



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y MECÁNICA

TESIS DOCTORAL

**INVESTIGACIÓN TEÓRICO – EXPERIMENTAL SOBRE
ENSAYOS LIGERAMENTE DESTRUCTIVOS (MDT)
UTILIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA
IN SITU DE ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL
PATRIMONIO CONSTRUIDO**

Autor

IGNACIO LOMBILLO VOZMEDIANO
INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Director

PROF. DR. LUIS VILLEGAS CABREDO
DOCTOR INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

SANTANDER, MAYO DE 2010

4

PROGRAMA EXPERIMENTAL EN LABORATORIO DESARROLLADO EN ESTA INVESTIGACIÓN

4.1 Campaña experimental sobre componentes de sillería.

4.1.1 Construcción del muro

Con fecha 28 de diciembre de 2007 fue construido en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria un muro de sillería arenisca. En la Fig. 4.1.1 se presenta la geometría de dicho muro.

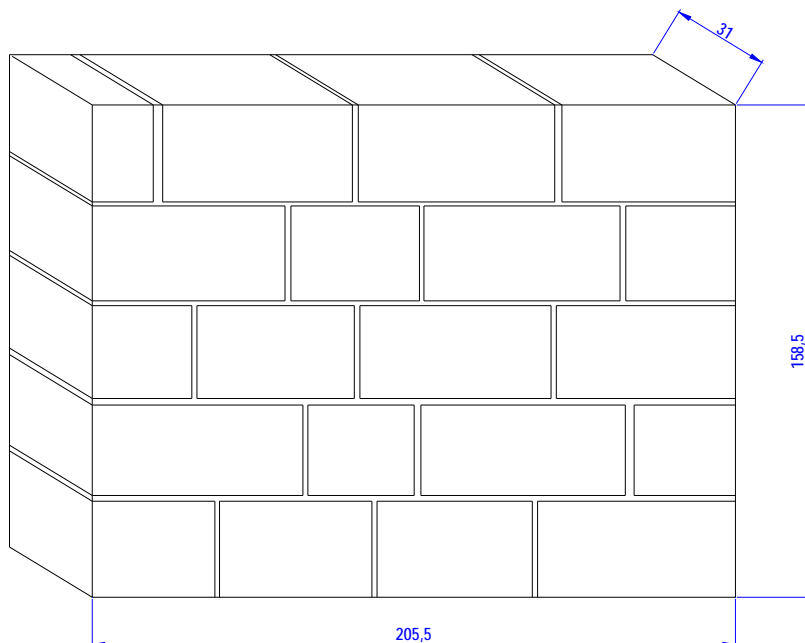


Fig. 4.1.1: Geometría general del muro de sillería arenisca ensayado en la presente tesis doctoral. Las cotas referidas son en cm. El espesor del muro es de 31 cm.

Para su confección se empleó roca arenisca y mortero bastardo tipo M-20b (según la NBE-FL 90) 1:2:10 (cemento:cal:arena, proporciones en volumen), Fig. 4.1.2-4.1.4. De éste se elaboraron muestras prismáticas de dimensiones 160 x 40 x 40 (largo x ancho x alto), en base a su ensayo se alcanzó una carga de rotura a flexión promedio de 370 kp con un coeficiente de variación de 32,23%, y una resistencia a compresión promedio de 4.73 N/mm² con un coeficiente de variación de 52.65%. Dichos ensayos fueron realizados los días 29-05-08, 06-06-08 y 12-06-08 sobre probetas elaboradas el 28-12-07. (Ver Anexo 2).

El espesor aproximado de los tendeles de mortero fue de 15 mm.



Fig. 4.1.2 y 4.1.3: Instantes tomados durante la construcción del muro de sillería armado a base de roca arenisca y mortero bastardo tipo M-20b, 1:2:10 (cemento:cal:arena, proporciones en volumen).



Fig. 4.1.4: Detalle del muro de sillería construido.

Fig. 4.1.5: Detalle del murete de sillería construido. Dicho elemento se armó a base de roca arenisca y mortero bastardo tipo M-20b, 1:2:10 (cemento:cal:arena, proporciones en volumen).

Igualmente, con la misma piedra arenisca y el mismo mortero, se compuso un murete de menores dimensiones ($63 \times 31 \times 93.2 \text{ cm}^3$, largo x ancho x alto) para realizar otras pruebas complementarias, Fig. 4.1.5.

4.1.2 Transporte del muro

En relación con facilitar el adecuado transporte del muro (de un peso aproximado de 2.25 t) bajo el pórtico de carga, y con la finalidad de no causarle ningún tipo de sollicitación que podría desembocar en el debilitamiento estructural o colapso del elemento constructivo, se idearon unos dispositivos de transporte denominados “maletas” constituidos por dos perfiles UPN, uno inferior con 5 planos de rigidizadores de cara a evitar su inestabilidad durante los procesos posteriores de carga, sobre el que se construye el muro in situ, y otro superior a modo de capucha (Fig. 4.1.6).

A su vez dichos elementos contaban con 4 dispositivos que permitían realizar el izado del muro (Fig. 4.1.7), además entre los UPN inferior y superior se dispusieron un total de ocho barras verticales (Fig. 4.1.8), roscadas, que mediante un leve pretensado motivan esfuerzos de compresión en el muro, con la finalidad de evitar la aparición de tracciones durante el transporte del mismo que podrían desembocar en daño.



Fig. 4.1.6: Detalle del UPN superior a modo de capucha. Los elementos de anclaje que figuran en la imagen tienen la finalidad, única y exclusivamente, de permitir el izado y colocación de esta pieza en coronación del muro.

Fig. 4.1.7: Detalle de uno de los cuatro elementos de izado dispuestos en el UPN rigidizado sobre el que se construyó el muro de mampostería.

Fig. 4.1.8: Detalle de una de las 8 barras roscadas verticales con las que se introducía cierto nivel de compresión en el muro, de cara a evitar la aparición de tracciones durante el transporte del mismo.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En las Fig. 4.1.9 y 4.1.10 se ilustran sendos detalles del mecanismo de transporte una vez montado en el muro mientras que en la Fig. 4.1.11 se representa un instante durante el transporte de la sillería bajo el pórtico de carga.



Fig. 4.1.9 y 4.1.10: Detalles del mecanismo de transporte una vez montado en el muro de sillería.

Fig. 4.1.11: Instante captado durante el transporte bajo el pórtico de carga.

Finalmente, mediante el apoyo del muro en un carrito (Fig. 4.1.12) se finalizaba la instalación del muro bajo el pórtico de carga empleado durante los ensayos (Fig. 4.1.13).



Fig. 4.1.12: El muro acaba de posicionarse bajo el pórtico de carga mediante un carrito, el cuál era removido con posterioridad.

Fig. 4.1.13: Detalle del emplazamiento del muro bajo el pórtico de carga.

4.1.3 Determinación del ángulo de apertura de cargas en el muro de sillería.

Dada la extensión del muro realizado y teniendo en cuenta que el elemento de reparto de cargas que se disponía era de 1 metro de longitud, fue necesario obtener el ángulo de apertura de cargas en el seno del muro.

Pese a que en la norma NBE-FL 90 (Fábricas de ladrillo) se alude a que puede tomarse un ángulo de apertura de carga, como norma general, de 30° , en cada muro particular, dependiendo de la rigidez de sus componentes, dicho parámetro puede ser objeto de cambio. Igualmente, el valor obtenido puede ser un indicador más preciso que el general aportado por la norma referida para la evaluación de la apertura de cargas en el plano del muro en construcciones reales.

En este sentido se dispusieron un total de 5 galgas extensométricas en la forma que indican las Fig. 4.1.14 y 4.1.15 para registrar las deformaciones captadas por cada una de ellas durante el proceso de carga.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

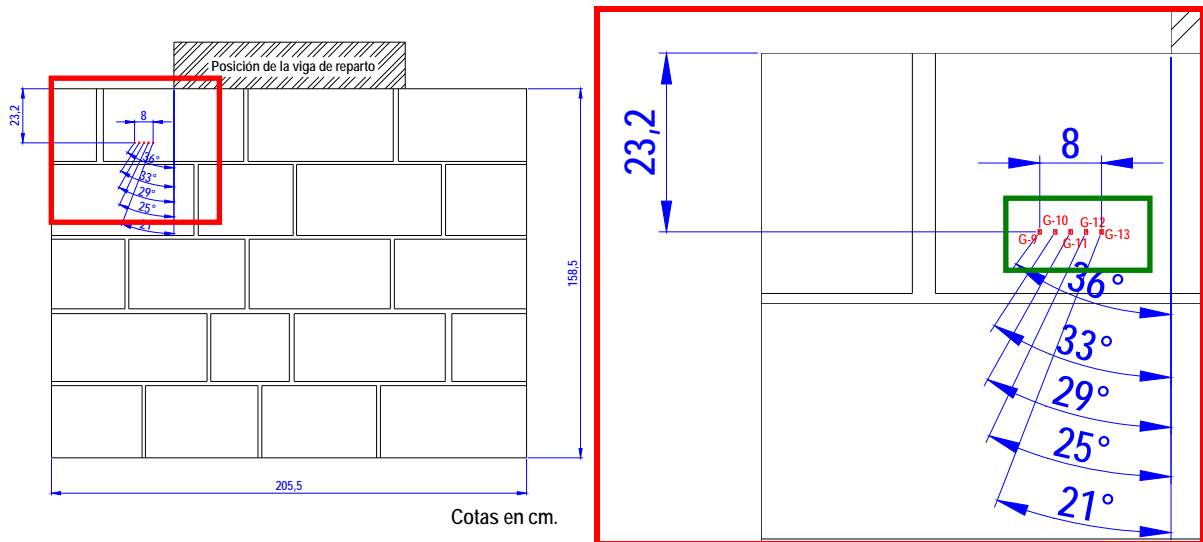


Fig. 4.1.14 y 4.1.15: Detalles de la localización de las galgas extensométricas en el seno del muro de sillería.

Como puede comprobarse dichas bandas extensométricas se dispusieron a 23.2 cm de la coronación del muro, cada dos centímetros, de forma que la galga central definiría con el punto extremo de la viga de reparto de la carga un ángulo sensiblemente de 30° (en este caso 29°), Fig. 4.1.16 y 4.1.17.

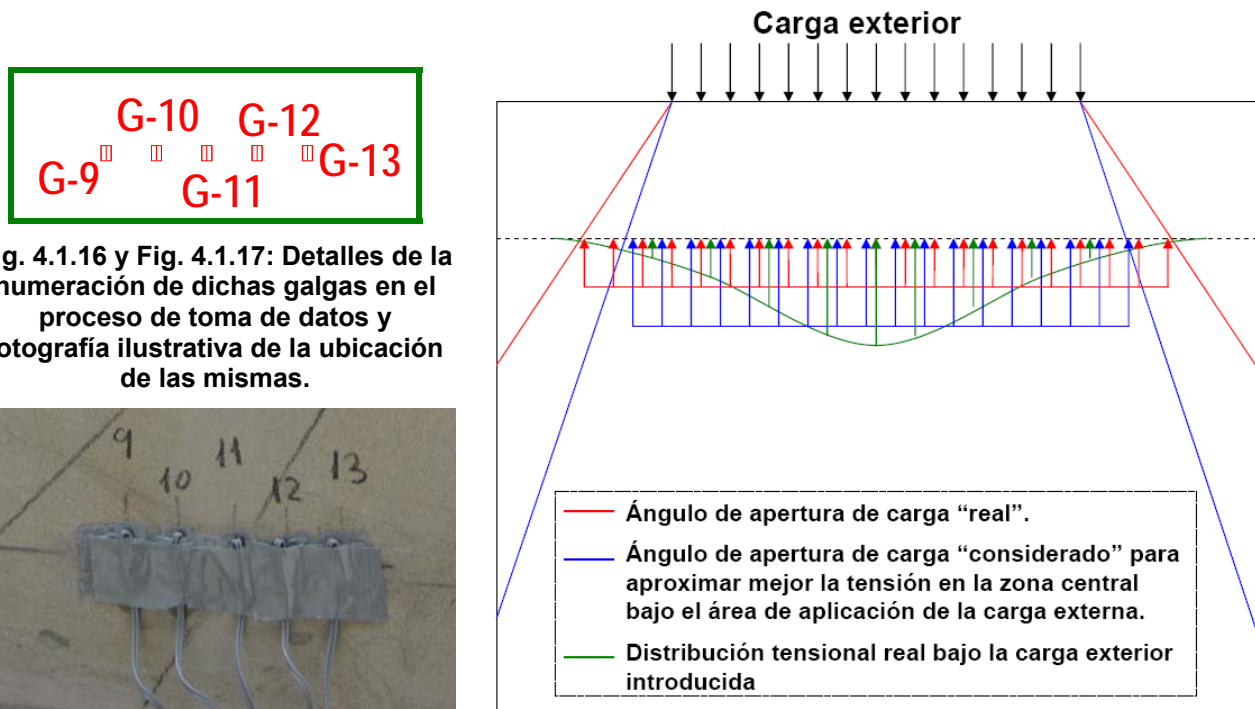


Fig. 4.1.16 y Fig. 4.1.17: Detalles de la numeración de dichas galgas en el proceso de toma de datos y fotografía ilustrativa de la ubicación de las mismas.



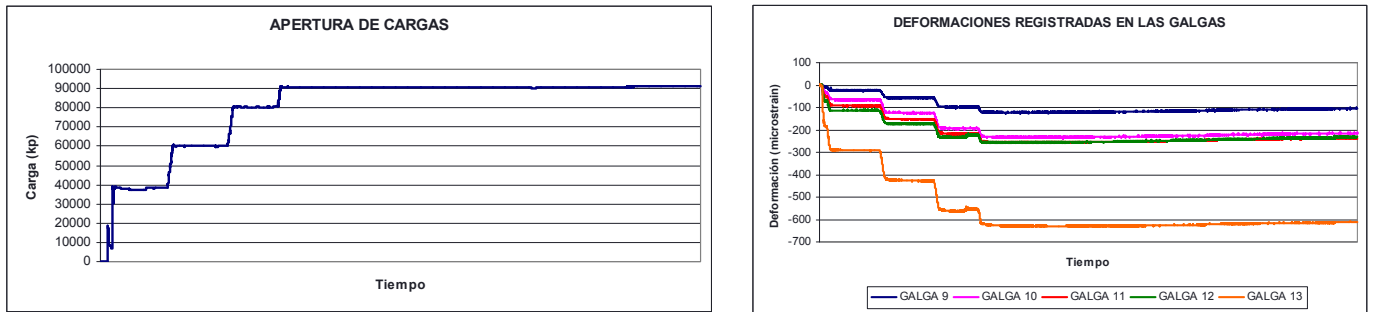
Fig. 4.1.18: Justificación del ángulo de apertura de carga considerado, motivado por la necesidad de ajustar mejor el nivel tensional existente en el área central bajo la carga externa aplicada, de forma que los niveles tensionales teóricos de comparación sean más coherentes con la realidad.

Con la viga de reparto en la posición indicada se realizó un primer proceso de carga (hasta aproximadamente 20 t) y descarga, para generar un reacomodo del sistema (muro, viga de reacción y gatos hidráulicos), seguido de un proceso de carga hasta un total de 90 toneladas, en cuatro escalones: 40 t, 60 t, 80 t y 90 t (Fig. 4.1.19).

Mientras se realizó el proceso descrito se registró la evolución de las deformaciones en los cinco puntos de control (Fig. 4.1.20) de forma que se verificó un salto importante en las deformaciones

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

registradas entre las galgas denominadas como 13 y 12. Aunque el ángulo de apertura de carga afectaría a las 5 galgas, dado que todas ellas registraron compresiones, para aproximar mejor el nivel tensional máximo existente en la zona central bajo la carga externa aplicada (Fig. 4.1.18), con la finalidad de que los niveles tensionales teóricos de comparación sean más coherentes con la realidad, se consideró oportuno considerar como ángulo de apertura de carga, a falta de más densidad de galgas, la posición definida por el punto medio existente entre las galgas 12 y 13, que define un ángulo de 23° .



4.1.4 Determinación de las características mecánicas del muro.

Con la finalidad de obtener las características mecánicas (módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson) del muro para posterior contraste de los resultados alcanzados mediante técnicas no destructivas, se colocaron una serie de transductores potenciométricos, tanto verticales como horizontales.

En el croquis adjunto (Fig. 4.1.21) puede comprobarse la ubicación de dichos transductores, así como la línea ideal de la apertura de cargas, considerando el ángulo del apartado anterior.

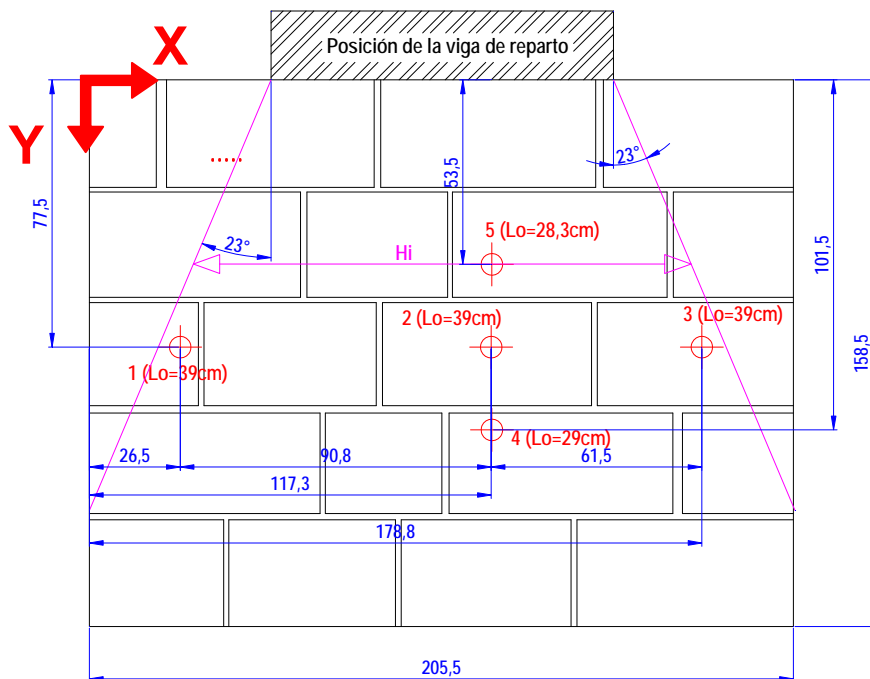


Fig. 4.1.21: Posición de los cinco transductores potenciométricos, dispuestos para estimar las características mecánicas del muro. De los mismos se representa su punto central, así como la longitud inicial de medida. Todas las cotas relacionadas están en cm.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En la Tabla 4.1.1 se relaciona la posición del centro de cada uno de los cinco transductores en el sistema coordenado (x,y) referido, así como la anchura de muro afectada por la carga, a nivel del punto central de los transductores, haciendo la hipótesis de apertura lineal, para la obtención del nivel tensional vertical medio en cada nivel.

Tabla 4.1.1: Posición del centro de cada uno de los transductores en el sistema coordenado (x,y) referido, así como la anchura de muro afectada por la carga.

Transductor	Posición del centro de cada transductor		Anchura de carga
	X (cm)	Y (cm)	H _i (cm)
1	26.5	77.5	165.79
2	117.3	77.5	165.79
3	117.3	77.5	165.79
4	117.3	101.5	186.17
5	178.8	53.5	145.42

Para el control de la puesta en carga durante la ejecución de los ensayos se empleó un transductor de presión de 400 Ba (5 voltios) y dos gatos hidráulicos de 126.70 cm² de área cada uno.

Debido a lo referido una señal de presión registrada de 1 voltio equivale a una carga de 20,272 kp.

$$400 \frac{kp}{cm^2} \approx 5 \text{ voltios} \rightarrow 1 \text{ voltio} \approx 80 \frac{kp}{cm^2}$$

$$1 \text{ voltio} \approx 80 \frac{kp}{cm^2} \cdot 126.70 \text{ cm}^2 \cdot 2 = 20,272 \text{ kp}$$

El área rayada dibujada sobre la coronación el muro, Fig. 4.1.21, corresponde a los elementos empleados para introducción de la carga en el muro de sillería. Por ello que también hay que considerar que el peso muerto que representan dichos elementos reparto que asciende a un total de 220 kp.

Igualmente, en la Fig. 4.1.22 se ilustra la ubicación de los transductores dentro del alzado del muro, presentado un detalle de la colocación de los mismos en la Fig. 4.1.23.

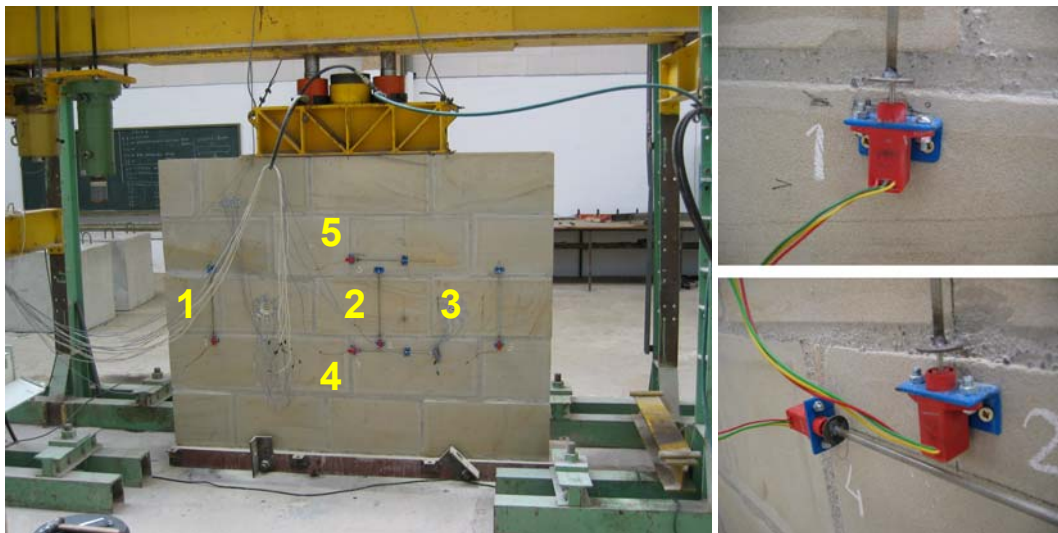


Fig: 4.1.22: Ubicación de los transductores dentro del alzado del muro.

Fig. 4.1.23: Detalle de la colocación de los transductores en la sillería.

Con la viga de reparto en la posición indicada en la Fig. 4.1.22 (en el centro del muro) se realizó un proceso de carga, en escalones sucesivos. En la Fig. 4.1.24 se ilustra el proceso referido mediante la evolución del nivel tensional vertical medio a nivel del punto central del transductor n° 2. En dicha figura se remarca el escalón de carga que se tuvo en cuenta para la estimación del módulo de deformación.

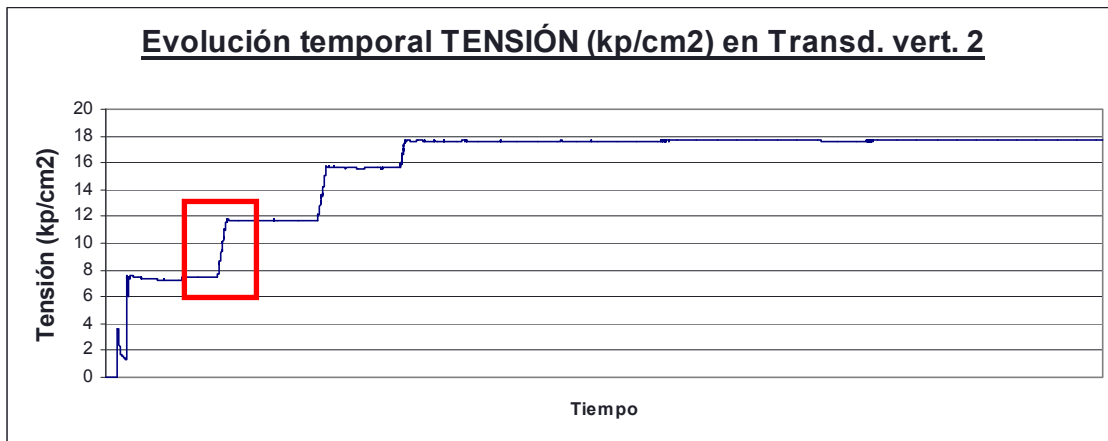


Fig. 4.1.24: Evolución temporal del nivel tensional vertical medio a nivel del punto central del transductor nº 2.

De la misma forma, en la Fig. 4.1.25 se ilustra la evolución de las deformaciones registradas por el transductor nº 2 bajo la acción de la ley de cargas introducida. Igualmente, también se ha resaltado el escalón de deformación empleado para la estimación del módulo de deformación.

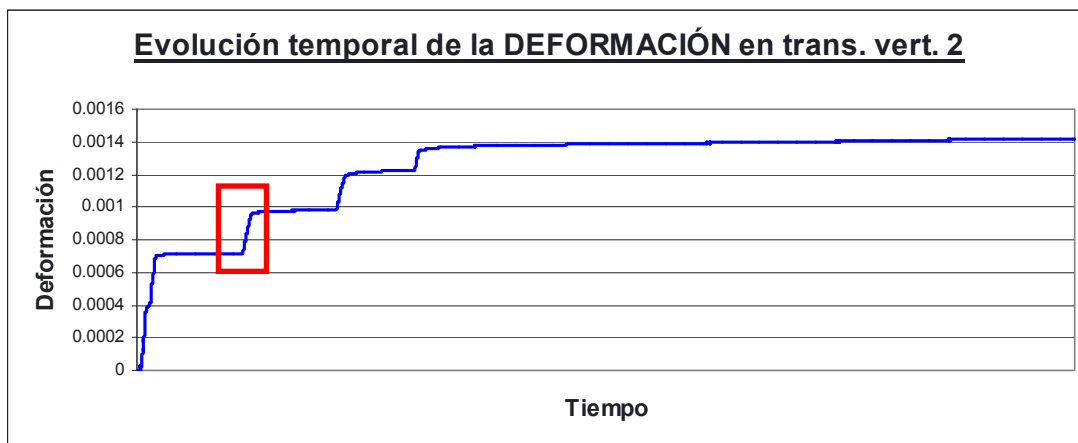


Fig. 4.1.25: Evolución temporal de la deformación vertical registrada por el transductor nº 2.

Mediante la composición de la tensión media estimada en el punto central de dicho transductor nº 2, obtenida haciendo la hipótesis de apertura lineal de cargas, y la deformación registrada por el mismo durante el ensayo, se obtuvo un módulo de elasticidad de 1,711.80 MPa (Fig. 4.1.26).

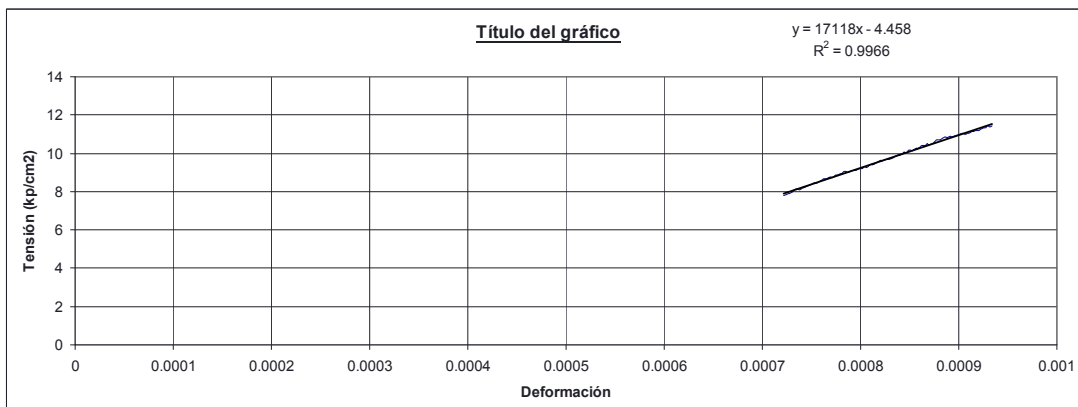


Fig. 4.1.26: Estimación del módulo de deformación en el área local ensayada del muro de sillería. El valor obtenido es de 1,711.80 MPa.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Debe referirse que el parámetro obtenido se refiere a un punto local del muro, indicando un orden de magnitud de cara a poder emitir un juicio razonado sobre la adecuación del módulo de deformación obtenido en los ensayos de gato plano doble que se presentan con posterioridad.

4.1.5 Ensayos de Hole Drilling

Se realizaron un total de cinco ensayos Hole Drilling, con la finalidad de estimar el nivel de tensión vertical en cinco puntos diferentes del muro de sillería construido.

En la Fig. 4.1.27 se ilustra la ubicación de cada uno de estos ensayos dentro del muro. Igualmente en la Tabla 4.1.2 se relacionan las coordenadas del centro de cada una de las perforaciones realizadas respecto de un origen relativo compuesto por la esquina inferior izquierda.

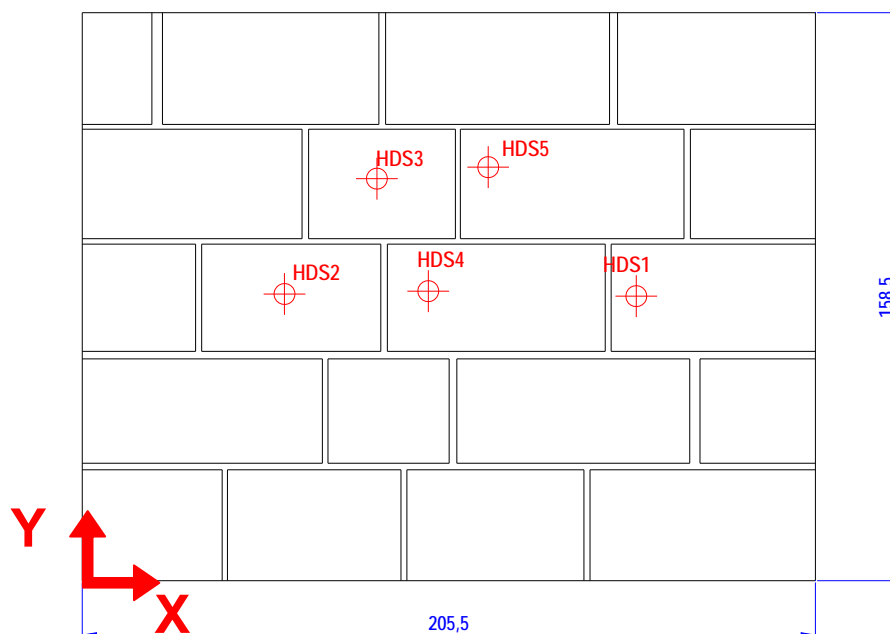


Fig. 4.1.27: Ubicación en el muro de los 5 ensayos de Hole Drilling realizados.

Tabla 4.1.2: Coordenadas de ubicación de los ensayos de Hole Drilling realizados.

	HDS1	HDS2	HDS3	HDS4	HDS5
x_i (cm)	155.3	56.7	82.6	97	113.8
y_i (cm)	79.4	80	112.2	80.8	115.4

Para la ejecución de los ensayos se empleó un transductor de presión de 400 Ba (5 voltios) y dos gatos hidráulicos de 126.70 cm² de área cada uno. Debido a lo referido una señal de presión registrada de 1 voltio equivale a 20,272 kp.

Igualmente, también hay que considerar que el peso muerto que representa la viga de reparto empleada en el ensayo es de 220 kp.

4.1.5.1 Obtención de las características mecánicas (E y ν) de la piedra arenisca involucrada en los ensayos hole drilling.

En un ensayo hole drilling, en ausencia de la determinación de las constantes A y B deducidas experimentalmente, para estimar el nivel tensional a partir de las deformaciones registradas por las bandas extensométricas, es necesario conocer el módulo de deformación y coeficiente de Poisson del material soporte de las mismas.

En este caso concreto, para la obtención de las características mecánicas de la piedra arenisca involucrada en los ensayos, y dado que la regularidad de los bloques que componen el muro

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

favorece que la carga vertical introducida en coronación se transmita a lo largo de su alzado de forma eminentemente vertical, se emplearon los registros de evolución de la deformación de las galgas verticales (bandas 1 y 5) y horizontales (bandas 3 y 7) de cada uno de los ensayos hole drilling, para estimar dichas propiedades en el punto exacto del muro en el que se desarrolló cada ensayo.

En lo que sigue se presenta un resumen de los trabajos desarrollados para obtener dichos parámetros para los ensayos HDS1, HDS3 y HDS5, dado que para los HDS2 y HDS4, pese a realizar el ensayo de forma correcta, se perdieron los resultados fruto de un problema surgido con el sistema de adquisición de datos.

Igualmente, también se presentan los resultados obtenidos para los ensayos hole drilling HDS6, HDS7 y HDS8, realizados en el murete de arenisca referido con anterioridad (Fig. 4.1.5).

4.1.5.1.1 Características mecánicas involucradas en el ensayo HDS1.

En la Fig. 4.1.28 se presenta la evolución temporal de la tensión media en el punto de ensayo HDS1, considerando una apertura lineal de cargas de 23°. Igualmente en la Fig. 4.1.29 se ilustra la evolución de las deformaciones verticales (bandas 1 y 5) y horizontales (bandas 3 y 7) bajo la tensión referida en la Fig. 4.1.28.

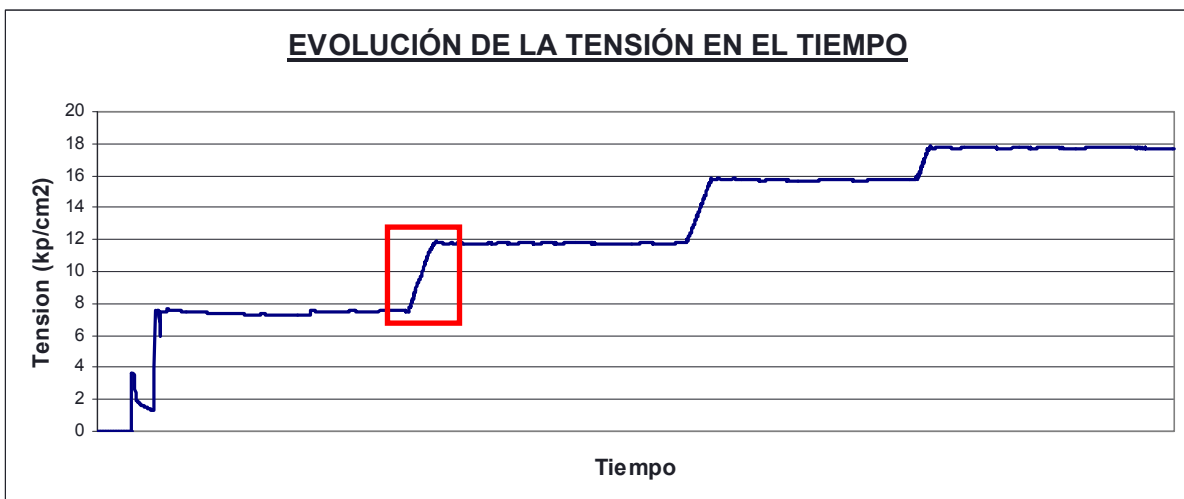


Fig. 4.1.28: Evolución temporal de la tensión media en el punto de ensayo HDS1.

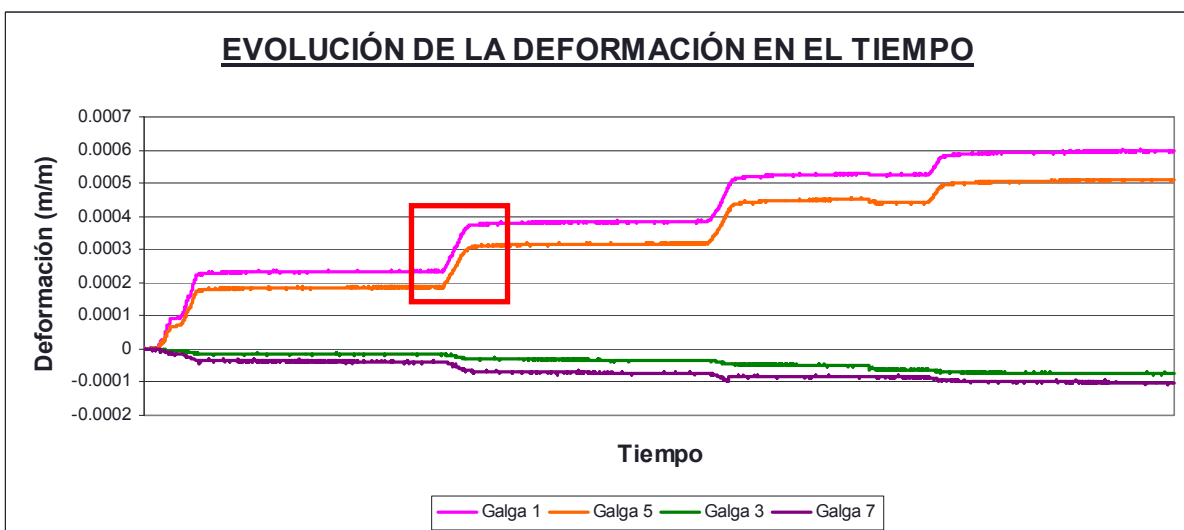


Fig. 4.1.29: Evolución temporal de las deformaciones verticales y horizontales registradas en el punto de ensayo HDS1.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Mediante la composición de la tensión media estimada y la deformación registrada por las bandas nº 1 y nº 5 durante la puesta en carga del muro, en la Fig. 4.1.30 se presenta la ley tensión – deformación obtenida para el escalón remarcado en las Fig. 4.1.28 y 4.1.29. Igualmente, se presenta la ecuación del ajuste lineal en dicho escalón de tensión.

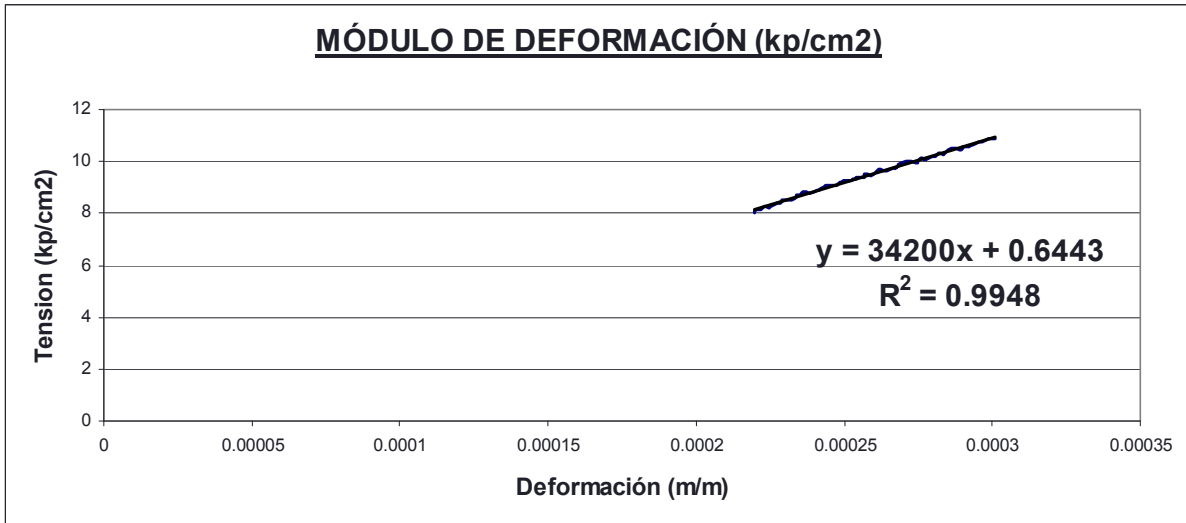


Fig. 4.1.30: Estimación del módulo de deformación de la piedra arenisca en el punto de ensayo HDS1. El valor obtenido es de 3,420.0 MPa.

De la Fig. 4.1.30 puede concluirse que el módulo de deformación, en el punto local de ensayo, asciende a 3,420.0 MPa. Por su parte, el coeficiente de Poisson obtenido, mediante la relación entre la deformación horizontal y la vertical en la rama elástica considerada, presenta un valor de 0.131.

4.1.5.1.2 Características mecánicas involucradas en el ensayo HDS3.

En la Fig. 4.1.31 se presenta la evolución temporal de la tensión media en el punto de ensayo HDS3, considerando una apertura lineal de cargas de 23° . Igualmente en la Fig. 4.1.32 se ilustra la evolución de las deformaciones verticales (bandas 1 y 5) y horizontales (bandas 3 y 7) bajo la tensión referida en la Fig. 4.1.31.

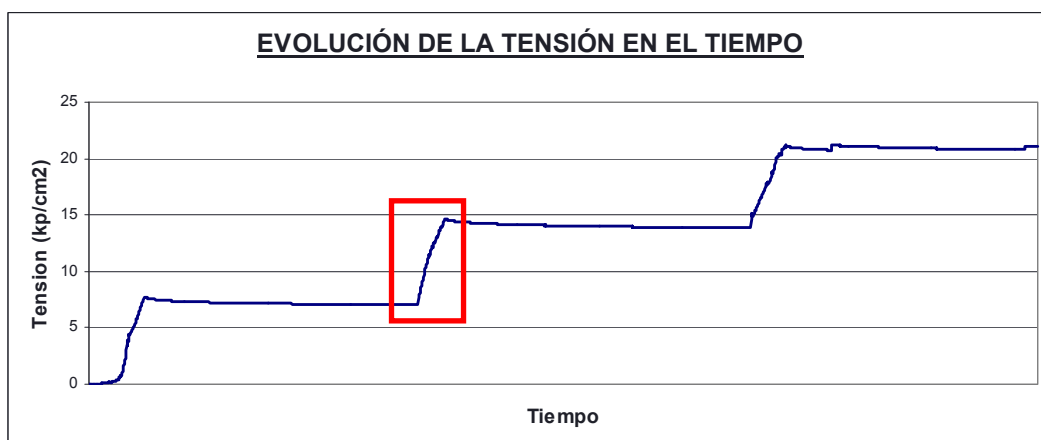


Fig. 4.1.31: Evolución temporal de la tensión media en el punto de ensayo HDS3.

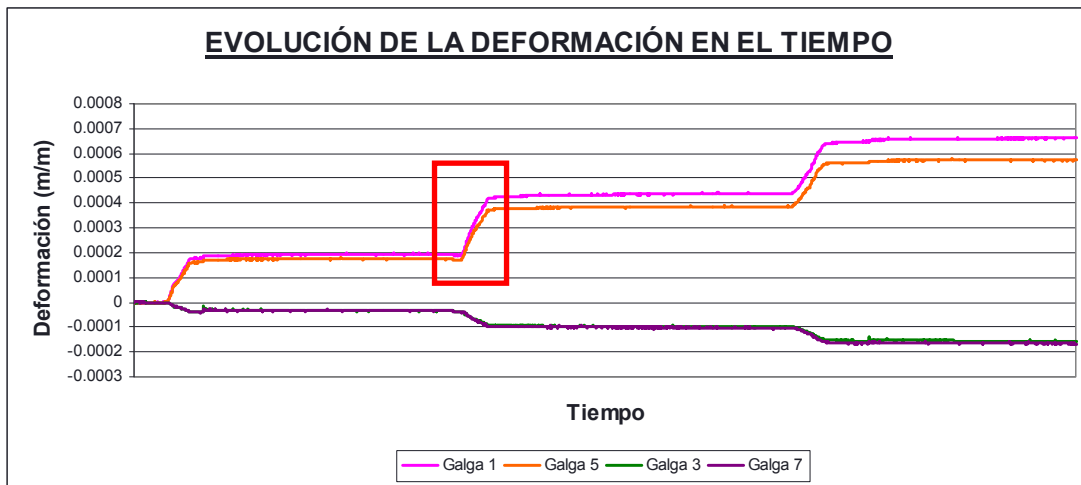


Fig. 4.1.32: Evolución temporal de las deformaciones verticales y horizontales registradas en el punto de ensayo HDS3.

Mediante la composición de la tensión media estimada y la deformación registrada por las bandas nº 1 y nº 5 durante la puesta en carga del muro, en la Fig. 4.1.33 se presenta la ley tensión – deformación obtenida para el escalón remarcado en las Fig. 4.1.31 y 4.1.32. Igualmente, se presenta la ecuación del ajuste lineal en dicho escalón de tensión.

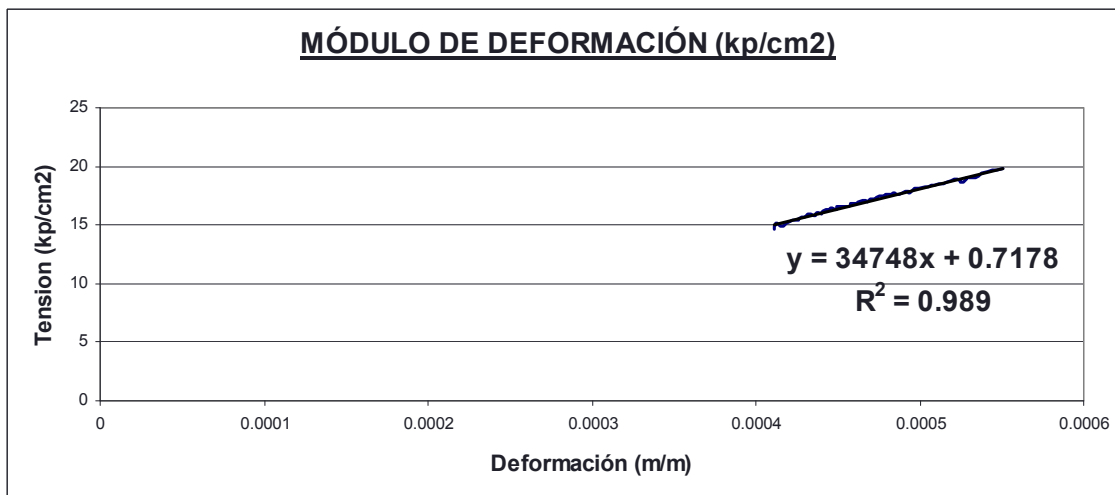


Fig. 4.1.33: Estimación del módulo de deformación de la piedra arenisca en el punto de ensayo HDS3. El valor obtenido es de 3,474.8 MPa.

De la Fig. 4.1.33 puede concluirse que el módulo de deformación, en el punto local de ensayo, asciende a 3,474.8 MPa. Por su parte, el coeficiente de Poisson obtenido, mediante la relación entre la deformación horizontal y la vertical en la rama elástica considerada, presenta un valor de 0.248.

4.1.5.1.3 Características mecánicas involucradas en el ensayo HDS5.

En la Fig. 4.1.34 se presenta la evolución temporal de la tensión media en el punto de ensayo HDS5, considerando una apertura lineal de cargas de 23°. Igualmente en la Fig. 4.1.35 se ilustra la evolución de las deformaciones verticales (bandas 1 y 5) y horizontales (bandas 3 y 7) bajo la tensión referida en la Fig. 4.1.34. Sólo se tiene en cuenta la galga vertical 5 dado que como se referirá con posterioridad, al exponer los resultados del ensayo HDS5, la galga nº 1 presenta, desde origen, valores excesivamente altos de deformación.

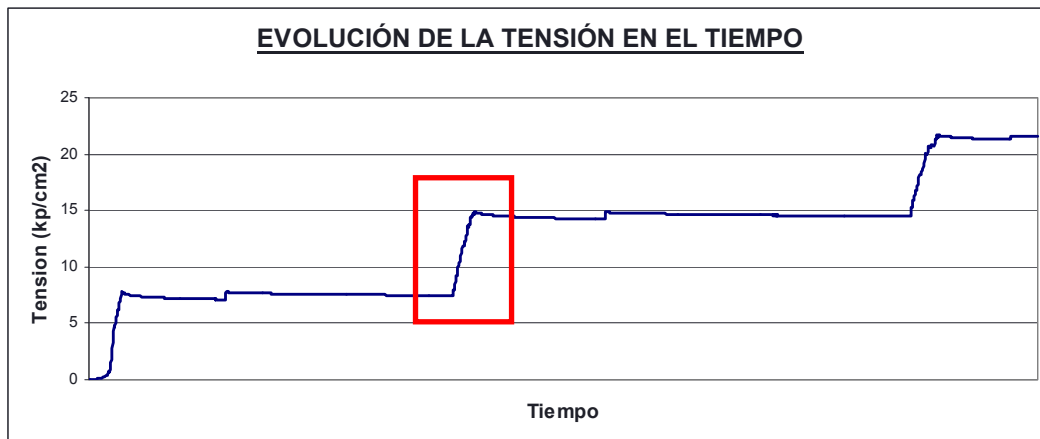


Fig. 4.1.34: Evolución temporal de la tensión media en el punto de ensayo HDS5.

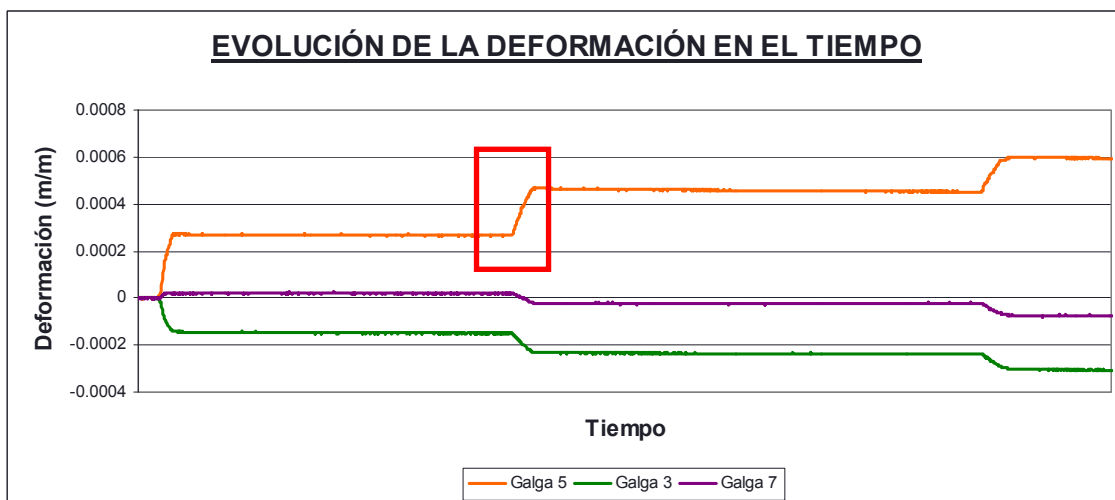


Fig. 4.1.35: Evolución temporal de las deformaciones verticales y horizontales registradas en el punto de ensayo HDS5.

Mediante la composición de la tensión media estimada y la deformación registrada por la banda nº 5 durante la puesta en carga del muro, en la Fig. 4.1.36 se presenta la ley tensión – deformación obtenida para el escalón remarcado en las Fig. 4.1.34 y 4.1.35. Igualmente, se presenta la ecuación del ajuste lineal en dicho escalón de tensión.

De la Fig. 4.1.36 puede concluirse que el módulo de deformación, en el punto local de ensayo, asciende a 3,516.6 MPa. Por su parte, el coeficiente de Poisson obtenido, mediante la relación entre la deformación horizontal y la vertical en la rama elástica considerada, presenta un valor de 0.255.

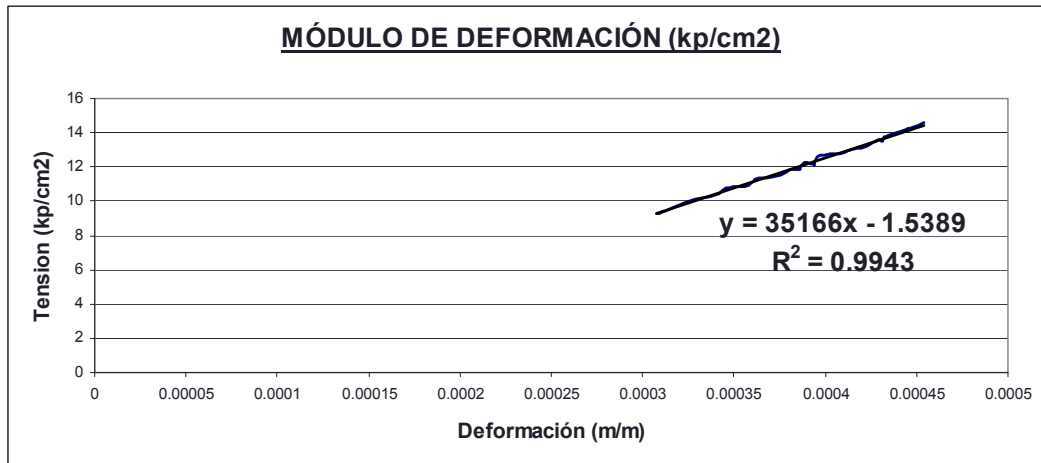


Fig. 4.1.36: Estimación del módulo de deformación de la piedra arenisca en el punto de ensayo HDS5. El valor obtenido es de 3,516.6 MPa.

4.1.5.1.4 Características mecánicas involucradas en la piedra arenisca del murete de arenisca (HDS6, HDS7 y HDS8).

En la Fig. 4.1.37 se presenta la evolución temporal de la tensión media en el punto de ensayo HDS6, considerando una apertura lineal de cargas de 23°. Igualmente en la Fig. 4.1.38 se ilustra la evolución de las deformaciones verticales (bandas 1 y 5) y horizontales (bandas 3 y 7) bajo la tensión referida en la Fig. 4.1.37.

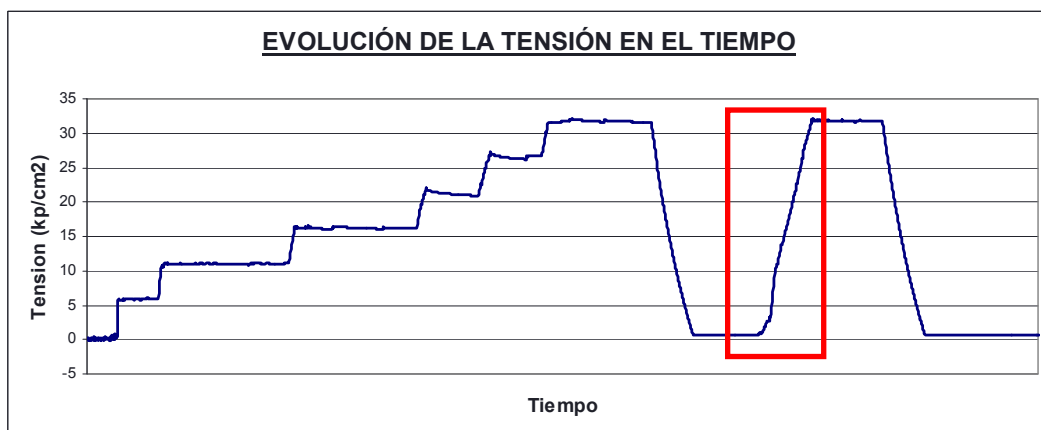


Fig. 4.1.37: Evolución temporal de la tensión media en el punto de ensayo HDS6.

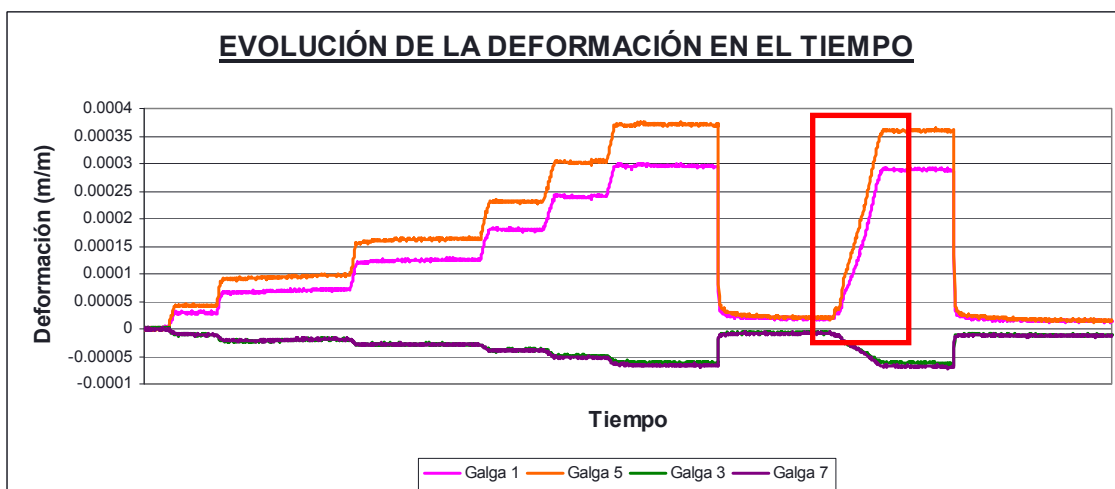


Fig. 4.1.38: Evolución temporal de las deformaciones verticales y horizontales registradas en el punto de ensayo HDS6.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Mediante la composición de la tensión media estimada y la deformación registrada por las bandas nº 1 y nº 5 durante la puesta en carga del muro, en la Fig. 4.1.39 se presenta la ley tensión – deformación obtenida para el escalón remarcado en las Fig. 4.1.37 y 4.1.38. Igualmente, se presenta la ecuación del ajuste lineal en dicho escalón de tensión.

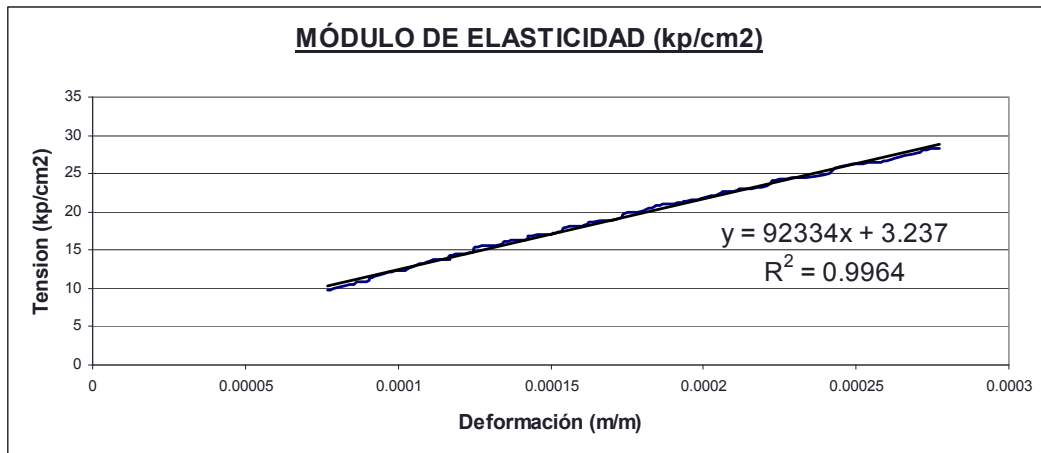


Fig. 4.1.39: Estimación del módulo de deformación de la piedra arenisca en el punto de ensayo HDS6. El valor obtenido es de 9,233.4 MPa.

De la Fig. 4.1.39 puede concluirse que el módulo de deformación, en el punto local de ensayo, asciende a 9,233.4 MPa. Por su parte, el coeficiente de Poisson obtenido, mediante la relación entre la deformación horizontal y la vertical en la rama elástica considerada, presenta un valor de 0.235.

4.1.5.2 Ensayo hole drilling HDS1

En la Fig. 4.1.40 siguiente se muestra la localización del Hole Drilling denominado HDS1 dentro del conjunto del muro de fábrica.

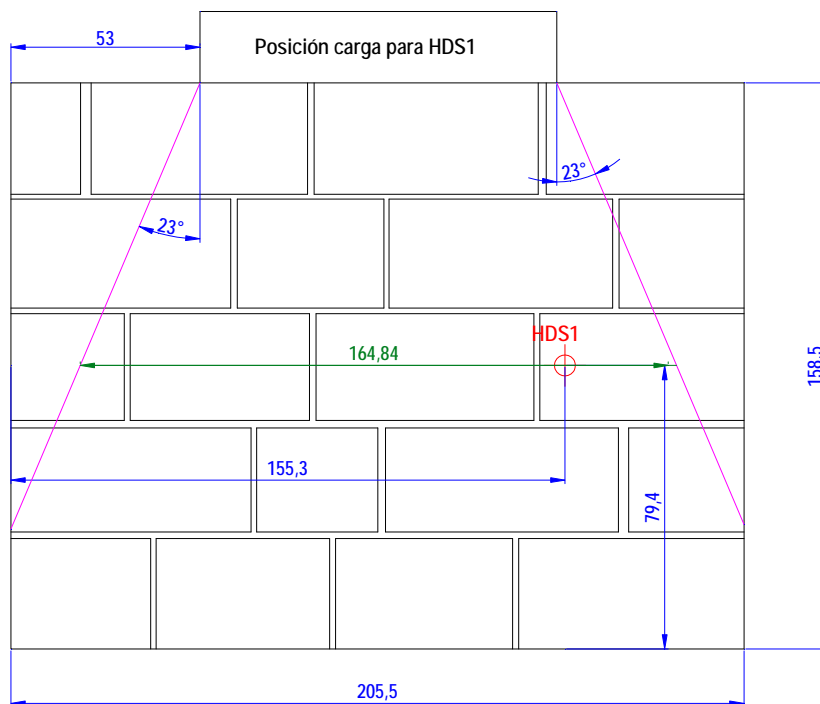


Fig. 4.1.40: Alzado del muro de sillería con la localización del HDS1. El espesor del muro son 31 cm. Las cotas referidas son en cm.

Se realizaron cuatro escalones de carga (Fig. 4.1.41) respectivos de 40 t, 60 t, 80 t y 90 t.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido



Fig. 4.1.41: Introducción de la carga durante el ensayo. El nivel medio de carga vertical mantenido constante a lo largo del ensayo en la cabeza del muro fue de 90,768.9 kp.

En la Fig. 4.1.42 se presentan los registros de la evolución de la deformación de cada galga a lo largo del ensayo.

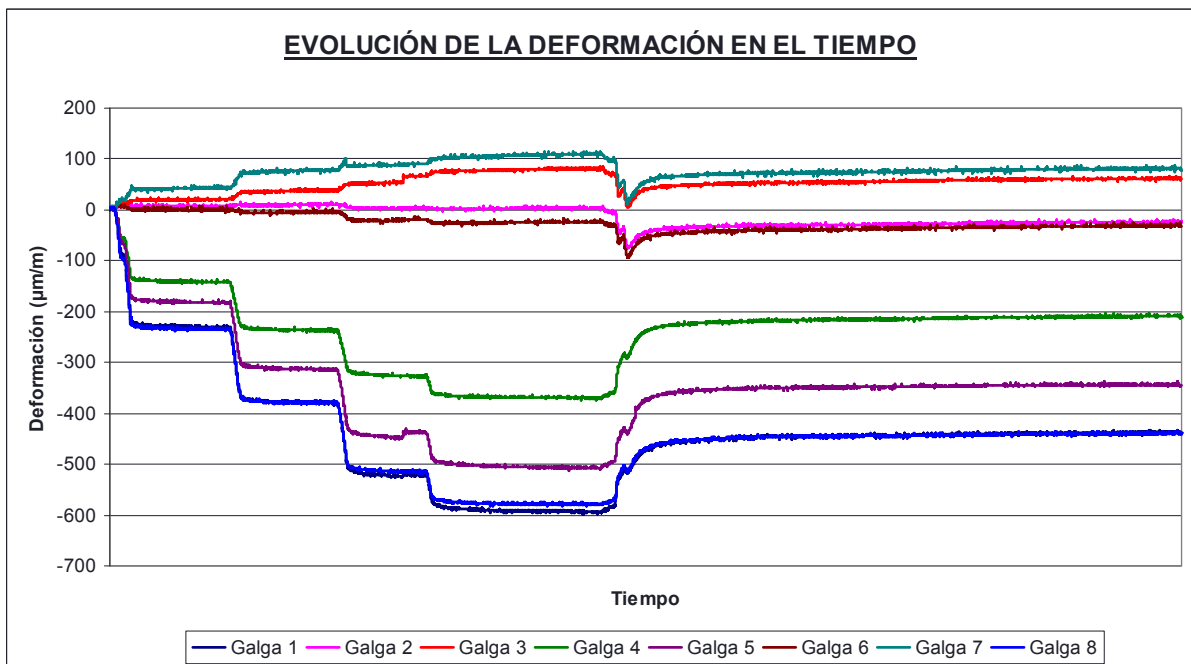


Fig. 4.1.42: Evolución registrada en la deformación de cada galga a lo largo del ensayo HDS1.

Bajo la carga referida mantenida constante, tomando como origen relativo los valores de la deformación, previamente al taladrado, una vez estabilizados (Tabla 4.1.3), la gráfica de evolución de la deformación con el tiempo, una vez omitida la fase de puesta en carga a escalones, toma el aspecto siguiente (Fig. 4.1.43):

Tabla 4.1.3: Deformación una vez estabilizada la carga previamente al taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	-591.7	2.8	78.9	-369.0	-505.2	-24.7	107.0	-577.9

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

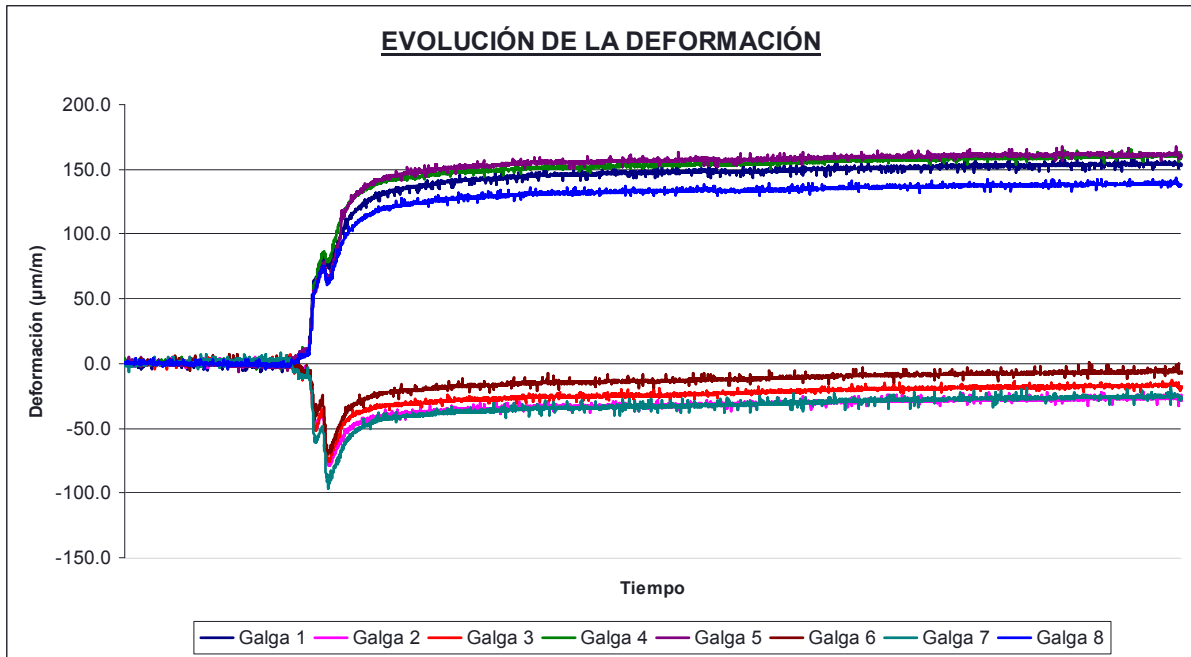


Fig. 4.1.43: Traslación de los registros con el objetivo de tomar como origen relativo para el procesado del ensayo, el instante en que los valores presentados por las galgas se estabilizan.

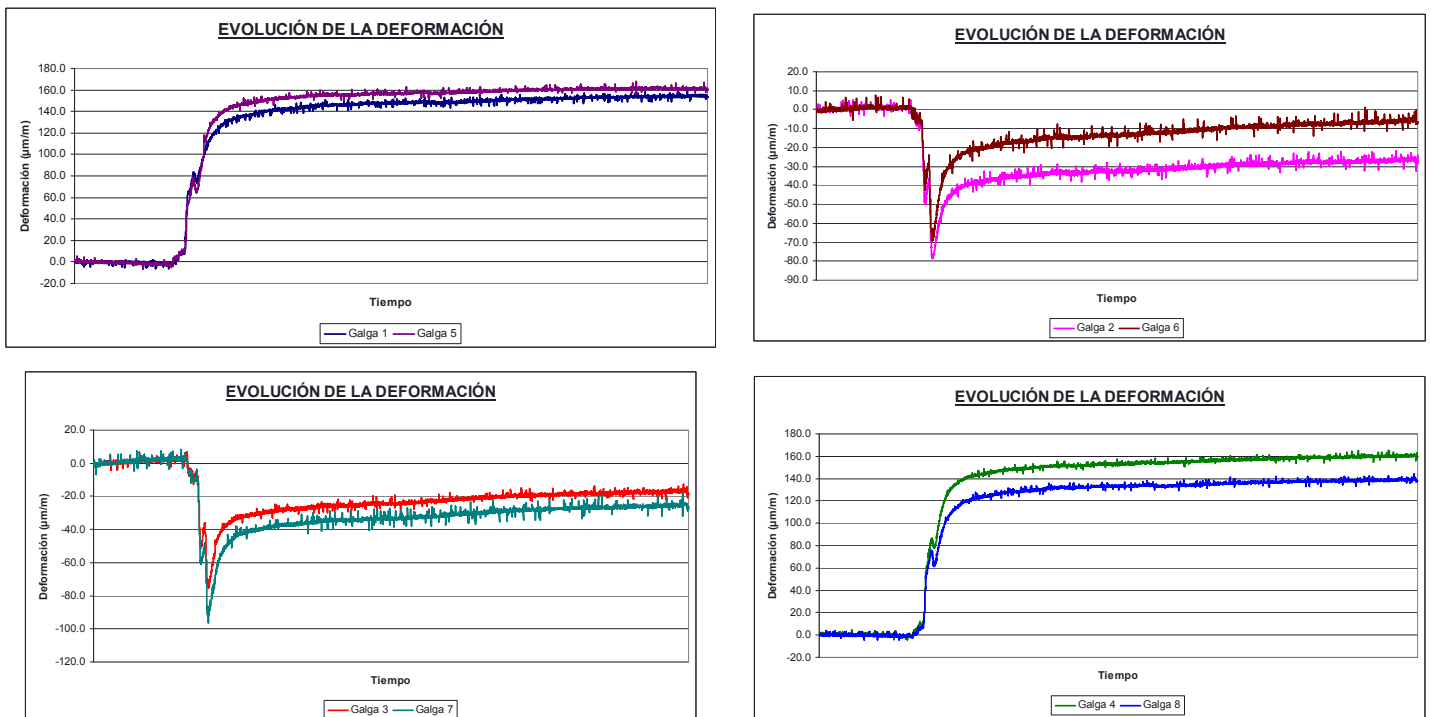


Fig. 4.1.44-4.1.45: Evolución de la deformación en el tiempo de las galgas, dos a dos (se representan conjuntamente las diametralmente opuestas).

Las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$ durante los 30 últimos minutos del ensayo. En vista de lo referido, se considera como incremento deformacional de las galgas, tras el taladrado, los valores de la siguiente Tabla 4.1.4:

Tabla 4.1.4: Incremento deformacional registrado por las galgas extensométricas, manteniendo constante la carga en coronación del muro, después del taladrado y respecto de la Fig. 1.4.43.

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	152.7	-27.8	-18.4	158.7	160.8	-7.7	-27.0	137.5

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Como ya se ha referido, dado que las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$, el registro asociado a cada una de ellas se considera válido. En base a las deformaciones referidas y procediendo con la teoría de la elasticidad, para cada una de las ocho combinaciones de galgas extensométricas existentes, pueden obtenerse (Tabla 4.1.5) las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente, medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las bandas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Tabla 4.1.5: Obtención, para cada una de las combinaciones de galgas, de las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente (β), medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Combinación	Canales	σ_{max} (N/mm ²)	σ_{min} (N/mm ²)	β (°)	σ_{vert} (N/mm ²)
1	1, 3, 6	-0.21	-1.82	69	-1.61
2	2, 4, 7	-0.06	-1.92	22	-1.64
3	3, 5, 8	-0.29	-1.87	-18	-1.72
4	4, 6, 1	-0.34	-1.95	-69	-1.68
5	5, 7, 2	-0.07	-1.96	67	-1.67
6	6, 8, 3	-0.2	-1.77	24	-1.57
7	7, 1, 4	-0.02	-1.88	-23	-1.60
8	8, 2, 5	0.12	-1.78	-64	-1.58
$\sigma_{\text{vert, Promedio}}$ (N/mm²)					-1.63
$\sigma_{\text{vert, Desvest}}$ (N/mm²)					0.05
Coef. de variación					3.24%

A su vez desde un punto de vista estadístico se han tenido en cuenta las ocho combinaciones, dado que presentan un coeficiente de variación del 3.24%.

La tensión vertical promedio estimada en el ensayo es de **1.63 N/mm²** (compresión). Para una consulta más detallada del procesado del ensayo, se remite al lector al registro de ensayo Lab0810 adjunto en el Anexo 3.

Por otra parte la tensión vertical media teórica existente en el punto de ensayo es de **1.78 N/mm²** (compresión):

$$\sigma_{\text{media}} = \frac{90,768.9kp}{164.8431\text{cm}^2} = 17.76 \frac{kp}{\text{cm}^2} = 1.78 \frac{N}{\text{mm}^2} \text{ (compresión)}$$

4.1.5.3 Ensayo hole drilling HDS2

En la Fig. 4.1.46 se muestra la localización del Hole Drilling denominado HDS2 dentro del conjunto del muro de fábrica.

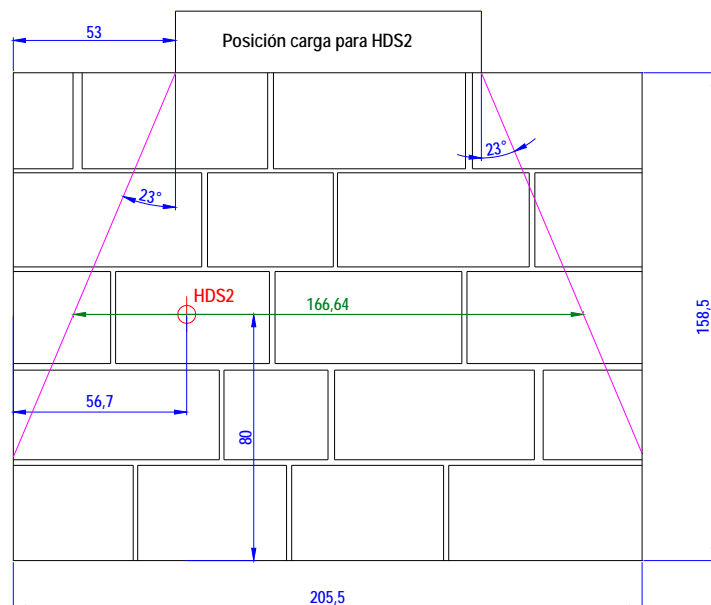


Fig. 4.1.46: Alzado del muro de sillería con la localización del HDS2. El espesor del muro son 31 cm. Las cotas referidas son en cm.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Debido a problemas con el equipo de adquisición de datos, pese a que el ensayo fue realizado con éxito (registro Lab0811, consultar Anejo 3), el registro de los mismos fue erróneo (problemas asociados con el data logger), no permitiendo, por ende, la estimación del nivel de tensiones en el punto de control.

4.1.5.4 Ensayo hole drilling HDS3

En la Fig. 4.1.47 se muestra la localización del Hole Drilling denominado HDS3 dentro del conjunto del muro de fábrica.

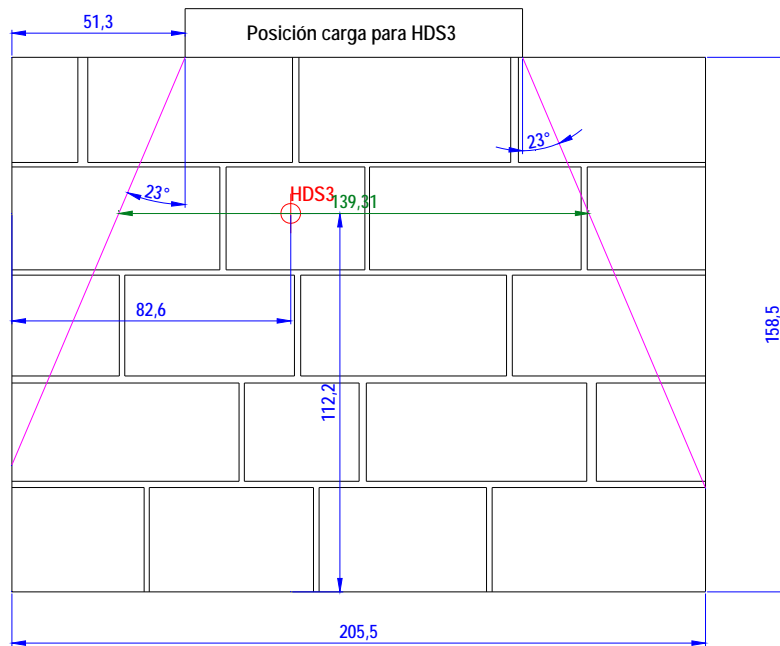


Fig. 4.1.47: Alzado del muro de sillería con la localización del HDS3. El espesor del muro son 31 cm. Las cotas referidas son en cm.

La carga se introdujo en tres escalones respectivos, Fig. 4.1.48, de aproximadamente 30 t, 60 t y 90 t, valor éste último que es mantenido constante a lo largo del ensayo



Fig. 4.1.48: Introducción de la carga durante el ensayo. El nivel medio de carga vertical mantenido constante en la cabeza del muro fue de 90,319.8 kp.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En la Fig. 4.1.49 se presentan los registros de la evolución de la deformación de cada galga a lo largo del ensayo.

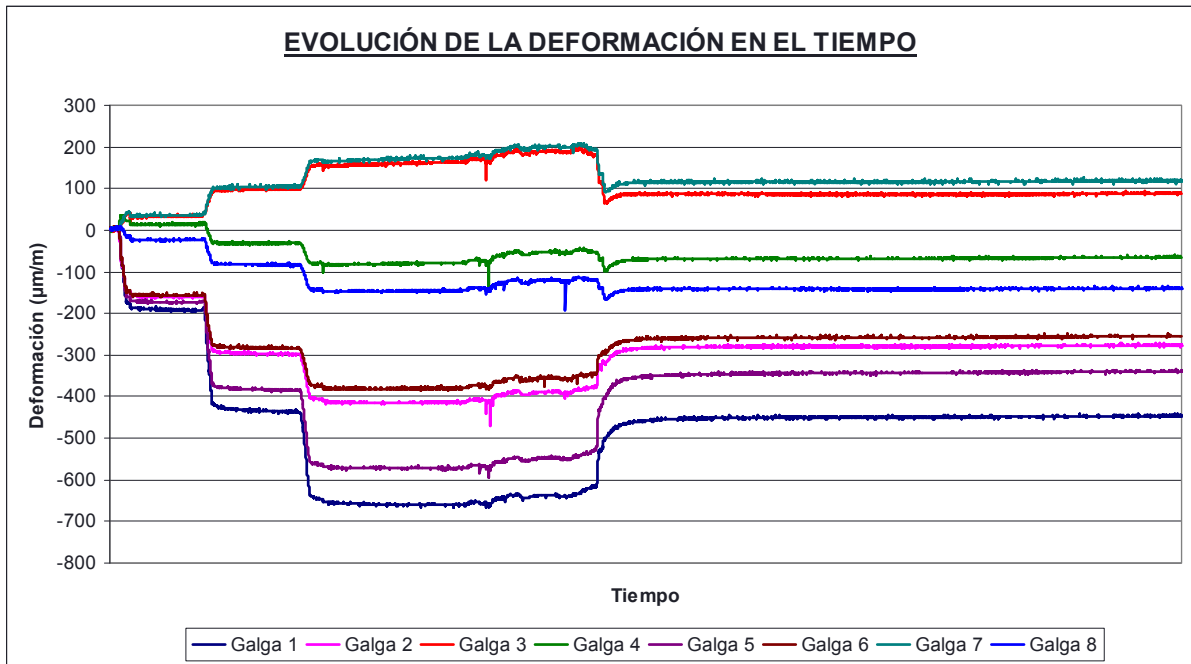


Fig. 4.1.49: Evolución registrada en la deformación de cada galga a lo largo del ensayo HDS3.

Bajo la carga referida mantenida constante, tomando como origen relativo los valores de la deformación, previamente al taladrado, una vez estabilizados (Tabla 4.1.6), la gráfica de evolución de la deformación con el tiempo toma el aspecto siguiente (Fig. 4.1.50):

Tabla 4.1.6: Deformación una vez estabilizada la carga previamente al taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	-659.4	-414.3	160.1	-80.8	-572.0	-380.9	170.9	-146.1

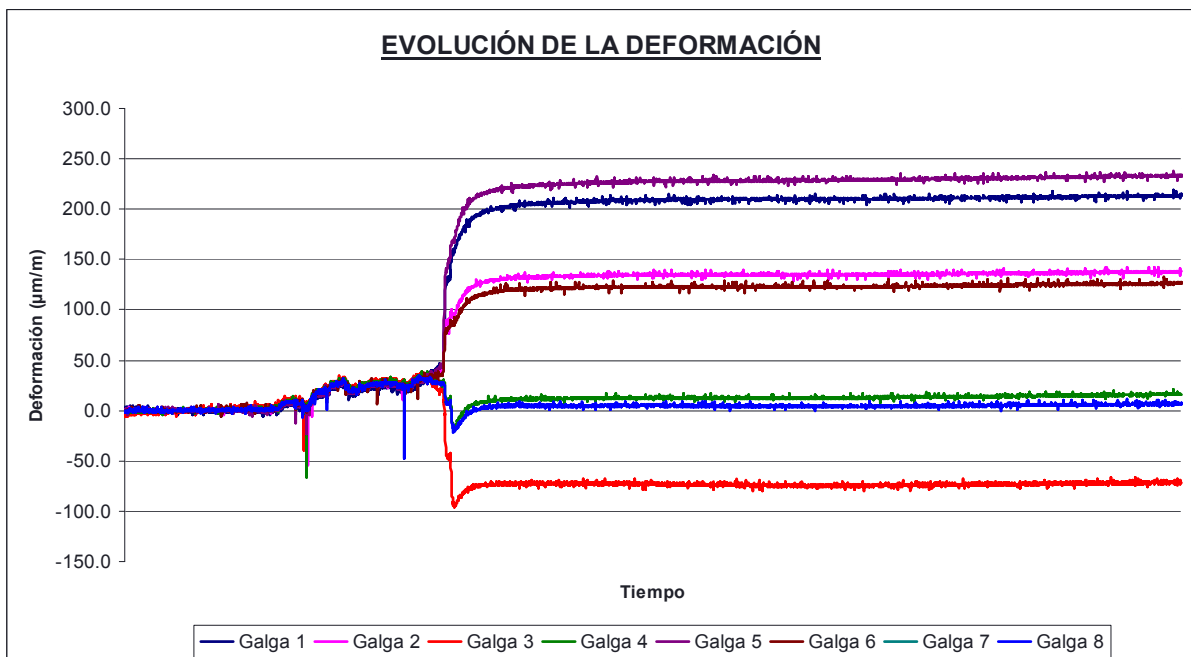


Fig. 4.1.50: Traslación de los registros con el objetivo de tomar como origen relativo para el procesamiento del ensayo, el instante en que los valores presentados por las galgas se estabilizan.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

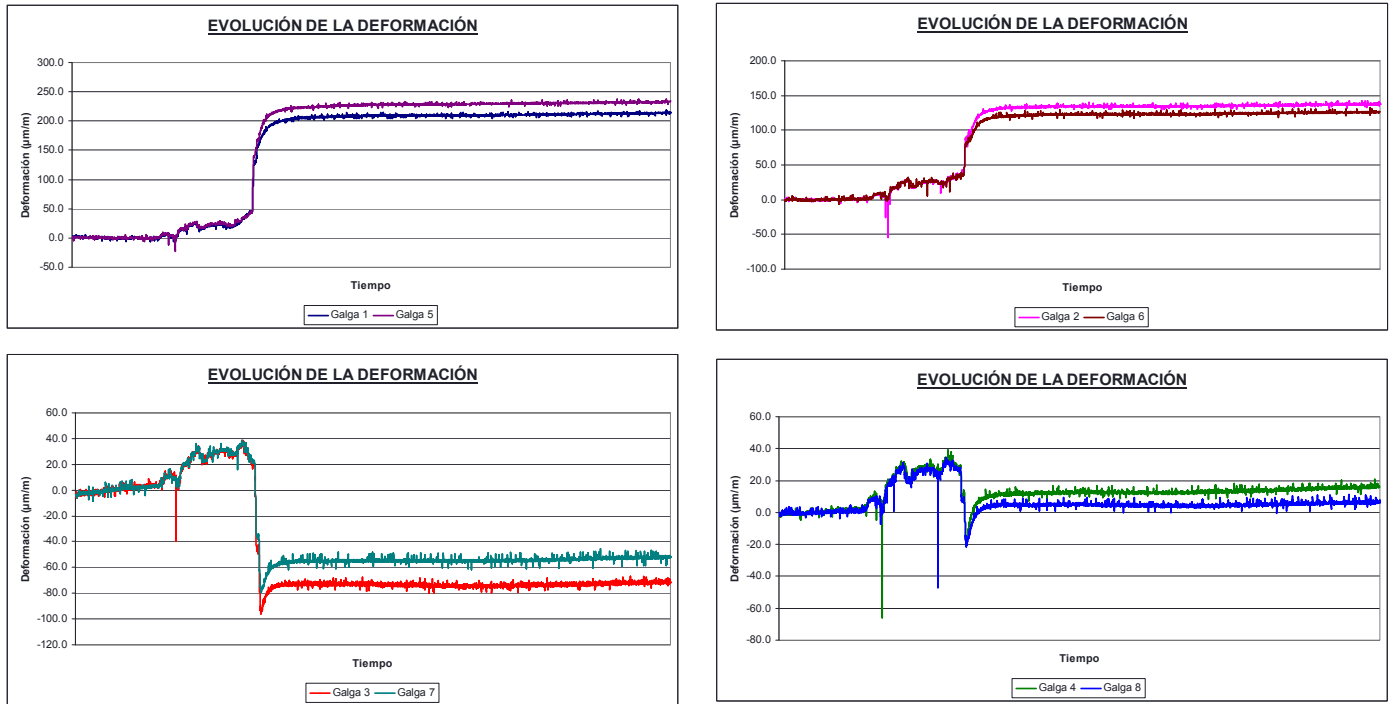


Fig. 4.1.51-4.1.54: Evolución de la deformación en el tiempo de las galgas, dos a dos (se representan conjuntamente las diametralmente opuestas).

En la Fig. 4.1.55 se ilustra un detalle tomado durante la ejecución de la perforación, mientras que en la Fig. 4.1.56 se ilustra el emplazamiento del ensayo HDS3 una vez finalizado.

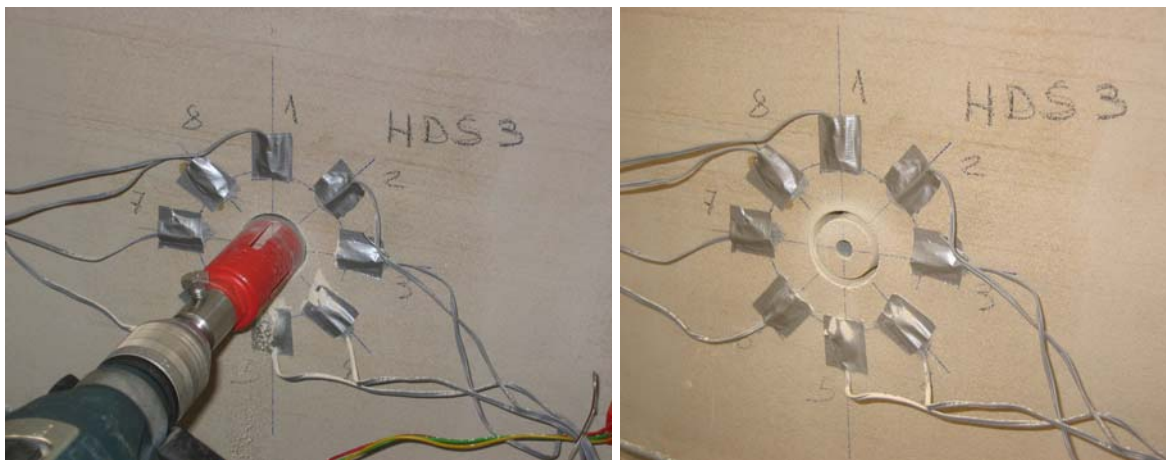


Fig. 4.1.55: Detalle tomado durante la ejecución de la perforación.

Fig. 4.1.56: Emplazamiento del ensayo HDS3 una vez finalizado.

Las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$ durante los 30 últimos minutos del ensayo. En vista de lo referido, se considera como incremento deformacional de las galgas, tras el taladrado, los valores de la siguiente Tabla 4.1.7:

Tabla 4.1.7: Incremento deformacional registrado por las galgas extensométricas, manteniendo constante la carga en coronación del muro, después del taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	212.0	136.4	-72.8	14.6	231.4	124.9	-53.3	5.4

Como ya se ha referido, dado que las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$, el registro asociado a cada una de ellas se considera válido. En base a las deformaciones referidas y procediendo con la teoría de la elasticidad, para cada una de las ocho combinaciones de galgas extensométricas existentes, pueden obtenerse (Tabla 4.1.8) las tensiones principales

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

máxima y mínima, σ_{\max} y σ_{\min} , el ángulo existente, medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Tabla 4.1.8: Obtención, para cada una de las combinaciones de galgas, de las tensiones principales máxima y mínima, σ_{\max} y σ_{\min} , el ángulo existente (β), medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Combinación	Canales	σ_{\max} (N/mm ²)	σ_{\min} (N/mm ²)	β (°)	σ_{vert} (N/mm ²)
1	1, 3, 6	0.12	-2.07	-79	-1.99
2	2, 4, 7	-0.04	-2.08	58	-1.98
3	3, 5, 8	0.1	-2.32	13	-2.20
4	4, 6, 1	0.12	-2.07	-34	-1.99
5	5, 7, 2	-0.17	-2.32	-81	-2.27
6	6, 8, 3	0.17	-1.99	57	-1.90
7	7, 1, 4	-0.05	-2.17	13	-2.06
8	8, 2, 5	0.25	-2.24	-34	-2.15
$\sigma_{\text{vert, Promedio}}$ (N/mm²)					-2.07
$\sigma_{\text{vert, Desvest}}$ (N/mm²)					0.13
Coef. de variación					6.15%

A su vez desde un punto de vista estadístico se tienen en cuenta las ocho combinaciones, dado que presentan un coeficiente de variación del 6.15%.

La tensión vertical promedio estimada en el ensayo es de **2.07 N/mm²** (compresión). Para una consulta más detallada del procesado del ensayo, se remite al lector al registro de ensayo Lab0812 adjunto en el Anexo 3.

Por otra parte la tensión vertical media teórica existente en el punto de ensayo es de **2.09 N/mm²** (compresión):

$$\sigma_{\text{media}} = \frac{90,319.8kp}{139.31 \cdot 31cm^2} = 20.91 \frac{kp}{cm^2} = 2.09 \frac{N}{mm^2} \text{ (compresión)}$$

4.1.5.5 Ensayo hole drilling HDS4

En la Fig. 4.1.57 se muestra la localización del Hole Drilling denominado HDS4 dentro del conjunto del muro de fábrica.

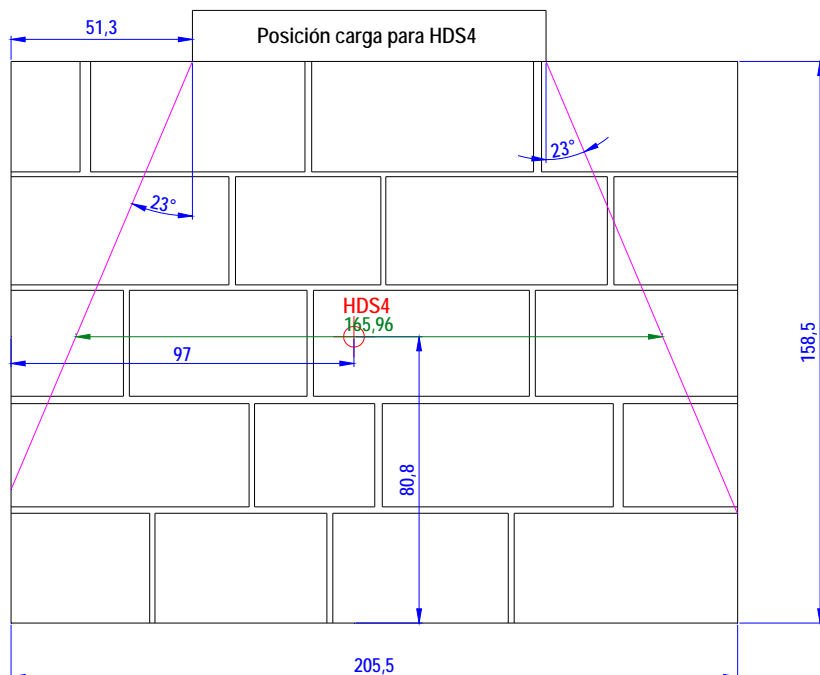


Fig. 4.1.57: Alzado del muro de sillería con la localización del HDS4. El espesor del muro son 31 cm. Las cotas referidas son en cm.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Debido a problemas con el equipo de adquisición de datos, pese a que el ensayo fue realizado con éxito (registro Lab0813, consultar Anejo 3), el registro de los mismos fue erróneo (problemas con el sistema de adquisición de datos), no permitiendo, por ende, la estimación del nivel de tensiones en el punto de control.

4.1.5.6 Ensayo hole drilling HDS5

En la Fig. 4.1.58 se muestra la localización del Hole Drilling denominado HDS5 dentro del conjunto del muro de fábrica.

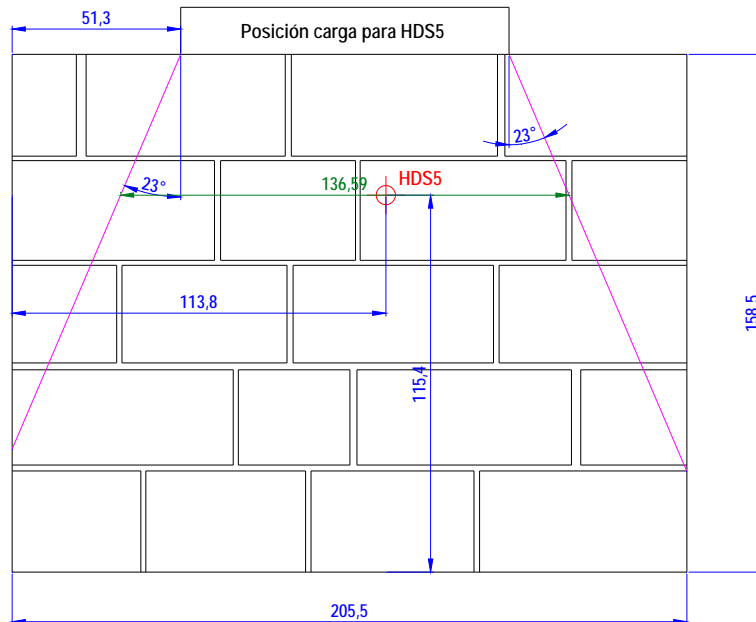


Fig. 4.1.58: Alzado del muro de sillería con la localización del HDS5. El espesor del muro son 31 cm. Las cotas referidas son en cm.

La carga final que operó a lo largo del ensayo se introdujo mediante tres escalones respectivos de 30 t, 60 t y 90 t (Fig. 4.1.59). En las Fig. 4.1.60 y 4.1.61 se presentan sendas fotografías de los valores registrados por el sistema de adquisición de datos en dos instantes determinados durante el ensayo, y en la Fig. 4.1.62 el control, por duplicado, del nivel de carga mediante polímetro.



Fig. 4.1.59: Introducción de la carga durante el ensayo. El nivel medio de carga vertical mantenido constante en la cabeza del muro fue de 90,563.7 kp.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

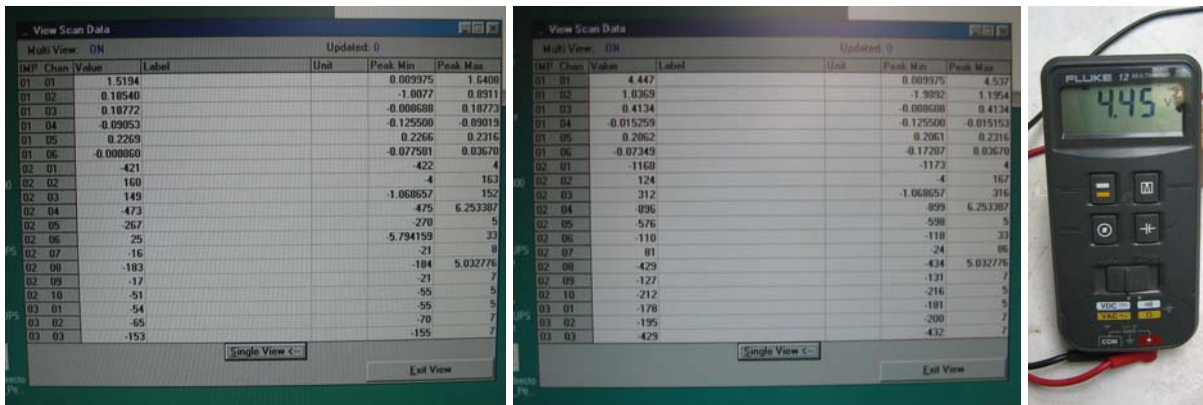


Fig. 4.1.60-4.1.62: El Canal IMP01-Chan01 representa el valor de la carga introducida en cabeza del muro (en voltaje). En los instantes representados se aprecia un valor de aproximadamente 1.5 voltios (30.6 t, asociado al primer escalón de carga) en la figura superior izquierda (Fig. 4.1.60), y un valor de aproximadamente 4.45 voltios (90.4 t, carga asociada al tercer y último escalón) tanto reflejado en el software de adquisición, figura superior central (Fig. 4.1.61), como en un polímetro externo de verificación, figura superior derecha (Fig. 4.1.62).

Por su parte, en la Fig. 4.1.63 se presentan los registros de la evolución de la deformación de cada galga a lo largo del ensayo.

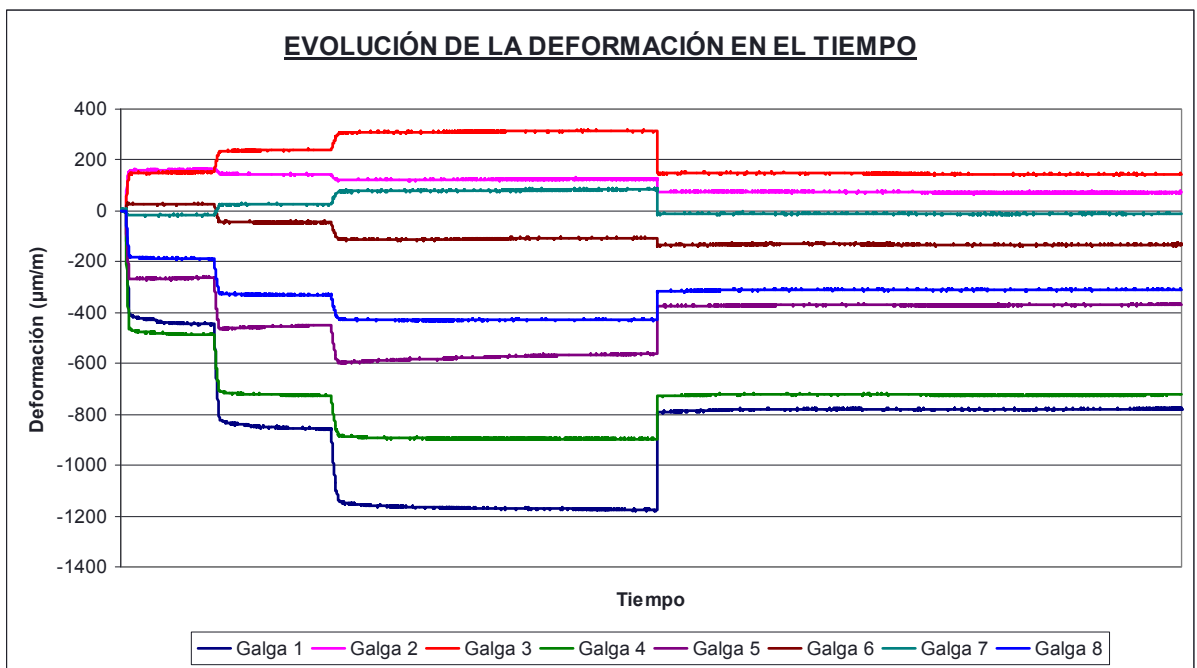


Fig. 4.1.63: Evolución registrada en la deformación de cada galga a lo largo del ensayo HDS5.

Bajo la carga referida mantenida constante, tomando como origen relativo los valores de la deformación, previamente al taladrado, una vez estabilizados (Tabla 4.1.9), la gráfica de evolución de la deformación con el tiempo toma el aspecto siguiente (Fig. 4.1.64):

Tabla 4.1.9: Deformación una vez estabilizada la carga previamente al taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	-1170.2	124.5	312.6	-894.8	-572.7	-109.3	81.5	-429.0

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

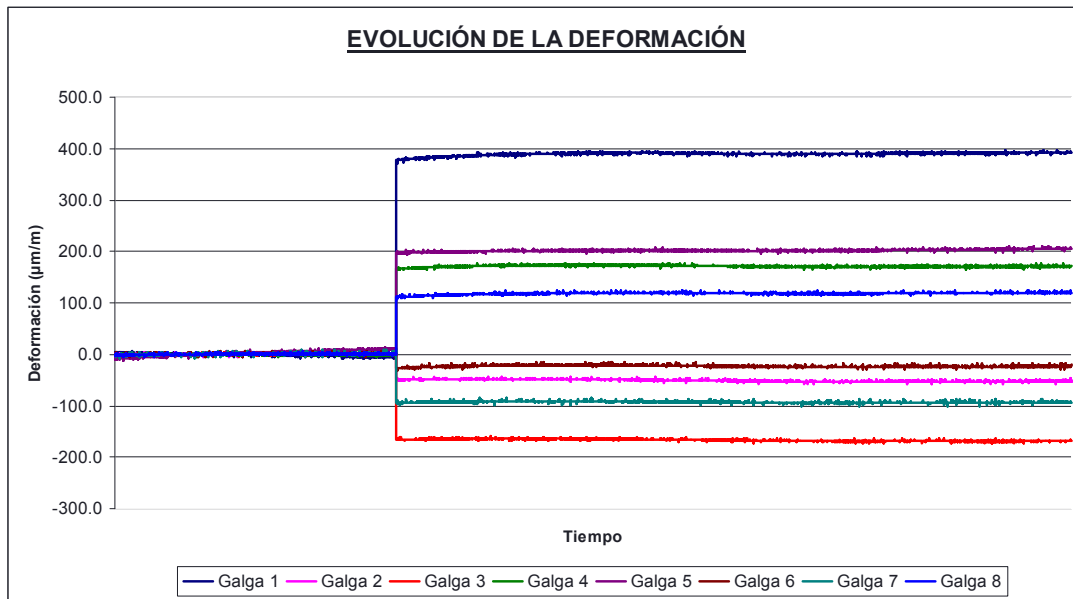


Fig. 4.1.64: Traslación de los registros con el objetivo de tomar como origen relativo para el procesado del ensayo, el instante en que los valores presentados por las galgas se estabilizan.

Como circunstancia reseñable durante la fase de registro de datos conviene aludir, en vista de la evolución gráfica de las deformaciones, que entre las 10:37:55 h y las 10:50:48 h (día 25-06-08), debido a un error no identificado (bajada de tensión, etc.) pese a que el sistema de adquisición de datos funcionó correctamente, el software relacionado con la gestión de los datos no registró los valores durante el intervalo de tiempo referido (a ello responde el salto presente en todas las galgas en la gráfica de evolución presentada).

Dado que se disponen datos de la deformación previa al taladrado y de la deformación de estabilización tras el mismo, puede estimarse el incremento deformacional para cada una de las galgas y, por ende, realizar el procesado matemático expuesto en el registro de ensayo Lab0814 adjunto en el Anexo 3

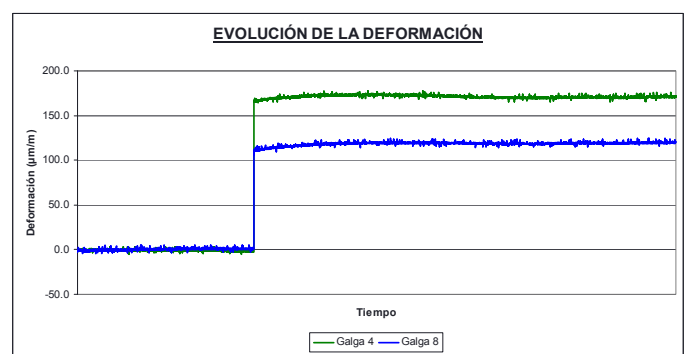
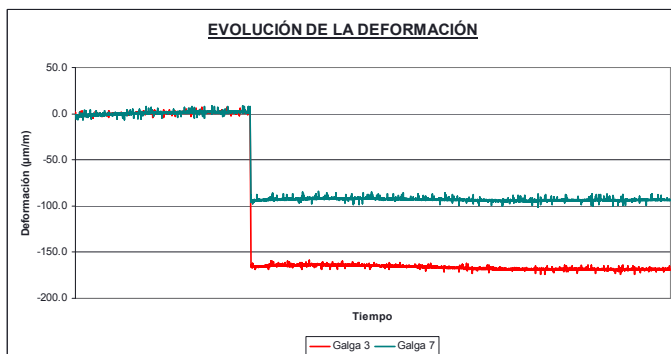
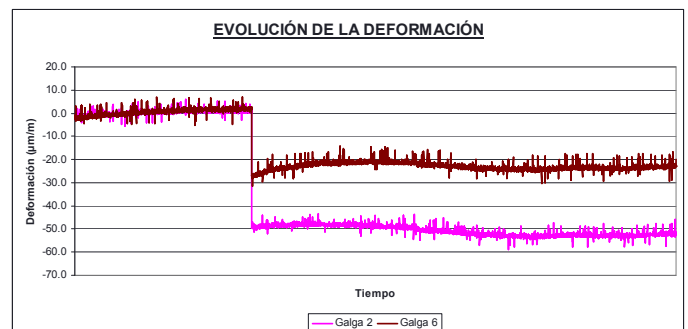
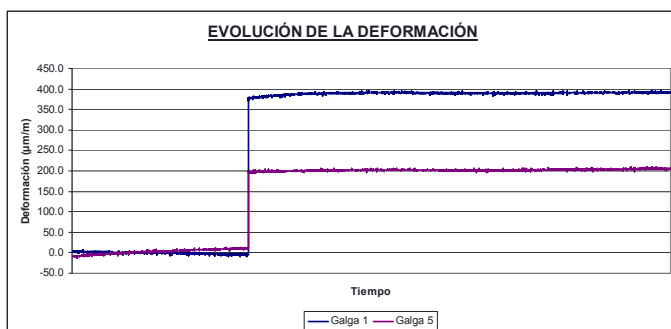


Fig. 4.1.65-4.1.68: Evolución de la deformación en el tiempo de las galgas, dos a dos (se representan conjuntamente las diametralmente opuestas).

De la misma forma, puede referirse que la galga 1 registra un valor de deformación excesivo.

Las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$ durante los últimos 30 minutos del ensayo. En vista de lo referido, se considera como incremento deformacional de las galgas, tras el taladrado, los valores de la Tabla 4.1.10.

Tabla 4.1.10: Incremento deformacional registrado por las galgas extensométricas, manteniendo constante la carga en coronación del muro, después del taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	390.7	-52.9	-168.9	170.5	203.2	-23.8	-94.0	118.9

Como ya se ha referido aunque la galga 1 y la galga 5 presentan una tendencia similar, la galga 1 se estabiliza tras el taladrado a un valor de deformación excesivo. Por este hecho se comprueba que las combinaciones en las que está presente la galga 1 (Combinaciones 1, 4 y 7) alcanzan valores de tensiones excesivamente altos. Por todo ello, para la estimación de la tensión vertical existente, sólo se tienen en cuenta las combinaciones 2, 3, 5, 6 y 8 (Tabla 4.1.11).

Tabla 4.1.11: Obtención, para cada una de las combinaciones de galgas, de las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente (β), medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Combinación	Canales	σ_{max} (N/mm^2)	σ_{min} (N/mm^2)	β ($^\circ$)	σ_{vert} (N/mm^2)	
1	1, 3, 6	0.7	-3.82	77	-3.59	
2	2, 4, 7	0.55	-2.2	27	-1.94	
3	3, 5, 8	1.3	-1.78	-14	-1.60	
4	4, 6, 1	1.38	-3.45	-54	-3.33	
5	5, 7, 2	0.57	-2.1	72	-1.85	
6	6, 8, 3	0.99	-2.33	36	-2.25	
7	7, 1, 4	-0.32	-3.86	-3	-3.85	
8	8, 2, 5	0.92	-1.85	-58	-1.71	
					$\sigma_{\text{vert, Promedio}}$ (N/mm^2)	-1.87
					$\sigma_{\text{vert, Desvest}}$ (N/mm^2)	0.25
					Coef. de variación	13.32%

La tensión vertical promedio estimada en el ensayo fue de 1.87 N/mm^2 (compresión), con un coeficiente de variación de 13.32%. Se remite al lector al registro de ensayo Lab0814 adjunto en el Anexo 3 para una consulta más detallada del procesado de los datos.

Por otra parte la tensión vertical media teórica existente en el punto de ensayo era de 2.14 N/mm^2 (compresión):

$$\sigma_{\text{media}} = \frac{90,563.7 \text{kp}}{136.59 \cdot 31 \text{cm}^2} = 21.39 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} = 2.14 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ (compresión)}$$

4.1.5.7 Comparativa entre el registro de la deformación en dos ensayos Hole Drilling: uno mediante extensometría resistiva (HDS6) y otro mediante extensometría de fibra óptica (HDS7).

Con fecha 28 de diciembre de 2007 fue construido en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria un murete de sillería arenisca. En la Fig. 4.1.69 se presenta la geometría de dicho elemento de obra de fábrica.

En las Fig. 4.1.70 y 4.1.71 se ilustra un instante de los ensayos realizados, simultáneamente, mediante extensometría resistiva (HDS6) y mediante extensometría de fibra óptica (HDS7). Dicha campaña experimental fue realizada, en colaboración, con el Prof. Santiago Sánchez Beitia (Universidad del País Vasco) y con la firma industrial HBM (Alemania).

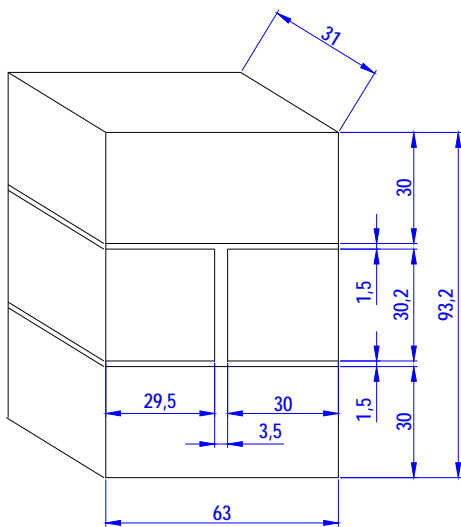


Fig. 4.1.69: Geometría del murete de sillería arenisca ensayado. Las cotas referidas están en cm.

Fig. 4.1.70: Instante tomado durante el ensayo hole drilling realizado mediante extensometría resistiva (HDS6), en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

Fig. 4.1.71: Instante tomado durante el ensayo hole drilling realizado mediante extensometría de fibra óptica (HDS7), en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

4.1.5.7.1 Ensayo hole drilling HDS6 (Extensometría resistiva)

En la Fig. 4.1.72 se muestra la localización del Hole Drilling mediante extensometría resistiva (HDS6) dentro del conjunto del murete de fábrica de sillería. Por su parte las Fig. 4.1.73 y 4.1.74 muestran sendas perspectivas del ensayo realizado.

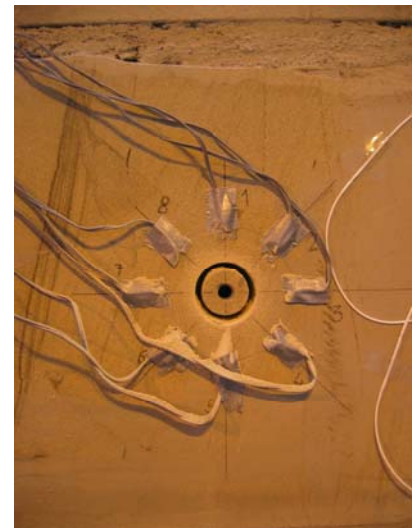
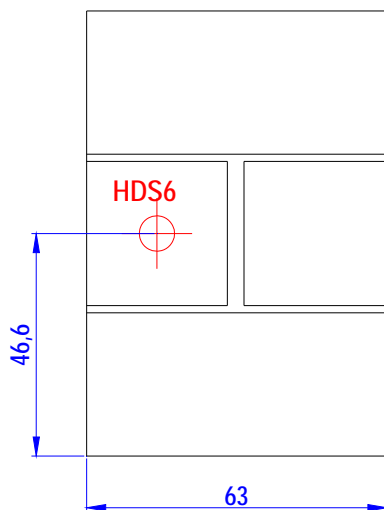


Fig. 4.1.72: Alzado del murete de sillería con la localización del HDS6. El espesor del murete son 31 cm. Las cotas referidas son en cm.

Fig. 4.1.73 y 4.1.74: Detalles del ensayo HDS6 realizado.

Se introdujo un nivel de carga vertical en la cabeza del muro próximo a 60 t, Fig. 4.1.75, que simula la carga que existiría en un edificio real, y con posterioridad se realizó el ensayo.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

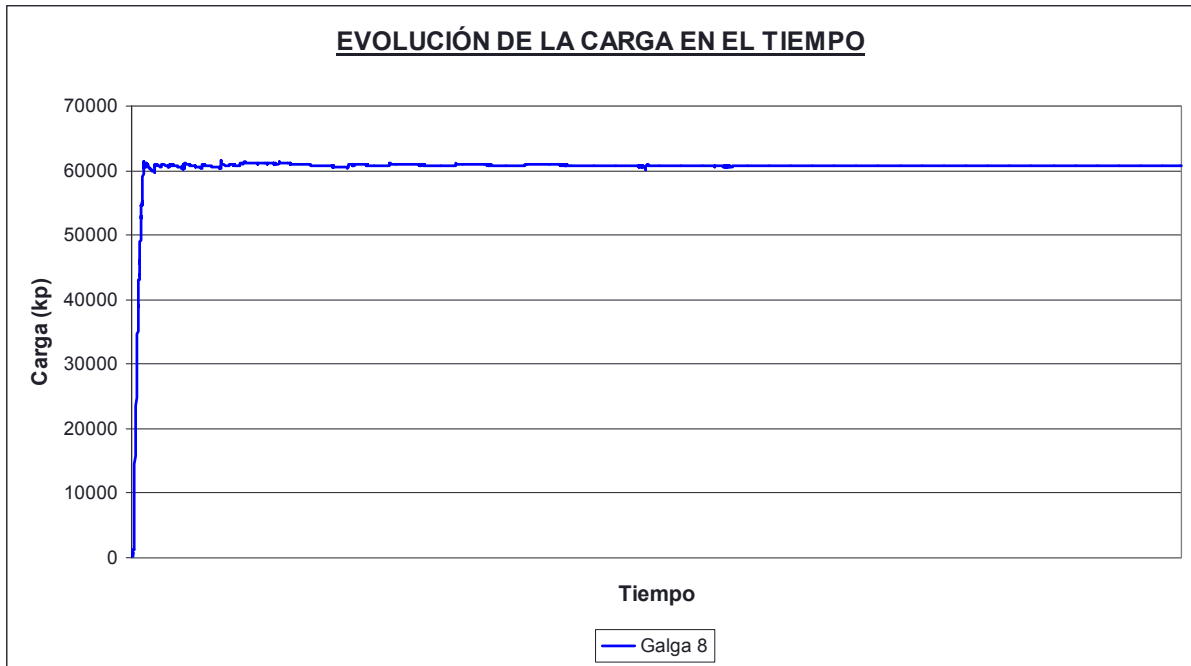


Fig. 4.1.75: Evolución de la carga durante el ensayo. El nivel medio de carga vertical mantenido constante en la cabeza del muro fue de 60,747.2 kp.

En la Fig. 4.1.76 se presentan los registros de la evolución de la deformación de cada galga a lo largo del ensayo. Como puede observarse en la figura referida la adquisición de la deformación se comenzó una vez introducida la carga en la cabeza del muro.

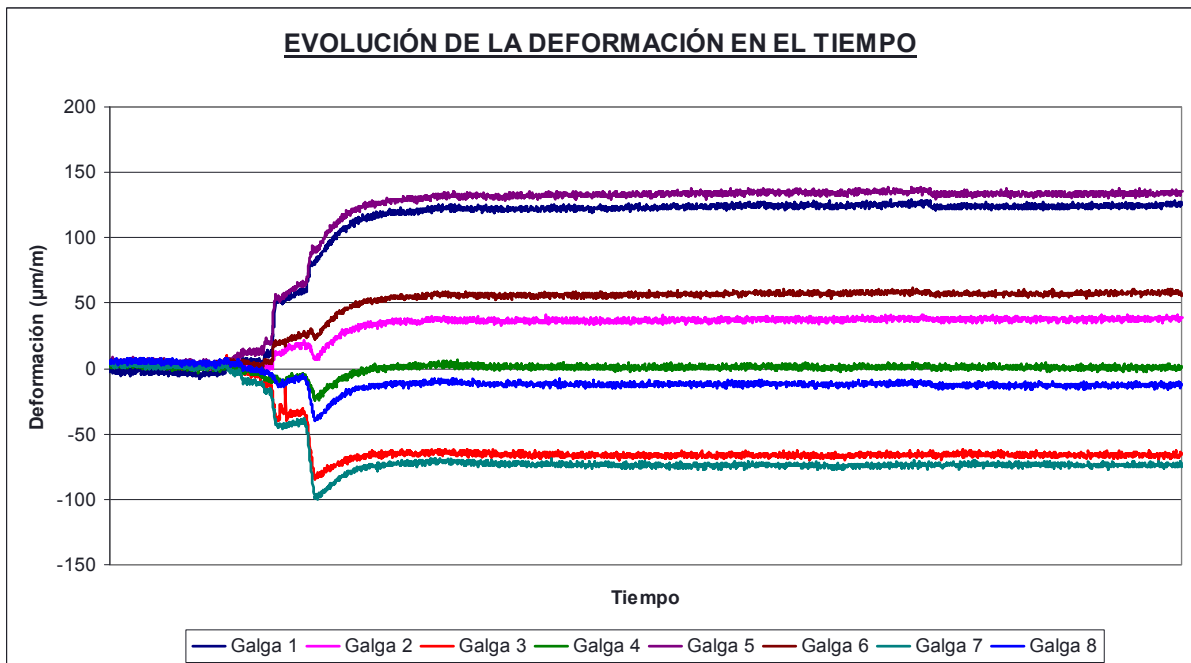


Fig. 4.1.76: Evolución registrada en la deformación de cada galga a lo largo del ensayo HDS6.

Bajo la carga referida mantenida constante, tomando como origen relativo los valores de la deformación, previamente al taladrado, una vez estabilizados (Tabla 4.1.12), la gráfica de evolución de la deformación con el tiempo toma el aspecto siguiente (Fig. 4.1.77):

Tabla 4.1.12: Deformación una vez estabilizada la carga previamente al taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	-2.6	3.1	3.2	1.7	5.1	3.5	2.2	5.2

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

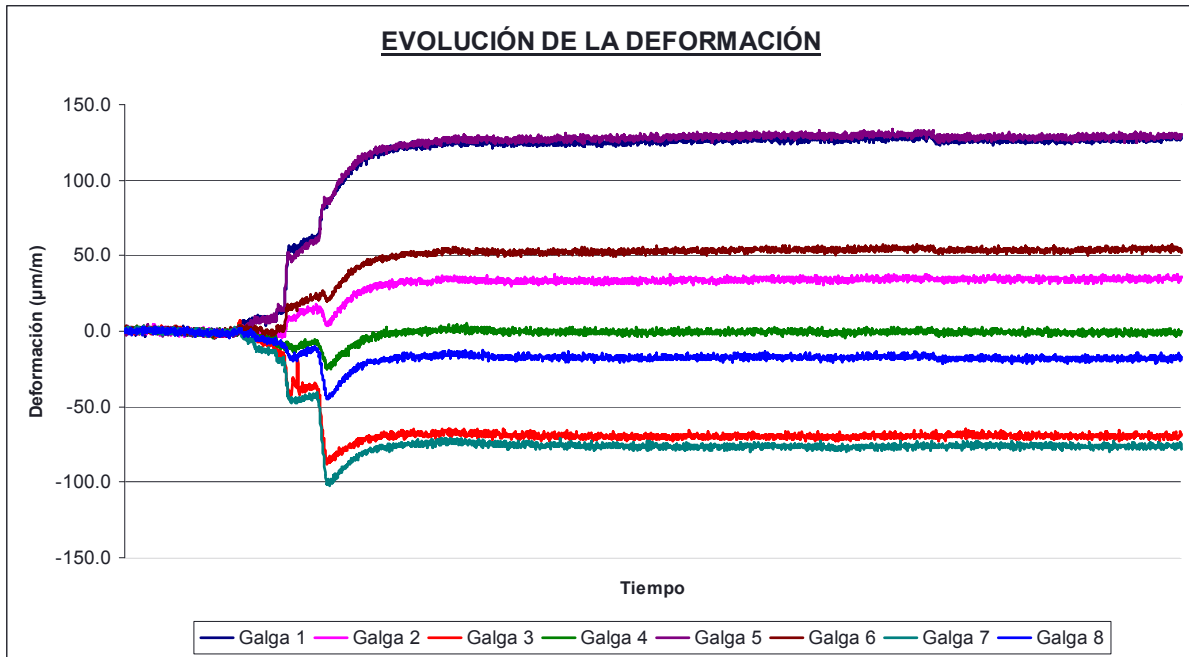


Fig. 4.1.77: Traslación de los registros con el objetivo de tomar como origen relativo para el procesado del ensayo, el instante en que los valores presentados por las galgas se estabilizan.

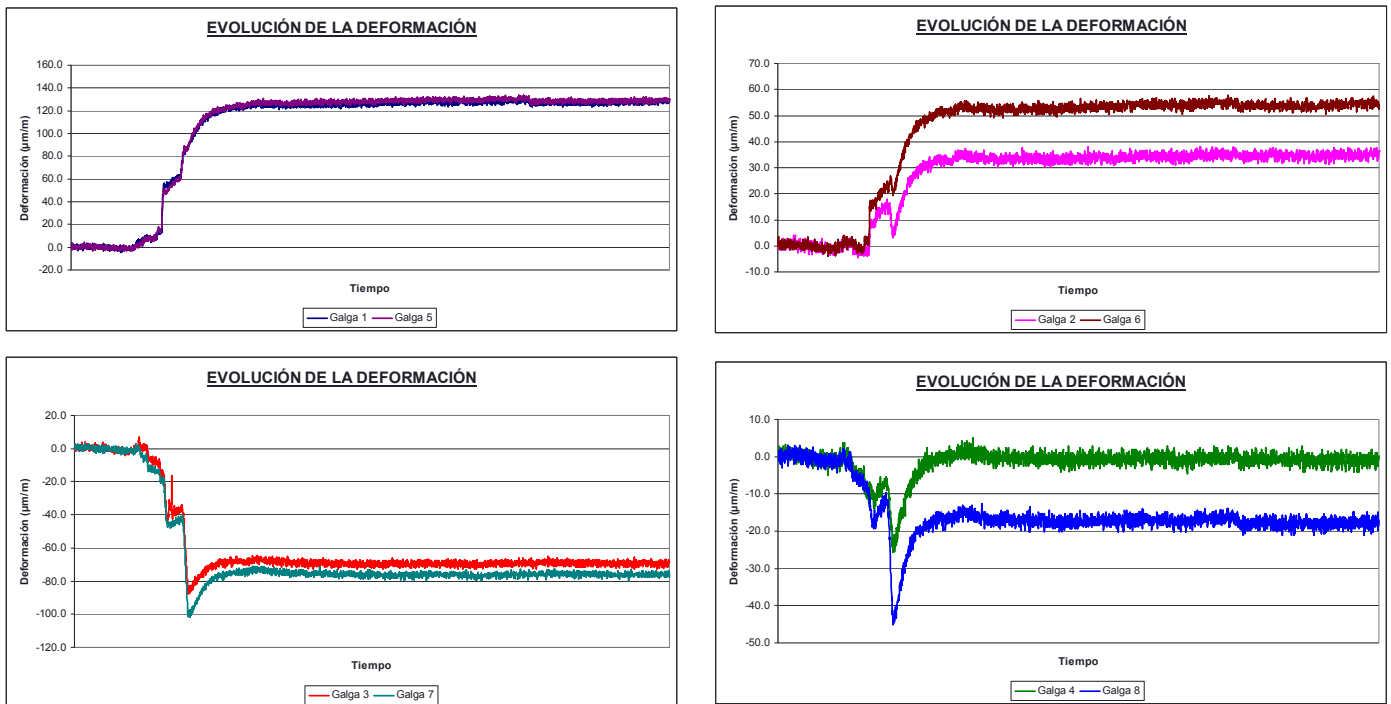


Fig. 4.1.78-4.1.81: Evolución de la deformación en el tiempo de las galgas, dos a dos (se representan conjuntamente las diametralmente opuestas).

Las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$ durante los últimos minutos del ensayo. En vista de lo referido, se considera como incremento deformacional de las galgas, tras el taladrado, los valores de la siguiente Tabla 4.1.13:

Tabla 4.1.13: Incremento deformacional registrado por las galgas extensométricas, manteniendo constante la carga en coronación del muro, después del taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	127.0	34.4	-69.4	-0.8	129.1	53.9	-76.1	-17.5

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Como ya se ha referido dado que las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$, el registro asociado a cada una de ellas se considera válido. En base a las deformaciones referidas y procediendo con la teoría de la elasticidad, para cada una de las ocho combinaciones de galgas extensométricas existentes, pueden obtenerse (Tabla 4.1.14) las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente, medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Tabla 4.1.14: Obtención, para cada una de las combinaciones de galgas, de las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente (β), medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Combinación	Canales	σ_{max} (N/mm ²)	σ_{min} (N/mm ²)	β (°)	σ_{vert} (N/mm ²)
1	1, 3, 6	0.84	-3.02	-83	-2.96
2	2, 4, 7	1.17	-2.44	50	-2.41
3	3, 5, 8	0.97	-3.22	13	-3.01
4	4, 6, 1	0.98	-2.99	-37	-2.91
5	5, 7, 2	0.96	-2.96	-88	-2.96
6	6, 8, 3	1.11	-2.49	56	-2.36
7	7, 1, 4	1.04	-2.96	7	-2.90
8	8, 2, 5	2.03	-2.67	-39	-2.62
$\sigma_{\text{vert, Promedio}}$ (N/mm²)					-2.77
$\sigma_{\text{vert, Desvest}}$ (N/mm²)					0.26
Coef. de variación					9.53%

A su vez desde un punto de vista estadístico se tienen en cuenta las ocho combinaciones, dado que presentan un coeficiente de variación del 9.53%.

La tensión vertical promedio estimada en el ensayo es de **2.77 N/mm²** (compresión). Se remite al lector al registro de ensayo Lab0833 adjunto en el Anexo 3 para una consulta más detallada del procesado de los datos.

Por otra parte la tensión vertical teórica media existente en el punto de ensayo es de **3.11 N/mm²** (compresión):

$$\sigma_{\text{media}} = \frac{60,747.2kp}{63 \cdot 31 \text{cm}^2} = 31.10 \frac{kp}{\text{cm}^2} = 3.11 \frac{N}{\text{mm}^2} \text{ (compresión)}$$

4.1.5.7.2 Ensayo hole drilling HDS7 (Extensometría óptica)

En la Fig. 4.1.82 se muestra la localización del Hole Drilling mediante extensometría de fibra óptica (HDS7) dentro del conjunto del murete de fábrica de sillería. Por su parte las Fig. 4.1.83 y 4.1.84 muestran sendas perspectivas del ensayo realizado. La extensometría óptica fue fabricada específicamente para el ensayo en cuestión.

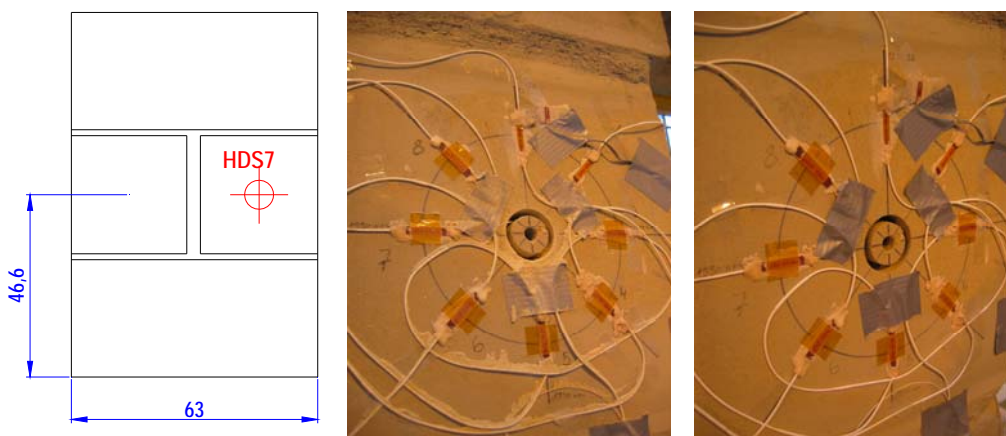


Fig. 4.1.82: Alzado del murete de sillería con la localización del HDS7. El espesor del murete son 31 cm. Las cotas referidas son en cm.

Fig. 4.1.83 y 4.1.84: Detalles del ensayo HDS7 realizado.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Se introdujo un nivel de carga vertical en la cabeza del muro próximo a 60 t, Fig. 4.1.85, que simula la carga que existiría en un edificio real, y con posterioridad se realizó el ensayo.

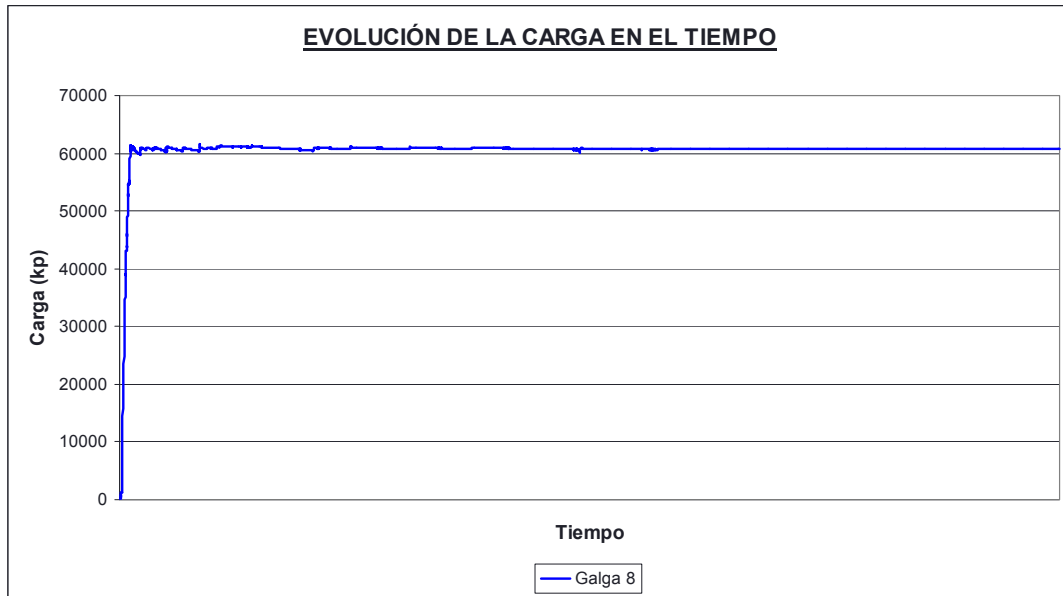


Fig. 4.1.85: Introducción de la carga durante el ensayo. El nivel medio de carga vertical mantenido constante en la cabeza del muro fue de 60,747.2 kp.

En la Fig. 4.1.86 se presentan los registros de la evolución de la deformación de cada galga a lo largo del ensayo. Como puede observarse en la figura referida la adquisición de la deformación se comenzó una vez introducida la carga en la cabeza del muro.

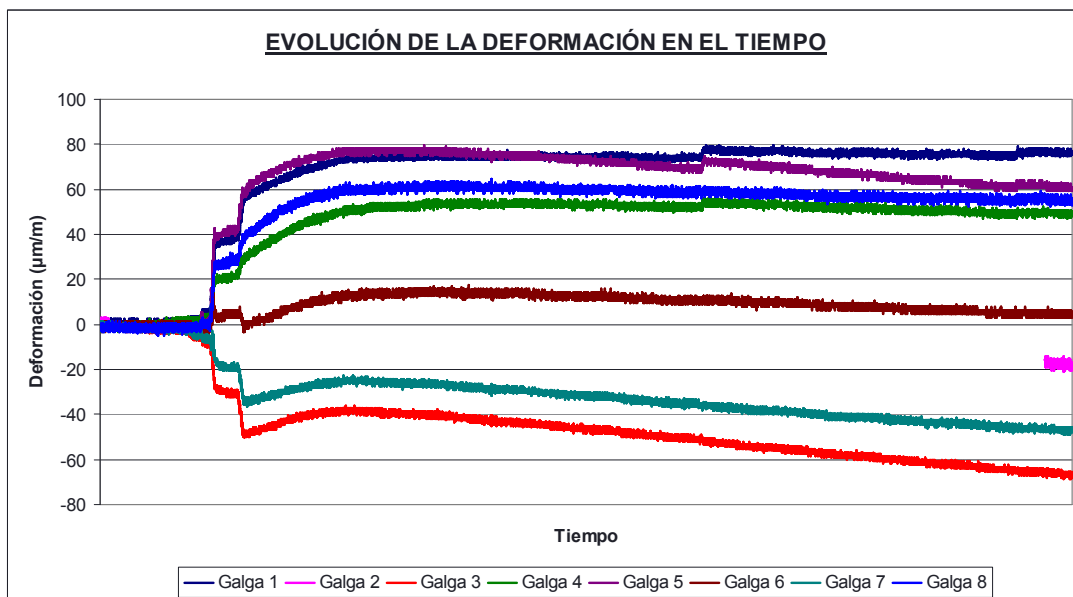


Fig. 4.1.86: Evolución registrada en la deformación de cada galga a lo largo del ensayo HDS7.

Bajo la carga referida mantenida constante, tomando como origen relativo los valores de la deformación, previamente al taladrado, una vez estabilizados (Tabla 4.1.15), la gráfica de evolución de la deformación con el tiempo toma el aspecto siguiente (Fig. 4.1.87):

Tabla 4.1.15: Deformación una vez estabilizada la carga previamente al taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	0.7	0.6	-1.7	-0.2	-1.2	-0.7	-1.5	-1.3

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

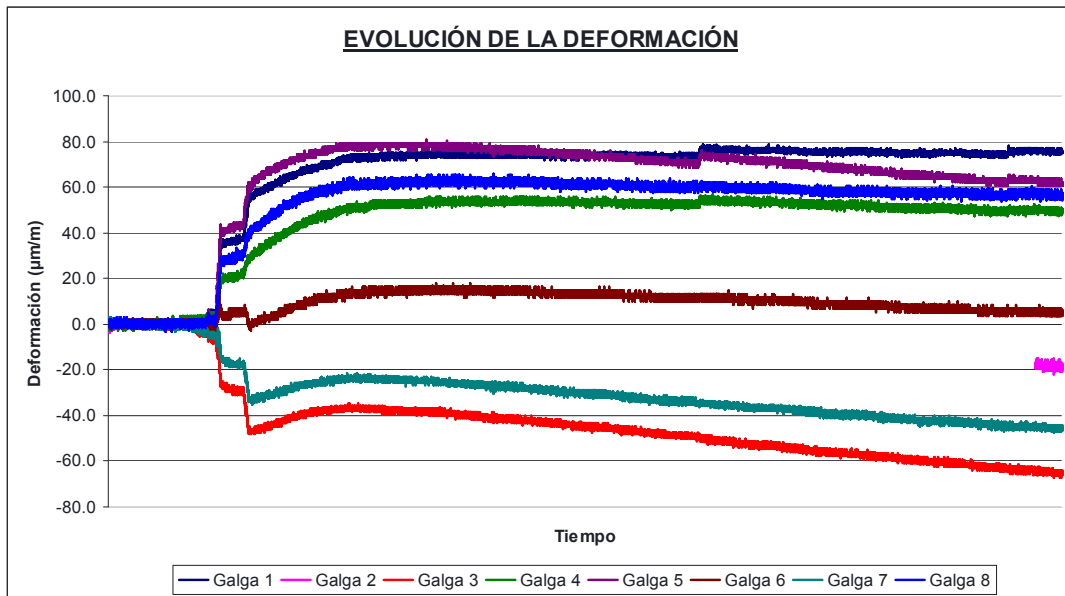


Fig. 4.1.87: Traslación de los registros con el objetivo de tomar como origen relativo para el procesado del ensayo, el instante en que los valores presentados por las galgas se estabilizan.

Puede apreciarse una discontinuidad temporal en el registro de la galga óptica 2. Esta circunstancia se debe a la rotura de la fibra que supuso la no determinación, en continuo, de la evolución de la deformación de dicha galga, por ello que se optó por registrar durante dos periodos de tiempo, uno con antelación al taladrado y otro bastante después de su realización, con la finalidad de poder estimar el incremento deformacional sufrido por dicha galga óptica como consecuencia de la perforación.

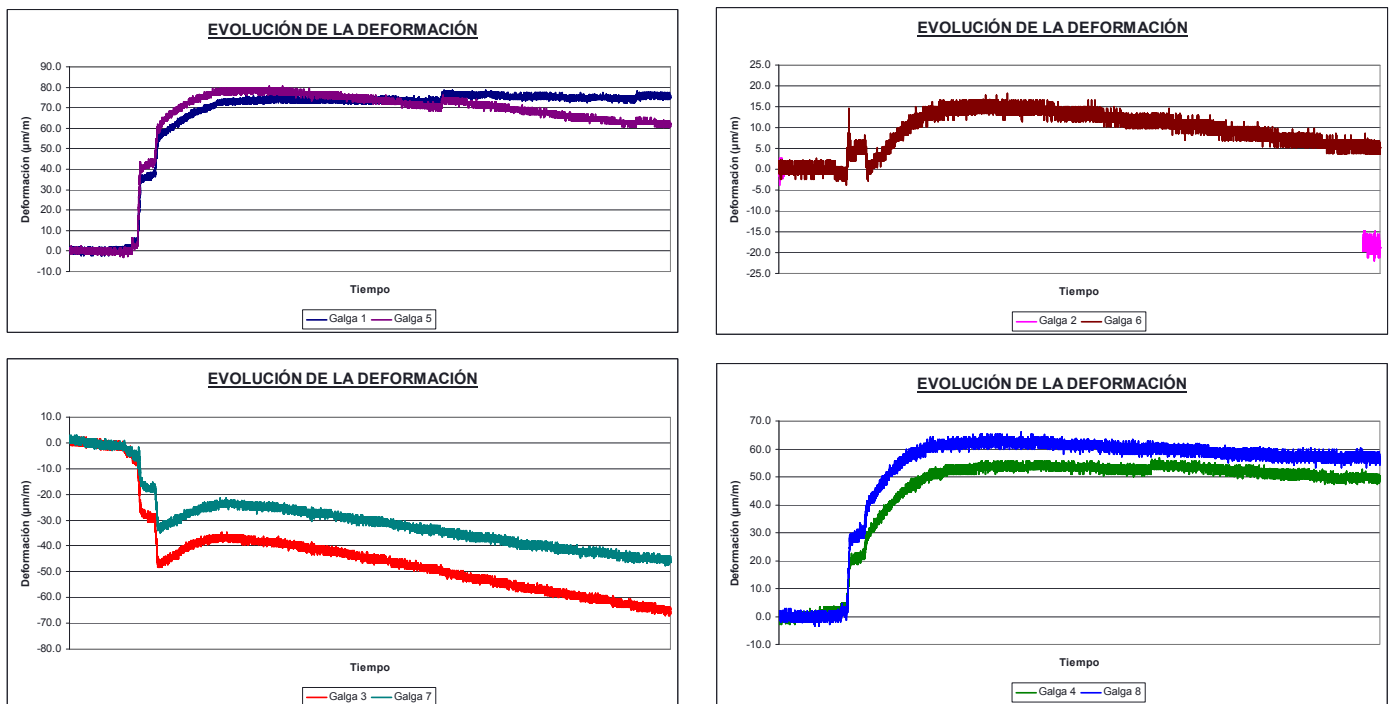


Fig. 4.1.88-4.1.91: Evolución de la deformación en el tiempo de las galgas, dos a dos (se representan conjuntamente las diametralmente opuestas).

Como puede apreciarse en las Fig. 4.1.88 y 4.1.89, las galgas ópticas 1, 4, 5, 6 y 8 presentan una cierta estabilización de los valores de las deformaciones registradas tras el taladrado (unas con mayor claridad que otras). Por su parte las galgas 3 y 7 presentan una evolución monótona decreciente (más o menos con una pendiente constante), circunstancia que hace dudar, en esos

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

casos, de cuál pueda ser un valor lógico de estabilización de dicha deformación. En lo que respecta a la galga 2, dado el corto lapso de tiempo del que se tiene registro de la evolución de la deformación tras el taladrado, no puede hacerse afirmación alguna con rigor suficiente.

Dicho comportamiento, parece estar relacionado con el inadecuado comportamiento del adhesivo bicomponente empleado, dada la humedad del soporte pétreo (cabe relacionar que la humedad ambiental era del 80%) que suponía una reacción prácticamente súbita del adhesivo en el momento que entraba en contacto con el soporte de arenisca, de forma que la adhesión de las galgas ópticas al murete pudo no ser del todo efectiva.

En vista de lo referido, se ha considerado como incremento deformacional de las galgas, tras el taladrado, los valores de la Tabla 4.1.16 (para cada galga óptica se ha adoptado el valor medio de los registrados durante la última media hora del ensayo, Fig. 4.1.92-95):

Tabla 4.1.16: Incremento deformacional registrado por las galgas extensométricas, manteniendo constante la carga en coronación del muro, después del taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	75.2	-18.2	-63.3	49.7	62.8	5.7	-44.4	56.9

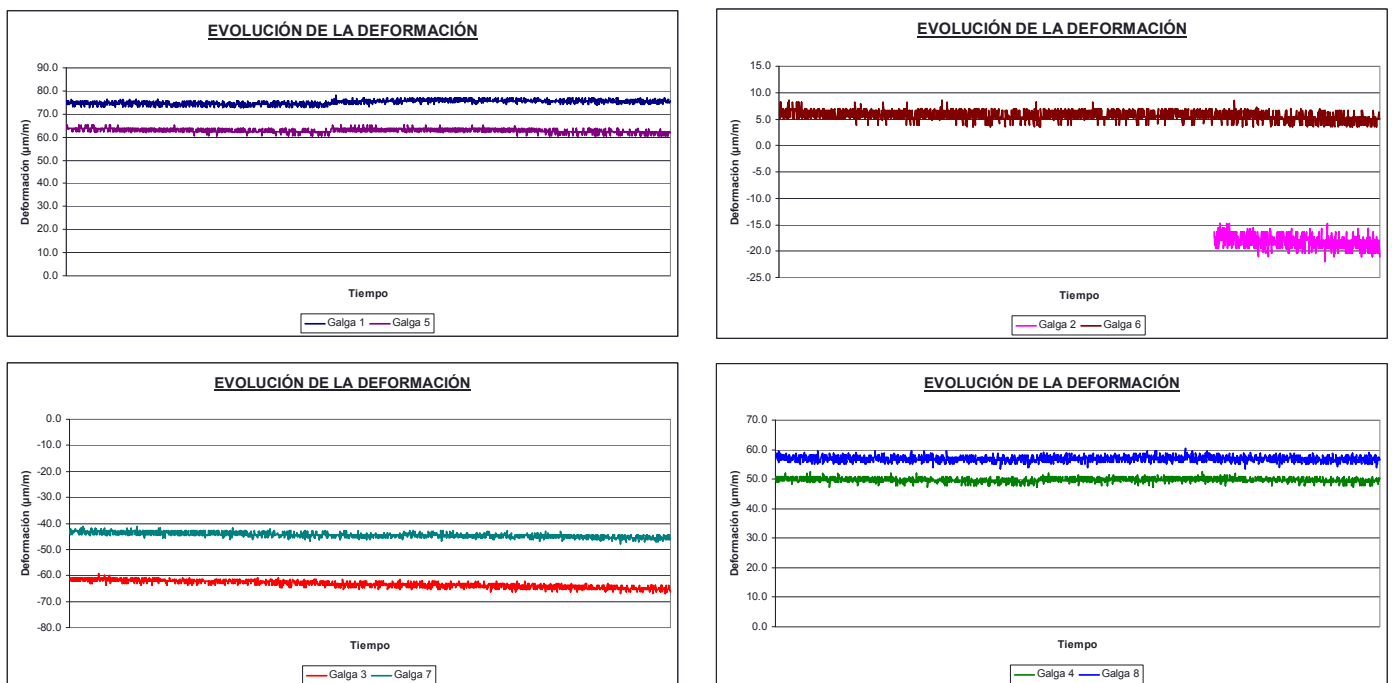


Fig. 4.1.92-4.1.95: Registro de los últimos 30 minutos del ensayo (parte final de las Fig. 88-91 anteriores).

En base a las deformaciones referidas y procediendo con la teoría de la elasticidad, para cada una de las ocho combinaciones de galgas extensométricas existentes, pueden obtenerse (Tabla 4.1.17) las tensiones principales máxima y mínima, σ_{\max} y σ_{\min} , el ángulo existente, medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Desde un punto de vista estadístico (coeficiente de variación inferior al 10%) solo se tienen en cuenta las combinaciones 1, 2, 7 y 8. Para estas combinaciones la tensión vertical promedio estimada en el ensayo es de **2.85 N/mm²** (compresión), presentando un coeficiente de variación de 6.25%.

Por su parte, si se considera que las galgas 3 y 7 no presentaban una estabilización clara de sus deformaciones tras el taladrado, la única combinación en la que se verifica tanto la no participación de las galgas 3 y 7, como un resultado del nivel de tensiones adecuado (desde un

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

punto de vista estadístico) es la combinación 8, en la que se obtiene un nivel tensional de **2.73 N/mm²** (compresión).

Tabla 4.1.17: Obtención, para cada una de las combinaciones de galgas, de las tensiones principales máxima y mínima, σ_{\max} y σ_{\min} , el ángulo existente (β), medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Combinación	Canales	σ_{\max} (N/mm ²)	σ_{\min} (N/mm ²)	β (°)	σ_{vert} (N/mm ²)
1	1, 3, 6	1.88	-2.67	90	-2.67
2	2, 4, 7	1.22	-3.32	30	-3.02
3*	3, 5, 8	2.81	-2.77	-21	-2.05
4*	4, 6, 1	-0.13	-3.56	-57	-3.41
5*	5, 7, 2	1.36	-2.59	76	-2.36
6*	6, 8, 3	1.13	-5.3	37	-5.18
7	7, 1, 4	1.24	-3.29	-15	-2.99
8	8, 2, 5	0.6	-3.17	-65	-2.73
$\sigma_{\text{vert, Promedio}}$ (N/mm²)					-2.85
$\sigma_{\text{vert, Desvest}}$ (N/mm²)					0.18
Coef. de variación					6.25%

* Las combinaciones 3, 4, 5 y 6 no se han tenido en cuenta desde un punto de vista estadístico (coeficiente de variación menor del 10%).

Se remite al lector al registro de ensayo Lab0834 adjunto en el Anexo 3 para una consulta detallada del procesado realizado de los datos.

Por otra parte la tensión vertical media existente en el punto de ensayo es la misma que la estimada para el ensayo HDS6 mediante extensometría resistiva, siendo de **3.11 N/mm²** (compresión):

$$\sigma_{\text{media}} = \frac{60,747.2kp}{63.31cm^2} = 31.10 \frac{kp}{cm^2} = 3.11 \frac{N}{mm^2} \text{ (compresión)}$$

4.1.5.7.3 Comparación de los resultados obtenidos por extensometría resistiva y óptica.

En base a los resultados obtenidos por ambas técnicas de registro de deformaciones, y pese a que algunas de las galgas ópticas (nº 3 y 7) no presentaron una estabilización de la deformación tras el taladrado, puede concluirse que los niveles tensionales estimados fueron bastante aproximados, tal y como comprobarse en la Tabla 4.1.18. Además, ambos casos permiten una buena estimación del nivel tensional teórico existente.

Tabla 4.1.18: Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos hole drilling HDS6, con registro de deformaciones mediante extensometría resistiva, y HDS7, con registro de deformaciones mediante extensometría óptica.

Ensayo	Fecha	$\sigma_{\text{experimental}}$ (MPa)	σ_{estimada} (MPa)	$\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{est}}$
HDS6	05/12/2008	2.77	3.11	0.89
HDS7 (FO)	05/12/2008	2.85 (2.73)	3.11	0.92 (0.88)

A favor de la extensometría resistiva pueden relacionarse las siguientes ventajas respecto de la extensometría óptica:

- Mayor facilidad de instalación en el elemento portante. Dado que las cadenas de fibra óptica precisan una mayor sensibilidad en lo referente a su manejo y disposición, existiendo una elevada posibilidad de rotura de la cadena, hecho que se constató en el ensayo (tal y como ya se ha referido) al igual que en otras dos experiencias relacionadas con la disposición de galgas de fibra óptica, en las que el autor de la presente tesis doctoral se ha visto involucrado (Sánchez-Beitia et al. 2009b; PGT 33/2006).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

- A día de hoy, precio mucho más competitivo tanto en lo que respecta a las bandas en sí mismas, como al sistema de adquisición de datos necesario para la realización del ensayo.

En contraposición, la tecnología de fibra óptica permite el almacenamiento de las deformaciones incluso cuando la unidad de registro está temporalmente desconectada, pudiendo relacionar las medidas tomadas antes y después de las desconexiones. Esta ha sido la razón fundamental por la que se ha puesto en práctica la tecnología de fibra óptica en combinación con la metodología hole drilling, dado que la combinación de ambas permitiría realizar una monitorización del estado tensional en función del tiempo (Sánchez-Beitia et al. 2009b).

4.1.5.8 Comparativa entre el registro de la deformación en dos ensayos Hole Drilling: uno mediante extensometría resistiva (HDS8) y otro mediante videocorrelación (HDS9).

Sobre el mismo murete de arenisca fue realizada una campaña experimental para comprobar la bondad de la técnica de la videocorrelación en la estimación de las deformaciones registradas en el área circundante a un ensayo de hole drilling, y las registradas por extensometría resistiva.

En este sentido, en las Fig. 4.1.96 y 4.1.97 se ilustra un instante de los ensayos realizados, simultáneamente, mediante extensometría resistiva (HDS8) y mediante estimación de las deformaciones por videocorrelación. Dicha campaña experimental fue realizada, en colaboración, con el Instituto Tecnológico de la Construcción de la Comunidad Valenciana (AIDICO), y por las firmas industriales Álava Ingenieros (España) y Limes Messtechnik (Alemania).



Fig. 4.1.96: Instante tomado durante el ensayo hole drilling realizado mediante extensometría resistiva (HDS8), en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria. La profundidad del taladro fue de 37.97 cm.

Fig. 4.1.97: Instante tomado durante el ensayo hole drilling realizado mediante adquisición de deformaciones por videocorrelación (HDS9), en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria. La profundidad del taladro fue de 37.65 cm.

4.1.5.8.1 Ensayo hole drilling HDS8 (Extensometría resistiva)

En la Fig. 4.1.98 se muestra la localización del Hole Drilling mediante extensometría resistiva (HDS8) dentro del conjunto del murete de fábrica de sillería. Por su parte en la Fig. 4.1.99 se muestra un instante captado durante el proceso de perforación.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

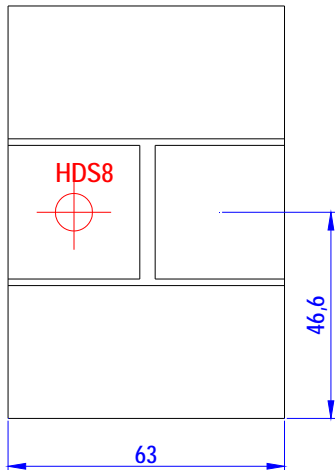


Fig. 4.1.98: Alzado del murete de sillaría con la localización del HDS8 (el ensayo fue realizado en la cara opuesta de los HDS6 y HDS7 ejecutados en el mismo murete de arenisca). El espesor del murete son 31 cm. Las cotas referidas son en cm.

Fig. 4.1.99: Instante captado durante el proceso de perforación.

Se introdujo un nivel de carga vertical en la cabeza del muro próximo a 60 t, Fig. 4.1.100, que simula la carga que existiría en un edificio real, y con posterioridad se realizó el ensayo.



Fig. 4.1.100: Introducción de la carga durante el ensayo. El nivel medio de carga vertical mantenido constante en la cabeza del muro fue de 60,808.2 kp.

En la Fig. 4.1.101 se presentan los registros de la evolución de la deformación de cada galga a lo largo del ensayo.

Bajo la carga referida mantenida constante, tomando como origen relativo los valores de la deformación, previamente al taladrado, una vez estabilizados (Tabla 4.1.19), la gráfica de evolución de la deformación con el tiempo toma el aspecto siguiente (Fig. 4.1.102):

Tabla 4.1.19: Deformación una vez estabilizada la carga previamente al taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	-619.7	-431.7	88.7	-20.6	-612.0	-304.0	110.7	-249.3

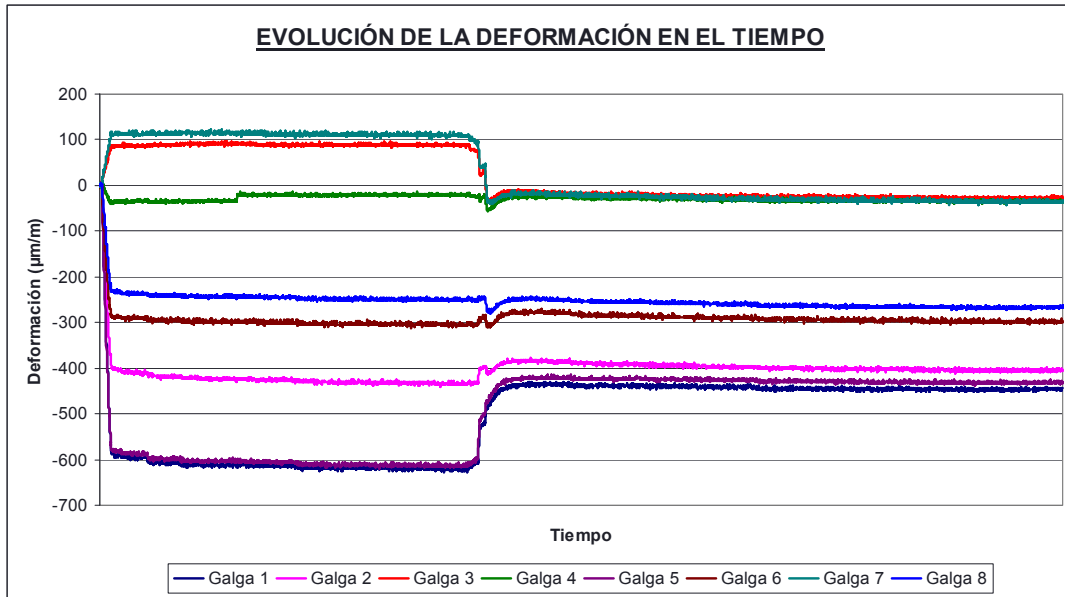


Fig. 4.1.101: Evolución registrada en la deformación de cada galga a lo largo del ensayo HDS8.

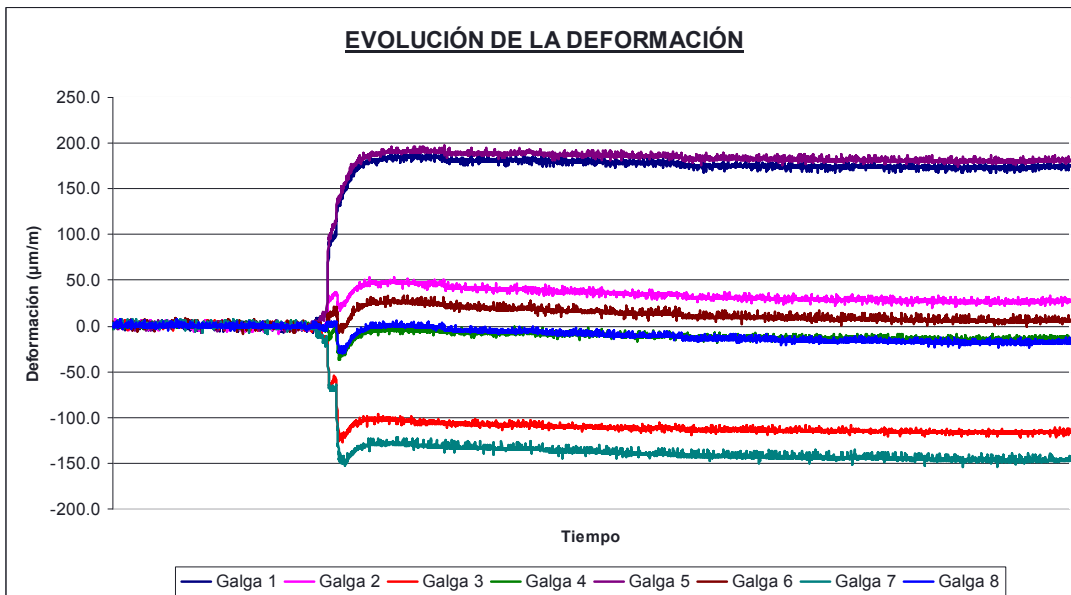


Fig. 4.1.102: Traslación de los registros con el objetivo de tomar como origen relativo para el procesado del ensayo, el instante en que los valores presentados por las galgas se estabilizan.

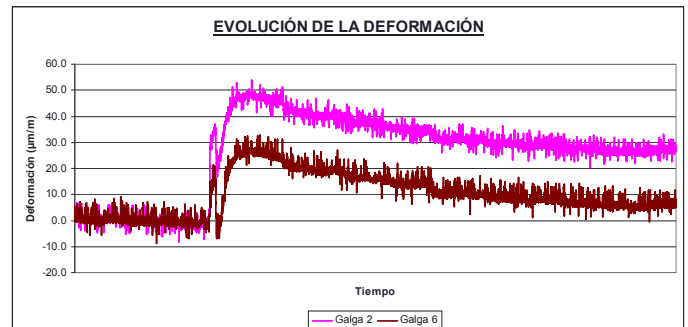
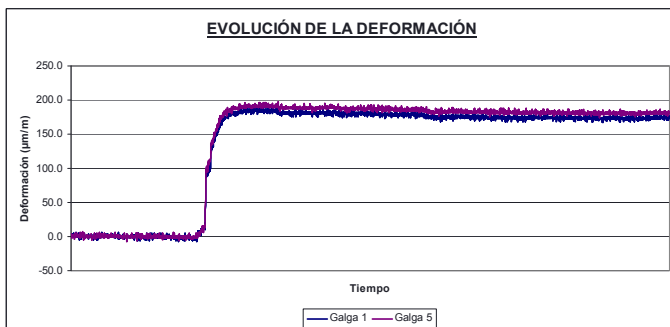


Fig. 4.1.103-4.1.104: Evolución de la deformación en el tiempo de las galgas, dos a dos (se representan conjuntamente las diametralmente opuestas).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

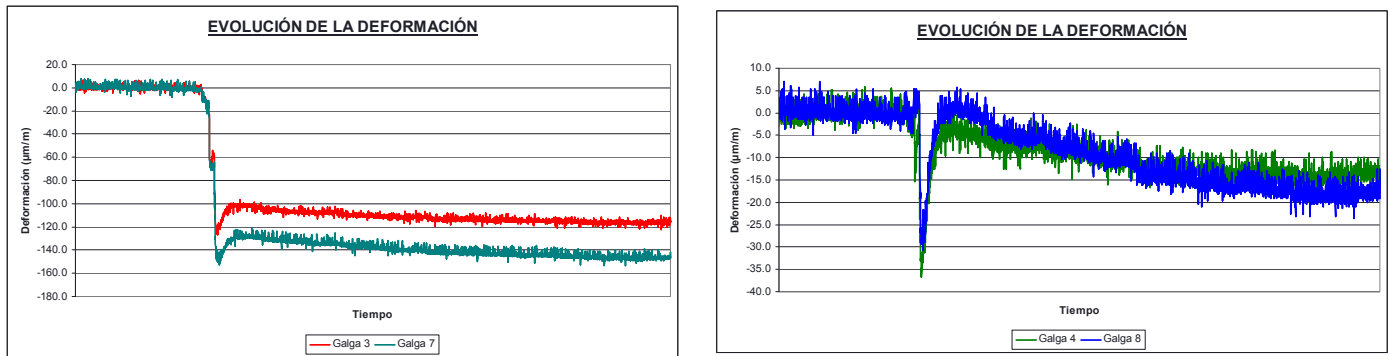


Fig. 4.1.105-4.1.106: Evolución de la deformación en el tiempo de las galgas, dos a dos (se representan conjuntamente las diametralmente opuestas).

Las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$ durante los últimos 30 minutos del ensayo. En vista de lo referido, se considera como incremento deformacional de las galgas, tras el taladrado, los valores de la Tabla 4.1.20.

Tabla 4.1.20: Incremento deformacional registrado por las galgas extensométricas, manteniendo constante la carga en coronación del muro, después del taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	173.8	27.4	-115.8	-13.9	180.9	6.6	-145.8	-17.7

En base a las deformaciones referidas y procediendo con la teoría de la elasticidad, para cada una de las ocho combinaciones de galgas extensométricas existentes, pueden obtenerse (Tabla 4.1.21) las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente, medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Tabla 4.1.21: Obtención, para cada una de las combinaciones de galgas, de las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente (β), medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Combinación	Canales	σ_{max} (N/mm^2)	σ_{min} (N/mm^2)	β ($^\circ$)	σ_{vert} (N/mm^2)
1	1, 3, 6	1.7	-3.89	86	-3.86
2	2, 4, 7	2.68	-3.19	49	-3.16
3*	3, 5, 8	1.76	-4.21	9	-4.06
4	4, 6, 1	3.52	-3.25	-43	-3.24
5	5, 7, 2	2.46	-3.78	-88	-3.77
6*	6, 8, 3	2.32	-1.9	48	-1.89
7	7, 1, 4	2.56	-3.62	5	-3.57
8	8, 2, 5	3.2	-3.56	-41	-3.53
$\sigma_{\text{vert, Promedio}}$ (N/mm^2)					-3.52
$\sigma_{\text{vert, Desvest}}$ (N/mm^2)					0.28
Coef. de variación					7.92%

* Por criterios estadísticos (obtener un coeficiente de variación inferior al 10%) no se han tenido en cuenta las combinaciones 3 y 6.

La tensión vertical promedio estimada en el ensayo es de **3.52 N/mm^2** (compresión), presentando un coeficiente de variación de 7.92%. Se remite al lector al registro de ensayo Lab0819 adjunto en el Anexo 3 para una consulta más detallada del procesado de los resultados.

Por otra parte la tensión vertical media existente en el punto de ensayo es de **3.11 N/mm^2** (compresión):

$$\sigma_{\text{media}} = \frac{60,808.2kp}{63 \cdot 31 \text{cm}^2} = 31.14 \frac{kp}{\text{cm}^2} = 3.11 \frac{N}{\text{mm}^2} \text{ (compresión)}$$

4.1.5.8.2 Ensayo hole drilling HDS9 (Videocorrelación)

En lo que sigue se pasa a resumir los trabajos desarrollados en relación a un ensayo de hole drilling (Fig. 4.1.107), en el cuál se procedió al registro de las deformaciones del área de ensayo mediante la técnica de la videocorrelación digital de imágenes (Fig. 4.1.108).

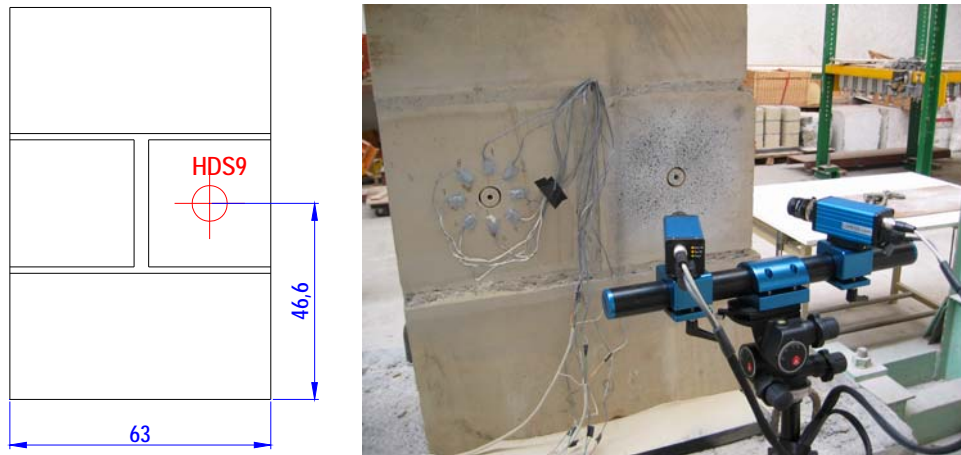


Fig. 4.1.107: Alzado del murete de sillería con la localización del HDS9 (el ensayo fue realizado en la cara opuesta de los HDS6 y HDS7 ejecutados en el mismo murete de arenisca). El espesor del murete son 31 cm. Las cotas referidas son en cm.

Fig. 4.1.108: Instante captado durante el registro de deformaciones mediante la técnica de la videocorrelación digital.

4.1.5.8.2.1 Fundamentos de la correlación digital de imágenes (DIC).

La técnica de correlación digital de imágenes comenzó a desarrollarse a principios de los años 80 por investigadores de la Universidad de Carolina del Sur (Peters y Ransom 1982). La idea en la que se basa el método es la de calcular el desplazamiento del componente objeto de medida mediante un tracking de la deformación de un patrón moteado en imágenes obtenidas durante el proceso de carga (Fig. 4.1.109).

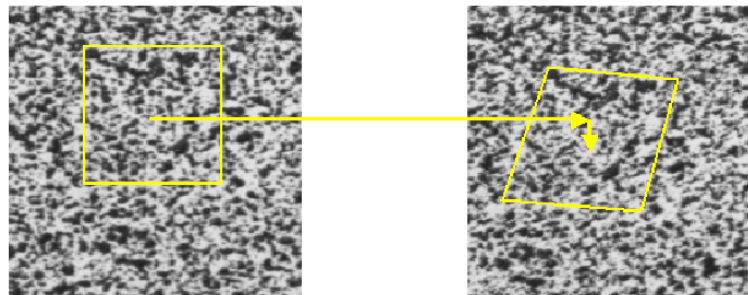


Fig. 4.1.109: Patrón aleatorio antes y después de la deformación (Schön 2008).

El proceso de análisis de imágenes puede ser entendido como una técnica de reconocimiento de patrones que busca localmente el patrón moteado aleatorio comparando imágenes del elemento deformado con el estado de referencia (imagen de referencia). Mediante el uso de una única cámara se pueden tomar medidas en dos dimensiones (en el plano de la superficie que se está midiendo), obteniendo las componentes u , v de desplazamiento y las componentes de deformación e_{xx} , e_{yy} , e_{xy} cuando el espécimen es plano.

Recientemente, el método de la correlación digital de imágenes (DIC) ha sido extendido al uso de múltiples cámaras, pudiendo obtenerse medidas en elementos tridimensionales, así como el cálculo de sus deformaciones en tres dimensiones (Helm et al. 1996). La técnica de medida en tres dimensiones requiere el uso de al menos dos cámaras sincronizadas adquiriendo imágenes del componente sometido a carga desde distintos ángulos. Mediante la determinación de los puntos correspondientes a las imágenes de las distintas cámaras y realizando un tracking del

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

movimiento a través del ciclo de carga, la forma y la deformación pueden ser reconstruidas en base a una simple calibración de cámaras. Usando dos o más cámaras es posible medir las coordenadas (x,y,z) del objeto, los desplazamientos (u,v,w), y las deformaciones, teniendo en cuenta los movimientos de sólido rígido.

Montaje del Sistema.

El montaje experimental para el método DIC en 3 dimensiones es sencillo y se ilustra en la Fig. 4.1.110. Las dos cámaras se montan en una barra de alta rigidez con el fin de evitar movimientos relativos entre las mismas.

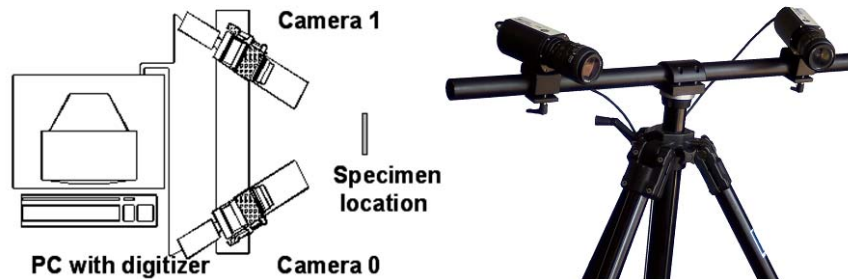


Fig. 4.1.110: Montaje estereoscópico para medida de deformaciones en 3D (Schön 2008).

El método DIC no requiere el uso de iluminación láser, de forma que el espécimen puede ser iluminado con una fuente de luz blanca. Sin embargo, la superficie a medir debe tener un patrón aleatorio uniforme, que suele ser aplicado antes de la toma de medidas. Los patrones aleatorios pueden ser obtenidos mediante spray de pintura, pegatinas, etc.

Análisis de imágenes.

Aunque se han desarrollado una gran variedad de algoritmos DIC a lo largo de los años (Peters W.H. y Ransom W.F 1982; Sutton et al. 1986; Schreier et al. 2000; Chen et al. 1993; Synnergren y Sjoedahl 1999), un método se ha establecido como el preferido en análisis de deformación debido a su capacidad para medir grandes rotaciones y deformaciones arbitrarias, así como por su mayor precisión y eficiencia. Como las coordenadas deformadas no coincidirán con la cuadrícula de muestreo de la imagen, se requieren técnicas de interpolación en la escala de grises de la imagen para obtener una precisión óptima (Schreier et al. 2000).

En medidas de elementos tridimensionales se usa un algoritmo similar. Sin embargo, la función para el “mapping” de la superficie se basa en parámetros conocidos de calibración de las cámaras. Los parámetros de visionado son la localización y orientación de un segmento de la superficie, asumiéndose éste como localmente plano.

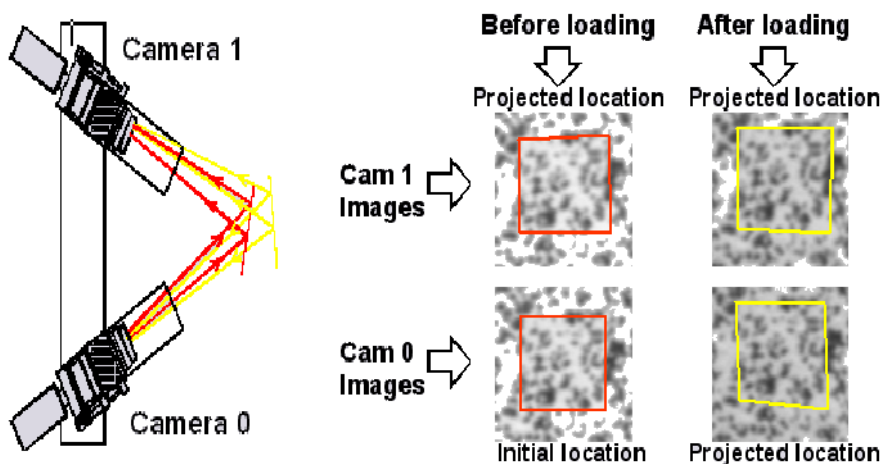


Fig. 4.1.111: Principio de medida en 3D (Schön 2008).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Para medidas de deformación se añaden a las funciones de “mapping” parámetros adicionales descriptores de la orientación y la posición del segmento de la superficie tras la deformación, así como parámetros descriptores de los componentes de deformación de orden superior. La Fig. 4.1.111 muestra un esquema del proceso.

Calibración.

En contraposición a los sistemas de dos dimensiones (donde la calibración se realiza simplemente determinando un factor de escala), los sistemas en 3D deben ser calibrados.

Esta calibración se realiza de forma automática y envuelve la adquisición de una serie de imágenes de una tarjeta de calibración patrón que debe posicionarse en distintas orientaciones (rotaciones alrededor de los tres ejes).

La Fig. 4.1.112 muestra dos imágenes de muestreo para la calibración. Por su parte la Fig. 4.1.113 ilustra un instante captado durante el proceso de calibración del sistema en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria. Con estas imágenes de la tarjeta de calibración patrón, los parámetros de trabajo de las cámaras y su orientación relativa son ajustados automáticamente en pocos segundos (Triggs et al. 2000). Una vez que el sistema ha sido calibrado, es posible comenzar a tomar las medidas de deformación del componente objeto de medida o ensayo.

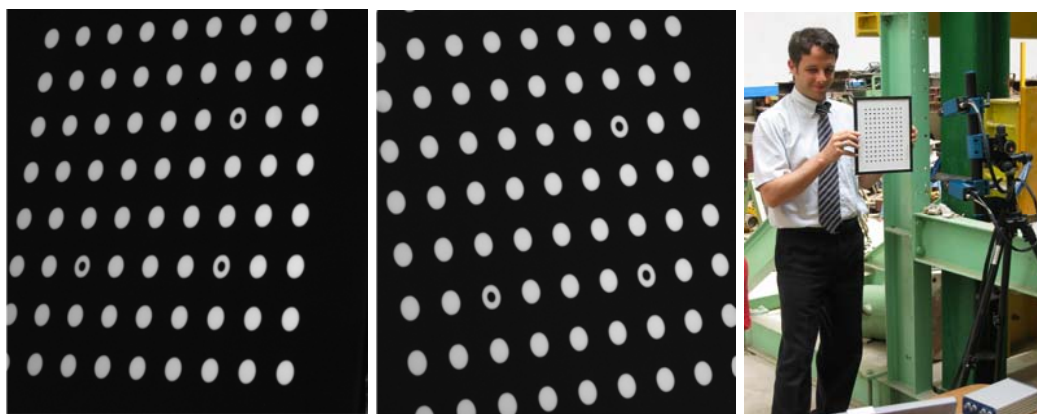


Fig. 4.1.112: Imágenes de una tarjeta de calibración patrón obtenidas durante una calibración por dos cámaras distintas (Schön 2008).

Fig. 4.1.113: Instante captado durante el proceso de calibración del sistema en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

Adquisición de medidas

En medidas de deformaciones en 3D se hace necesario realizar varias correlaciones entre imágenes:

1. Comparación de las imágenes obtenidas por las cámaras izquierda y derecha (Stereo matching) para calcular las coordenadas 3D (forma) del espécimen.
2. Tracking temporal entre las imágenes del espécimen deformado y las imágenes de referencia (espécimen antes de la deformación) para calcular los desplazamientos y deformaciones del espécimen.

La Fig. 4.1.114 ilustra las múltiples correlaciones entre imágenes. Gracias a esta correlación es posible calcular la precisión de la medida, obteniéndose una referencia de la calidad de la misma.

4.1.5.8.2 Resultados de la campaña experimental.

Hasta el día de hoy no se tiene constancia de aplicaciones específicas en “Rehabilitación del Patrimonio Construido”, pero el gran potencial de esta técnica hace pensar que podría aplicarse en este campo en un futuro cercano. Con esta idea, la Universidad de Cantabria, ADICO, Álava Ingenieros y LIMESS Messtechnik und Software GmbH, realizaron un ensayo hole drilling en un murete de sillería mediante medida de desplazamientos sin contacto (video-correlación digital).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

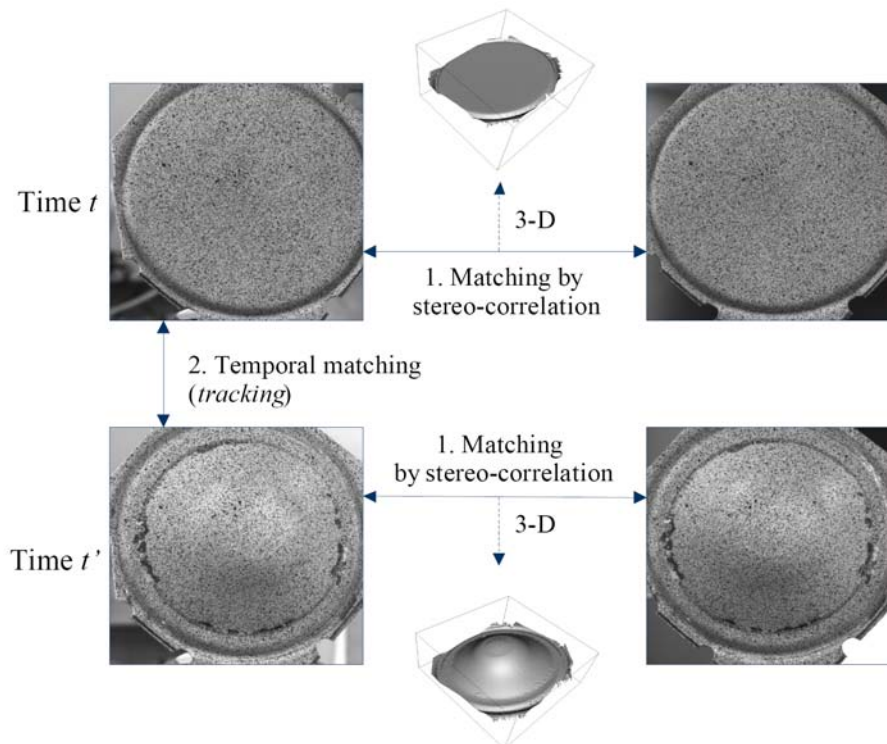


Fig. 4.1.114: Principio de funcionamiento. Estéreo-correlación y tracking temporal (Schön 2008).

Para comprobar la fidelidad de las medidas obtenidas mediante DIC, se compararon las deformaciones obtenidas mediante una serie de galgas extensométricas resistivas emplazadas en la zona izquierda de una de las hiladas componentes del murete de sillería arenisca y las medidas obtenidas mediante el sistema Vic 3D, cuya área de ensayo, una vez preparada, se observa a la derecha de la Fig. 4.1.117.

Igualmente, se han incluido las Fig. 4.1.115 y 4.1.116 que muestran el proceso para la definición del patrón moteado aleatorio de referencia.



Fig. 4.1.115 y 4.1.116: Definición del patrón aleatorio de referencia mediante spray.

Fig. 4.1.117: Instante captado durante el registro de la deformación en la zona de ensayo, tanto con bandas resistivas (a la izquierda) como mediante el sistema Vic 3D (derecha) previamente a la realización de la perforación.

Paso 1: Carga

Como ya se refirió en un apartado 4.1.5.8.1 anterior, fue introducido un nivel de carga vertical en la cabeza del muro próximo a 60 t, el cual, teniendo en cuenta la geometría del murete, supone un nivel tensional vertical de compresión de 3.11 N/mm^2 en el punto de ensayo.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Con el objetivo de comparar la deformación registrada por las galgas extensométricas con las obtenidas mediante el sistema Vic 3D se acotó dentro del patrón moteado aleatorio una superficie equivalente a la de las galgas posicionadas (de 6 mm de longitud). El centro de dichas áreas de control definen una circunferencia de 8.8 cm de diámetro concéntrica con la perforación a realizar con posterioridad. En las Fig. 4.1.118 y 4.1.119 se recoge el valor de la deformaciones e_{xx} y e_{yy} (horizontal y vertical) en un instante dado.

Una vez estabilizadas las deformaciones registradas por las bandas resistivas del ensayo HDS8 anexo, se paso a realizar la perforación.

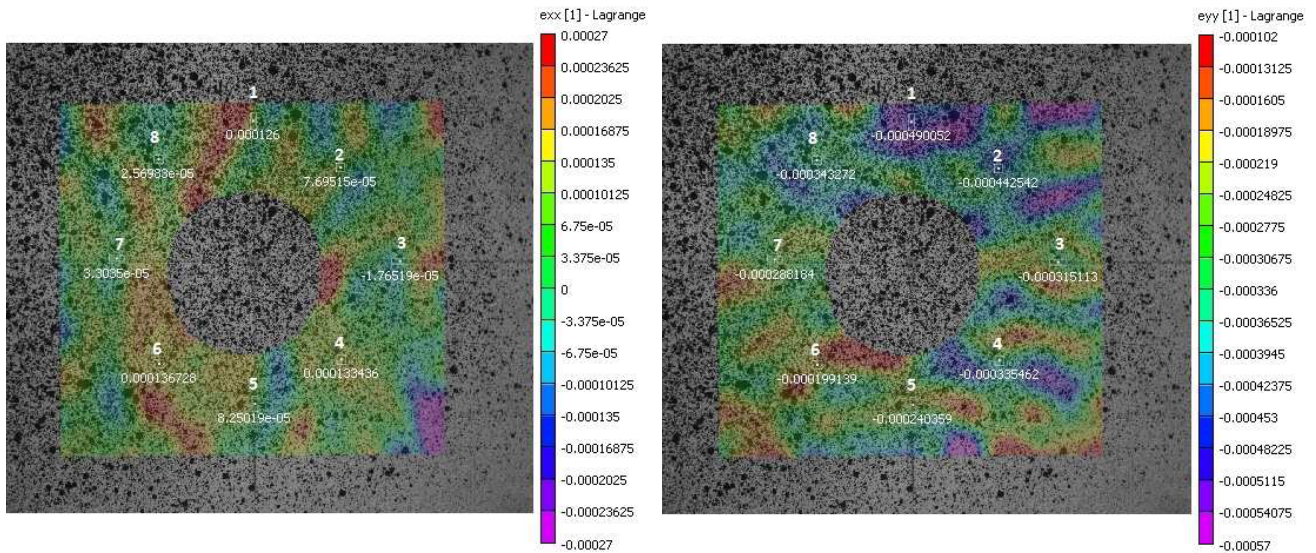


Fig. 4.1.118: Numeración de las áreas de control y valor de la deformación e_{xx} en un instante dado (Schön 2008).

Fig. 4.1.119: Numeración de las áreas de control y valor de la deformación e_{yy} en un instante dado (Schön 2008).

Paso 2: Perforación del agujero

El paso 2, consiste en la realización de la perforación (Fig. 4.1.120-122), manteniendo constante la carga en la cabeza del muro. Una vez realizado el agujero se registraron las deformaciones experimentadas por el área de ensayo, mediante video-correlación digital, durante tres horas (Fig. 4.1.123).



Fig. 4.1.120 y 4.1.121: Diferentes instantes durante la perforación del orificio.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido



Fig. 4.1.122: Detalle de la perforación una vez realizada. La profundidad de la misma fue de 37.65 cm (mayor que 0.4 el diámetro definido por el centro de las áreas de control).

Fig. 4.1.123: Instante captado del proceso de medición posterior a la realización de la perforación.

En las Fig. 4.1.124 y 4.1.125 se ilustra la distribución de la deformación e_{xx} y e_{yy} (horizontal y vertical) en un instante dado, una vez perforado el agujero.

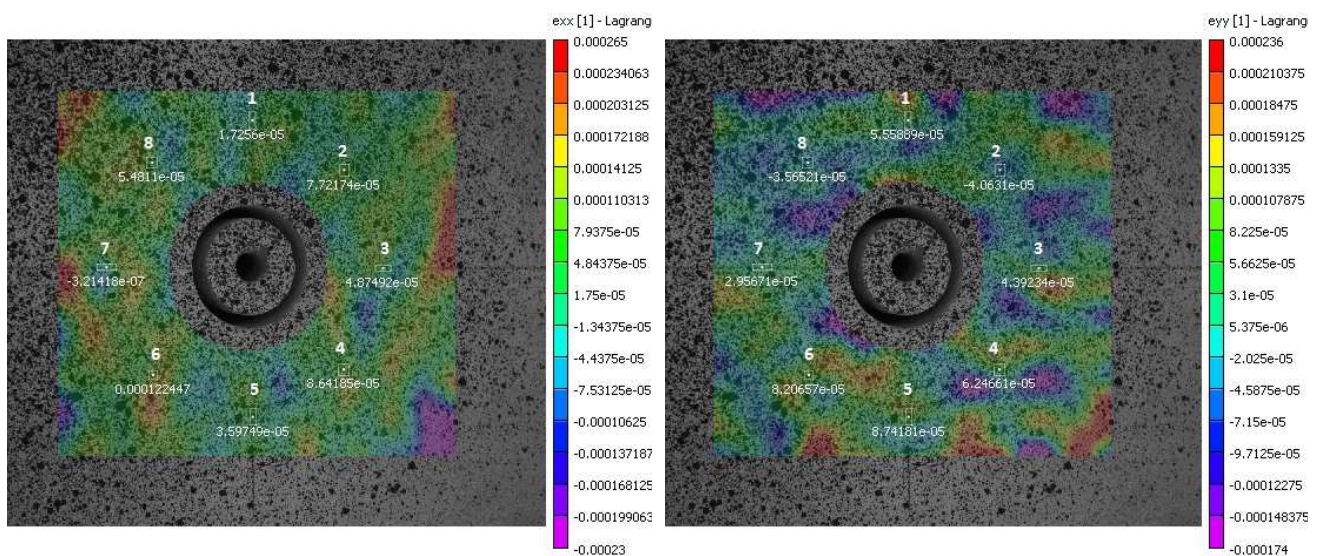


Fig. 4.1.124: Instante de la distribución de la deformación horizontal e_{xx} en el área de control, con el agujero una vez perforado (Schön 2008).

Fig. 4.1.125: Instante de la distribución de la deformación vertical e_{yy} en el área de control, con el agujero una vez perforado (Schön 2008).

4.1.5.8.3 Comparación de los resultados obtenidos por extensometría resistiva y videocorrelación digital de imágenes DIC.

En las Fig. 4.1.126 y 4.1.127 se compara la deformación registrada por la banda extensométrica vertical nº 1, a lo largo del ensayo, con la deformación vertical (e_{yy}) promediada para el área de control resaltada en rojo en la Fig. 4.1.128, de superficie equivalente a la de la galga nº 1.

Como puede comprobarse en las Fig. 4.1.126 y 4.1.127 el incremento deformacional obtenido por la galga extensométrica vertical nº 1 en el ensayo HDS8 fue de 173.8 $\mu\text{m}/\text{m}$, mientras que el estimado mediante video-correlación digital fue de 806.5 $\mu\text{m}/\text{m}$, circunstancia que pone de manifiesto que la precisión de las medidas obtenidas no fue todo lo buena que se esperaba.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

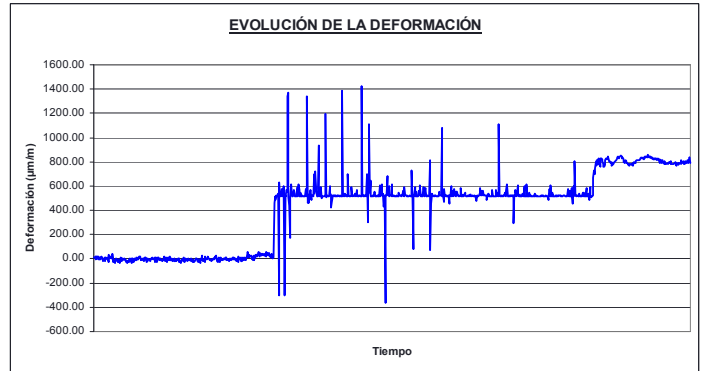
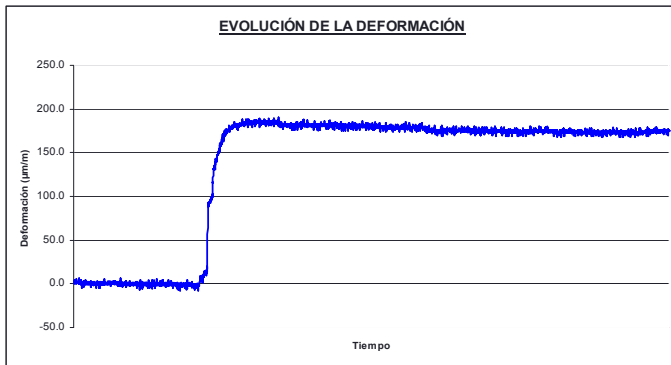
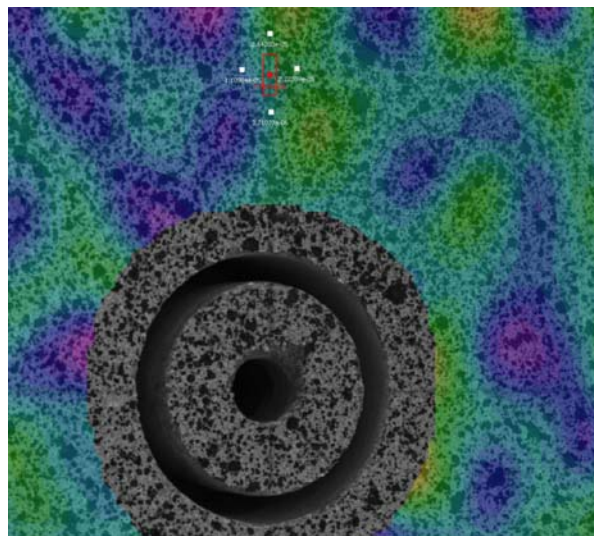


Fig. 4.1.126 y 4.1.127: Comparación de la deformación registrada por la banda extensométrica vertical nº 1, a lo largo del ensayo HDS8, con la deformación vertical (e_{yy}) promediada para el área de control resaltada en color rojo en la Fig. 4.1.128, de superficie equivalente a la de la galga nº 1.

Fig. 4.1.128: Área de control, de superficie equivalente a la de la banda extensométrica vertical nº 1, para la que se promedió la deformación vertical registrada mediante el sistema Vic 3D, con la finalidad de comparar el incremento deformacional residual estimado al final del ensayo de hole drilling con el registrado por la banda extensométrica referida (Schön 2008).



A modo de resumen, en base a los resultados obtenidos con el sistema empleado, y pese a que la técnica resulta muy atractiva e intuitiva, en lo que se refiere a la interpretación de los fenómenos que se desarrollan en el área de ensayo a lo largo del proceso (Fig. 4.1.129 y 4.1.130), en estos momentos, la precisión de las medidas no se ajusta a los requerimientos esperados para la interpretación de las deformaciones registradas mediante ensayos hole drilling en estructuras de fábrica.

Fig. 4.1.129: Instante captado durante el ensayo de un triplete de fábrica de ladrillo frente a mecanismos de corte.



Fig. 4.1.130: Mapa de desplazamientos registrado mediante el sistema Vic 3D, en la dirección de aplicación de la carga, horizontal según la disposición de la imagen (Schön 2008).



4.1.6 Ensayos de Gato plano

En el muro de sillería objeto de análisis fueron desarrollados dos campañas de gato plano. La finalidad de estos ensayos fue el contrastar experimentalmente los niveles tensionales obtenidos con la técnica de gato plano simple, dado que el nivel tensional medio en la zona de ejecución del gato plano era conocido a priori, así como el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson obtenidos mediante el ensayo de gato plano doble, en tanto que previamente se habían valorado dichas características mecánicas mediante la disposición de transductores potenciométricos (si bien esta comparación es relativa pues la medida obtenida con los transductores responde a una zona muy local).

No obstante, también se pretendió ahondar en la afección de las constantes de carácter geométrico (k_a) que afectan a los resultados, en tanto que es uno de los factores de paso de presiones registradas en la bomba a niveles tensionales en servicio. En este sentido se llevó a cabo un registro pormenorizado tanto de la superficie de la roza, como del área neta de contacto del gato con la estructura muraria, de cara a tratar de discernir cuál es la implicación, de cada uno de estos factores geométricos, en los resultados obtenidos.

Igualmente, otro de los objetivos de los ensayos se relaciona con tratar de discernir un proceso metodológico coherente para la obtención de la tensión de rotura del componente estructural y, por ende, tener conciencia del nivel de seguridad existente en el mismo. Para ello, partiendo de los ciclos de un ensayo de gato plano doble, se tratará de estimar la envolvente de rotura para, de esa forma, estimar la tensión de rotura asociada a una deformación en rotura del 3‰.

Finalmente, se intuye que la rigidez de una determinada solución constructiva de fábrica pueda estar relacionada, por un lado con la calidad de las piedras y mortero componentes, y por otro con la proporción geométrica en que aparece cada una de estas fases, referir a que esta idea subyace en la formulación de Ohler, recomendada por muchos autores como adecuada en la caracterización de fábricas históricas (Martínez et al. 2001). En este sentido se pretende proporcionar datos que contribuyan a obtener una relación que ligue el módulo de elasticidad obtenido mediante ensayo de gato plano doble, con la distribución porcentual de la fase piedra y de la fase mortero dentro de la fábrica. Obviamente, para obtener dicha relación con rigor suficiente es necesario disponer de una cantidad apreciable de resultados de ensayos, amén de la composición morfológica del componente estructural analizado, para cada tipología de fábrica planteada (por ejemplo para sillerías de roca arenisca de resistencia media y mortero de cal), aspecto que trasciende esta investigación.

Para la ejecución de los ensayos se empleó un transductor de presión de 400 Ba (5 voltios) y dos gatos hidráulicos de 126.70 cm² de área cada uno.

Debido a lo referido una señal de presión registrada de 1 voltio equivale a la siguiente carga:

$$400 \frac{kp}{cm^2} \approx 5 \text{ voltios} \rightarrow 1 \text{ voltio} \approx 80 \frac{kp}{cm^2}$$

$$1 \text{ voltio} \approx 80 \frac{kp}{cm^2} \cdot 126.70 \text{ cm}^2 \cdot 2 = 20,272 \text{ kp}$$

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Igualmente, también hay que considerar que el peso muerto que representa la viga de reparto empleada en el ensayo es de 220 kp (Fig. 4.1.131).



Fig. 4.1.131: Puesta en carga del muro.



Fig. 4.1.132: Nivel de voltaje introducido en la cabeza del muro, equivalente a 26.5 toneladas.

Por ello que una señal registrada por el transductor de presión de 4.45 voltios (Fig. 4.1.132), equivale a 90,430.4 kp, constituyendo el nivel de carga introducido en cabeza del muro para la ejecución de los ensayos de gato plano simple.

$$P_{vertical} = 20,272 \frac{kp}{voltio} \cdot 4.45 \text{ voltios} + 220 \text{ kp} = 90,430.4 \text{ kp}$$

4.1.6.1 Ensayos de gato plano GPS-A (simple y doble)

En la Fig. 4.1.133 se esquematiza la distribución de los dos gatos planos dentro del muro de sillería arenisca, así como las magnitudes necesarias para obtener el nivel tensional medio en cada uno de los planos donde se ejecutaron los ensayos, considerando un ángulo de apertura de cargas de 23° (ver apartado 4.1.3).

Tras la preparación de la zona de ensayo (pegado de los puntos de control, Fig. 4.1.134), se procedió a la ejecución del **ensayo de gato plano simple**, con la finalidad de obtener el nivel tensional vertical de compresión en servicio. Para ello, previamente fue necesario registrar la distancia existente entre los puntos de control antes del corte. A continuación, se procedió a llevar a cabo una hendidura, mediante el empleo de una sierra de disco manual, Fig. 4.1.135, que guíe la sierra de disco orbital que proporcionará el corte para la posterior inserción del gato plano (Fig. 4.1.136). Como consecuencia del corte y de la carga vertical existente, se producirá una relajación del elemento estructural en la zona de ensayo.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

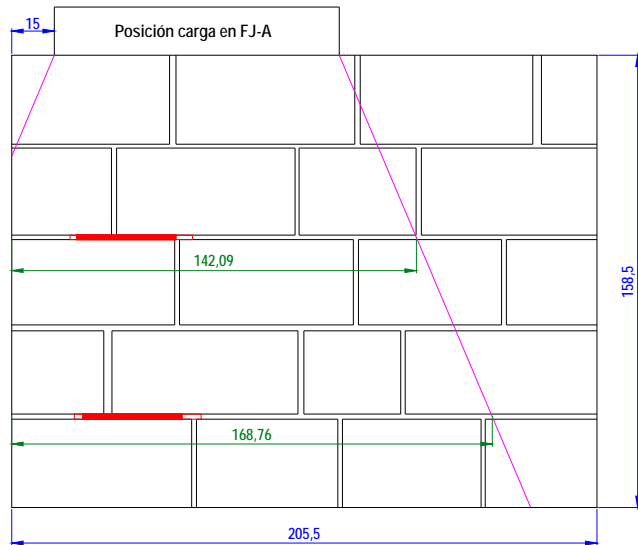


Fig. 4.1.133: Ubicación de los ensayos de gato plano simple (corresponde al emplazamiento superior) y doble GPS-A en el alzado del muro de la sillería. Las cotas relacionadas están en cm.



Fig. 4.1.134: Instante tomado durante el pegado de los puntos de control.

Fig. 4.1.135: Ejecución de una hendidura mediante sierra de disco, para posterior guiado de la sierra orbital.

Fig. 4.1.136: Ejecución de la roza para insertar el gato plano simple.

Con la finalidad de estimar el área neta de contacto entre el gato plano y el muro se dispuso un calco entre dos láminas de papel, de manera que los puntos de presión quedasen reflejados en el papel por acción del calco. Igualmente, fue estimada el área de la roza ejecutada (para una consulta más detallada del proceso se remite al lector al apartado 4.1.9). En las Fig. 4.1.137 y 4.1.138 se ilustran el área aproximada de la roza, así como el área efectiva de contacto del gato en el muro.

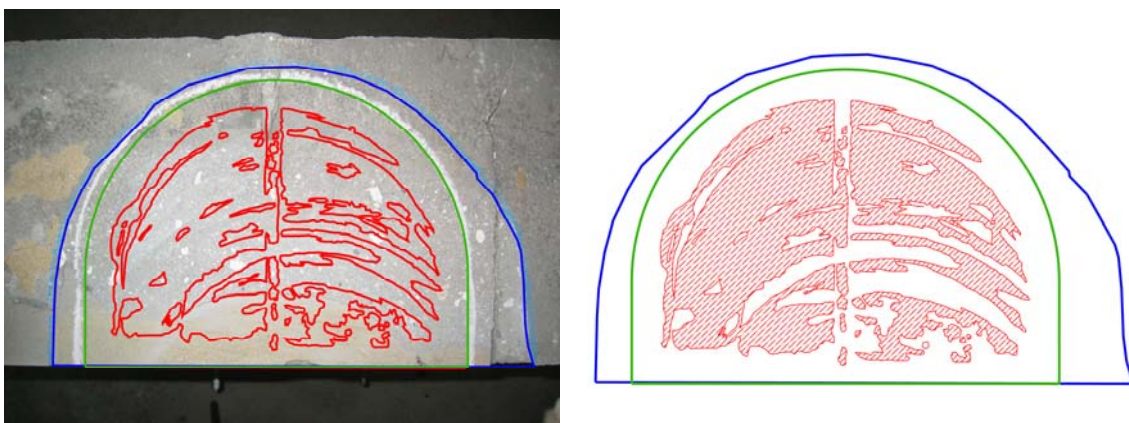


Fig. 4.1.137 y 4.1.138: Replanteo del área de la roza (963.38 cm^2), el área del gato plano GPS-A Simple (778.56 cm^2) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (355.28 cm^2).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En base a las áreas obtenidas para la roza ejecutada y para el contacto gato-muro, y conociendo la geometría del gato plano empleado en el ensayo (Semioval 350x260x3.5mm), es posible obtener las diferentes relaciones geométricas (k_a). En la Tabla 4.1.22 se resumen los factores geométricos obtenidos.

Tabla 4.1.22: Factores geométricos, k_a , obtenidos para el ensayo de gato plano simple GPS-A Simple llevado a cabo en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

	Factores geométricos, k_a , GPS-A Simple			
	Áreas (cm ²)		Constantes derivadas	
Gato plano GPS-A Simple (Fig. 4.1.138)	A_{roza}	963.38	$K_{gato-roza}$	0.808
	A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$	0.456
	$A_{contacto}$	355.28	$K_{contacto-roza}$	0.369

Por su parte, en relación a la constante de calibración de los gatos planos, k_m , se ha adoptado un valor de 0.95 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

En las Fig. 4.1.139 y 4.1.140 se han representado el área de ensayo con la finalidad de ubicar la posición de los puntos de control en el conjunto de la fábrica.

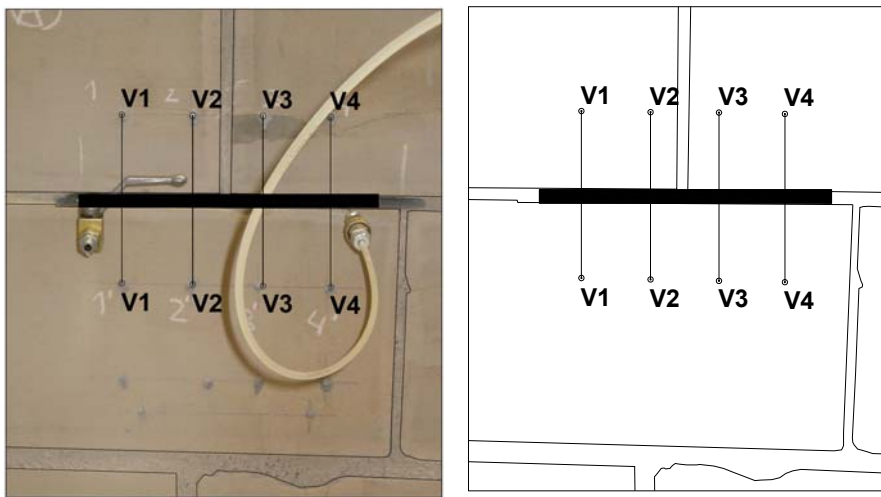


Fig. 4.1.139 y 4.1.140: Croquis del área de ensayo de gato plano simple realizado.

Una vez introducido el gato se procederá a aumentar su presión interna mediante bombeo hidráulico hasta que la distancia medida inicialmente, antes de la ejecución de la roza, se recupere (Fig. 4.1.141 y 4.1.142). En ese momento, dicha presión interna ($P_{cancelación}$), corregida con unos coeficientes relacionados con la rigidez inherente del gato, K_m y, según la literatura, con la relación de áreas existente entre el gato y la roza practicada, K_a , permitiría obtener el nivel tensional en servicio del elemento estructural analizado (σ).



Fig. 4.1.141 y 4.1.142: Proceso de presurización del gato plano y control de la evolución de las deformaciones experimentas por los puntos de control.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Los resultados del ensayo se recogen en el registro Lab0815, el cual se adjunta en el Anexo 5. No obstante, de dicho registro, se recoge a continuación la Fig. 4.1.143 que ilustra el nivel tensional en servicio existente en el elemento estructural caso de utilizar el coeficiente geométrico $K_a=K_{\text{gato-roza}}$. En este caso dicho valor alcanza los **3.49 MPa**. Igualmente en la Fig. 4.1.144 se representa para varios niveles de tensión proporcionados por el gato plano, la evolución de las deformaciones experimentadas por cada par de puntos de control.

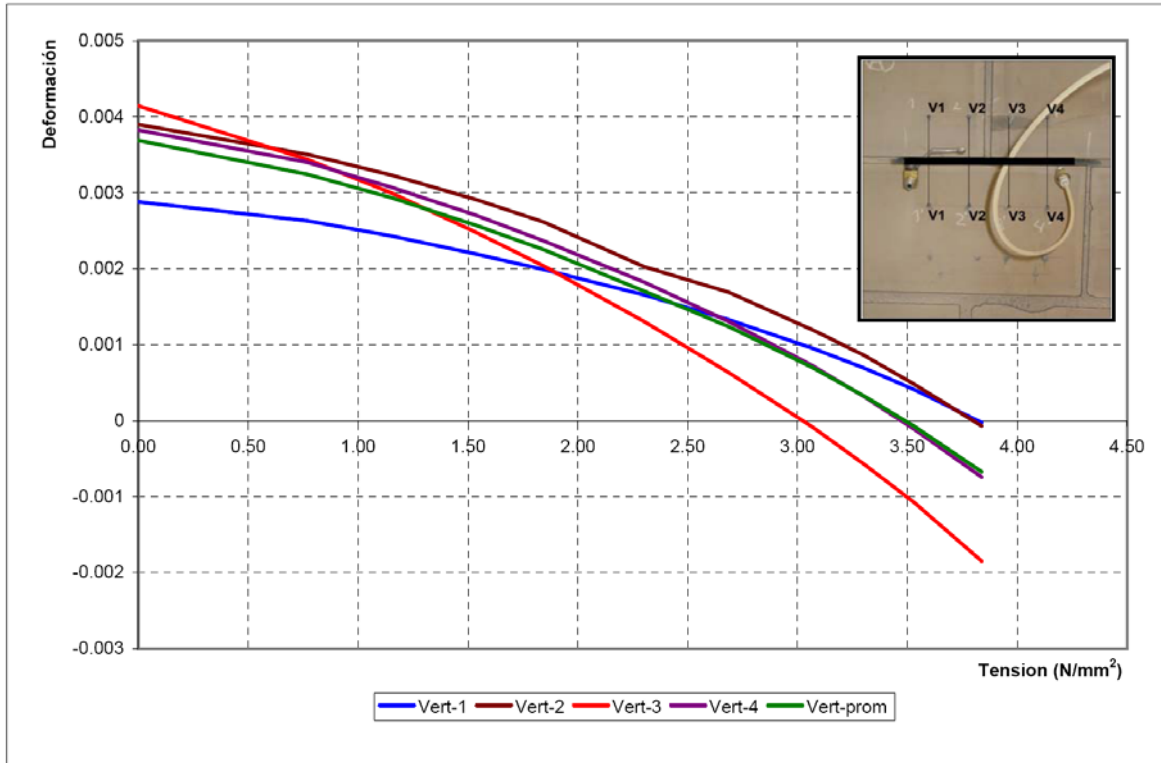
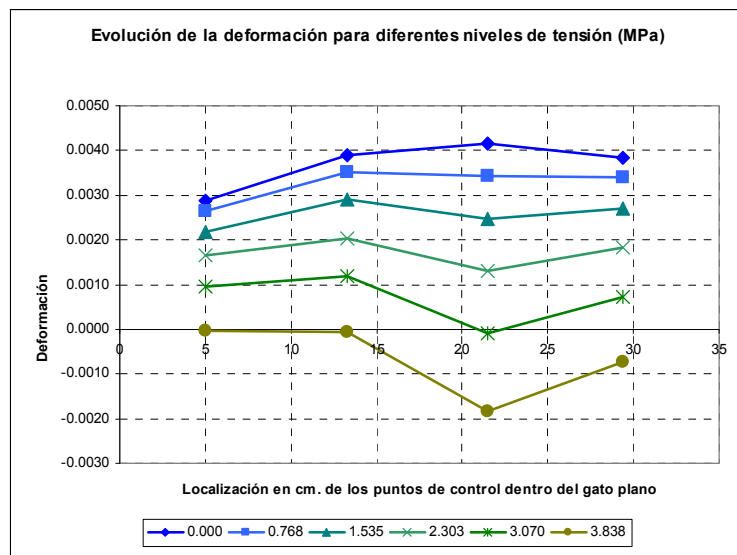


Fig. 4.1.143: Nivel tensional obtenido mediante el ensayo de gato plano simple, empleando como coeficiente corrector geométrico el que liga el área de la roza y el área del gato plano ($K_{\text{gato-roza}}$).

Fig. 4.1.144: Evolución de las deformaciones experimentadas por cada par de puntos de control, para varios niveles de tensión proporcionados por el gato plano.



De la misma forma, para cada combinación del factor de corrección por rigidez, k_m , con cada uno de los factores geométricos, k_a , obtenidos, pueden estimarse los siguientes niveles tensionales en servicio (Tabla 4.1.23).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.1.23: Estimación del nivel tensional en servicio para diferentes valores del coeficiente k_a .

	K_m	K_a	$\sigma_{\text{experimental}}$ (MPa)	σ_{media} (MPa)	$\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{media}}$
$K_{\text{gato-roza}}^1$	0.95	0.808	3.49	2.053	1.70
$K_{\text{contacto-gato}}$	0.95	0.456	1.97	2.053	0.96
$K_{\text{contacto-roza}}$	0.95	0.369	1.59	2.053	0.78

La tensión vertical media en el plano del gato plano es de 2.053 MPa.

$$\sigma_{\text{media}} = \frac{90,430.40kp}{142.09 \cdot 31cm^2} = 20.53 \frac{kp}{cm^2} = 2.053MPa \text{ (compresión)}$$

En lo que respecta al **ensayo de gato plano doble**, cuyo objetivo es obtener la ley σ - ϵ de la porción de fábrica movilizada en el ensayo, fue necesario, tras disponer los puntos de control pertinentes (Fig. 4.1.145), ejecutar una segunda roza, paralela con la realizada para el ensayo de gato plano simple (Fig. 4.1.146).



Fig. 4.1.145: Instante tomado durante el pegado de los puntos de control relacionados con el ensayo GPS-A Doble.

Fig. 4.1.146: Instante captado durante la ejecución de la roza mediante la sierra orbital.

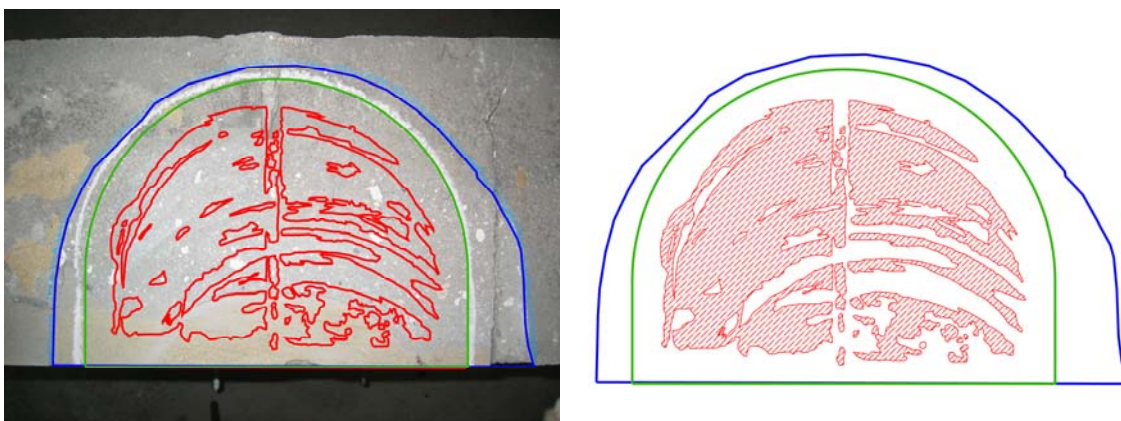


Fig. 4.1.147: Replanteo del área de la roza (963.38 cm^2), el área del gato plano superior GPD-A Doble (778.56 cm^2) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (355.28 cm^2).

¹ Relación geométrica propuesta en la normativa.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Con la finalidad de estimar el área neta de contacto entre los gatos planos y el muro se dispuso un calco entre dos láminas de papel, de manera que los puntos de presión quedasen reflejados en el papel por acción del calco. Igualmente, fueron estimadas las áreas de las rozas ejecutadas (para una consulta más detallada del proceso se remite al lector al apartado 4.1.9). En las Fig. 4.1.147 se ilustra el área aproximada de la roza, así como el área efectiva de contacto del gato en el muro, para el gato plano superior del ensayo GPS-A Doble (es el mismo gato que el simple relacionado con anterioridad GPS-A Simple).

Por su parte en las Fig. 4.1.148 se ilustra el área aproximada de la roza, así como el área efectiva de contacto del gato en el muro, para el gato plano inferior del ensayo GPS-A Doble.

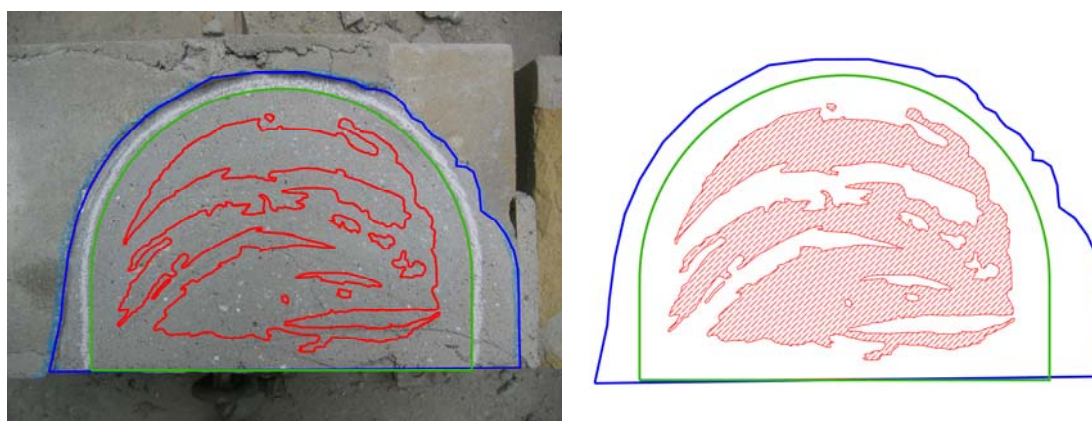


Fig. 4.1.148: Replanteo del área de la roza (957.43 cm²), el área del gato plano inferior GPD-A Doble (778.56 cm²) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (345.73 cm²).

En base a las áreas obtenidas tanto para las rozas ejecutadas, como para el área efectiva de contacto, y conociendo la geometría de los gatos planos empleados en el ensayo (Semioval 350x260x3.5mm), es posible obtener diferentes relaciones geométricas (k_a). En la Tabla 4.1.24 se resumen los factores geométricos obtenidos.

Tabla 4.1.24: Factores geométricos, k_a , obtenidos para cada uno de los dos gatos planos involucrados en el ensayo GPS-A Doble.

Factores geométricos, k_a , GPS-A Doble			
		Áreas (cm ²)	Constantes derivadas
Gato plano superior (Fig. 4.1.147)	A_{roza}	963.38	$K_{gato-roza}$ 0.808
	A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$ 0.456
	$A_{contacto}$	355.28	$K_{contacto-roza}$ 0.369
Gato plano inferior (Fig. 4.1.148)	A_{roza}	957.43	$K_{gato-roza}$ 0.813
	A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$ 0.444
	$A_{contacto}$	345.73	$K_{contacto-roza}$ 0.361

A su vez, en la Tabla 4.1.25 se presentan los valores medios obtenidos para dichos factores geométricos.

Tabla 4.1.25: Valores medios obtenidos para los factores geométricos, k_a , involucrados en el ensayo GPS-A Doble.

Factores geométricos, k_a , GPS-A Doble	
$K_{gato-roza}$	0.811
$K_{contacto-gato}$	0.450
$K_{contacto-roza}$	0.365

Por su parte, en relación a la constante de calibración de los gatos planos, k_m , se ha adoptado un valor de 0.95 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

Una vez introducido el segundo gato, y tras el purgado del aire contenido en el interior del mismo hasta llenarlo de fluido hidráulico bombeado, se realizan ciclos de presurizado – despresurizado de los gatos, registrando para cada nivel de presión el desplazamiento de los puntos verticales (Fig. 4.1.149) y horizontales (Fig. 4.1.150) y, por ende, obteniendo las deformaciones asociadas a

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

cada ciclo. De esta manera se grafica la ley σ - ϵ para la porción de fábrica ensayada, de la cuál puede obtenerse el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. Como puede comprenderse el ensayo es una especie de ensayo a compresión in situ sobre la porción de fábrica aislada por los cortes practicados.



Fig. 4.1.149: Registro de la evolución de la deformación de los puntos de control vertical a lo largo del ensayo GPS-A Doble.

Fig. 4.1.150: Registro de la evolución de la deformación de los puntos de control horizontal a lo largo del ensayo GPS-A Doble.

En la Fig. 4.1.151 se presentan los resultados obtenidos para los cuatro puntos de control vertical y los dos horizontales tras la realización de 4 ciclos de carga y descarga, considerando como factor geométrico el que relaciona el área del gato plano con el área de las rozas ejecutadas ($K_{\text{gato-roza}}$). El punto de control vertical n° 1 registró un comportamiento muy discordante del resto de puntos de control vertical, mostrando un comportamiento mucho más rígido, por ello que dicho punto n° 1 no se tuvo en cuenta en el procesado posterior de los datos.

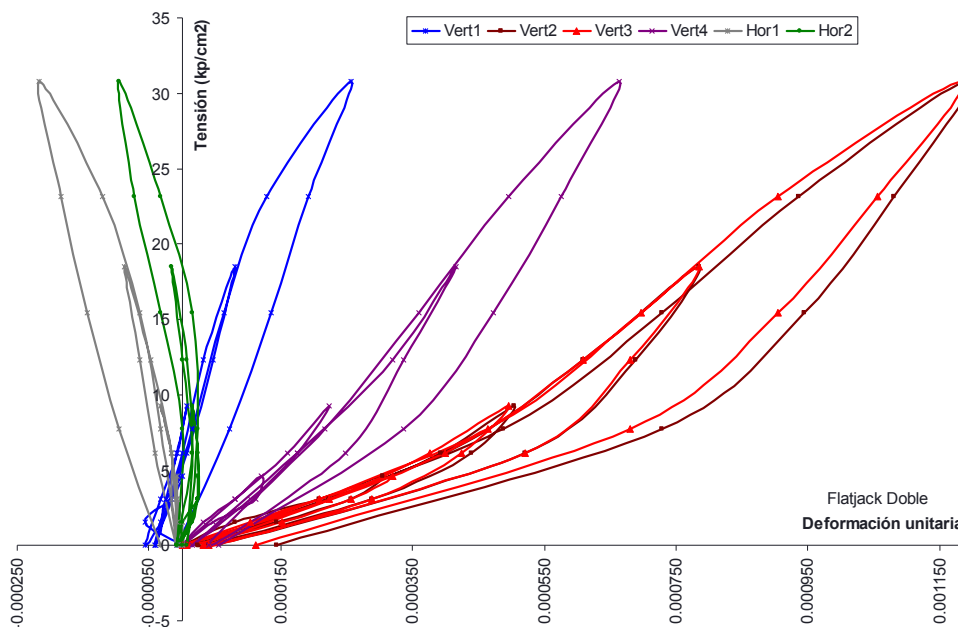


Fig. 4.1.151: Leyes σ - ϵ obtenidas para los cuatro puntos de control vertical (base de medida 200 mm) y para los dos puntos de control horizontal (base de medida 200 mm).

Por su parte, en la Fig. 4.1.152 se presentan las leyes tensión – deformación promedio, obtenidas en el área de ensayo tanto para los puntos de control verticales, a excepción del n° 1, como para los horizontales.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

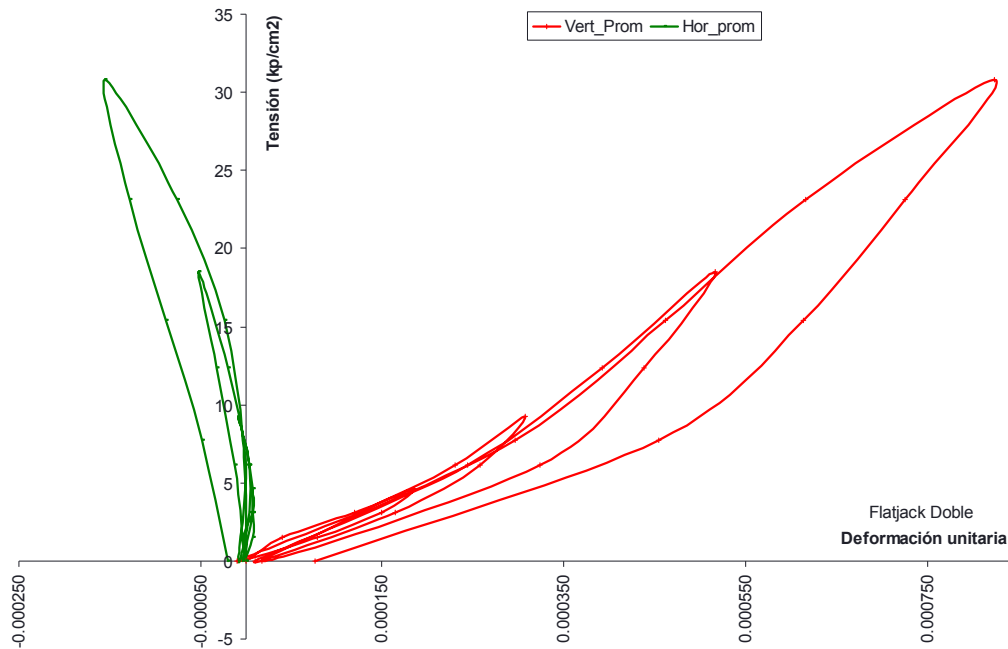


Fig. 4.1.152: Leyes σ - ϵ promedio obtenidas en el ensayo GPS-A Doble.

A partir de las curvas anteriores puede comprobarse que la envolvente de las mismas presenta un comportamiento lineal bastante acusado en toda su extensión, circunstancia que pone de manifiesto que todavía se está en el rango elástico de la fábrica, si bien la presencia de cierta concavidad dificulta la interpretación de los resultados. Por su parte en la Fig. 4.1.153 se han representado los ciclos realizados así como los puntos máximos que definen la envolvente de los mismos. A dichos puntos se ha ajustado una curva logarítmica en base a la cual se ha estimado la tensión de rotura asociada a una deformación del 3‰ (Tassios 1988), obteniendo un valor de 6.28 MPa. Puede verificarse como el coeficiente de correlación obtenido es muy próximo a la unidad.

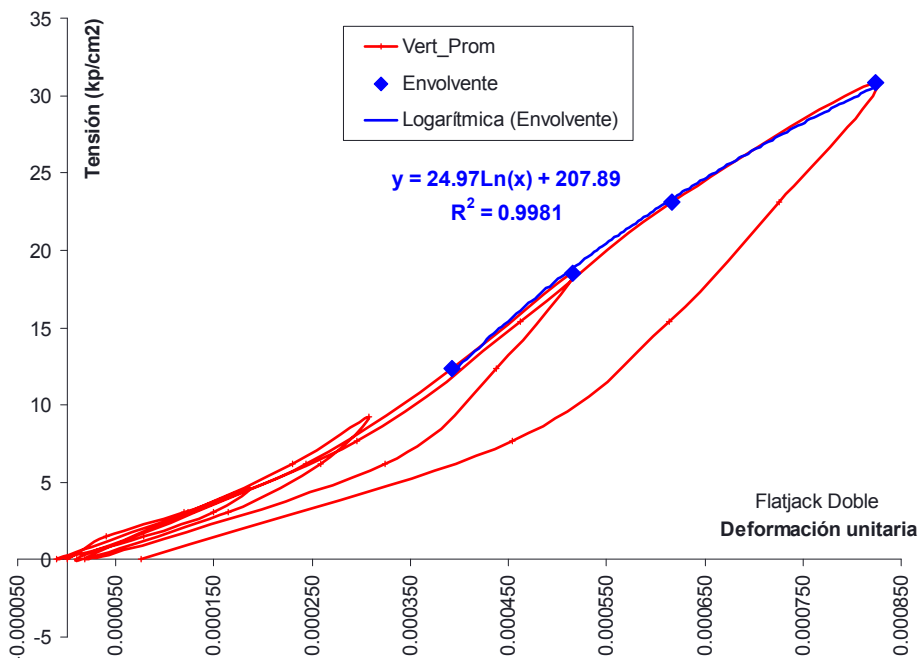


Fig. 4.1.153: Envlovente de rotura y ajuste logarítmico obtenido ($R^2 = 0.9981$).

Igualmente, a partir de las curvas obtenidas (Fig. 4.1.151 y 4.1.152) puede estimarse las características mecánicas, módulo de deformación y coeficiente de Poisson, para dicha sillería arenisca. Dichos parámetros mecánicos serán función de los factores k_a y k_m , en tanto que la

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

tensión instalada depende de la presión interna movilizada en los gatos planos mediante el grupo de bombeo y de dichos factores de corrección.

En la Tabla 4.1.26 se presentan las características mecánicas obtenidas en cada uno de los ciclos realizados, sin tener en cuenta el punto de control n° 1 dado su comportamiento discordante del resto, considerando como factor geométrico el que relaciona el área del gato plano con el área de las rozas ejecutadas ($K_{\text{gato-roza}}$). Cabe llamar la atención a que dichas características mecánicas se corresponden con las obtenidas para un intervalo de presiones [p_1 , p_2], por ello que el módulo de deformación obtenido sea un módulo secante.

Tabla 4.1.26: Características mecánicas, E y ν , obtenidas en el ensayo GPS-A Doble empleando como factor geométrico $k_a = K_{\text{gato-roza}}$.

Ciclo	p_1^* (kp/cm ²)	p_2^* (kp/cm ²)	$E_{p_1-p_2}$ (kp/cm ²)				$E_{p_1-p_2_promedio}$ (kp/cm ²)	$\nu_{p_1-p_2_promedio}$
			Vert 1	Vert 2	Vert 3	Vert 4		
1	0	4	192,613.00	14,816.00	14,816.00	38,523.00	22,718.33	-
2	0	8	128,408.00	16,051.00	16,749.00	38,523.00	23,774.33	-
3	0	16	171,211.00	21,108.00	21,703.00	40,550.00	27,787.00	-0.03
4	0	20	148,163.00	22,397.00	23,206.00	48,153.00	31,252.00	-0.05
							26,382.92	-0.04

* p_1 y p_2 indican el intervalo de presiones para el cuál se ha obtenido el módulo de elasticidad secante ($E_{p_1-p_2}$) y el coeficiente de Poisson ($\nu_{p_1-p_2}$).

De la misma forma podrían obtenerse las características mecánicas teniendo en cuenta los factores geométricos que relacionan el área del gato y el área efectiva de contacto entre el gato plano y el muro ($K_{\text{contacto-gato}}$), o el que relaciona las áreas de las rozas con dicha área de contacto ($K_{\text{contacto-roza}}$). Un resumen de las características mecánicas obtenidas en cada uno de los ciclos empleando los diferentes factores geométricos obtenidos se presentan en la Tabla 4.1.27.

Tabla 4.1.27: Características mecánicas, E y ν , obtenidas en el ensayo GPS-A Doble empleando los diferentes factores geométricos, k_a , calculados,

Ciclo	p_1 (kp/cm ²)	p_2 (kp/cm ²)	k_m	K_a	$E_{p_1-p_2_promedio}$ (kp/cm ²)	$\nu_{p_1-p_2_promedio}$	
1	0	4	0.95	$K_{\text{gato-roza}}$	0.811	22,718.33	-
				$K_{\text{contacto-gato}}$	0.450	12,605.67	-
				$K_{\text{contacto-roza}}$	0.365	10,224.67	-
2	0	8	0.95	$K_{\text{gato-roza}}$	0.811	23,774.33	-
				$K_{\text{contacto-gato}}$	0.450	13,191.33	-
				$K_{\text{contacto-roza}}$	0.365	10,700.00	-
3	0	16	0.95	$K_{\text{gato-roza}}$	0.811	27,787.00	-0.03
				$K_{\text{contacto-gato}}$	0.450	15,418.00	-0.03
				$K_{\text{contacto-roza}}$	0.365	12,506.00	-0.03
4	0	20	0.95	$K_{\text{gato-roza}}$	0.811	31,252.00	-0.05
				$K_{\text{contacto-gato}}$	0.450	17,341.00	-0.05
				$K_{\text{contacto-roza}}$	0.365	14,065.33	-0.05

Como conclusión, aceptando el considerar como factor geométrico, k_a , el que relaciona el área del gato plano con el área de las rozas ejecutadas ($K_{\text{gato-roza}}$), dado que es el que propone la normativa, podría considerarse un módulo de elasticidad secante de 2,638.29 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.04.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Para una consulta más detallada del ensayo, se remite al lector al registro Lab0816, el cuál se adjunta en el Anexo 5.

En las Fig. 4.1.154 y 4.1.155 se ha representado el área de ensayo con la finalidad de ubicar la posición de los puntos de control en el conjunto de la fábrica.

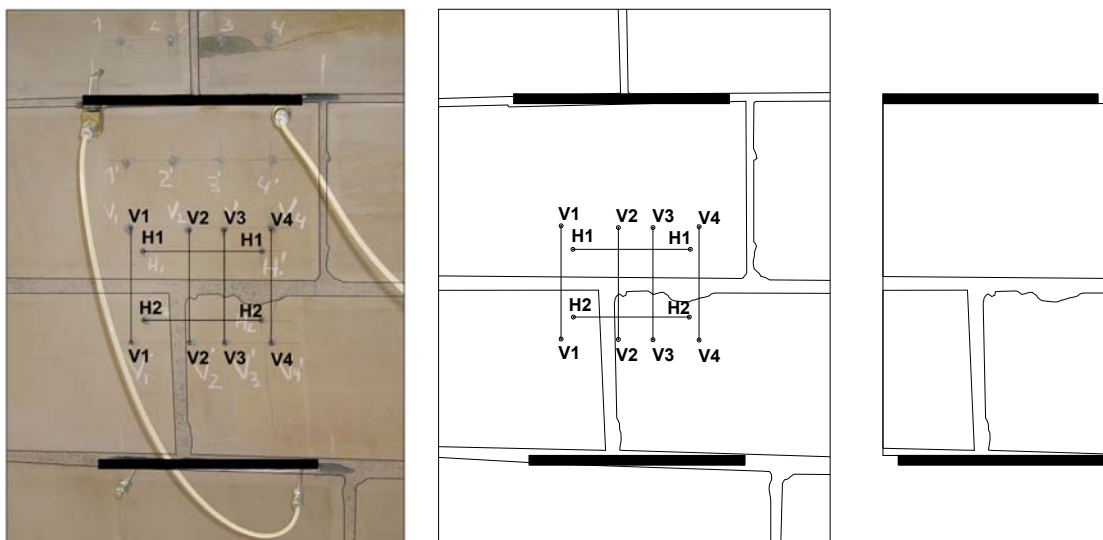


Fig. 4.1.154 y 4.1.155: Croquis del área de ensayo realizado.

Fig. 4.1.156: Detalle del área movilizada entre los dos gatos planos.

Por su parte en la Fig. 4.1.156 se ha individualizado el área rectangular definida por dos gatos planos y sendas verticales por sus extremos, con el objetivo de cuantificar, en superficie, la relación existente entre el área de mortero y el área de piedra movilizada. El fin perseguido es aportar un punto para la evaluación de la posible relación existente entre el módulo de deformación y la proporción de la fase pétreo y de la fase mortero, para el caso de una sillería arenisca blanda y mortero de cal. En este sentido en la Tabla 4.1.28 se presentan las áreas computadas y la relación referida.

Tabla 4.1.28: Área total, de piedras y de mortero calculadas a partir de la Fig. 4.1.156. Relación entre el área de mortero y el área de las piedras.

$A_{\text{total}} \text{ (cm}^2\text{)}$	2142.54
$A_{\text{piedras}} \text{ (cm}^2\text{)}$	1960.06
$A_{\text{mortero}} \text{ (cm}^2\text{)}$	182.48
$A_{\text{mortero}}/A_{\text{piedras}}$	0.09
E (Mpa)	2,638.29

4.1.6.2 Ensayos de gato plano GPS-B (simple y doble)

En la Fig. 4.1.157 se esquematiza la distribución de los dos gatos planos dentro del muro de sillería arenisca, así como las magnitudes necesarias para obtener el nivel tensional medio en cada uno de los planos donde se ejecutaron los gatos planos, considerando un ángulo de apertura de cargas de 23° (ver apartado 4.1.3).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

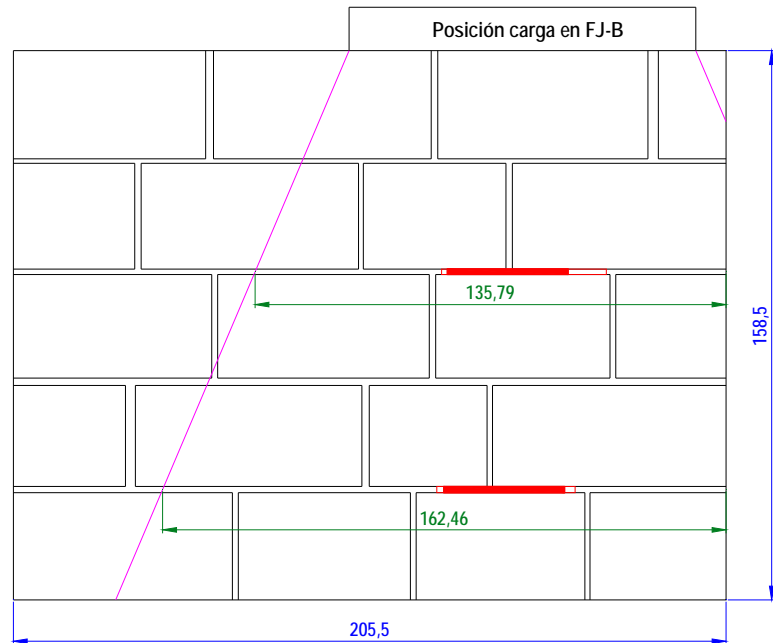


Fig. 4.1.157: Ubicación de los ensayos de gato plano simple (corresponde al emplazamiento superior) y doble GPS-B en el alzado del muro de la sillería. Las cotas relacionadas están en cm.

Tras la preparación de la zona de ensayo (pegado de los puntos de control), se procedió a la ejecución del **ensayo de gato plano simple**, con la finalidad de obtener el nivel tensional vertical de compresión en servicio. Para ello, previamente fue necesario registrar la distancia existente entre los puntos de control antes del corte (Fig. 4.1.158). A continuación, se procedió a llevar a cabo una hendidura, mediante el empleo de una sierra de disco manual, que guíe la sierra de disco orbital que proporcionará el corte para la posterior inserción del gato plano (Fig. 4.1.159). Como consecuencia del corte y de la carga vertical existente, se producirá una relajación del elemento estructural en la zona de ensayo.



Fig. 4.1.158: Medida de la distancia inicial previamente a la ejecución de la roza.

Fig. 4.1.159: Ejecución de la roza para insertar el gato plano simple.

Con la finalidad de estimar el área neta de contacto entre el gato plano y el muro se dispuso un calco entre dos láminas de papel, de manera que los puntos de presión quedasen reflejados en el papel por acción del calco. Igualmente, fue estimada el área de la roza ejecutada (para una consulta más detallada del proceso se remite al lector al apartado 4.1.9). En las Fig. 4.1.160 y 4.1.161 se ilustran el área aproximada de la roza, así como el área efectiva de contacto del gato en el muro.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

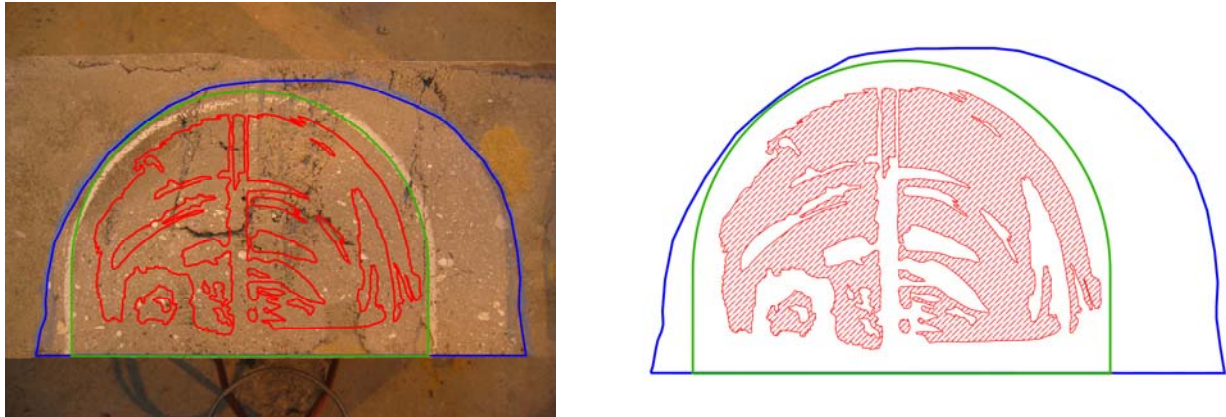


Fig. 4.1.160 y 4.1.161: Replanteo del área de la roza (1,067.19 cm²), el área del gato plano GPS-B simple (778.56 cm²) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (381.63 cm²).

En base a las áreas obtenidas para la roza ejecutada y para el contacto gato-muro, y conociendo la geometría del gato plano empleado en el ensayo (Semioval 350x260x3.5mm), es posible obtener las diferentes relaciones geométricas (k_a). En la Tabla 4.1.29 se resumen los factores geométricos obtenidos.

Tabla 4.1.29: Factores geométricos, k_a , obtenidos para el ensayo de gato plano simple GPS-B Simple llevado a cabo en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

Factores geométricos, k_a , GPS-B Simple			
		Áreas (cm ²)	Constantes derivadas
Gato plano GPS-B Simple (Fig. 4.1.161)	A_{roza}	1,067.19	$K_{gato-roza}$ 0.730
	A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$ 0.490
	$A_{contacto}$	381.63	$K_{contacto-roza}$ 0.358

Por su parte, en relación a la constante de calibración de los gatos planos, k_m , se ha adoptado un valor de 0.95 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

En las Fig. 4.1.162 y 4.1.163 se han representado el área de ensayo con la finalidad de ubicar la posición de los puntos de control en el conjunto de la fábrica.

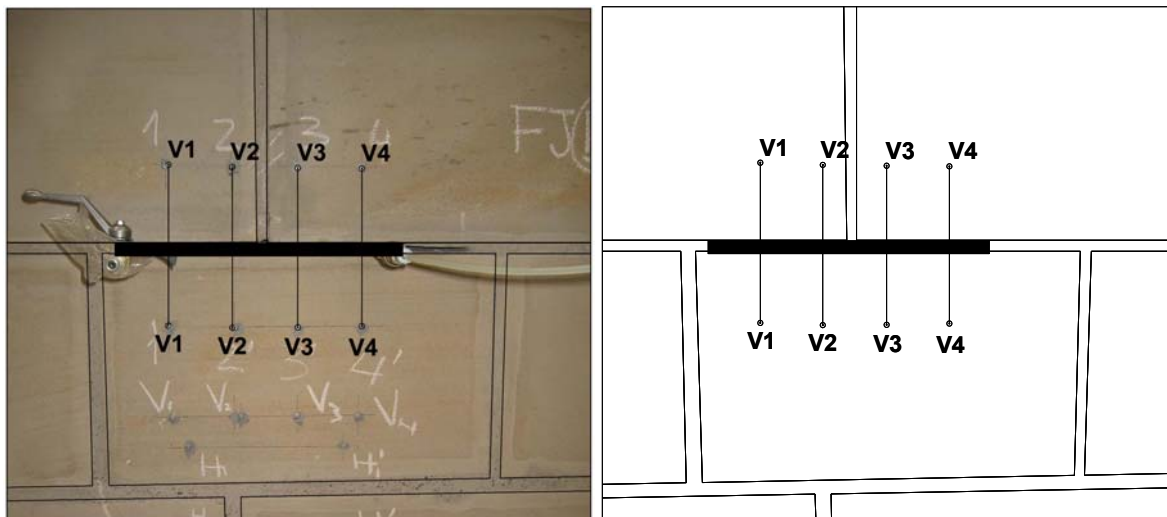


Fig. 4.1.162 y 4.1.163: Croquis del área de ensayo de gato plano simple realizado.

Una vez introducido el gato se procederá a aumentar su presión interna mediante bombeo hidráulico hasta que la distancia medida inicialmente, antes de la ejecución de la roza, se recupere (Fig. 4.1.164 y 4.1.165). En ese momento, el nivel tensional en servicio del elemento estructural analizado (σ), se obtendrá corrigiendo dicha presión interna ($P_{cancelación}$) con los coeficientes K_m y K_a ya referidos.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

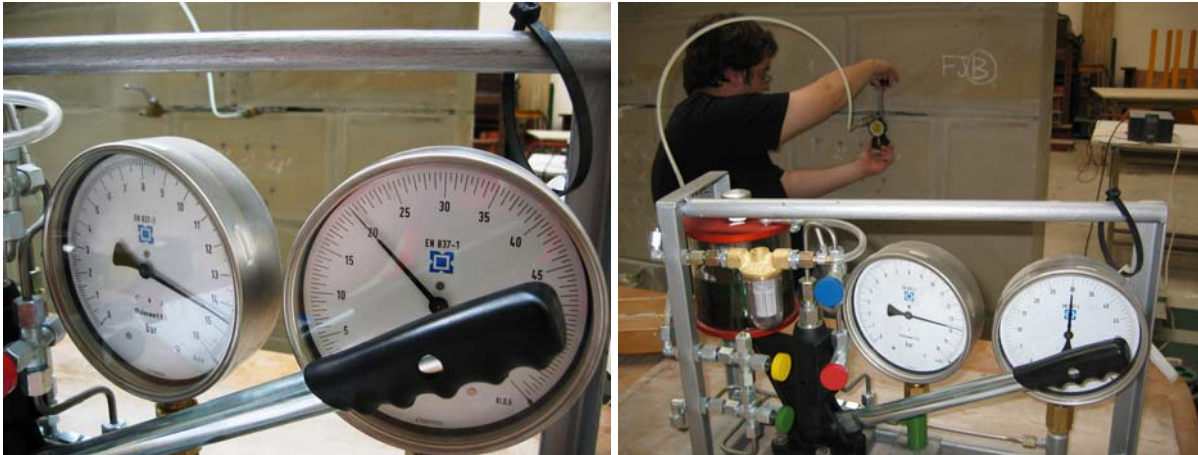


Fig. 4.1.164 y 4.1.165: Proceso de presurización del gato plano y control de la evolución de las deformaciones experimentas por los puntos de control a 20 y 30 bar respectivamente.

Los resultados del ensayo se recogen en el registro Lab0817, el cuál se adjunta en el Anexo 5. No obstante, de dicho registro, se recoge a continuación la Fig. 4.1.166 que ilustra el nivel tensional en servicio existente en el elemento estructural caso de utilizar el coeficiente geométrico $K_a=K_{\text{gato-roza}}$, en este caso dicho valor alcanza los 2.50 MPa. Igualmente en la Fig. 4.1.167 se representa para varios niveles de tensión proporcionados por el gato plano, la evolución de las deformaciones experimentadas por cada par de puntos de control.

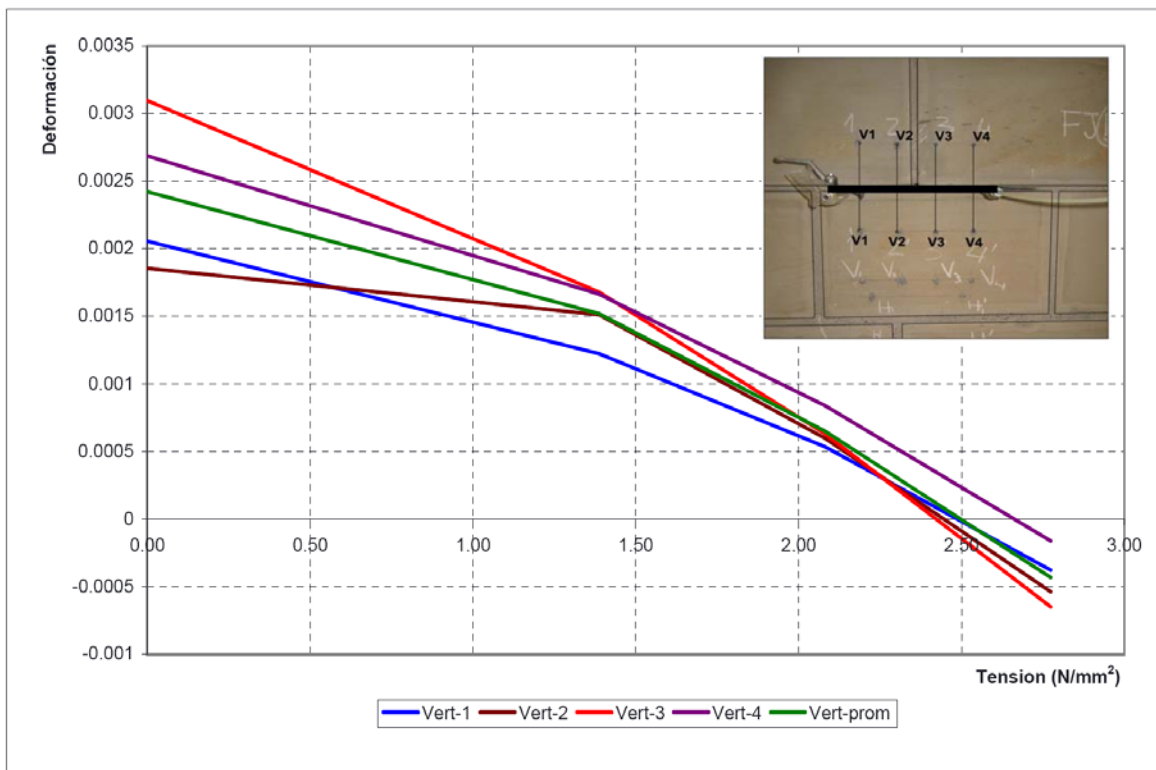
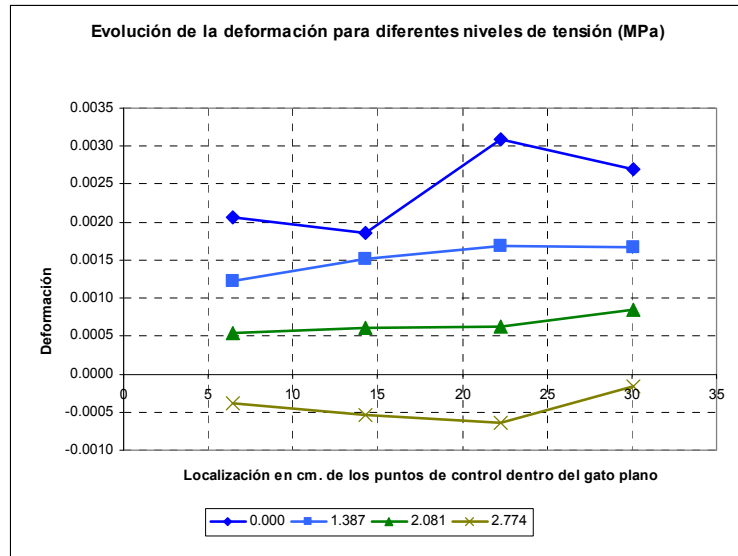


Fig. 4.1.166: Nivel tensional obtenido mediante el ensayo de gato plano simple, empleando como coeficiente corrector geométrico el que liga el área de la roza y el área del gato plano ($K_{\text{gato-roza}}$).

Fig. 4.1.167: Evolución de las deformaciones experimentadas por cada par de puntos de control, para varios niveles de tensión proporcionados por el gato plano.



De la misma forma, para cada combinación del factor de corrección por rigidez, k_m , con cada uno de los factores geométricos, k_a , obtenidos, pueden estimarse los siguientes niveles tensionales en servicio (Tabla 4.1.30).

Tabla 4.1.30: Estimación del nivel tensional en servicio para diferentes valores del coeficiente k_a .

	K_m	K_a	$\sigma_{\text{experimental}}$ (MPa)	σ_{media} (MPa)	$\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{media}}$
$K_{\text{gato-roza}}^2$	0.95	0.730	2.50	2.148	1.16
$K_{\text{contacto-gato}}$	0.95	0.490	1.68	2.148	0.78
$K_{\text{contacto-roza}}$	0.95	0.358	1.23	2.148	0.57

La tensión vertical media en el plano del gato plano es de 2.148 MPa.

$$\sigma_{\text{media}} = \frac{90,430.40kp}{135.79 \cdot 31 \text{cm}^2} = 21.48 \frac{kp}{\text{cm}^2} = 2.148 \text{MPa} \text{ (compresión)}$$

En lo que respecta al **ensayo de gato plano doble** fue necesario, tras disponer los puntos de control pertinentes (Fig. 4.1.168), ejecutar una segunda roza, paralela con la realizada para el ensayo de gato plano simple (Fig. 4.1.170), para lo cual previamente se llevó a cabo una guía mediante una sierra de disco manual (Fig. 4.1.169).

Con la finalidad de estimar el área neta de contacto entre los gatos planos y el muro se dispuso un calco entre dos láminas de papel, de manera que los puntos de presión quedasen reflejados en el papel por acción del calco. Igualmente, fueron estimadas las áreas de las rozas ejecutadas (para una consulta más detallada del proceso se remite al lector al apartado 4.1.9). En las Fig. 4.1.171 se ilustra el área aproximada de la roza, así como el área efectiva de contacto del gato en el muro, para el gato plano superior del ensayo GPS-B Doble (es el mismo gato que el simple relacionado con anterioridad GPS-B Simple).

² Relación geométrica propuesta en la normativa.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido



Fig. 4.1.168: Detalle de los puntos de control del ensayo GPS-B Doble, previamente a la ejecución de la roza.

Fig. 4.1.169: Ejecución de una hendidura mediante sierra de disco, para posterior guiado de la sierra orbital.

Fig. 4.1.170: Instante captado durante la ejecución de la roza mediante la sierra orbital.

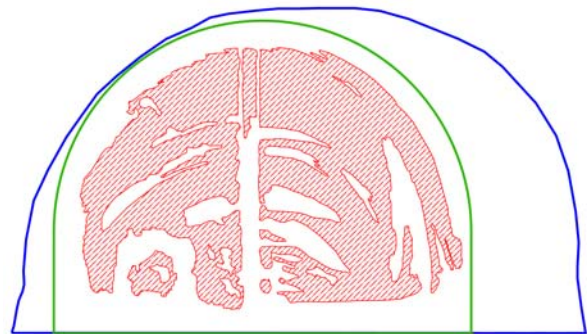
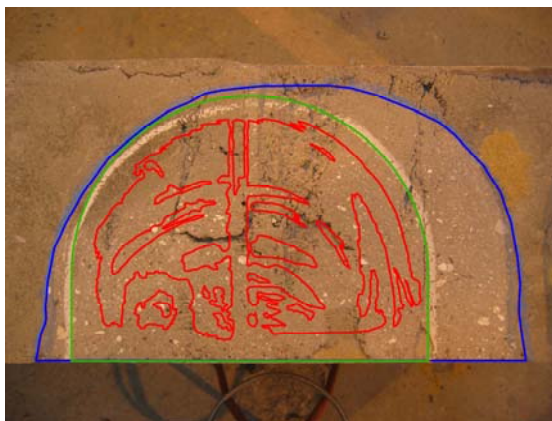


Fig. 4.1.171: Replanteo del área de la roza ($1,067.19 \text{ cm}^2$), el área del gato plano superior GPD-B Doble (778.56 cm^2) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (381.63 cm^2).

Por su parte en las Fig. 4.1.172 se ilustra el área aproximada de la roza, así como el área efectiva de contacto del gato en el muro, para el gato plano inferior del ensayo GPS-B Doble.

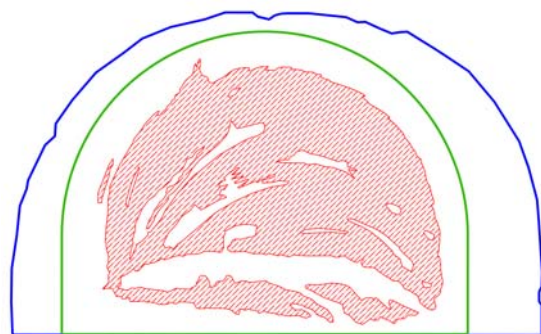
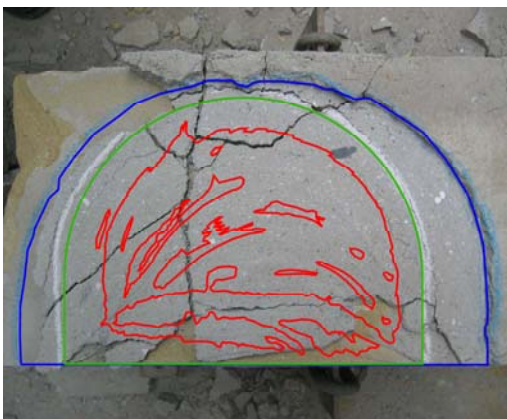


Fig. 4.1.172: Replanteo del área de la roza ($1,076.51 \text{ cm}^2$), el área del gato plano inferior GPD-B Doble (778.56 cm^2) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (399.99 cm^2).

En base a las áreas obtenidas tanto para las rozas ejecutadas, como para el área efectiva de contacto, y conociendo la geometría de los gatos planos empleados en el ensayo (Semioval

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

350x260x3.5mm), es posible obtener diferentes relaciones geométricas (k_a). En la Tabla 4.1.31 se resumen los factores geométricos obtenidos.

Tabla 4.1.31: Factores geométricos, k_a , obtenidos para cada uno de los dos gatos planos involucrados en el ensayo GPS-B Doble.

Factores geométricos, k_a, GPS-B Doble			
		Áreas (cm ²)	Constantes derivadas
Gato plano superior (Fig. 4.1.171)	A_{roza}	1,067.19	$K_{gato-roza}$ 0.730
	A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$ 0.490
	$A_{contacto}$	381.63	$K_{contacto-roza}$ 0.358
Gato plano inferior (Fig. 4.1.172)	A_{roza}	1,076.51	$K_{gato-roza}$ 0.723
	A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$ 0.514
	$A_{contacto}$	399.99	$K_{contacto-roza}$ 0.372

A su vez, en la Tabla 4.1.32 se presentan los valores medios obtenidos para dichos factores geométricos.

Tabla 4.1.32: Valores medios obtenidos para los factores geométricos, k_a , involucrados en el ensayo GPS-B Doble.

Factores geométricos, k_a, GPS-B Doble	
$K_{gato-roza}$	0.726
$K_{contacto-gato}$	0.502
$K_{contacto-roza}$	0.365

Por su parte, en relación a la constante de calibración de los gatos planos, k_m , se ha adoptado un valor de 0.95 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

Una vez introducido el segundo gato, y tras el purgado del aire contenido en el interior del mismo hasta llenarlo de fluido hidráulico bombeado, se realizan ciclos de presurizado – despresurizado de los gatos, registrando para cada nivel de presión el desplazamiento de los puntos verticales (Fig. 4.1.173) y horizontales (Fig. 4.1.174) y, por ende, obteniendo las deformaciones asociadas a cada ciclo. De esta manera se grafica la ley σ - ϵ para la porción de fábrica ensayada, de la cuál puede obtenerse el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.



Fig. 4.1.173: Registro de la evolución de la deformación de los puntos de control vertical a lo largo del ensayo GPS-B Doble.

Fig. 4.1.174: Registro de la evolución de la deformación de los puntos de control horizontal a lo largo del ensayo GPS-B Doble.

En la Fig. 4.1.175 se presentan los resultados obtenidos para los cuatro puntos de control vertical y los dos horizontales tras la realización de 4 ciclos de carga y descarga, considerando como factor geométrico el que relaciona el área del gato plano con el área de las rozas ejecutadas ($K_{gato-roza}$).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

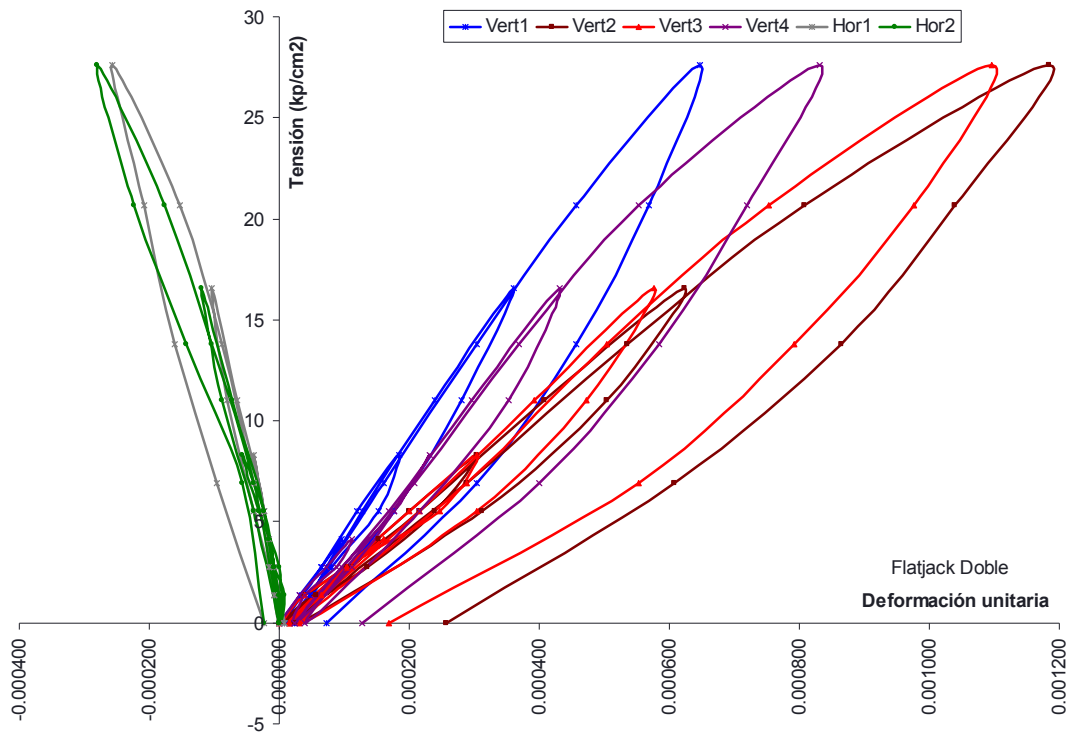


Fig. 4.1.175: Leyes σ - ϵ obtenidas para los cuatro puntos de control vertical (base de medida 200 mm) y para los dos puntos de control horizontal (base de medida 200 mm).

Por su parte, en la Fig. 4.1.176 se presentan las leyes tensión – deformación promedio, obtenidas en el área de ensayo tanto para los puntos de control verticales, como para los horizontales.

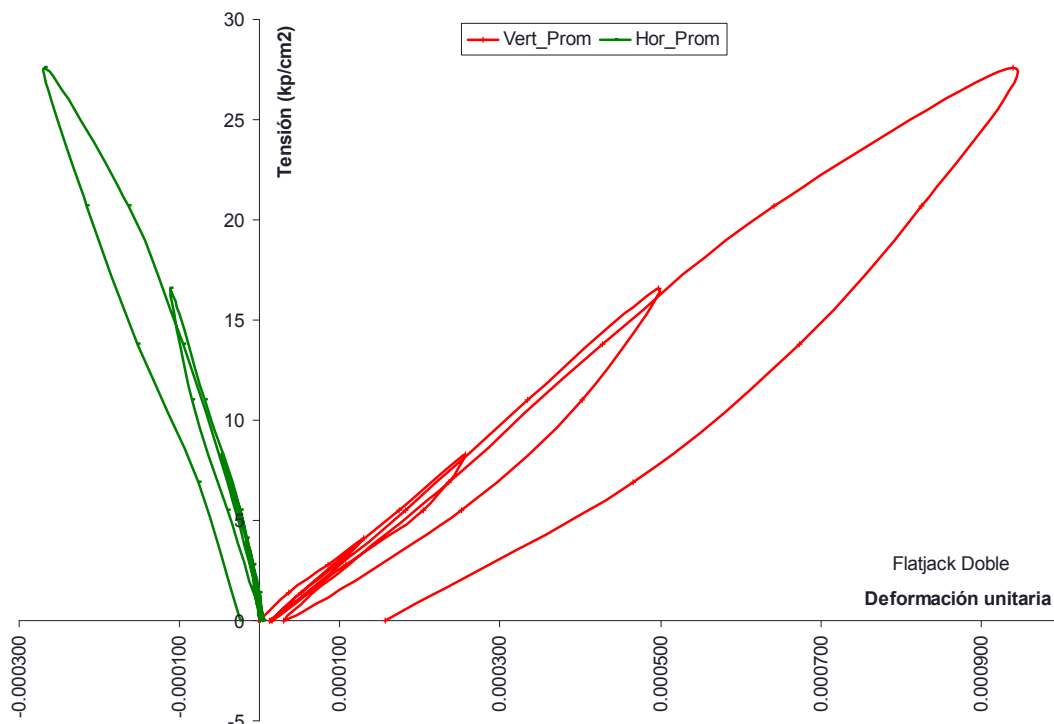


Fig. 4.1.176: Leyes σ - ϵ promedio obtenidas en el ensayo GPS-B Doble.

A partir de las curvas anteriores puede comprobarse que la envolvente de las mismas presenta un comportamiento lineal bastante acusado en toda su extensión, circunstancia que pone de manifiesto que todavía se está en el rango elástico de la fábrica. Por su parte en la Fig. 4.1.177 se han representado los ciclos realizados así como los puntos máximos que definen la envolvente de

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

los mismos. A dichos puntos se ha ajustado una curva logarítmica en base a la cual se ha estimado la tensión de rotura asociada a una deformación del 3‰ (Tassios 1988), obteniendo un valor de 4.57 MPa. Puede verificarse como el coeficiente de correlación obtenido es muy próximo a la unidad.

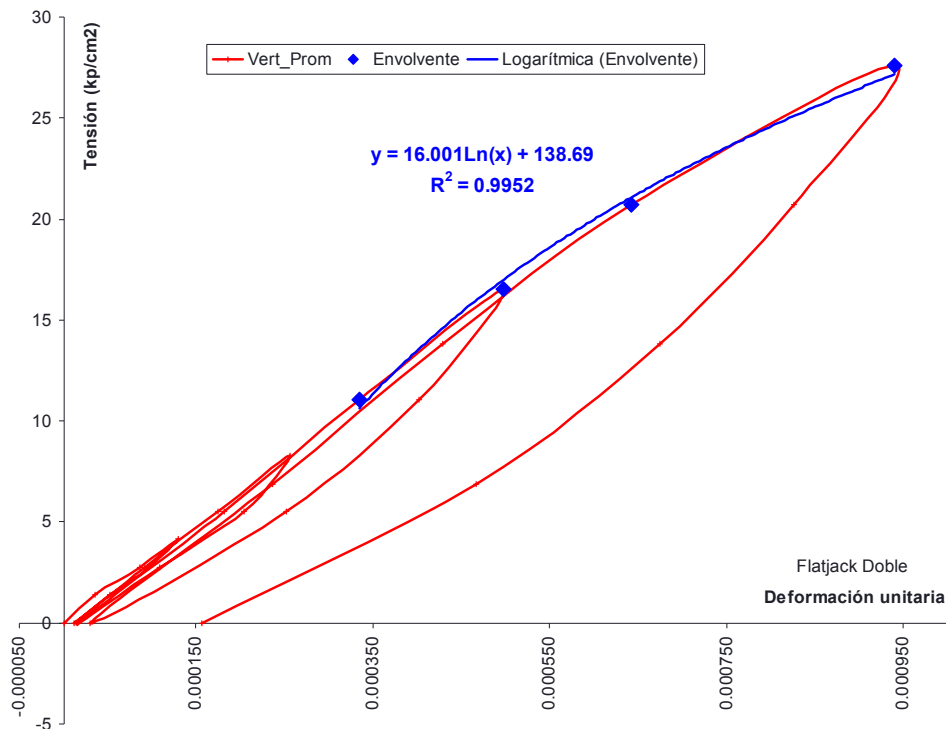


Fig. 4.1.177: Envolvente de rotura y ajuste logarítmico obtenido ($R^2 = 0.9952$).

Igualmente, a partir de las curvas obtenidas (Fig. 4.1.175 y 4.1.176) puede estimarse las características mecánicas, módulo de deformación y coeficiente de Poisson, para dicha sillería arenisca. Dichos parámetros mecánicos serán función de los factores k_a y k_m , en tanto que la tensión instalada depende de la presión interna movilizada en los gatos planos mediante el grupo de bombeo y de dichos factores de corrección.

En la Tabla 4.1.33 se presentan las características mecánicas obtenidas en cada uno de los ciclos realizados, considerando como factor geométrico el que relaciona el área del gato plano con el área de las rozas ejecutadas ($K_{\text{gato-roza}}$). Cabe llamar la atención a que dichas características mecánicas se corresponden con las obtenidas para un intervalo de presiones $[p_1, p_2]$, por ello que el módulo de deformación obtenido sea un módulo secante.

Tabla 4.1.33: Características mecánicas, E y ν , obtenidas en el ensayo GPS-B Doble empleando como factor geométrico $k_a = K_{\text{gato-roza}}$.

Ciclo	p_1^* (kp/cm ²)	p_2^* (kp/cm ²)	$E_{p_1-p_2}$ (kp/cm ²)				$E_{p_1-p_2_promedio}$ (kp/cm ²)	$\nu_{p_1-p_2_promedio}$
			Vert 1	Vert 2	Vert 3	Vert 4		
1	0	4	43,106	26,527	26,527	38,317	33,619	-0.14
2	0	8	49,264	27,588	29,987	36,300	35,785	-0.17
3	0	16	51,089	27,047	29,349	40,571	37,014	-0.21
4	0	20	49,264	26,941	29,225	42,055	36,871	-0.25
							35,822.31	-0.19

* p_1 y p_2 indican el intervalo de presiones para el cual se ha obtenido el módulo de elasticidad secante ($E_{p_1-p_2}$) y el coeficiente de Poisson ($\nu_{p_1-p_2}$).

De la misma forma podrían obtenerse las características mecánicas teniendo en cuenta los factores geométricos que relacionan el área del gato y el área efectiva de contacto entre el gato

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

plano y el muro ($K_{\text{contacto-gato}}$), o el que relaciona las áreas de las rozas con dicha área de contacto ($K_{\text{contacto-roza}}$). Un resumen de las características mecánicas obtenidas en cada uno de los ciclos empleando los diferentes factores geométricos obtenidos se presentan en la Tabla 4.1.34.

Tabla 4.1.34: Características mecánicas, E y ν , obtenidas en el ensayo GPS-B Doble empleando los diferentes factores geométricos, k_a , calculados,

Ciclo	p_1 (kp/cm ²)	p_2 (kp/cm ²)	k_m	K_a	$E_{p1-p2_promedio}$ (kp/cm ²)	$\nu_{p1-p2_promedio}$	
1	0	4	0.95	$K_{\text{gato-roza}}$	0.726	33,619	
				$K_{\text{contacto-gato}}$	0.502	23,246	-0.14
				$K_{\text{contacto-roza}}$	0.365	16,903	-0.14
2	0	8	0.95	$K_{\text{gato-roza}}$	0.726	35,785	
				$K_{\text{contacto-gato}}$	0.502	24,744	-0.17
				$K_{\text{contacto-roza}}$	0.365	17,991	-0.17
3	0	16	0.95	$K_{\text{gato-roza}}$	0.726	37,014	
				$K_{\text{contacto-gato}}$	0.502	25,594	-0.21
				$K_{\text{contacto-roza}}$	0.365	18,609	-0.21
4	0	20	0.95	$K_{\text{gato-roza}}$	0.726	36,871	
				$K_{\text{contacto-gato}}$	0.502	25,495	-0.25
				$K_{\text{contacto-roza}}$	0.365	18,537	-0.25

Como conclusión, aceptando el considerar como factor geométrico, k_a , el que relaciona el área del gato plano con el área de las rozas ejecutadas ($K_{\text{gato-roza}}$), dado que es el propone la normativa, podría considerarse un módulo de elasticidad secante de 3,582.23 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.19.

Para una consulta más detallada del ensayo, se remite al lector al registro Lab0818, el cual se adjunta en el Anexo 5.

En las Fig. 4.1.178 y 4.1.179 se ha representado el área de ensayo con la finalidad de ubicar la posición de los puntos de control en el conjunto de la fábrica.

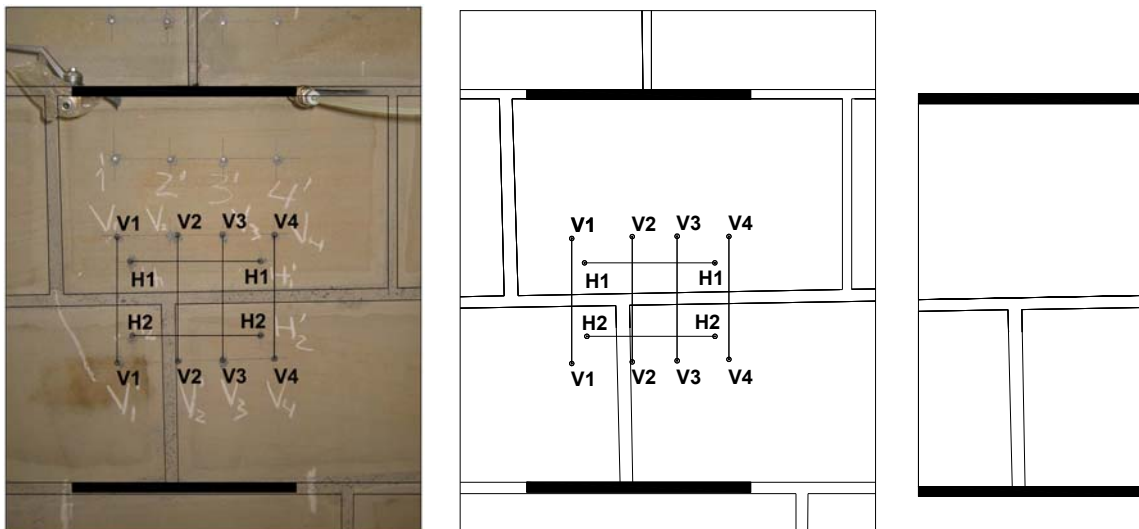


Fig. 4.1.178 y 4.1.179: Croquis del área de ensayo realizado.

Fig. 4.1.180: Detalle del área movilizada entre los dos gatos planos.

Por su parte en la Fig. 4.1.180 se ha individualizado el área rectangular definida por dos gatos planos y sendas verticales por sus extremos, con el objetivo de cuantificar, en superficie, la relación existente entre el área de mortero y el área de piedra movilizada. El fin perseguido es aportar otro punto para la evaluación de la posible relación existente entre el módulo de deformación y la proporción de la fase pétreo y de la fase mortero, para el caso de una sillería

arenisca blanda y mortero de cal. En este sentido en la Tabla 4.1.35 se presentan las áreas computadas y la relación referida.

Tabla 4.1.35: Área total, de piedras y de mortero calculadas a partir de la Fig. 4.1.180. Relación entre el área de mortero y el área de las piedras.

A_{total} (cm ²)	2,103.36
$A_{piedras}$ (cm ²)	1,981.18
$A_{mortero}$ (cm ²)	122.18
$A_{mortero}/A_{piedras}$	0.06
E (MPa)	3,582.23

4.1.7 Simulación de un ensayo de gato plano simple mediante elementos finitos. Estimación del nivel tensional mediante gato plano simple y hole drilling en el muro de sillería.

Como ya se ha mencionado, el objeto del presente apartado es realizar una comparativa entre los resultados experimentales, obtenidos en laboratorio, relativos al estado tensional de un muro de sillería, y los teóricos, provenientes de la modelización numérica de los ensayos de gato plano simple y hole-drilling.

Con este fin, se ha realizado un macromodelo del muro, suponiéndolo constituido por un único material homogéneo. Los parámetros mecánicos que caracterizan dicho material se han extraído de los resultados de laboratorio procedentes del ensayo de gato plano doble. Se trata, por tanto, de un análisis, bidireccional, en el que los registros de laboratorio se comparan con los obtenidos del cálculo numérico, siendo éste, a su vez, alimentado con los resultados del anterior.

Adicionalmente a la comparación de resultados en tensiones del muro, también se ha realizado un análisis de sensibilidad del modelo teniendo en cuenta como variables el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y la densidad de la fábrica, valorando la influencia de su variación en los resultados.

El presente apartado se estructura de la siguiente forma:

En los dos primeros subapartados (4.1.7.1 y 4.1.7.2) se definen los datos de partida así como la metodología de cálculo general que se ha seguido en el desarrollo del análisis.

Posteriormente, en el apartado 4.1.7.3 se detallan los cálculos llevados a cabo para reproducir el ensayo de gato simple. Dentro del mismo, se incluyen cuatro subapartados (Situación inicial, Cálculo 1, Cálculo 2 y Cálculo 3) en los que se describen las distintas aproximaciones realizadas con el fin de asimilar, lo máximo posible, la modelización al comportamiento real del ensayo. Con posterioridad, se realiza un estudio de la influencia de los distintos parámetros considerados como datos de partida en los resultados obtenidos.

Por su parte, en el apartado 4.1.7.4 se detallan los niveles tensionales obtenidos en los puntos del muro en los que se realizaron los ensayos hole drilling.

Finalmente, se relacionan las conclusiones obtenidas de los diferentes cálculos llevados a cabo.

4.1.7.1 Datos de partida

Para la modelización del comportamiento del muro se le ha considerado constituido por un único material de comportamiento lineal, elástico e isótropo. Éste ha sido definido a través de los valores del Módulo de Elasticidad (E) y coeficiente de Poisson (ν) obtenidos en laboratorio con el ensayo de gato plano doble. Los valores empleados en el cálculo han sido:

- $E=3.11 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2=3,110.0 \text{ MPa}$
- $\nu=0.19$

El Módulo de Elasticidad se ha estimado a partir del promedio de los valores resultantes de los ensayos de gato plano doble realizados en la sillería.

La densidad (ρ) se ha estimado a partir de una probeta de roca arenisca, material predominante en el muro objeto del estudio. El valor obtenido ha sido:

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

- $\rho = 2,227.0 \text{ kg/m}^3$

Como cargas, se han considerado el peso propio del muro y la carga que se aplica sobre la cabeza del mismo. Para la determinación del peso propio se ha tomado el valor de la densidad ya referenciado, y para la carga vertical se ha tenido en cuenta además de la presión suministrada por los gatos hidráulicos, el peso de la viga que se emplea para un mejor reparto de cargas (220 kp). Con la suma de estos valores se obtiene una carga:

- $P = 90,430.4 \text{ kp} = 904,304.0 \text{ N}$

Dividiendo esta carga por la superficie en la que se aplica (longitud de la viga * espesor muro) resulta el valor de presión a aplicar.

- $p = 904,304.0 / (1.00 * 0.31) = 2,917,109.68 \text{ N/m}^2 = 2.92 \text{ MPa}$

4.1.7.2 Metodología de cálculo

Para la modelización numérica se ha empleado el programa ANSYS v11 en su versión educativa. Ésta posee todas las capacidades de cálculo de la versión completa pero tiene una limitación en el número de nodos, y, en consecuencia, de elementos a emplear. Este hecho ha sido determinante en la realización de alguna de las discretizaciones, no habiendo sido por ello posible aumentar la densidad de la malla.

En todos los casos, el primer paso que se ha dado ha sido definir un modelo con la geometría del muro de sillería ensayado en laboratorio cuyas dimensiones principales son la que se muestran en la Fig. 4.1.181.

Para la localización espacial del modelo se ha considerado el origen de coordenadas en la esquina izquierda, inferior y posterior del muro y las orientaciones que se representan en la Fig. 4.1.181.

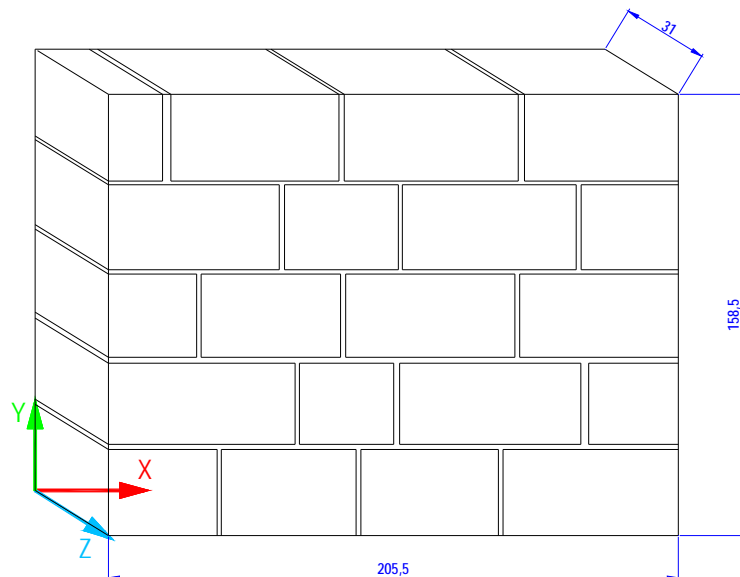


Fig. 4.1.181: Geometría del muro de sillería. Las cotas indicadas están en cm.

Con esta geometría como base, se han ido implementando variaciones para adaptar el modelo a la situación del muro en los distintos ensayos (realización de las rozas para los ensayos de gato plano, etc.).

El siguiente paso ha sido definir una discretización espacial, consistente en dividir el sólido que constituye el modelo del muro en elementos dentro de los cuales se evalúan los parámetros a determinar (tensión, desplazamientos, etc.). Los elementos empleados han sido SOLID45, cuando la discretización se ha realizado con elementos hexaédricos, y tipo SOLID92 para elementos tetraédricos. En ambos casos se trata de elementos en tres dimensiones, cuyos grados de libertad se corresponden con los desplazamientos en las tres direcciones en cada uno de sus nodos (UX, UY, UZ).

Como condiciones de contorno se han supuesto coaccionados los desplazamientos en las tres direcciones en la cara correspondiente a la base del muro.

4.1.7.3 Ensayo de gato plano simple

4.1.7.3.1 Descripción general

En esta parte del estudio se ha reproducido, mediante modelos numéricos, el comportamiento del muro de sillería durante la ejecución del ensayo de gato plano simple denominado GPS-A. Para ello, sobre un modelo del muro, con una carga aplicada en su cara superior, se ha simulado la ejecución de una roza (mediante la eliminación de los elementos correspondientes) y la aplicación de una presión sobre las caras de ésta, cuya integral representa la carga transmitida por el gato plano.

En la Fig. 4.1.182 se representa una vista en alzado del muro con la ubicación de la roza y de la carga aplicada sobre la carga superior. La zona roja señala la situación de la roza, correspondiéndose la parte sombreada al volumen que ocupa el gato dentro de ésta.

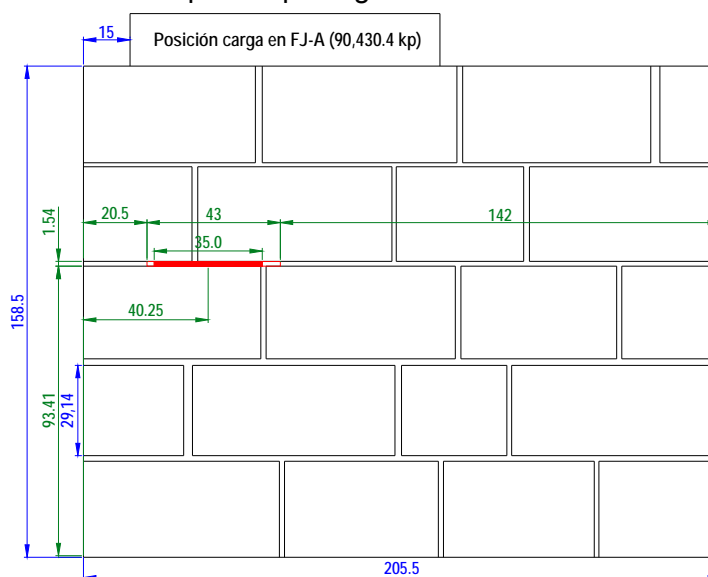


Fig. 4.1.182: Geometría. Ensayo de gato simple GPS-A. Las cotas indicadas están en cm.

Para cada escalón de carga, se ha analizado, por un lado, el estado tensional resultante, y por otro, las deformaciones registradas en los puntos de control descritos (en este caso, nodos del modelo). Al igual que en el ensayo real, en el estado inicial se toman unos puntos de control, a ambos lados de la roza, y se mide su distancia. La presión aplicada sobre la roza debe ser tal que se recupere la medida de partida.

Como ya se ha mencionado, el estudio se ha estructurado en cuatro cálculos sucesivos, descritos con detalle en los epígrafes 4.1.7.3.2, 4.1.7.3.3, 4.1.7.3.4 y 4.1.7.3.5. En el primero de ellos se estudia el comportamiento del muro al inicio del ensayo, previamente a la ejecución de la roza, y en los tres siguientes se ha ido paulatinamente, aproximando la modelización numérica al proceso real que se desarrolla durante el ensayo.

Además, en el apartado 4.1.7.4, sobre el modelo más sencillo, se ha efectuado el estudio sobre la influencia de diferentes parámetros de partida sobre la bondad de los resultados. Este aspecto servirá para analizar la necesidad de precisión en los resultados de laboratorio con los que se alimenta el modelo, identificando los parámetros en los que habrá que prestar especial atención con el fin de calibrar un buen modelo numérico. Así, se han realizado cálculos en los que, siguiendo los mismos pasos, se han variado parámetros como el módulo de elasticidad (E), el coeficiente de Poisson (ν) o la densidad del material (ρ).

4.1.7.3.2 Situación inicial

Para el primer cálculo desarrollado, la discretización espacial se ha realizado con elementos hexaédricos tipo SOLID45. Dicha discretización, en principio se ha realizado sobre el modelo

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

completo, para, posteriormente, proceder a eliminar los elementos que constituyen la roza realizada. En la Fig. 4.1.183 se representa la discretización realizada.

Sobre este modelo se ha aplicado la carga vertical sobre su cara superior, de igual valor y posición a la que se ha aplicado en el laboratorio y cuya posición se representa en el esquema de la Fig. 4.1.184. En esta figura también se representan las condiciones de contorno consideradas para la cara inferior del muro anteriormente definidas.

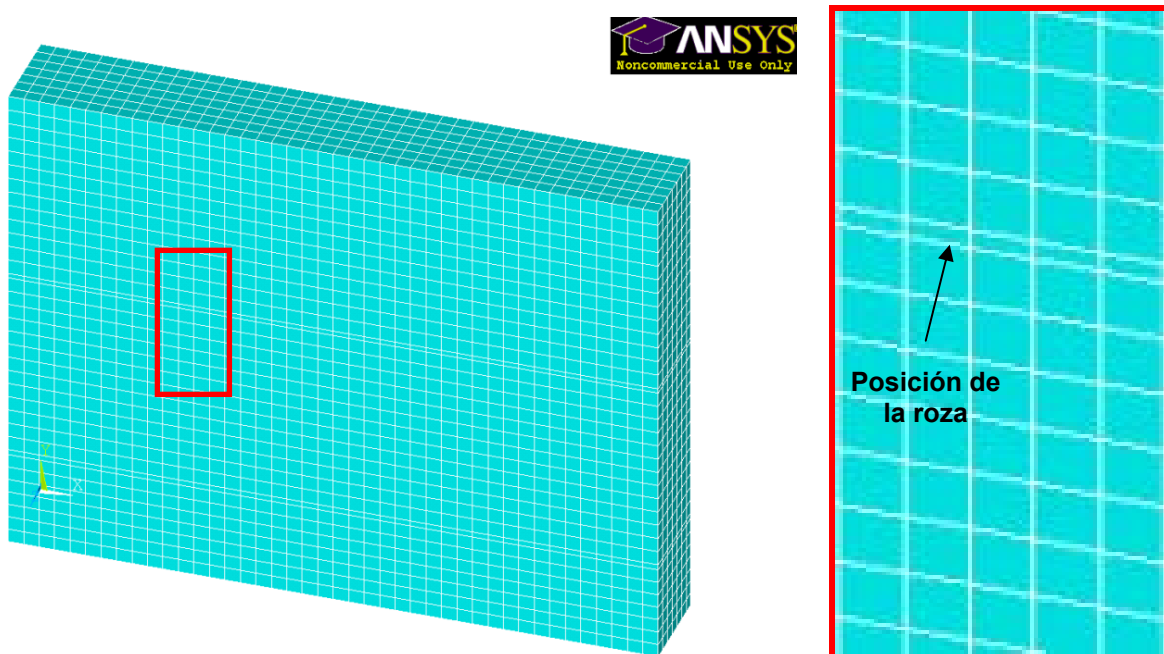


Fig. 4.1.183: Discretización muro completo.

Bajo la acción de esta carga, junto con el peso propio del muro, se ha realizado un análisis de la distribución de tensiones verticales, prestando especial atención a los niveles tensionales existentes a la altura de la roza. De acuerdo con la teoría del ensayo de gato plano simple, este valor de tensión de partida, será aproximadamente de la misma magnitud que la presión que posteriormente deberá aplicarse mediante el gato para que la distancia entre las parejas de puntos de control recupere el valor inicial. La distribución de tensiones obtenida se muestra en la Fig. 4.1.185. Igualmente, en la Fig. 4.1.186 se representan los desplazamientos del muro.

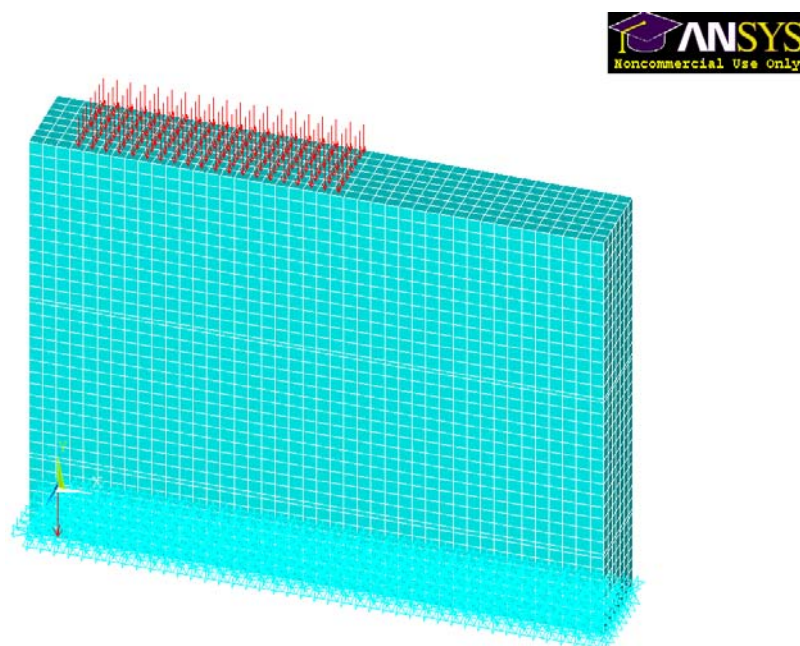


Fig. 4.1.184: Carga aplicada sobre la cara superior.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

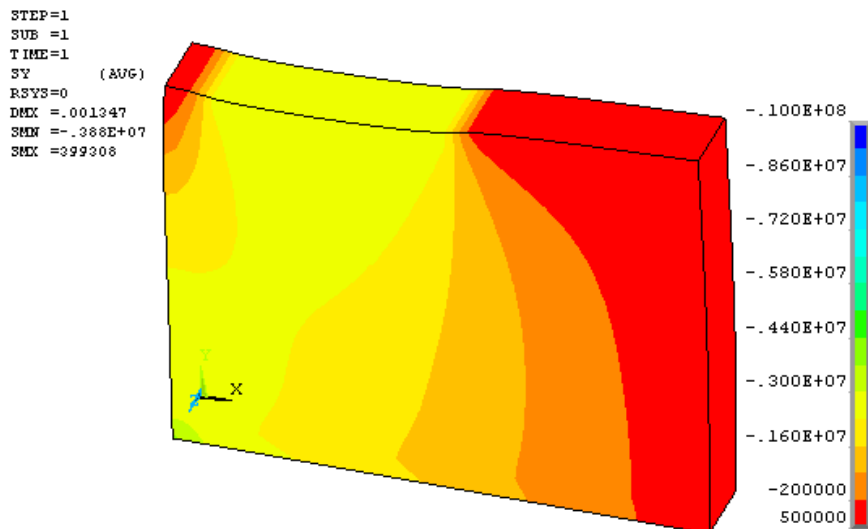


Fig. 4.1.185: Distribución de tensiones inicial (en N/m²). Step 1.

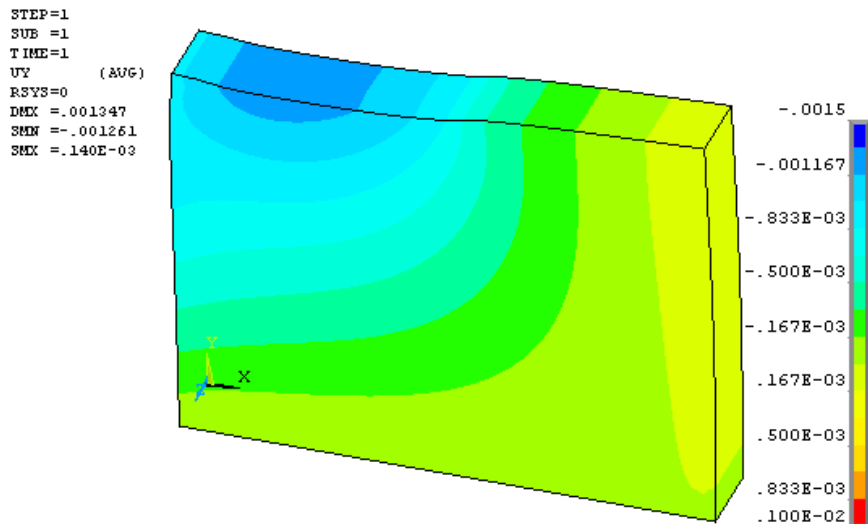


Fig. 4.1.186: Desplazamientos verticales iniciales (m). Step 1.

En la distribución tensional representada, se observa como aparece un bulbo de tensiones localizado bajo el área de aplicación de la carga. Evaluando en detalle las tensiones a la altura a la que, posteriormente, se ejecutará la roza, se estima una tensión aproximada de $23.9 \cdot 10^5$ N/m² (**2.39 MPa**). Este valor se ha calculado como el promedio de las tensiones verticales registradas en los elementos que posteriormente constituirán la roza. En la Tabla 4.1.36 se presentan los resultados correspondientes a dichos elementos.

Para evaluar la bondad de estos resultados, se ha realizado una aproximación grosera, consistente en estimar el área de reparto de cargas que corresponde a cada nivel del muro a partir del ángulo de apertura de cargas (ver esquema de la Fig. 4.1.187). Este ángulo se ha obtenido en laboratorio, resultando un valor de 23° (se remite al lector al apartado 4.1.3).

Con este ángulo, el área a una altura aproximada del muro de 0.95 m es de 0.44 m² (1.42·0.31 m²). Dividiendo el valor de la carga vertical aplicada en la cara superior, por esta área, resulta una tensión de $20.5 \cdot 10^5$ N/m² (**2.05 MPa**). Como era de esperar, el resultado obtenido con la aproximación teórica es algo menor que el correspondiente al cálculo numérico, ya que la distribución real de tensiones, en forma de bulbo, hace que el área de reparto de carga sea menor que el considerado con una apertura lineal de cargas, y, en consecuencia, la tensión resultante de dicho cálculo sea mayor.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

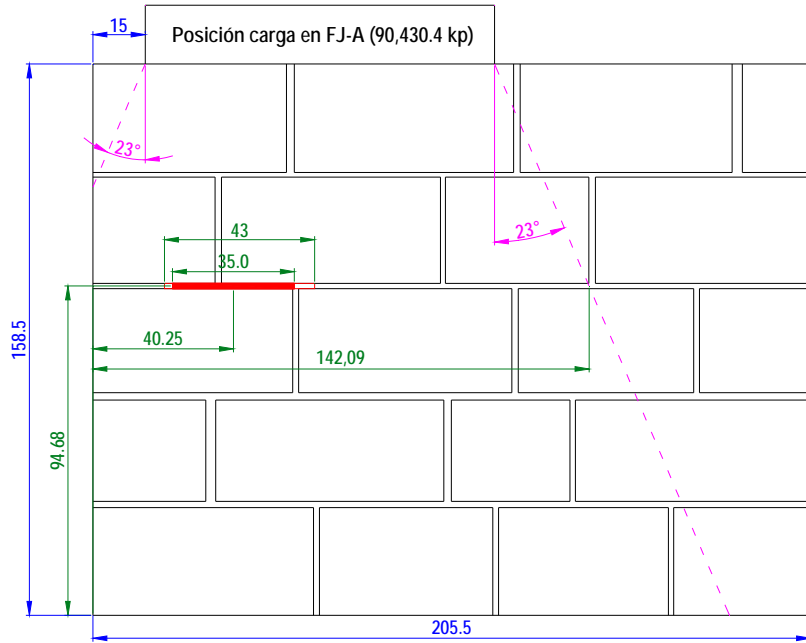


Fig. 4.1.187:
Distribución de tensiones teórica.
Cotas en cm.

Tabla 4.1.36: Resultados de tensiones en las proximidades de la roza. Como puede comprobarse el promedio de las tensiones verticales registradas en los elementos que posteriormente constituirán la roza es de 2.39 MPa de compresión vertical.

ELEMENTS	NODES	σ_y (N/m ²)	σ_y (MPa)	ELEMENTS	NODES	σ_y (N/m ²)	σ_y (MPa)
4106	718	-2.49E+06	-2.49	4110	694	-2.36E+06	-2.36
	712	-2.49E+06	-2.49		688	-2.36E+06	-2.36
	5012	-2.49E+06	-2.49		4988	-2.36E+06	-2.36
	5018	-2.49E+06	-2.49		4994	-2.36E+06	-2.36
	615	-2.49E+06	-2.49		611	-2.36E+06	-2.36
	614	-2.49E+06	-2.49		610	-2.36E+06	-2.36
	4914	-2.49E+06	-2.49		4910	-2.36E+06	-2.36
	4915	-2.49E+06	-2.49		4911	-2.36E+06	-2.36
4107	712	-2.48E+06	-2.48	4111	688	-2.30E+06	-2.30
	706	-2.48E+06	-2.48		682	-2.30E+06	-2.30
	5006	-2.48E+06	-2.48		4982	-2.30E+06	-2.30
	5012	-2.48E+06	-2.48		4988	-2.30E+06	-2.30
	614	-2.48E+06	-2.48		610	-2.30E+06	-2.30
	613	-2.48E+06	-2.48		609	-2.30E+06	-2.30
	4913	-2.48E+06	-2.48		4909	-2.30E+06	-2.30
	4914	-2.48E+06	-2.48		4910	-2.30E+06	-2.30
4108	706	-2.45E+06	-2.45	4112	682	-2.23E+06	-2.23
	700	-2.45E+06	-2.45		676	-2.23E+06	-2.23
	5000	-2.45E+06	-2.45		4976	-2.23E+06	-2.23
	5006	-2.45E+06	-2.45		4982	-2.23E+06	-2.23
	613	-2.45E+06	-2.45		609	-2.23E+06	-2.23
	612	-2.45E+06	-2.45		608	-2.23E+06	-2.23
	4912	-2.45E+06	-2.45		4908	-2.23E+06	-2.23
	4913	-2.45E+06	-2.45		4909	-2.23E+06	-2.23
4109	700	-2.41E+06	-2.41			-2.39E+06	-2.39
	694	-2.41E+06	-2.41				
	4994	-2.41E+06	-2.41				
	5000	-2.41E+06	-2.41				
	612	-2.41E+06	-2.41				
	611	-2.41E+06	-2.41				
	4911	-2.41E+06	-2.41				
	4912	-2.41E+06	-2.41				

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Por último, se han registrado las distancias iniciales existentes entre los puntos de control fijados, que se muestran en la Fig. 4.1.188. Estos puntos se han elegido intentando aproximarse, en la medida que la discretización realizada lo permite, a los considerados en el ensayo realizado en laboratorio, los cuales se situaron 10 cm por encima y por debajo de la roza. En esta figura, se indican los números de nodos correspondientes a cada punto de control, con el fin de poder realizar posteriormente el seguimiento de la distancia entre cada pareja. La **distancia inicial entre cada pareja de puntos es de 0.206 m**.

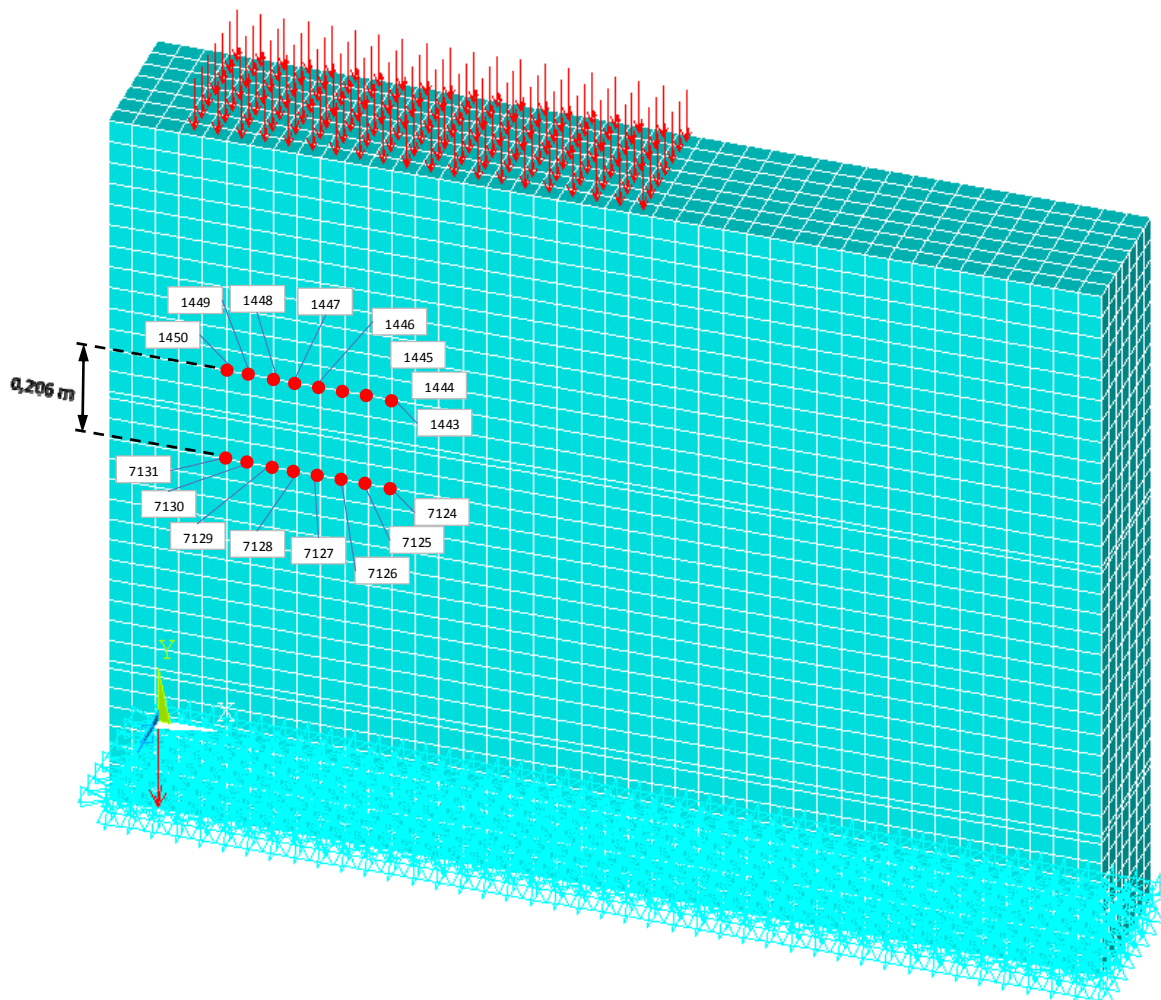


Fig. 4.1.188: Puntos de control dispuestos, de forma aproximada, 10 cm por encima y por debajo de la posición en la que se ejecutará la roza. La distancia inicial entre cada pareja de puntos es de 20.6 cm.

4.1.7.3.3 Cálculo 1. Primera aproximación.

Una vez obtenida la distribución de tensiones inicial, se ha definido un nuevo modelo de muro en el que los elementos correspondientes a la roza han sido eliminados.

En una primera aproximación, **la roza se ha considerado con forma paralelepípedica y pasante a lo largo de todo el espesor del muro**, para ir, en los sucesivos cálculos, adaptando su forma a la realmente ejecutada en laboratorio. De esta forma, además de ir aproximándose a la realidad del ensayo, se realiza un análisis de la influencia de la relación entre el área de la roza, y el área sobre la que verdaderamente se aplica la carga.

En la Fig. 4.1.189 puede verse el modelo, ya discretizado, empleado en este cálculo. Tanto las condiciones de contorno, como la carga aplicada sobre la cara superior del muro, se mantienen respecto al análisis anterior.

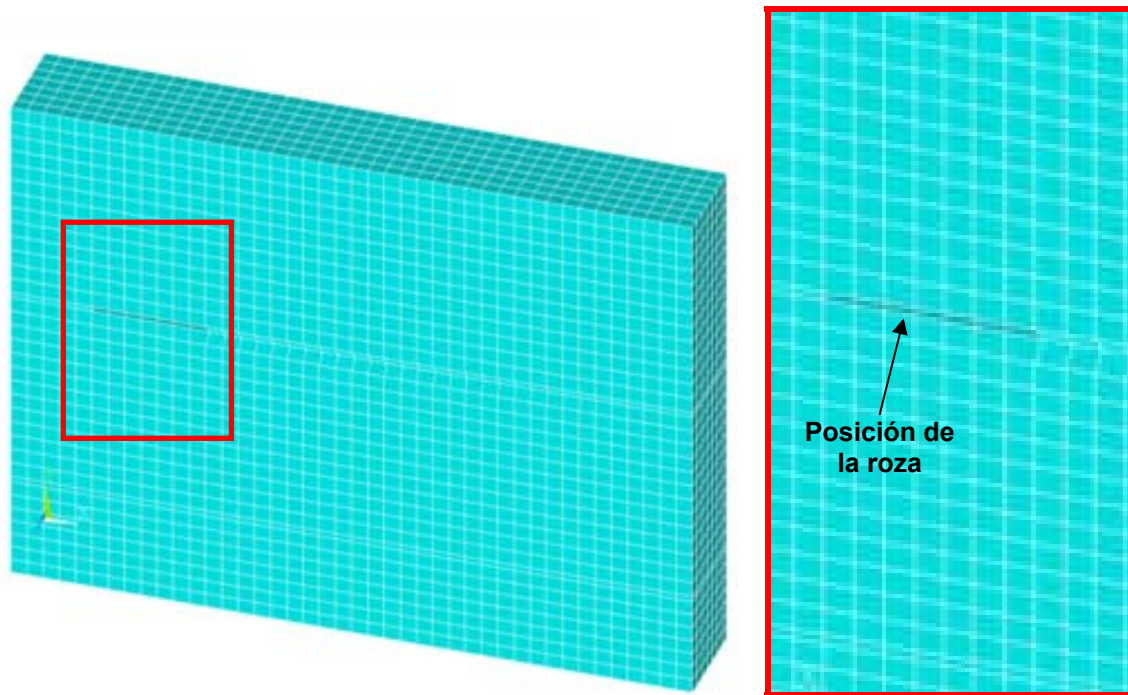


Fig. 4.1.189: Discretización muro con roza. Cálculo 1.

Con la realización de la roza, y mantenida la carga en la misma posición que ilustra la Fig. 4.1.188, se observa una redistribución de las tensiones sobre el muro, además de la esperada aproximación entre los puntos de control.

En la Fig. 4.1.190 se representa la nueva distribución tensional y en la Fig. 4.1.191 los desplazamientos. Posteriormente, en la Tabla 4.1.37 se muestra la deformación vertical experimentada por cada punto de control, y la nueva distancia existente entre cada pareja de nodos, correspondiéndose la ejecución de la roza a los valores registrados para el Step 2.

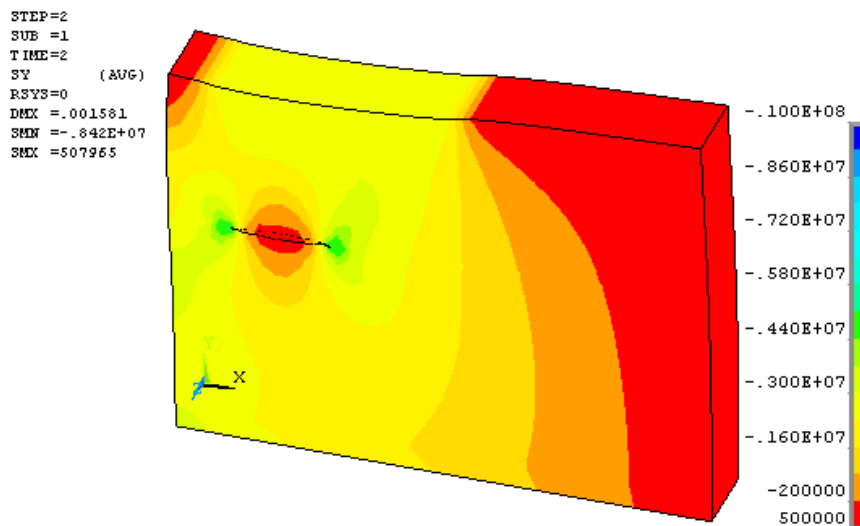


Fig. 4.1.190: Distribución de tensiones con roza (en N/m^2). Step 2. Cálculo 1.

A la vista de la Fig. 4.1.190, puede observarse que, como era de esperar, a ambos lados de la roza aparecen unas concentraciones de tensiones, resultado de la redistribución de éstas, a la vez que se registran tensiones de tracción en la parte superior e inferior de la roza, consecuencia de la aproximación entre sus bordes. En lo que respecta a los desplazamientos de los puntos, se puede ver claramente como los nodos situados sobre la roza experimentan un descenso mayor que los situados bajo ella, lo que conduce a la disminución de la distancia entre ellos; este fenómeno se ve incrementado en la parte central de la roza (ver Tabla 4.1.37).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

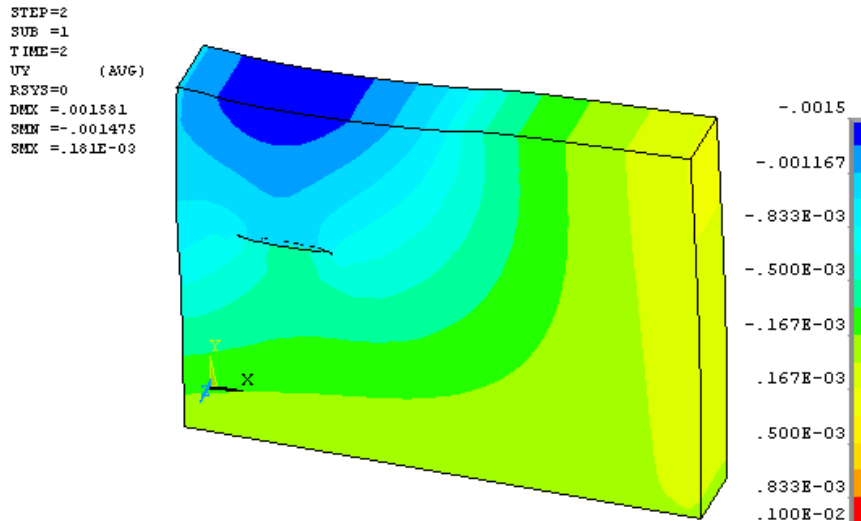


Fig. 4.1.191: Desplazamientos verticales con roza (m). Step 2. Cálculo 1.

A partir de esta situación, fue introducida una presión, de forma paulatina, sobre las superficies de la roza tal como se muestra en la Fig. 4.1.192. Para este cálculo **se ha considerado la roza de igual tamaño que el gato ($k_a=1$) por lo que la presión se aplica en todo el área de ésta.** Además, como ya se ha referido se ha supuesto pasante en todo el espesor del muro y con forma paralelepípedica.

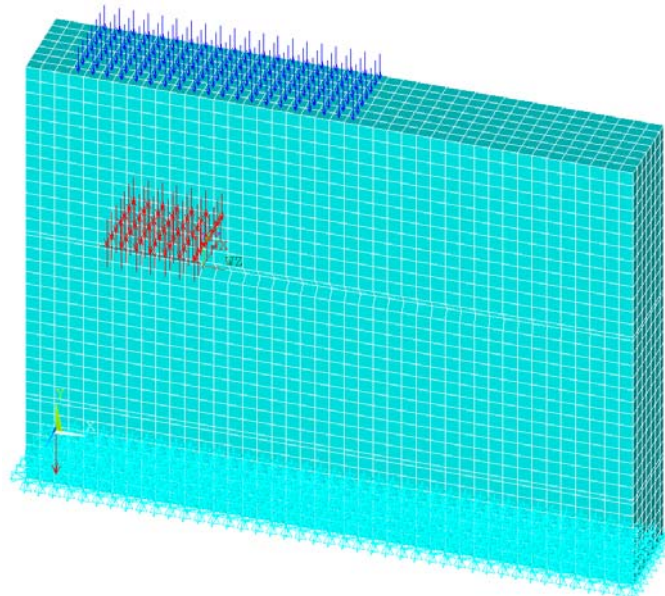


Fig. 4.1.192: Aplicación de la carga sobre la roza. Cálculo 1.

La presión se ha aplicado en escalones de carga, para cada uno de los cuales se ha ido registrando la variación en la distancia entre los puntos de control hasta que se produce la recuperación del valor mensurado antes de la ejecución de la roza (ver Tabla 4.1.37). Los valores de presión aplicados para cada escalón de carga (Step) son los siguientes:

- Step 0: Situación inicial
- Step 2: Aplicado Peso propio + carga superior
- Step 3: Carga sobre la roza. $p=2.0 \cdot 10^5$ N/m² (0.20 MPa).
- Step 4: Carga sobre la roza. $p=4.0 \cdot 10^5$ N/m² (0.40 MPa).
- Step 5: Carga sobre la roza. $p=8.0 \cdot 10^5$ N/m² (0.80 MPa).
- Step 6: Carga sobre la roza. $p=10.0 \cdot 10^5$ N/m² (1.00 MPa).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

- Step 7: Carga sobre la roza. $p=15.0 \cdot 10^5$ N/m² (1.50 MPa).
- Step 8: Carga sobre la roza. $p=20.0 \cdot 10^5$ N/m² (2.00 MPa).
- Step 9: Carga sobre la roza. $p=24.0 \cdot 10^5$ N/m² (2.40 MPa).
- Step 10: Carga sobre la roza. $p=35.0 \cdot 10^5$ N/m² (3.50 MPa).

Tanto en este cálculo como en los sucesivos, **el Step 9 se corresponde con una presión de igual valor a la tensión inicial registrada (valor teórico para el que debería recuperarse la deformación, ver Tabla 4.1.41), y el Step 10 a la presión para la que realmente se recupera la distancia inicial, tomada antes de la ejecución de la roza, entre las parejas de puntos de control.** Por tanto, el valor de la presión aplicada en este último Step puede variar entre los distintos cálculos, siendo por ello un factor más a evaluar.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.1.37: Desplazamientos en puntos de control. Cálculo 1.

	Puntos de control															
	1443 7124		1444 7125		1445 7126		1446 7127		1447 7128		1448 7129		1449 7130		1450 7131	
	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)
STEP 0	0.2060		0.2060		0.2060		0.2060		0.2060		0.2060		0.2060		0.2060	
STEP 2	-9.56E-04 -5.57E-04	0.2056	-1.00E-03 -4.87E-04	0.2055	-1.09E-03 -4.76E-04	0.2054	-1.10E-03 -4.34E-04	0.2053	-1.12E-03 -4.71E-04	0.2053	-1.08E-03 -4.82E-04	0.2054	-1.05E-03 -5.68E-04	0.2055	-9.87E-04 -6.12E-04	0.2056
STEP 3 $\rho=0.2$ MPa	-9.50E-04 -5.59E-04	0.2056	-9.96E-04 -4.91E-04	0.2055	-1.08E-03 -4.81E-04	0.2054	-1.09E-03 -4.41E-04	0.2054	-1.11E-03 -4.77E-04	0.2054	-1.07E-03 -4.87E-04	0.2054	-1.04E-03 -5.71E-04	0.2055	-9.81E-04 -6.14E-04	0.2056
STEP 4 $\rho=0.4$ MPa	-9.44E-04 -5.61E-04	0.2056	-9.90E-04 -4.96E-04	0.2055	-1.07E-03 -4.86E-04	0.2054	-1.08E-03 -4.47E-04	0.2054	-1.10E-03 -4.82E-04	0.2054	-1.06E-03 -4.93E-04	0.2054	-1.03E-03 -5.74E-04	0.2055	-9.75E-04 -6.16E-04	0.2056
STEP 5 $\rho=0.8$ MPa	-9.33E-04 -5.64E-04	0.2056	-9.76E-04 -5.04E-04	0.2055	-1.05E-03 -4.95E-04	0.2054	-1.06E-03 -4.60E-04	0.2054	-1.08E-03 -4.93E-04	0.2054	-1.04E-03 -5.03E-04	0.2055	-1.02E-03 -5.79E-04	0.2056	-9.64E-04 -6.20E-04	0.2057
STEP 6 $\rho=1.0$ MPa	-9.27E-04 -5.66E-04	0.2056	-9.70E-04 -5.09E-04	0.2055	-1.04E-03 -5.00E-04	0.2055	-1.05E-03 -4.66E-04	0.2054	-1.07E-03 -4.98E-04	0.2054	-1.04E-03 -5.08E-04	0.2055	-1.01E-03 -5.82E-04	0.2056	-9.58E-04 -6.22E-04	0.2057
STEP 7 $\rho=1.5$ MPa	-9.12E-04 -5.70E-04	0.2057	-9.53E-04 -5.19E-04	0.2056	-1.02E-03 -5.11E-04	0.2055	-1.03E-03 -4.82E-04	0.2055	-1.05E-03 -5.11E-04	0.2055	-1.01E-03 -5.22E-04	0.2055	-9.91E-04 -5.90E-04	0.2056	-9.44E-04 -6.28E-04	0.2057
STEP 8 $\rho=2.0$ MPa	-8.98E-04 -5.74E-04	0.2057	-9.37E-04 -5.30E-04	0.2056	-9.99E-04 -5.23E-04	0.2055	-1.00E-03 -4.98E-04	0.2055	-1.02E-03 -5.25E-04	0.2055	-9.93E-04 -5.35E-04	0.2055	-9.73E-04 -5.97E-04	0.2056	-9.30E-04 -6.33E-04	0.2057
STEP 9 $\rho=2.4$ MPa	-8.87E-04 -5.78E-04	0.2057	-9.24E-04 -5.38E-04	0.2056	-9.82E-04 -5.32E-04	0.2055	-9.88E-04 -5.10E-04	0.2055	-1.01E-03 -5.35E-04	0.2055	-9.77E-04 -5.45E-04	0.2056	-9.59E-04 -6.02E-04	0.2056	-9.19E-04 -6.37E-04	0.2057
STEP 10 $\rho=3.0$ MPa	-7.37E-04 -6.14E-04	0.2059	-7.32E-04 -6.34E-04	0.2059	-7.31E-04 -6.56E-04	0.2059	-7.21E-04 -6.63E-04	0.2059	-7.27E-04 -6.72E-04	0.2059	-7.25E-04 -6.66E-04	0.2059	-7.45E-04 -6.63E-04	0.2059	-7.54E-04 -6.56E-04	0.2059
STEP 10 $\rho=3.5$ MPa	-6.97E-04 -6.21E-04	0.2059	-6.83E-04 -6.57E-04	0.2060	-6.69E-04 -6.84E-04	0.2060	-6.55E-04 -7.00E-04	0.2060	-6.58E-04 -7.04E-04	0.2060	-6.63E-04 -6.95E-04	0.2060	-6.91E-04 -6.77E-04	0.2060	-7.12E-04 -6.62E-04	0.2060

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Analizando los resultados obtenidos, se observa que, para el valor de presión registrado antes de ejecutar la roza (aproximadamente 2.4 MPa), correspondiente al Step 9, no se alcanza del todo la distancia inicial medida entre los puntos de control (ver Tabla 4.1.37), por lo que se ha seguido aumentando la presión hasta que esta distancia se ha recuperado en el Step 10, correspondiente a una presión $p=35 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (3.5 MPa). Esta última presión es del mismo orden que la registrada experimentalmente (3.49 MPa).

En las Fig. 4.1.193 y 4.1.194 se representa la distribución tensional en el muro en los Steps 9 y 10 respectivamente. A continuación, en las Fig. 4.1.195 y 4.1.196, se ilustran los desplazamientos para cada uno de los Steps referidos.

Comparando las distribuciones de tensiones de la Fig. 4.1.193 y de la Fig. 4.1.185, puede comprobarse que con la aplicación de la presión sobre la roza resulta una distribución tensional aproximadamente igual a la existente antes de ejecutar la misma. Sin embargo, en la Fig. 4.1.194, se observa que para el Step 10, aparece un bulbo de compresiones en el entorno de la roza, como era de esperar, al aumentar la presión por encima del valor inicialmente registrado.

En lo que se refiere a los desplazamientos, éstos recuperan una distribución uniforme, muy similar a la existente inicialmente (ver Fig. 4.1.195 y Fig. 4.1.186).

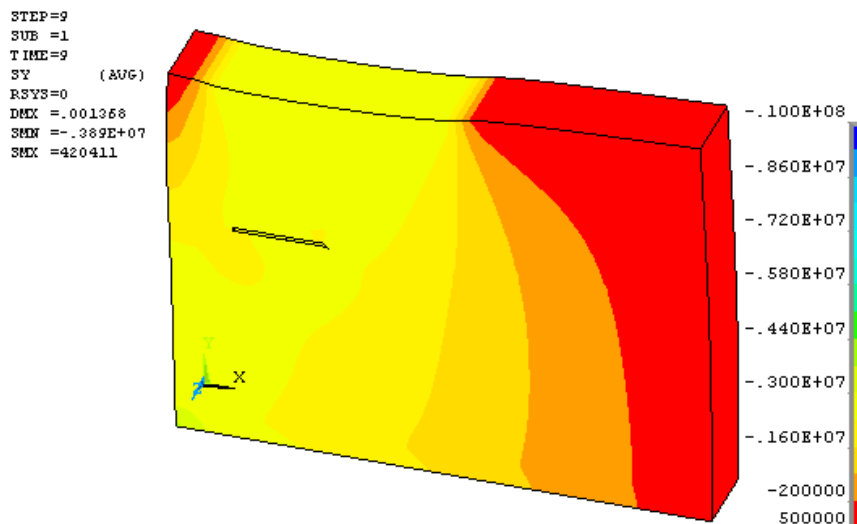


Fig. 4.1.193: Distribución de tensiones (N/m^2) para $p= 24 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (2.4 MPa). Step 9. Cálculo 1.

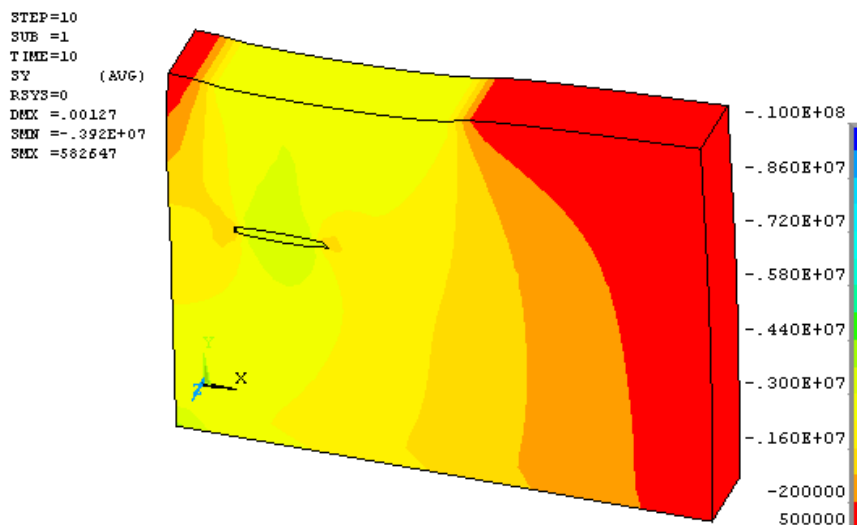


Fig. 4.1.194: Distribución de tensiones (N/m^2) para $p= 35 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (3.5 MPa). Step 10. Cálculo 1.

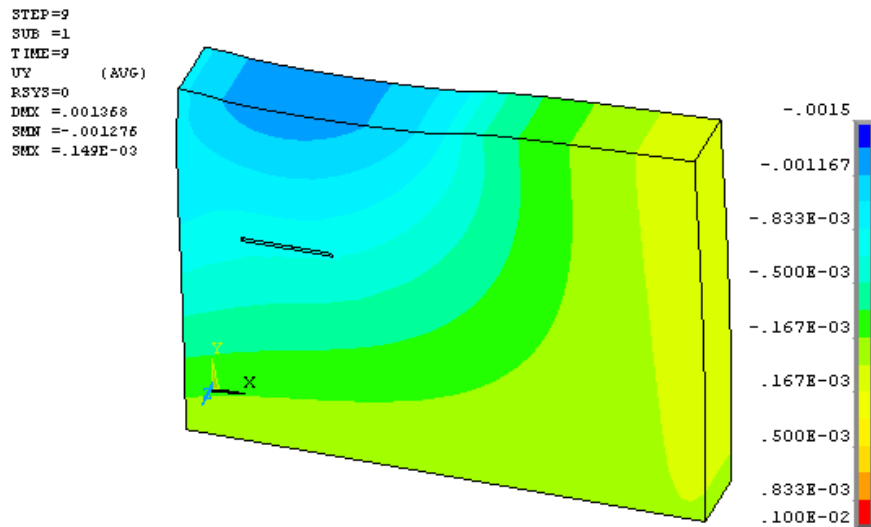


Fig. 4.1.195: Desplazamientos verticales (m) para $p= 24 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (2.4 MPa). Step 9. Cálculo 1.

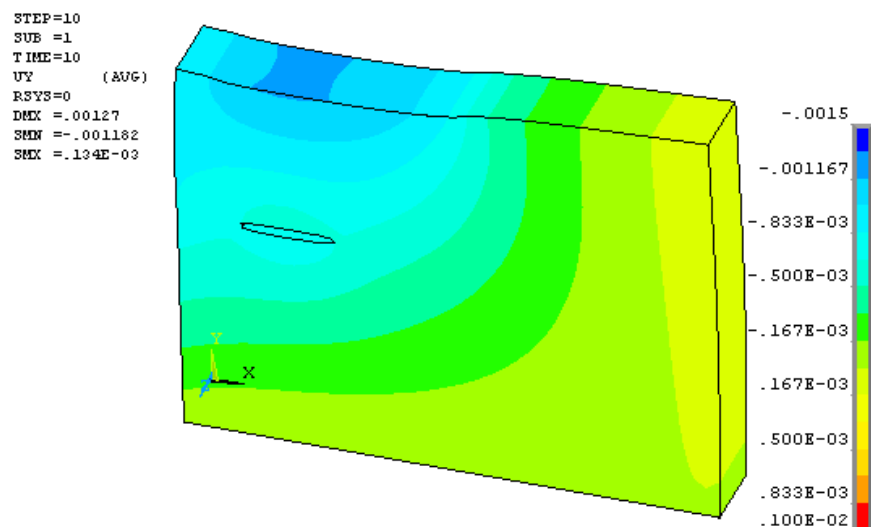


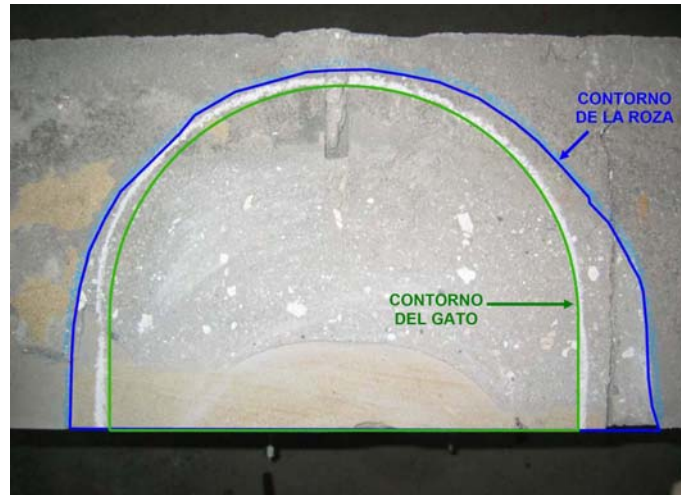
Fig. 4.1.196: Desplazamientos verticales (m) para $p= 35 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (3.5 MPa). Step 10. Cálculo 1.

4.1.7.3.4 Cálculo 2. Considerada la forma real de la roza

Tras la realización del cálculo descrito, se ha tratado de asimilar más el cálculo al desarrollo real del ensayo. Para ello, **se ha modificado la forma de la roza de acuerdo con la forma real realizada.**

Para tratar de determinar con exactitud la forma de la roza ejecutada, después del ensayo se demolió la parte superior del muro a la altura de la sección en la que se realizó el corte (se remite al lector al apartado 4.1.9.1). Como ya se ha expuesto, tras esta operación queda a la vista la roza con lo que puede delimitarse con exactitud el contorno de la misma (el cuál también puede determinarse de forma aproximada antes de la introducción del gato plano, tomando medidas de la profundidad de la misma, cada cierta distancia, desde la superficie del paramento), y situar sobre éste el correspondiente al gato plano. En la Fig. 4.1.197 se muestra, nuevamente, una fotografía obtenida durante el proceso de demolición controlada del ensayo, sobre la que se han representado los contornos relacionados.

Fig. 4.1.197: Contorno de la roza y del gato (ensayo GPS-A Simple)



Sobre el volumen del muro completo, se han situado estos contornos en la localización exacta obteniendo el modelo del muro con la roza y con el volumen del gato en su interior, tal y como se ilustra en la Fig. 4.1.198.

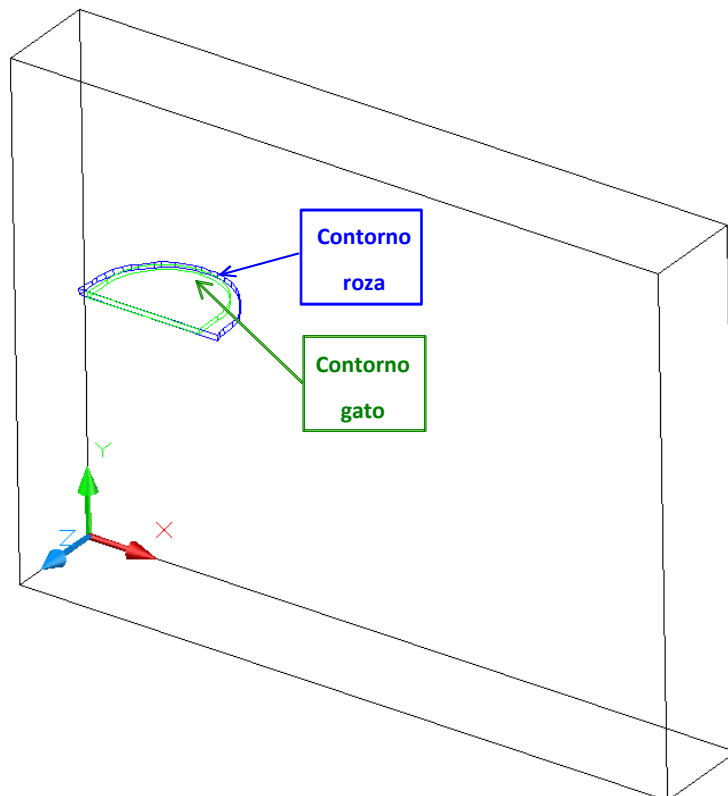


Fig. 4.1.198: Modelo del muro con forma real de la roza y del gato. Cálculo 2.

Para este caso, dado que al introducir la forma de la roza, el volumen del muro adopta una forma irregular, se ha realizado la discretización con elementos tetraédricos para una mejor adaptación de éstos al contorno. Como ya se ha señalado, los elementos empleados han sido tipo SOLID92. En la Fig. 4.1.199 se muestra la malla espacial empleada para este cálculo.

Al igual que en el cálculo 1 anterior, el cálculo 2 se ha organizado en escalones progresivos de presión (Steps) con los mismos valores y la misma numeración que la referida anteriormente salvo el último (**Step 10**), en el que el **valor de la presión** sobre la roza se ha modificado según los casos, de forma que sea el que **se corresponde con la recuperación de la distancia inicial medida entre los puntos de control, previamente a la ejecución de la roza.**

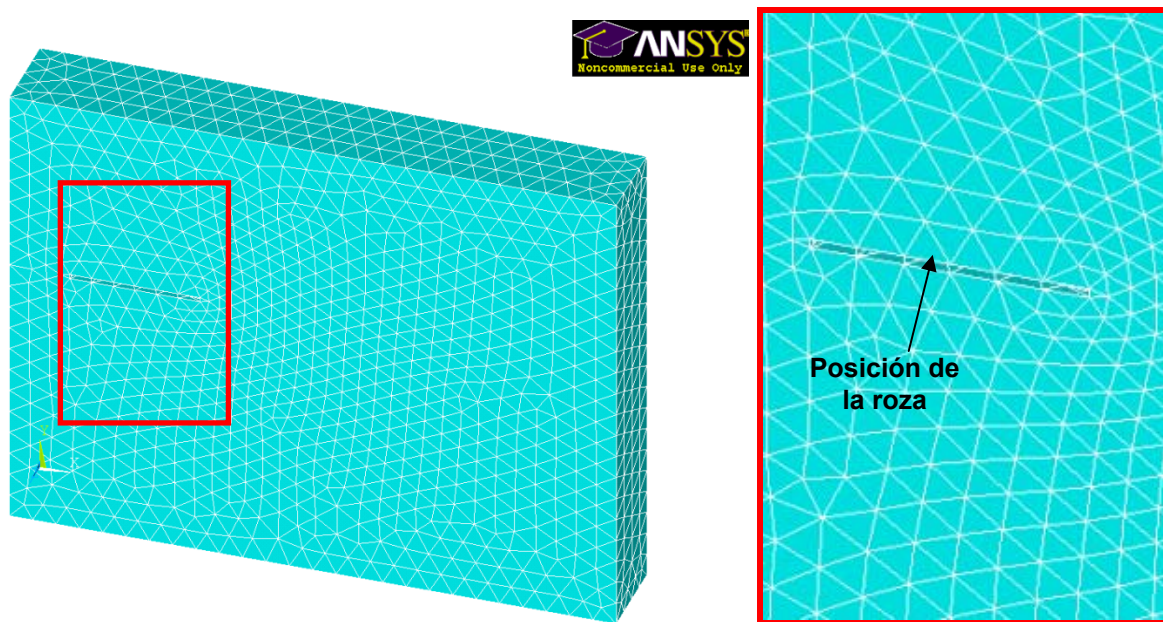


Fig. 4.1.199: Discretización del muro con roza mediante elementos tetraédricos. Cálculo 2.

En primer lugar, se ha evaluado la distribución de tensiones, y de deformaciones, una vez ejecutada la roza, bajo la acción de la carga sobre la cara superior del muro y del peso propio. En la Fig. 4.1.200 y en la Fig. 4.1.201 se muestran los resultados obtenidos.

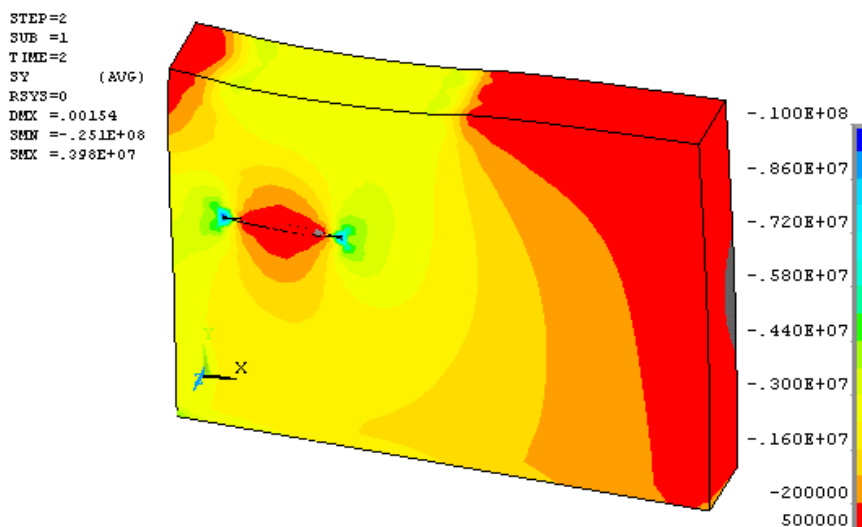


Fig. 4.1.200: Distribución de tensiones (N/m^2) con roza. Step 2. Cálculo 2.

Comparando este caso con el mismo estado alcanzado en el cálculo 1 expuesto con anterioridad (Fig. 4.1.200 y Fig. 4.1.190) puede comprobarse como, en este caso, al realizar la roza las tracciones que aparecen se reparten más a lo largo de la longitud de la misma, mientras que en el otro cálculo se concentraban más en su parte central. La justificación de lo referido se encuentra en que, en este segundo caso, al no cubrir la roza todo el espesor del muro, se produce una menor deformación relativa entre los puntos extremos y los centrales de la roza, ya que la porción de muro que queda en la parte posterior limita los desplazamientos verticales de la zona central. Como consecuencia de ello, se registran desplazamientos más parecidos en todos los puntos, y con ello una distribución de tensiones más uniforme.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

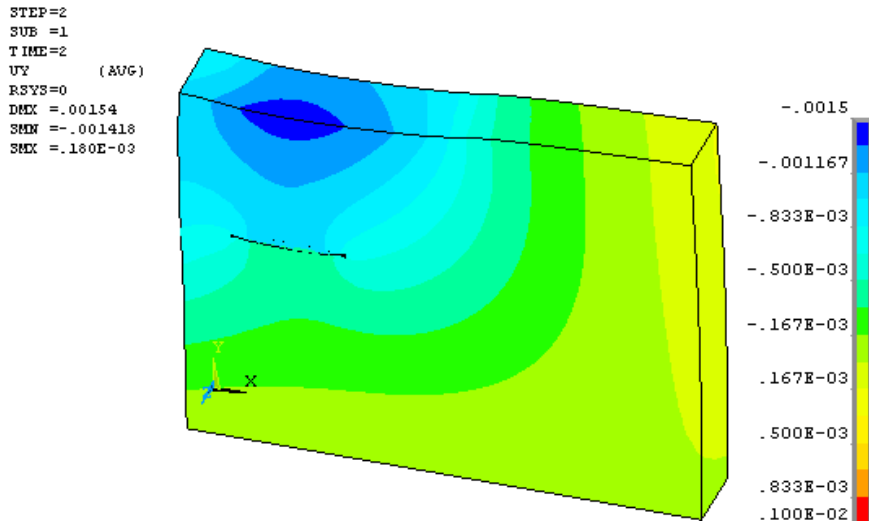
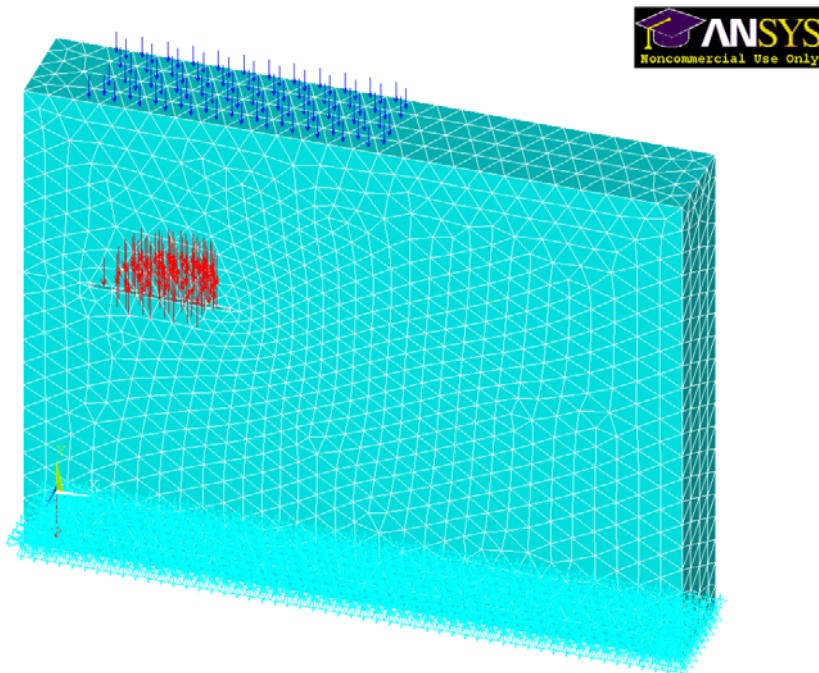


Fig. 4.1.201: Desplazamientos verticales con roza (m). Step 2. Cálculo 2.

Posteriormente, comenzó a aplicarse una presión uniforme sobre la superficie superior e inferior del gato plano. A diferencia del cálculo anterior, en este caso se ha considerado una superficie de aplicación menor que la de la roza, considerando únicamente el área situada dentro del contorno definido por el gato, según la Fig. 4.1.197 ($k_a=k_{\text{gato-roza}}=0.808$). En la Fig. 4.1.202 se representan las zonas de aplicación de carga.

Fig. 4.1.202:
Aplicación de la carga
sobre la roza. Cálculo
2.



Al igual que en el anterior cálculo, para los distintos Steps de carga, se han evaluado las distribuciones de tensiones y de desplazamientos, junto con la variación de la distancia existente entre los pares de puntos de control. Los resultados obtenidos para los Steps 9 y 10 se presentan en las Fig. 4.1.203 - 4.1.206.

A continuación, en la Tabla 4.1.38, se muestran los valores exactos de los desplazamientos de los puntos de control. En este caso, únicamente se señalan los correspondientes a los Steps 2, 9 y 10, al ser éstos los más representativos. En el Step 2 se observa el acercamiento de los nodos al ejecutar la roza, en el Step 9 se comprueba la distancia entre éstos cuando la presión aplicada por el gato iguala a la teórica inicial (2.4 MPa), y el **Step 10 se corresponde con una presión interna de $p=30 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2=3.0 \text{ MPa}$, para la que se recupera la deformación en casi todos los puntos.**

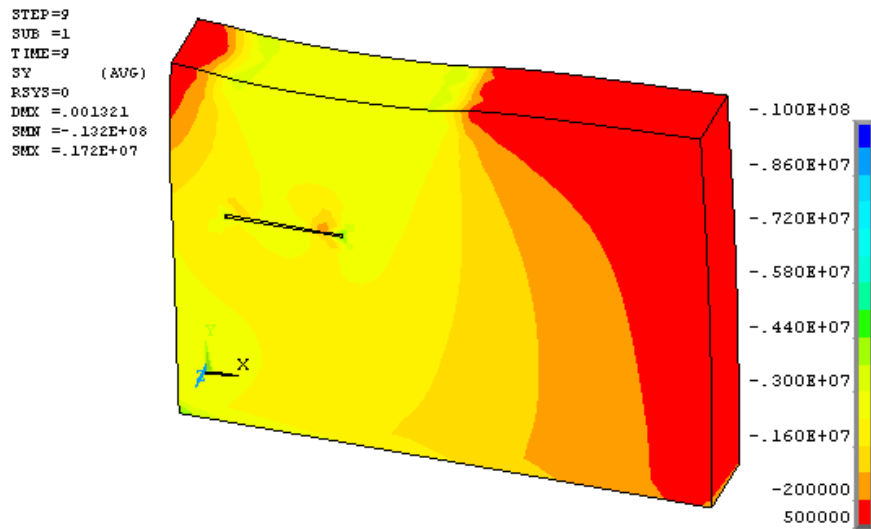


Fig. 4.1.203: Distribución de tensiones (N/m^2) para $p=24 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (2.4 MPa). Step 9. Cálculo 2.

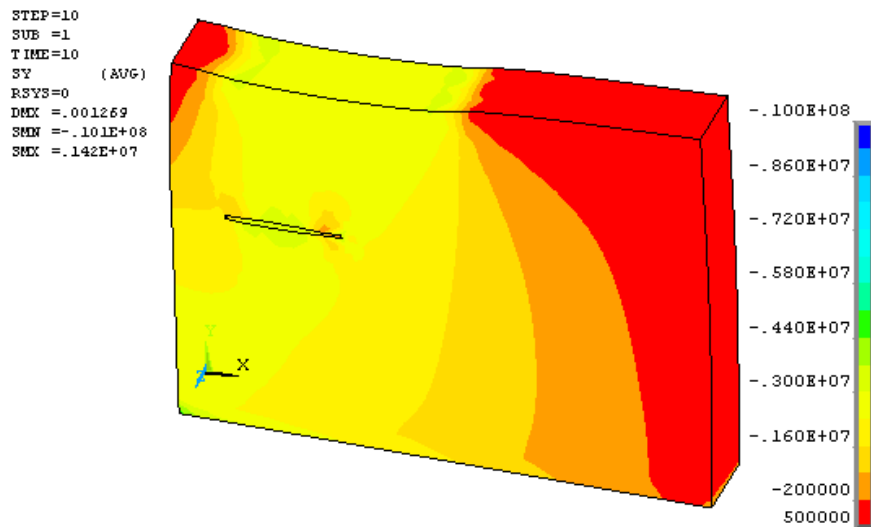


Fig. 4.1.204: Distribución de tensiones (N/m^2) para $p=30 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (3.0 MPa). Step 10. Cálculo 2.

Al analizar las distribuciones de tensiones para el Step 9, se observa que ésta es menos uniforme que en los casos expuestos con anterioridad. Mientras que en la zona central sí se alcanza una tensión parecida a la inicial en los extremos de la roza no acaba de eliminarse el fenómeno de concentración de tensiones. A diferencia de la concentración de tensiones que se registra al realizar la roza, debida al reparto de carga en el plano XY, en este caso la concentración de tensiones se registra respecto al plano XZ, ya que dada la forma semicircular de la roza y del gato, la presión no es uniforme a lo largo del espesor del muro.

En la distribución de tensiones correspondiente al Step 10 se observa como la zona comprimida en el entorno de la roza ha disminuido respecto al Cálculo 1, ya que la presión necesaria para recuperar la deformación inicial es inferior en este caso.

En cuanto a los desplazamientos, en las figuras correspondientes al Step 9 (Fig. 4.1.205 y 4.1.195) se observa como éstos se concentran, fundamentalmente, en la cara anterior del muro, fenómeno que no ocurría al considerar la roza en todo el espesor del mismo, siendo una muestra de la deformación diferencial que se produce a lo largo del espesor del componente estructural. En el registro correspondiente al Step 10 (Fig. 4.1.206) este fenómeno se ve atenuado pero sin acabar de desaparecer del todo.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

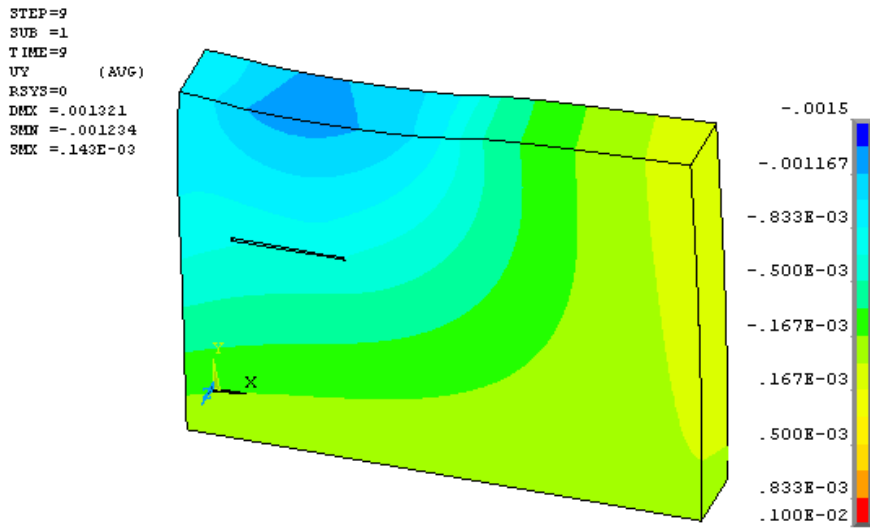


Fig. 4.1.205: Desplazamientos verticales (m) para $p=24 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (2.4 MPa). Step 9. Cálculo 2.

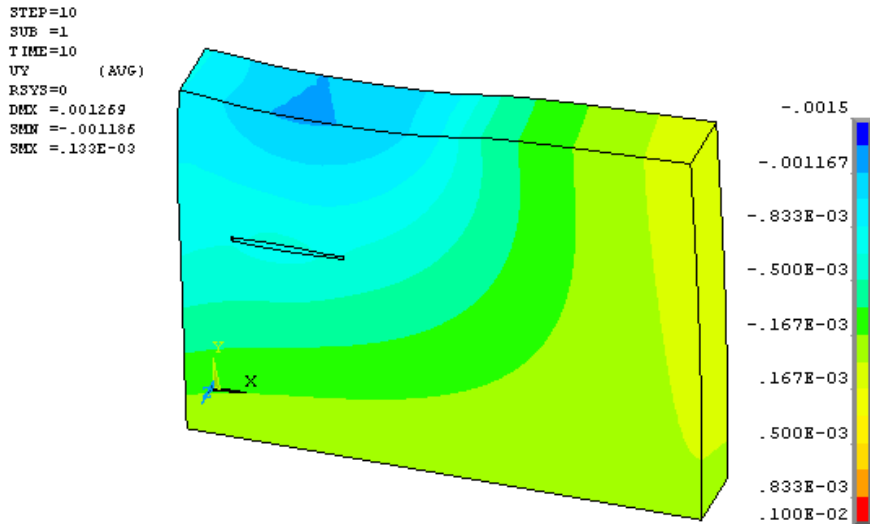


Fig. 4.1.206: Desplazamientos verticales (m) para $p=30 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (3.0 MPa). Step 10. Cálculo 2.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

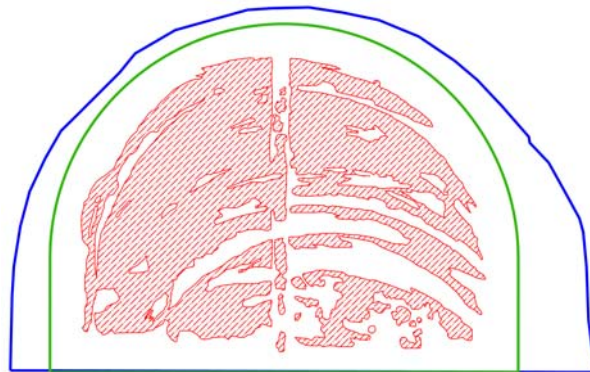
Tabla 4.1.38: Desplazamientos en puntos de control. Cálculo 2.

		Puntos de control											
		3541 3544		3566 3934		3850 3621		3607 3595		3582 3571		3530 3527	
		ϵ_y	ΔL (m)	ϵ_y	ΔL (m)	ϵ_y	ΔL (m)	ϵ_y	ΔL (m)	ϵ_y	ΔL (m)	ϵ_y	ΔL (m)
STEP 0		0.1211		0.1569		0.1565		0.1557		0.1625		0.0941	
STEP 2		-9.58E-04 -5.80E-04	0.1208	-1.06E-03 -4.24E-04	0.1563	-1.11E-03 -3.87E-04	0.1558	-1.11E-03 -3.83E-04	0.1550	-1.05E-03 -4.07E-04	0.1618	-8.65E-04 -5.25E-04	0.0937
STEP 9	p=2.4 MPa	-7.62E-04 -6.40E-04	0.1210	-7.66E-04 -6.08E-04	0.1568	-7.68E-04 -6.02E-04	0.1563	-7.77E-04 -5.92E-04	0.1555	-7.87E-04 -5.75E-04	0.1622	-7.40E-04 -5.82E-04	0.0939
STEP 10	p=3.0 MPa	-7.11E-04 -6.55E-04	0.1211	-6.89E-04 -6.56E-04	0.1569	-6.80E-04 -6.58E-04	0.1565	-6.91E-04 -6.46E-04	0.1557	-7.18E-04 -6.19E-04	0.1624	-7.07E-04 -5.97E-04	0.0939

4.1.7.3.5 Cálculo 3. Considerada la forma de la roza y el área de aplicación de la carga

La última aproximación realizada para modelizar el ensayo de gato plano simple, ha consistido en, **además de considerar la forma real de la roza y del gato, no suponer la presión de éste aplicada sobre todo el área, sino únicamente tener en cuenta el área efectiva de contacto entre el gato plano y el muro.** Para ello, en la realización del ensayo, se colocó un papel de calco sobre el gato, sobre el que quedó registrado el área real de contacto entre el gato y el muro. En la Fig. 4.1.207 se muestra el registro obtenido a partir del calco en relación a los contornos del gato y de la roza realizada para su inserción.

Fig. 4.1.207: Área de contacto gato-muro



Para la modelización de este fenómeno se ha calculado el área de contacto y se ha asimilado a un área uniforme sobre la que se aplica la carga. En la Fig. 4.1.208 se representa en azul el volumen correspondiente a la roza, en verde el del gato y en rojo, las áreas sobre las que se aplica la carga.

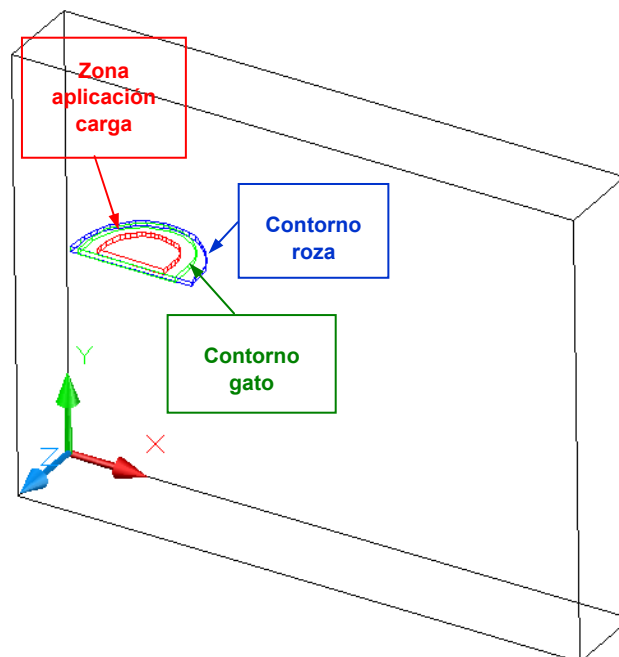


Fig. 4.1.208: Modelo del muro con la forma real de la roza y del gato. Cálculo 3.

En este caso, los resultados de distribución de tensiones una vez ejecutada la roza, y con anterioridad a la aplicación de presión sobre el gato, son los mismos que los obtenidos en el Cálculo 2 ya que la discretización empleada y la forma de la roza considerada son iguales.

La única variación con el anterior cálculo se encuentra en la zona en la que se aplica la presión del gato, la cual ha disminuido, tal como puede apreciarse en la Fig. 4.1.209 ($k_a = k_{\text{contacto-roza}} \approx 0.369$).

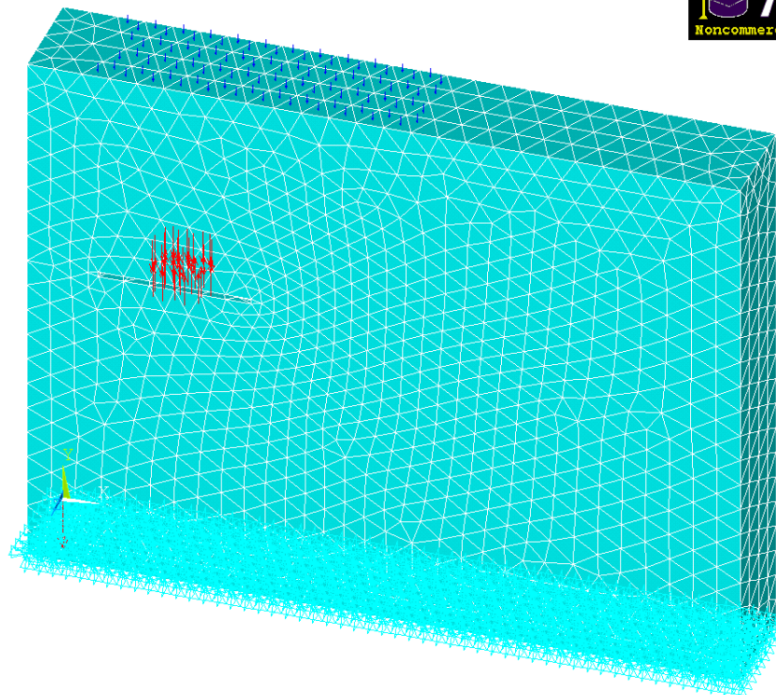
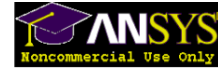


Fig. 4.1.209:
Aplicación de la carga sobre la roza. Cálculo 3

Sobre el área mostrada se han aplicado los distintos Steps de presión, de forma progresiva. En la Fig. 4.1.210 se muestran los resultados obtenidos para una presión sobre el gato de 2.4 MPa y en la Fig. 4.1.211 los desplazamientos verticales correspondientes a este mismo escalón de presión.

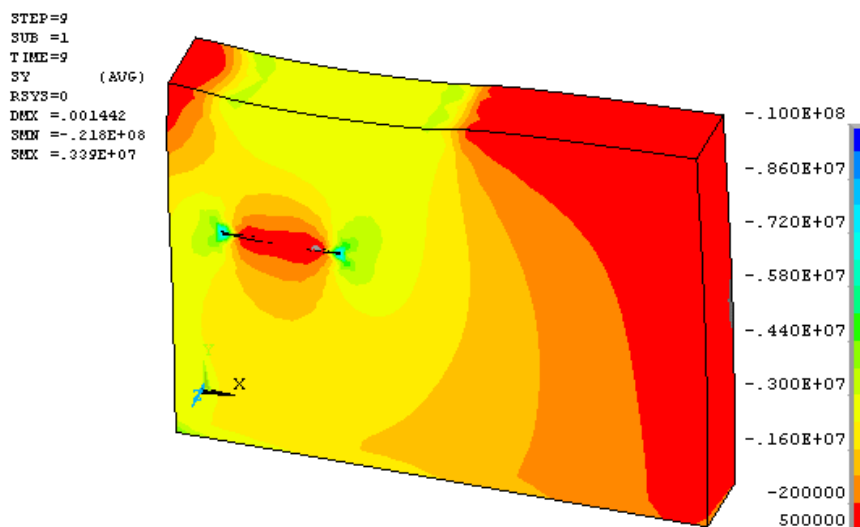


Fig. 4.1.210: Distribución de tensiones (N/m^2) para $p= 24 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (2.4 MPa). Step 9. Cálculo 3.

En estas figuras puede observarse como, al disminuir el área de aplicación de la carga, con la presión correspondiente al estado tensional inicial, antes de ejecutar la roza (aproximadamente 2.4 MPa), no se consiguen hacer desaparecer las tracciones que resultan de la ejecución de la misma y la consecuente deformación de los puntos situados en el entorno de ésta.

En lo que se refiere a las deformaciones, puede verse que al contrario que en los casos anteriores, para este Step no consigue restablecerse la distribución uniforme de los desplazamientos, manteniéndose una deformación relativa entre los puntos situados sobre y bajo la roza.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

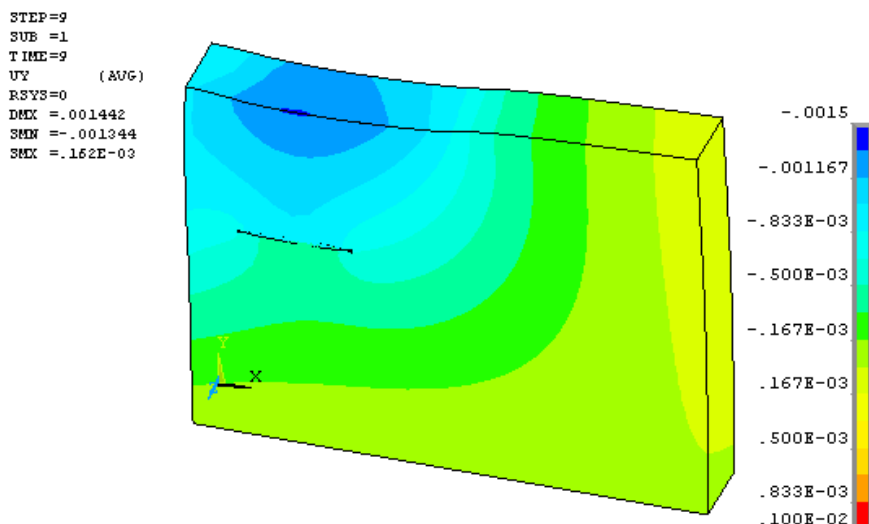


Fig. 4.1.211: Desplazamientos verticales (m). Step 9. Cálculo 3.

A continuación, en la Tabla 4.1.39 se muestran los desplazamientos relativos entre las parejas de puntos de control. Analizándola, puede observarse que en este caso se han implementado distintos niveles de presión correspondientes al Step 10 para tratar de **lograr restituir la distancia inicial entre las parejas de puntos de control. Esto no se logra hasta que no se aplica una presión de $100 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (10 MPa)**. A partir de este resultado puede concluirse que esta situación no es útil para reproducir el comportamiento real experimentado por el componente de sillería durante el ensayo, ya que en laboratorio el valor de la presión necesaria para restituir las distancias iniciales fue mucho menor (3.49 MPa empleando como $k_a = k_{\text{gato-roza}}$).

Una de las posibles causas de este fenómeno puede ser el hecho de que la carga aplicada por el gato se haya concentrado en su zona central, circunstancia por otro lado lógica a la vista de la Fig. 4.1.207, quedando una gran parte de la hendidura dejada por la roza sin presión ninguna. Como se ha podido comprobar, aunque el área de aplicación de la carga sea similar, el hecho de que esté distribuida o concentrada en una zona tiene mucha influencia en la bondad de los resultados obtenidos.

Por otra parte, también hay que referir que el área efectiva de contacto ilustrada en la Fig. 4.1.207 es una magnitud dinámica a lo largo de la prueba, en tanto en cuanto se desarrolla progresivamente bajo los niveles de presión crecientes introducidos durante el ensayo real, por ello que, para estimar con precisión la evolución del ensayo, debiera de conocerse el área efectiva real de contacto, para cada nivel de presión instalado.

En lo que se refiere al ensayo de gato plano simple puede concluirse que el procedimiento descrito como Cálculo 2, implementando la forma real de la roza y la del gato y suponiendo la carga aplicada sobre todo el área de éste, es el que reproduce más fielmente el nivel tensional preexistente con anterioridad a la ejecución de la roza. Además, el nivel tensional necesario, obtenido numéricamente, para restablecer la situación preexistente (3.0 MPa) se aproxima bastante a la tensión obtenida de forma experimental (34.9 MPa), obviamente no presentan valores más aproximados en tanto que el nivel tensional deducido mediante elementos finitos solamente tiene en cuenta deformación de carácter elástico, mientras que la obtenida de forma experimental, además del comportamiento elástico, está afectada por una componente inelástica desarrollada a consecuencia del proceso de corte y por ello es lógico que presente un valor un poco más elevado, pues la tensión introducida debe de recuperar la deformación elástica e inelástica.

Con el fin de ilustrar de una manera conjunta los resultados obtenidos en los distintos cálculos realizados, se acompañan la Tabla 4.1.40 y la Tabla 4.1.41 con las que puede establecerse una comparativa visual en tensiones y en desplazamientos.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.1.39: Desplazamientos en puntos de control. Cálculo 3.

		Puntos de control											
		3541 3544		3566 3934		3850 3621		3607 3595		3582 3571		3530 3527	
		ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)
STEP 0		0.1211		0.1569		0.1565		0.1557		0.1625		0.0941	
STEP 9 p=2.4 MPa		-8.83E-04 -5.76E-04	0.1208	-9.55E-04 -4.66E-04	0.1564	-9.82E-04 -4.42E-04	0.1559	-9.88E-04 -4.31E-04	0.1551	-9.62E-04 -4.38E-04	0.1619	-8.15E-04 -5.24E-04	0.0938
STEP 10 p=4.0 MPa		-8.32E-04 -5.73E-04	0.1209	-8.83E-04 -4.94E-04	0.1565	-8.97E-04 -4.79E-04	0.1561	-9.08E-04 -4.63E-04	0.1553	-9.01E-04 -4.59E-04	0.1620	-7.81E-04 -5.23E-04	0.0938
STEP 10 p=5.0 MPa		-8.00E-04 -5.71E-04	0.1209	-8.39E-04 -5.12E-04	0.1566	-8.44E-04 -5.02E-04	0.1561	-8.59E-04 -4.83E-04	0.1553	-8.63E-04 -4.72E-04	0.1621	-7.60E-04 -5.22E-04	0.0938
STEP 10 p=8.0 MPa		-7.06E-04 -5.66E-04	0.1210	-7.05E-04 -5.64E-04	0.1568	-6.84E-04 -5.71E-04	0.1564	-7.11E-04 -5.44E-04	0.1555	-7.48E-04 -5.10E-04	0.1622	-6.97E-04 -5.20E-04	0.0939
STEP 10 p=10.0 MPa		-6.43E-04 -5.62E-04	0.1211	-6.16E-04 -5.99E-04	0.1569	-5.78E-04 -6.17E-04	0.1565	-6.12E-04 -5.84E-04	0.1557	-6.72E-04 -5.36E-04	0.1623	-6.55E-04 -5.19E-04	0.0939

Tabla 4.1.40: Distribución de tensiones. Comparativa de resultados.

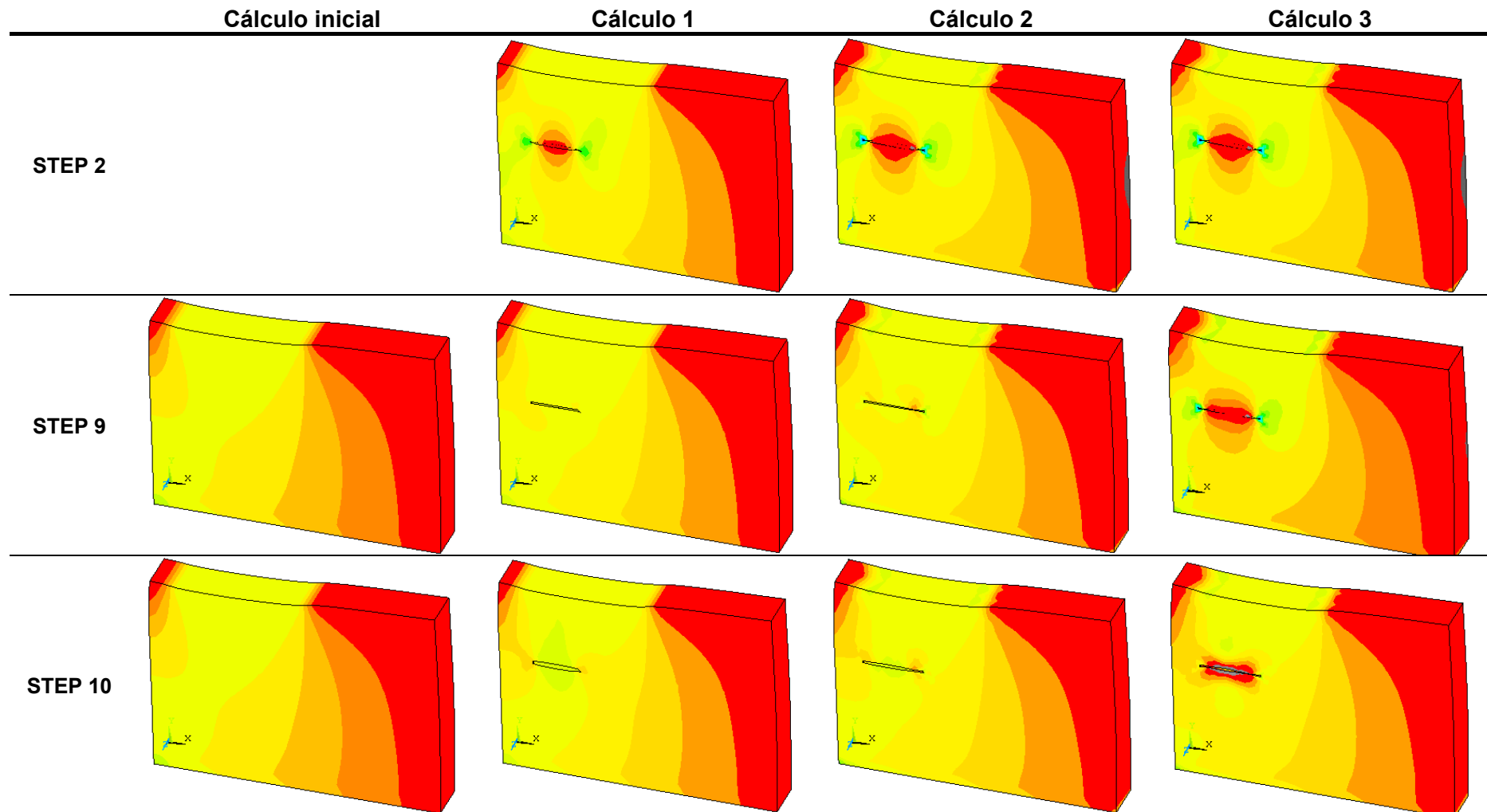
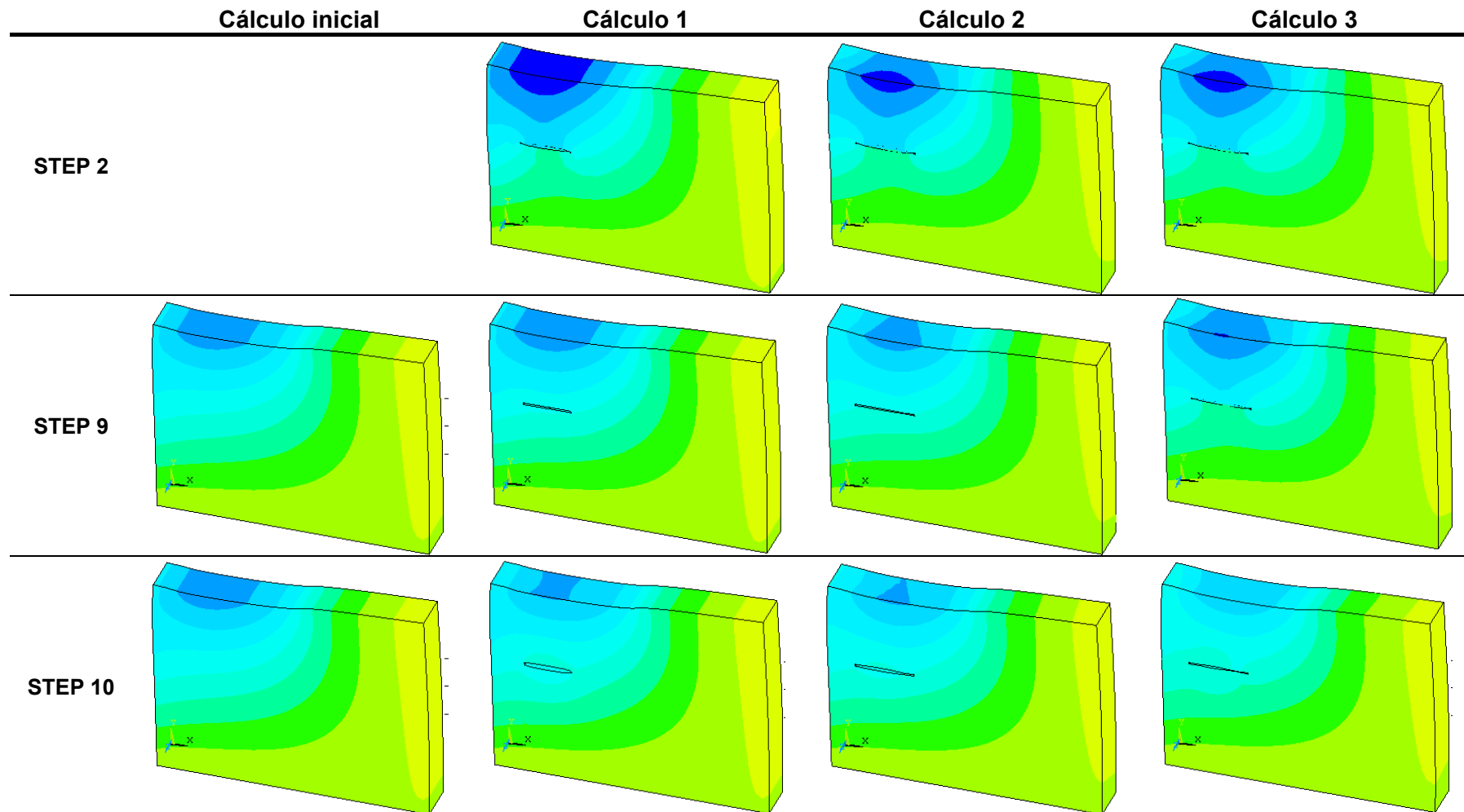


Tabla 4.1.41: Desplazamientos verticales. Comparativa de resultados.



4.1.7.4 Estudio de la influencia de los distintos parámetros en los resultados.

Tal como se ha mencionado anteriormente, sobre el modelo inicial, se han realizado diversos cálculos, modificando los parámetros que se han empleado como datos de partida (E , ν y ρ) y se ha evaluado su influencia en los resultados obtenidos.

Para establecer dicha comparativa, se ha procedido a realizar una búsqueda en bibliografía especializada, con el fin de hallar valores habitualmente empleados para los parámetros, con la misma filosofía que se enfrentaría la problemática caso de no disponer de ningún dato de carácter experimental. De esta forma, se plantearán cálculos paralelos entre estos valores bibliográficos y los empleados en la presente investigación.

Por otra parte, la estimación de los valores usuales de E , ν y ρ a partir de bibliografía, ha conducido a verificar la problemática existente en la actualidad para poder establecer “a priori” los parámetros mecánicos de un muro de fábrica, dada la dispersión de valores que se obtienen en función de la referencia consultada. Ésta es, por tanto, una razón más para reafirmar la necesidad de la realización de ensayos de gato plano que permita determinar de forma objetiva los parámetros mecánicos del material en cada caso concreto a estudiar.

4.1.7.4.1 Módulo de Elasticidad

Para determinar el valor del Módulo de Elasticidad se han empleado dos alternativas:

- I. Por un lado, se ha determinado el módulo de la fábrica directamente a partir del de la piedra (E_b).
- II. Por otro, se ha procedido en primer lugar a estimar la resistencia a compresión de la fábrica (f) por diferentes métodos, para posteriormente, a partir de un valor medio de todos los obtenidos, proceder a determinar el valor para el Módulo de deformación, mediante expresiones recogidas en distintas referencias.

Para el empleo de ambas alternativas se hace necesario establecer previamente las características mecánicas de la piedra componente de la fábrica y, en algunos casos, también del mortero de asiento. A continuación se relacionan los valores empleados.

Piedra

Resistencia a compresión:

- $f_b=58.4$ MPa, valor medio de distintas fuentes bibliográficas: Baker, Arredondo, Camuñas (Martínez et al. 2001).
- $f_b =22.5$ MPa, valor medio de la resistencia para arenisca en seco de diferentes localizaciones españolas (Martínez et al. 2001).

Se ha optado por considerar un valor de **$f_b=30$ MPa**.

Módulo de Elasticidad:

- $E_b=20,600$ MPa (Baker)
- $E_b=30,000$ MPa (UIC)

Se ha tomado un valor medio **$E_b=25,000$ MPa**.

Mortero

Resistencia a compresión: **$f_m=4.73$ MPa** (valor obtenido en ensayos de laboratorio, ver Anexo 2).

Módulo de Elasticidad: **$E_m=875$ MPa**, valor medio del rango recomendado por UIC, (Martínez et al. 2001).

Con estos valores se ha procedido a aplicar las dos alternativas descritas anteriormente.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

- I. Para estimar directamente el valor del Módulo de Elasticidad de la fábrica se ha empleado la siguiente expresión recomendada por UIC:

$$\text{UIC (Martínez et al. 2001): } E = E_b \cdot \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha \cdot \beta} \approx 0.5 \cdot E_b = 12,500 \text{ MPa}$$

siendo: $a=0.02$; $b=50$

- II. De acuerdo con esta metodología, primero se estima la resistencia a compresión de la fábrica, a partir de la cual se obtiene el Módulo de Elasticidad. Las expresiones recogidas en las distintas publicaciones consultadas son las siguientes:

Resistencia a compresión de la fábrica (f):

▪ BD 21/93 (Martínez et al. 2001): $f = 0.55 \cdot f_b^{0.63} \cdot 2.5^{0.25} = 5.9 \text{ MPa}$

▪ Ohler (Martínez et al. 2001), considerando $\alpha = \frac{h_m}{h_b} = \frac{1.5}{29} = 0.05$ (Fig. 4.1.182):

$$f = \frac{a \cdot f_b}{1 + \frac{b \cdot \alpha}{2} \cdot \frac{f_b}{f_{tb}}} = \frac{a \cdot f_b}{1 + 10 \cdot b \cdot \alpha} = \frac{0.811 \cdot 30}{1 + 10 \cdot 0.960 \cdot 0.05} = 16.4 \text{ MPa}$$

▪ UIC (Martínez et al. 2001), considerando $\alpha = \frac{h_m}{h_b} = \frac{1.5}{29} = 0.05$ (Fig. 4.1.182):

$$f = 0.5 \cdot \left(f_m + \frac{a \cdot f_b - f_m}{1 + \frac{b \cdot \alpha}{2} \cdot 0.5 \cdot \frac{f_b}{f_{tb}}} \right) = 0.5 \cdot \left(4.73 + \frac{1.0 \cdot 30 - 4.73}{1 + \frac{2.2 \cdot 0.05}{2} \cdot \frac{0.5}{0.025}} \right)$$

$$f = 8.38 \text{ MPa}$$

▪ PIET 70: $f = 6.25 \text{ MPa}$ (arenisca con $f_b > 30 \text{ MPa}$)

▪ BS 5628: Part 1:1978: $f = 15.0 \text{ MPa}$ ($f_b \approx 30 \text{ MPa}$; mortero tipo iii)

Considerando el valor medio, la resistencia a compresión considerada es $f=10.39 \text{ MPa}$

Módulo de Elasticidad (E):

▪ EC6 (CEN, Eurocódigo 6 1997): $E = 1.000 \cdot f_k = 10,390 \text{ MPa}$

▪ DIN 1053 (1996): $E = 700 \cdot f_{ck} = 7,273 \text{ MPa}$

▪ Schubert (Hendry 1998): $E = 2,116 \cdot \sqrt{f_{ck}} = 6,821 \text{ MPa}$

La media de estos valores, junto con el obtenido según el UIC (alternativa I), da como resultado un valor $E=9,246 \text{ MPa}$.

Previamente a la obtención de resultados, ya puede comprobarse la diferencia existente entre el valor obtenido a través de los ensayos de gato plano doble (3,110 MPa), y el obtenido a partir de bibliografía (9,246 MPa), además de las dificultades para determinar este último dada la dispersión existente entre los valores, en función de la referencia consultada.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En este nuevo escenario, se ha evaluado, en primer lugar, la situación del muro, en tensiones y en desplazamientos, antes de simular la ejecución de la roza. En las Fig. 4.1.212 y 4.1.213 se representan los resultados obtenidos.

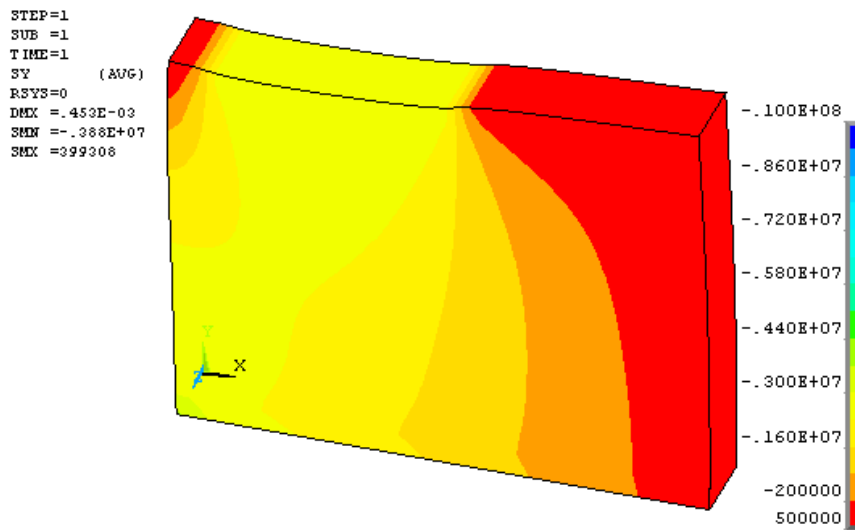


Fig. 4.1.212: Distribución de tensiones inicial (N/m^2). Step 1. Variación de E.

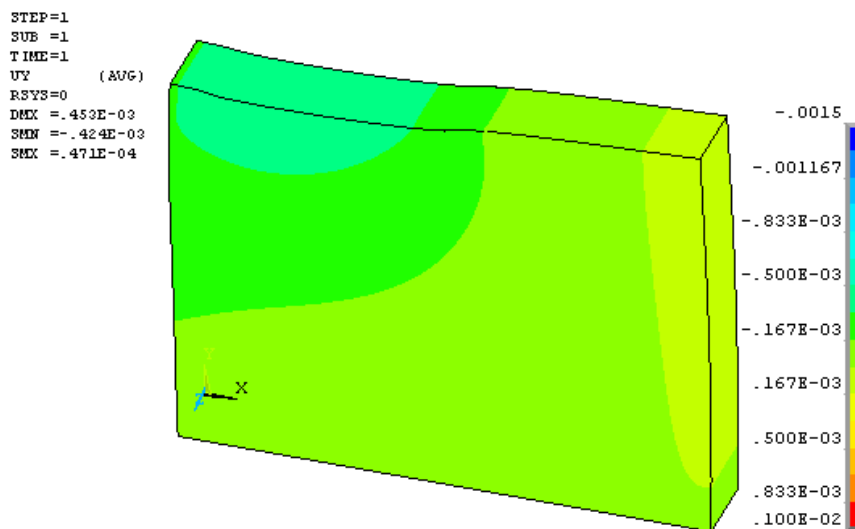


Fig. 4.1.213: Desplazamientos verticales iniciales (m). Step 1. Variación de E.

Como se puede ver en las figuras anteriores, la distribución de tensiones es muy parecida a la obtenida para el valor del Módulo de Elasticidad considerado en todo el estudio (ver Fig. 4.1.185), mientras que en el resultado en desplazamientos difiere más. Como era de esperar, al considerarse el material más rígido los desplazamientos bajo la acción de la carga vertical se ven disminuidos.

A continuación, se ha simulado la ejecución de la roza, de acuerdo con el procedimiento descrito como Cálculo 1. Los pasos que se han seguido para el cálculo son los mismos que los descritos en el apartado relativo a esta aproximación (ver epígrafe 4.1.7.3.3).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En las Fig. 4.1.214 y 4.1.215 se muestran los resultados obtenidos para la distribución de tensiones y de desplazamientos, respectivamente, al eliminar los elementos correspondientes a la roza, bajo la acción de la carga en la cara superior del muro y el peso propio.

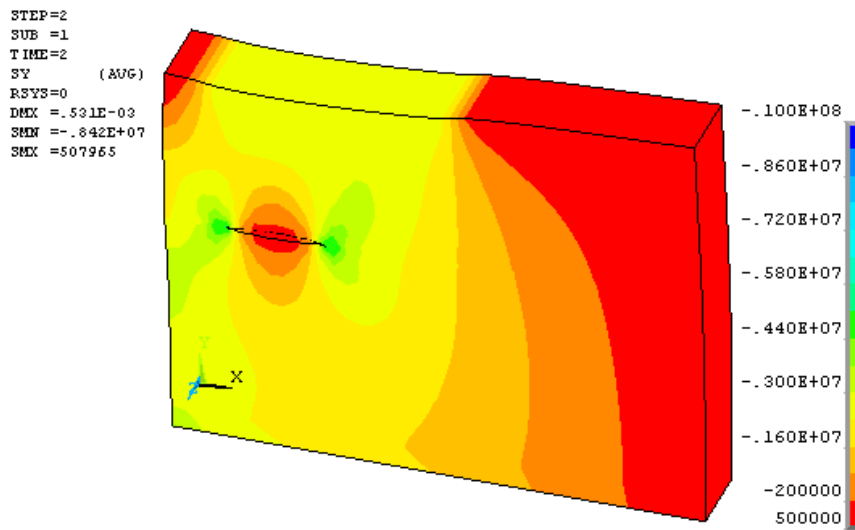


Fig. 4.1.214: Distribución de tensiones con roza (N/m^2). Step 2. Variación de E.

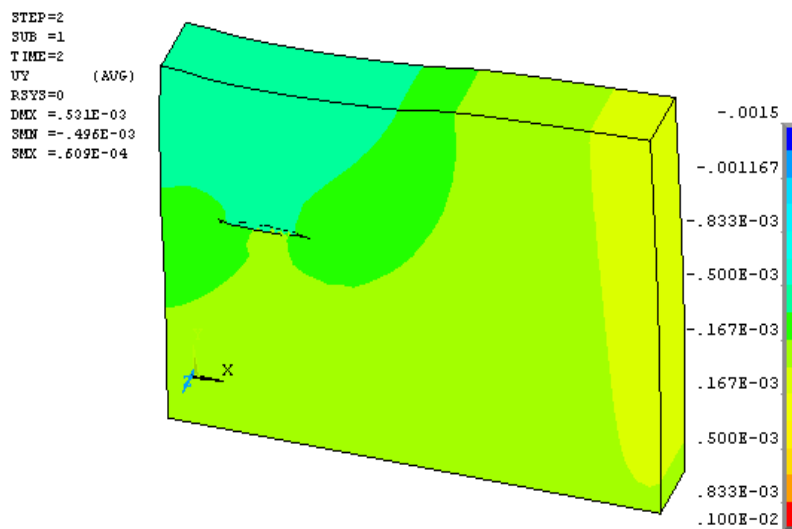


Fig. 4.1.215: Desplazamientos verticales (m). Step 2. Variación de E.

Una vez más, la diferencia respecto a los cálculos anteriores se localiza en los resultados en desplazamientos, como consecuencia de la variación en la rigidez del muro. Este hecho hace que la presión sobre la roza necesaria para recuperar el estado deformacional de partida sea menor que cuando se ha considerado un menor valor del Módulo de Elasticidad. En la Tabla 4.1.42 queda patente este hecho. Se observa como el Step 10, correspondiente a una presión de 3.0 MPa, se recupera totalmente la distancia inicial entre los puntos de control mientras que en el caso anterior era necesaria una presión de 3.5 MPa.

En las Fig. 4.1.216 - 4.1.219 se representan los resultados de las distribuciones de tensiones y de desplazamientos obtenidas para los Steps 9 y 10 del cálculo.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

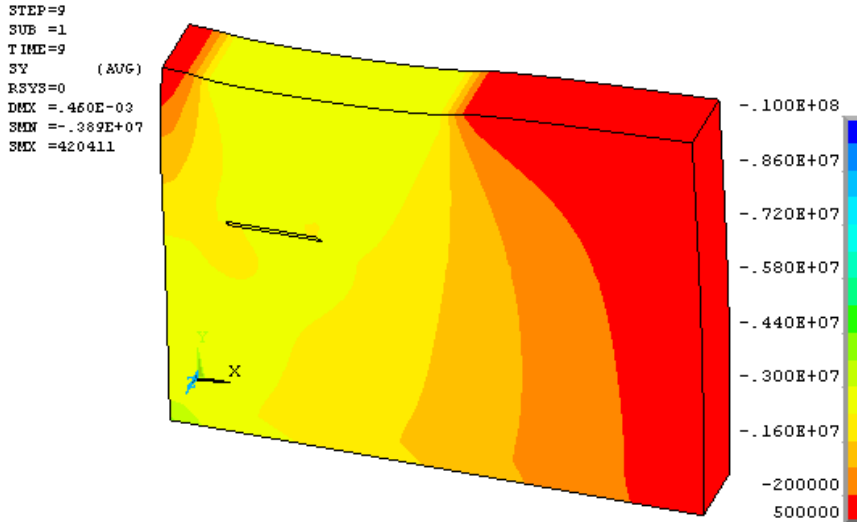


Fig. 4.1.216: Distrib. tensional (N/m^2) para $p=24 \cdot 10^5 N/m^2$ (2.4 MPa). Step 9. Variación de E.

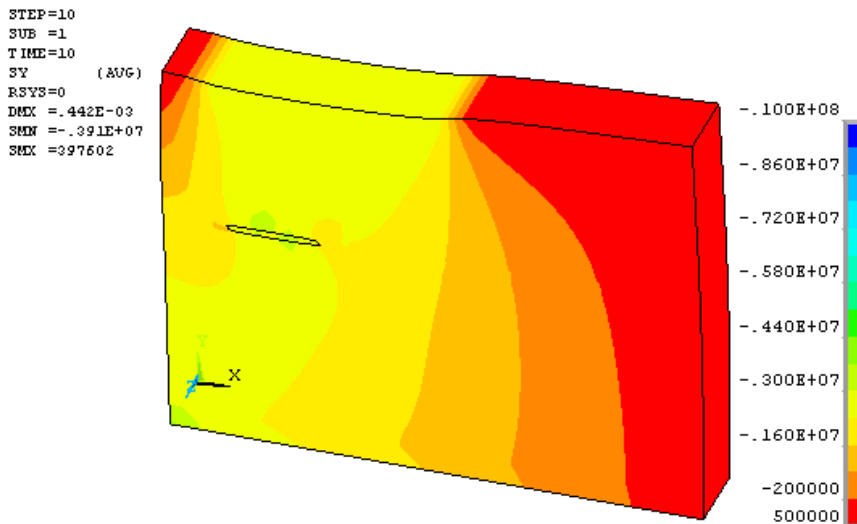


Fig. 4.1.217: Distrib. tensional (N/m^2) para $p=30 \cdot 10^5 N/m^2$ (3.0 MPa). Step 10. Variación de E.

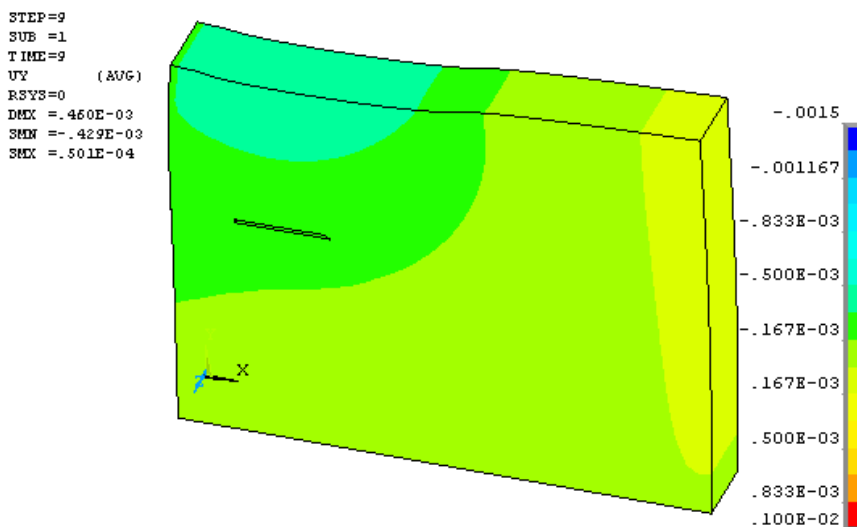


Fig. 4.1.218: Desplazamientos verticales (m). Step 9. Variación de E.

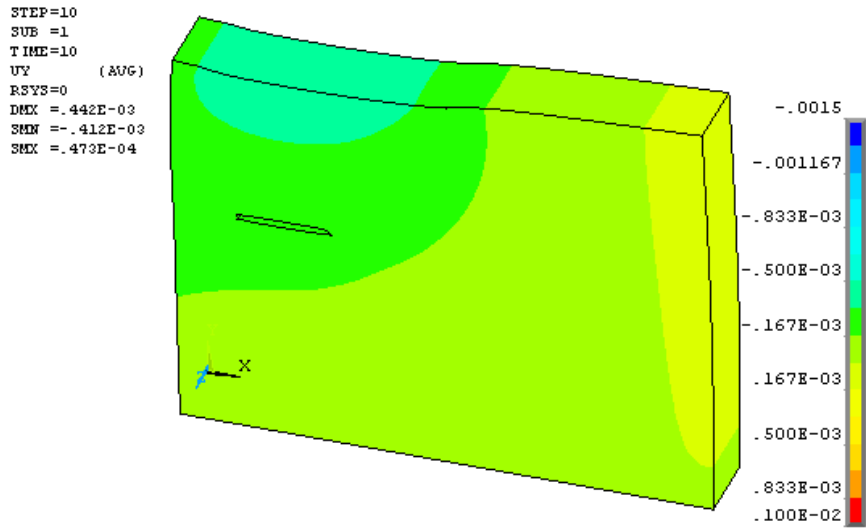


Fig. 4.1.219: Desplazamientos verticales (m). Step 10. Variación de E.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.1.42: Desplazamientos en puntos de control. Variación de E.

	Puntos de control															
	1443 7124		1444 7125		1445 7126		1446 7127		1447 7128		1448 7129		1449 7130		1450 7131	
	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)	ε_y	ΔL (m)
STEP 0		0,2060		0,2060		0,2060		0,2060		0,2060		0,2060		0,2060		0,2060
STEP 2	-3,28E-04 -1,91E-04	0,2059	-3,44E-04 -1,67E-04	0,2058	-3,73E-04 -1,63E-04	0,2058	-3,76E-04 -1,49E-04	0,2058	-3,84E-04 -1,62E-04	0,2058	-3,69E-04 -1,65E-04	0,2058	-3,58E-04 -1,95E-04	0,2058	-3,38E-04 -2,10E-04	0,2059
STEP 9 $p=2.4$ MPa	-2,64E-04 -2,03E-04	0,2059	-2,66E-04 -2,04E-04	0,2059	-2,72E-04 -2,09E-04	0,2059	-2,70E-04 -2,08E-04	0,2059	-2,73E-04 -2,13E-04	0,2059	-2,70E-04 -2,12E-04	0,2059	-2,73E-04 -2,17E-04	0,2059	-2,71E-04 -2,18E-04	0,2059
STEP 10 $p=3.0$ MPa	-2,48E-04 -2,06E-04	0,2060	-2,46E-04 -2,13E-04	0,2060	-2,46E-04 -2,20E-04	0,2060	-2,42E-04 -2,23E-04	0,2060	-2,45E-04 -2,26E-04	0,2060	-2,44E-04 -2,24E-04	0,2060	-2,50E-04 -2,23E-04	0,2060	-2,53E-04 -2,21E-04	0,2060

4.1.7.4.2 Coeficiente de Poisson

Para el valor del coeficiente de Poisson, además del empleado en todos los cálculos, obtenido del ensayo de gato plano doble ($\nu=0.19$), se ha realizado otro análisis con una valor $\nu=0.25$, de acuerdo con los valores recomendados para muros de fábrica recogidos en el Eurocódigo 6.

Como en el caso anterior, para este nuevo escenario, se ha evaluado, en primer lugar, la situación del muro, en tensiones y en desplazamientos, antes de simular la ejecución de la roza. En la Fig. 4.1.220 y 4.1.221 se representan los resultados obtenidos.

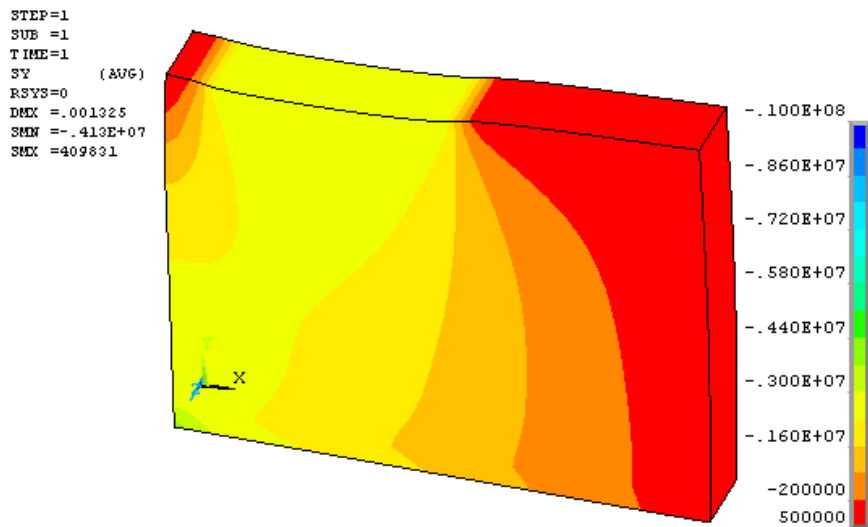


Fig. 4.1.220: Distribución de tensiones inicial (N/m^2). Step 1. Variación de ν .

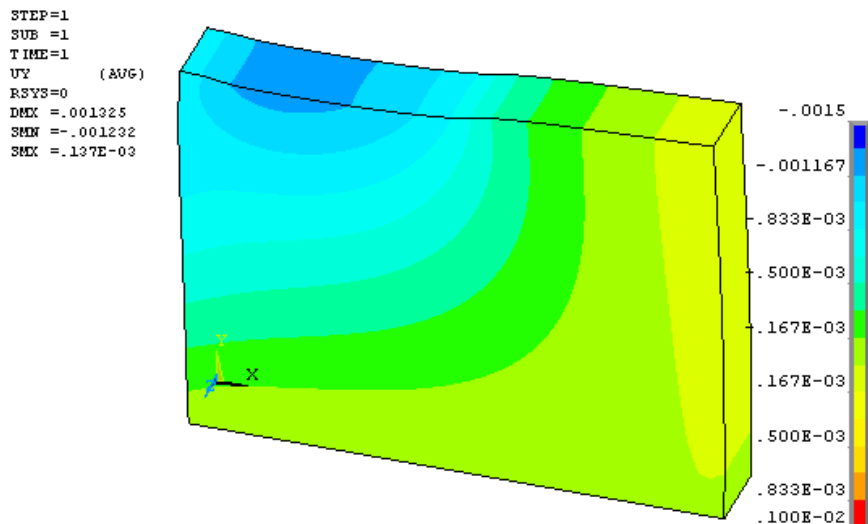


Fig. 4.1.221: Desplazamientos verticales iniciales (m). Step 1. Variación de ν .

Posteriormente, se han obtenido los registros de resultados una vez ejecutada la roza, de acuerdo con el procedimiento definido como Cálculo 1 (Fig. 4.1.222 - 4.1.227).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

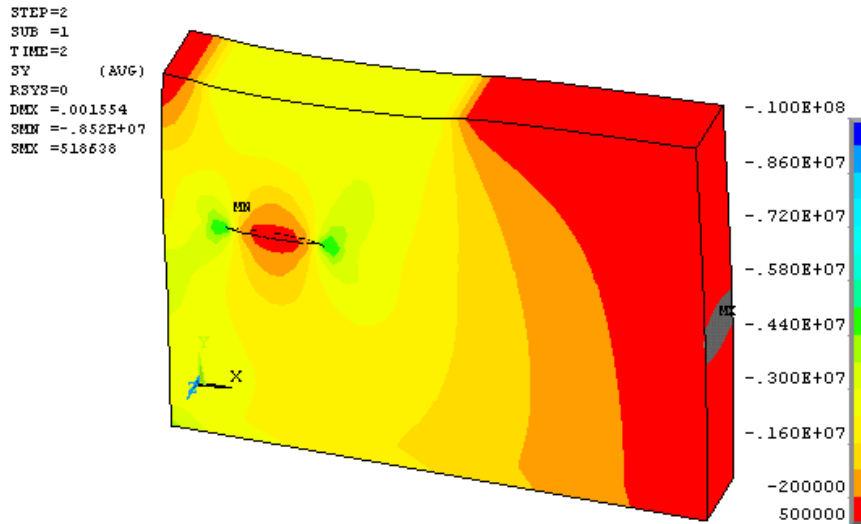


Fig. 4.1.222: Distribución de tensiones con roza (N/m^2). Step 2. Variación de ν .

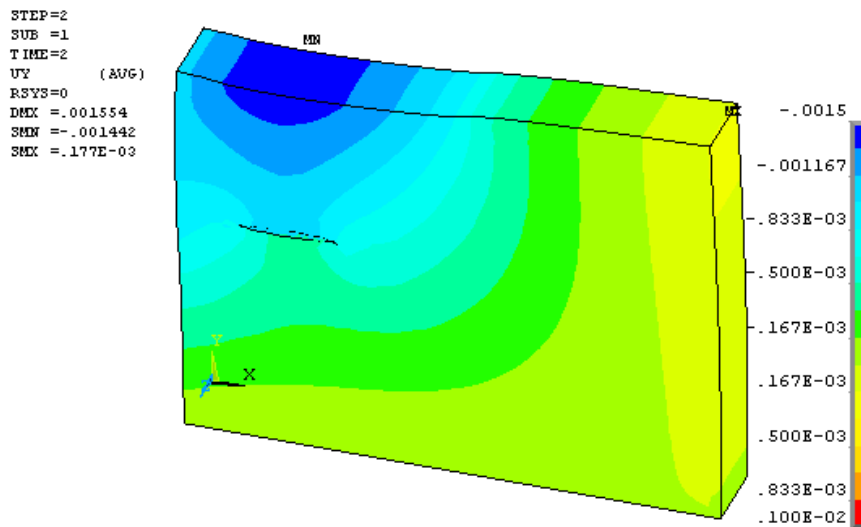


Fig. 4.1.223: Desplazamientos verticales (m). Step 2. Variación de ν .

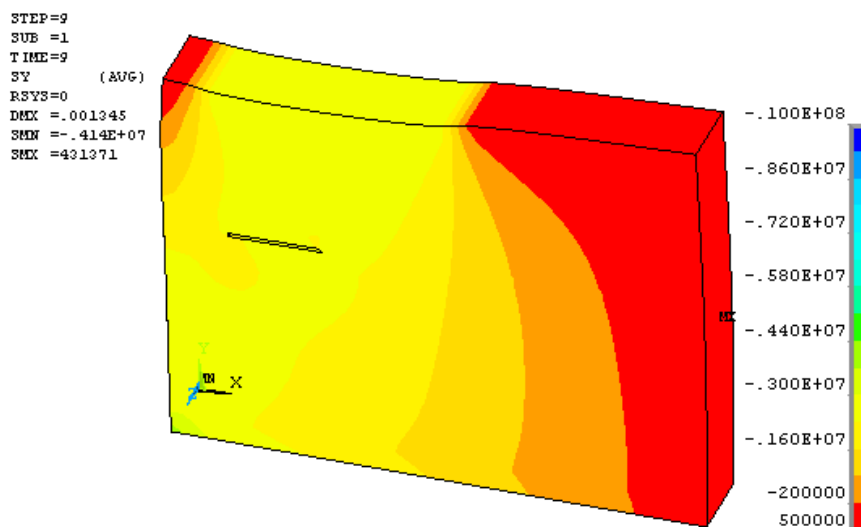


Fig. 4.1.224: Distribución de tensiones (N/m^2) para $p= 24 \cdot 10^5 N/m^2$ (2.4 MPa). Step 9. Variación de ν .

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

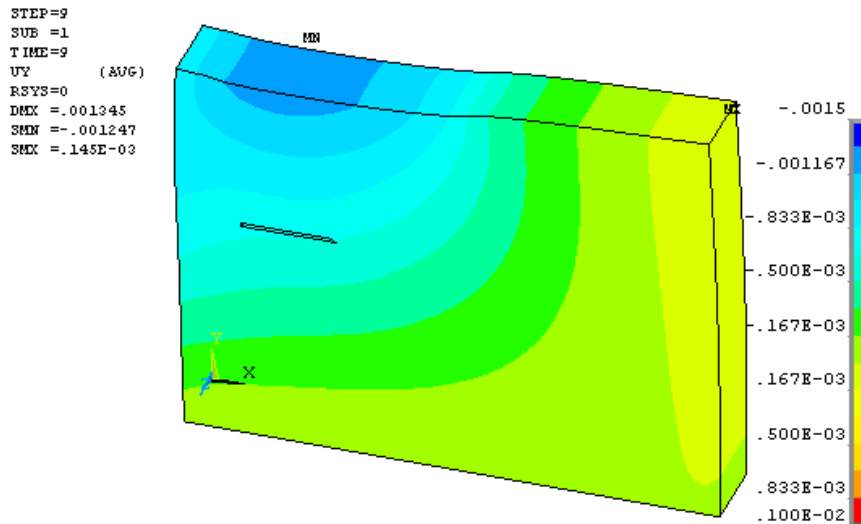


Fig. 4.1.225: Desplazamientos verticales (m). Step 9. Variación de ν .

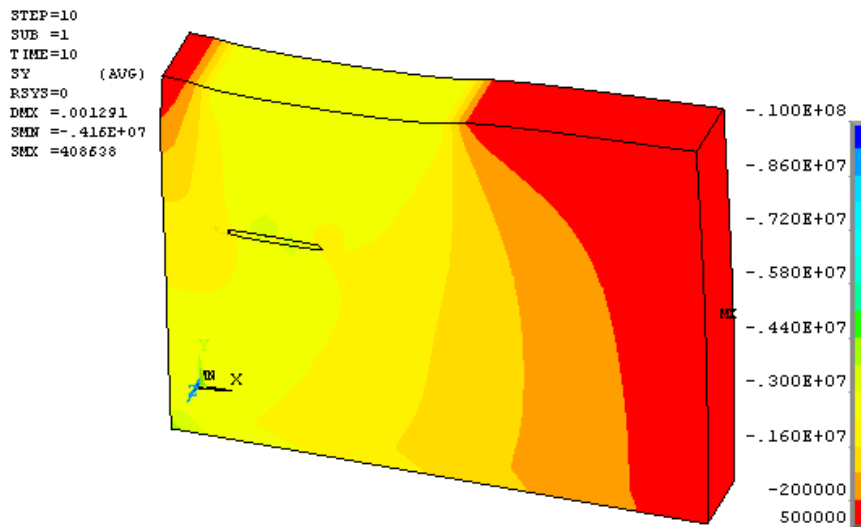


Fig. 4.1.226: Distribución tensional (N/m^2) para $p=30 \cdot 10^5 N/m^2$ (3.0 MPa). Step 10. Variación de ν .

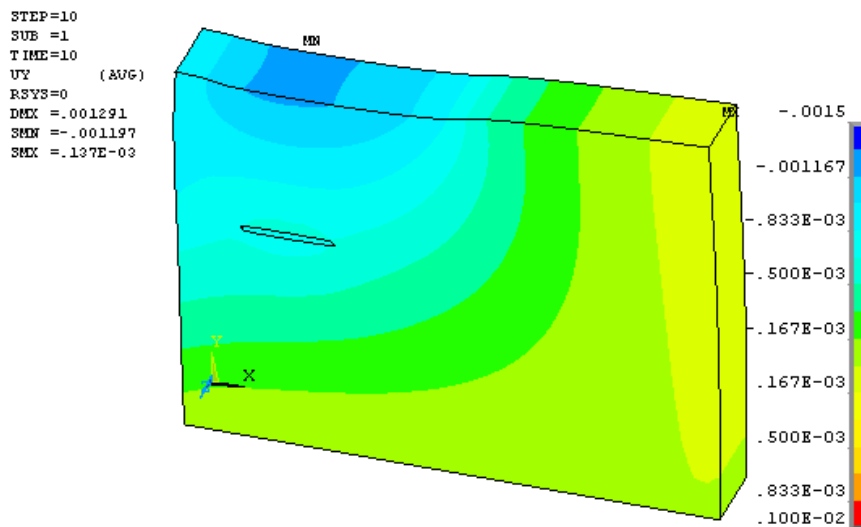


Fig. 4.1.227: Desplazamientos verticales (m). Step 10. Variación de ν .

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tras la observación de los registros de tensiones y deformaciones, y comparándolos con los correspondientes al Cálculo 1, se puede comprobar que la variación en los resultados es mínima, lo que conduce a pensar que la influencia del Coeficiente de Poisson no es, en este caso, de gran importancia.

4.1.7.4.3 Densidad

El valor de la densidad del material con el que realizar un cálculo paralelo, de cara a comparar resultados, se ha determinado a partir de la media entre los valores recogidos de distintas referencias (Martínez et al. 2001), que se muestran en la Tabla 4.1.43.

Tabla 4.1.43: Valores de densidad

	Baker	Camuñas	Hütte	Arredondo
ρ (kg/m ³)	2,200	2,300	2,300	2,600

De acuerdo con esto, el valor de densidad empleado para la comparación es $\rho = 2,350$ kg/m³.

Como en los casos anteriores, en primer lugar se ha evaluado la situación del muro, en tensiones y en desplazamientos, antes de simular la ejecución de la roza. En las Fig. 4.1.228 - 4.1.235 se representan los resultados obtenidos.

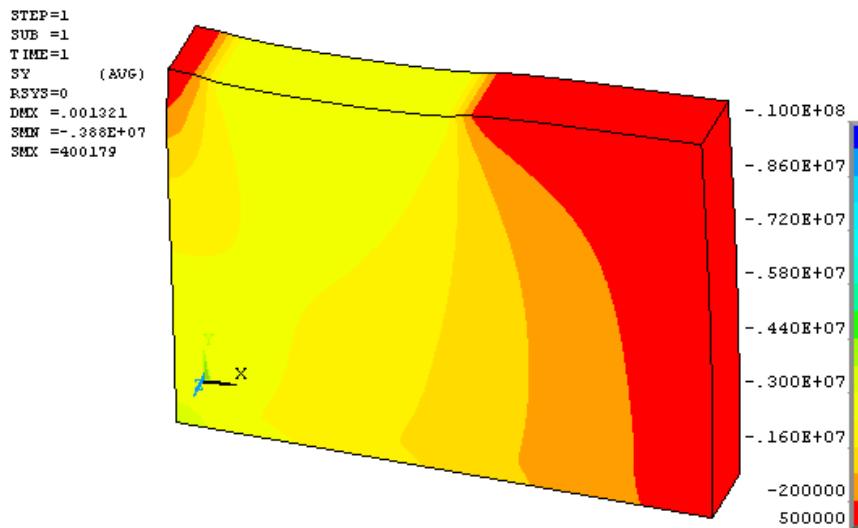


Fig. 4.1.228: Distribución de tensiones inicial (N/m²). Step 1. Variación de ρ .

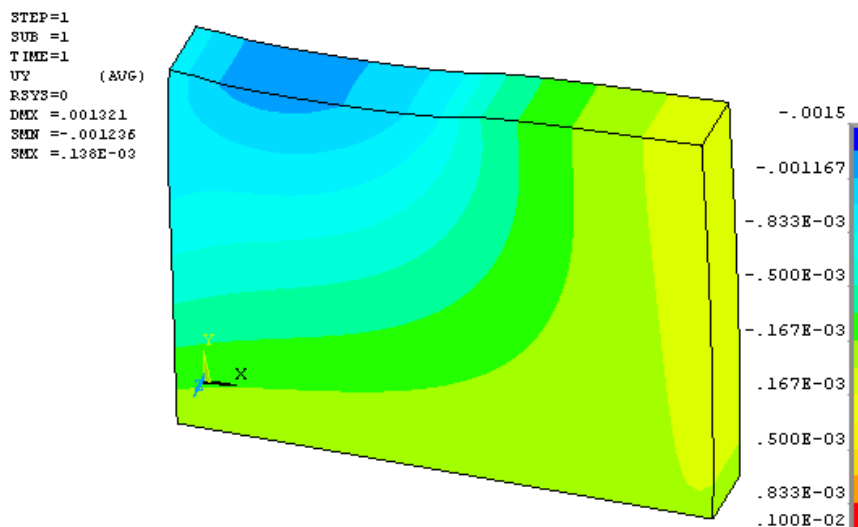


Fig. 4.1.229: Desplazamientos verticales iniciales (m). Step 1. Variación de ρ .

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

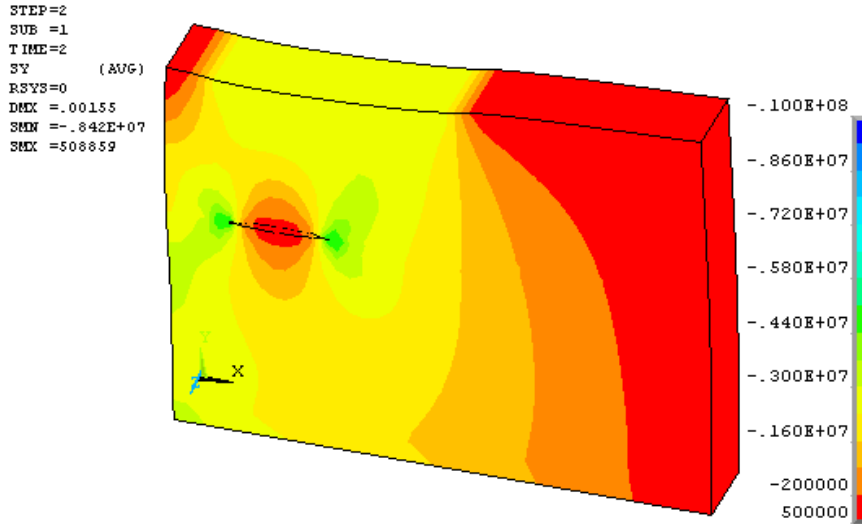


Fig. 4.1.230: Distribución de tensiones con roza (N/m^2). Step 2. Variación de ρ .

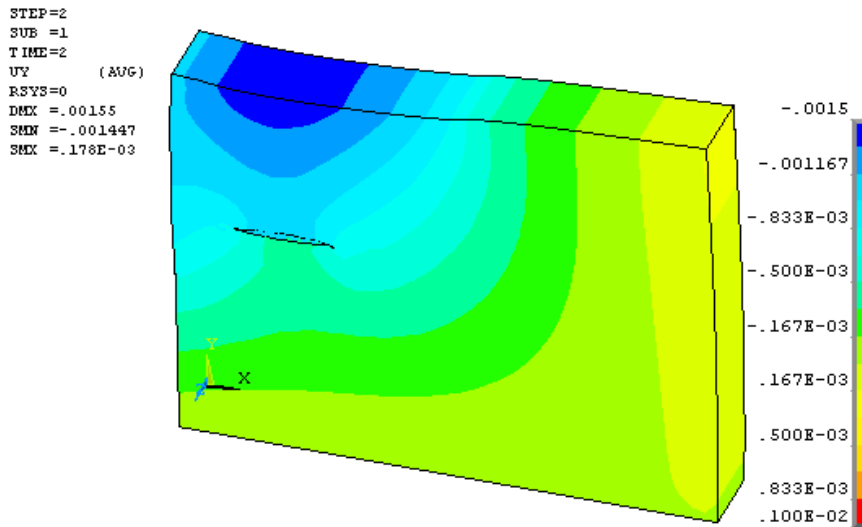


Fig. 4.1.231: Desplazamientos verticales (m). Step 2. Variación de ρ .

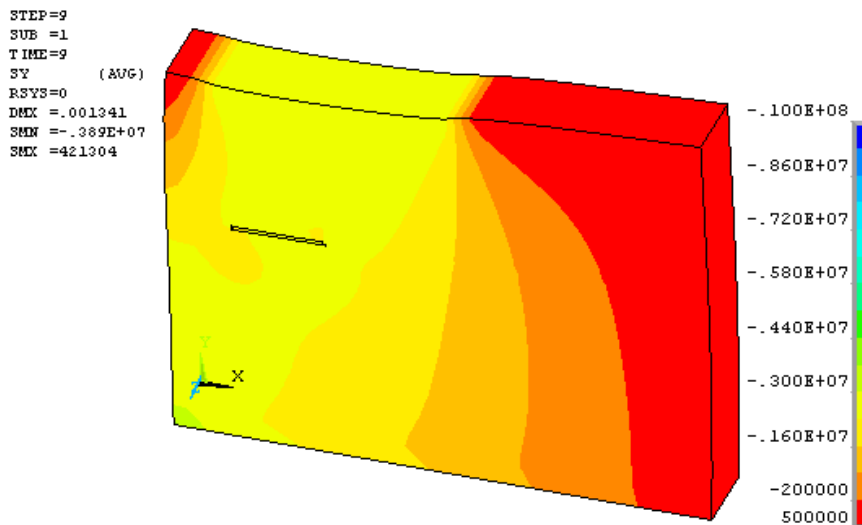


Fig. 4.1.232: Distribución de tensiones (N/m^2) para $p=24 \cdot 10^5 N/m^2$ (2.4 MPa). Step 9. Variación de ρ .

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

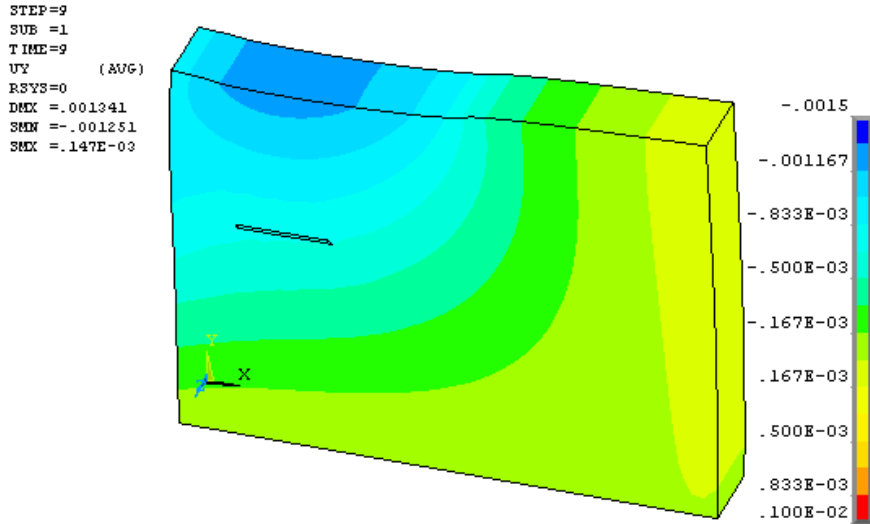


Fig. 4.1.233: Desplazamientos verticales (m). Step 9. Variación de ρ .

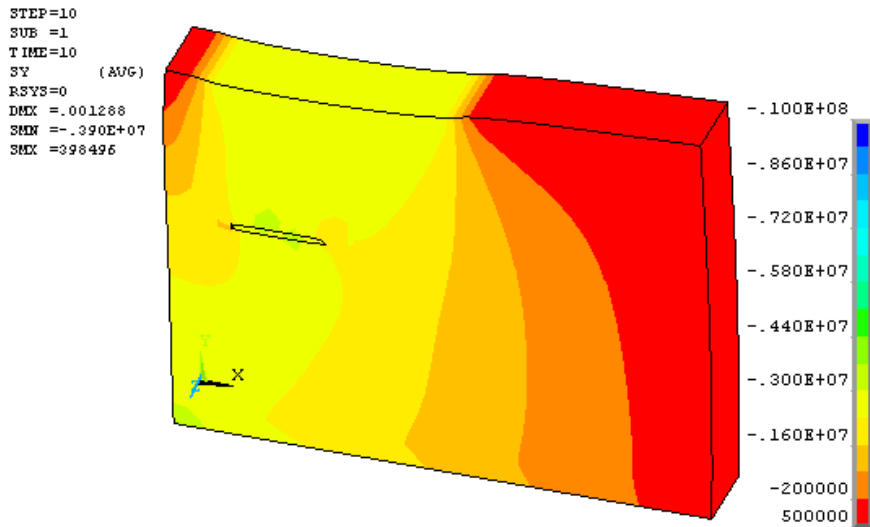


Fig. 4.1.234: Distribución tensional (N/m^2) para $p=30 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (3.0 MPa). Step 10. Variación de ρ .

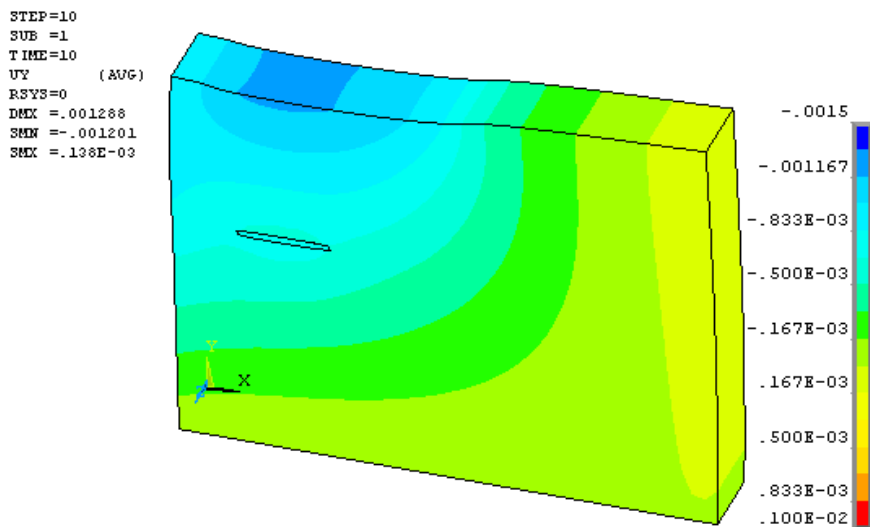


Fig. 4.1.235: Desplazamientos verticales (m). Step 10. Variación de ρ .

Tampoco en este caso la variación en el valor considerado para la densidad, es determinante en los resultados. Dado que este parámetro únicamente influye en la determinación del peso propio, y que esta carga, en el conjunto del proceso no es de especial repercusión.

4.1.7.5 Ensayos Hole Drilling.

Para establecer una comparativa entre los resultados obtenidos en laboratorio a partir del ensayo de Hole Drilling y los correspondientes al cálculo numérico, se ha modelizado el muro con una carga aplicada en su cara superior y se ha obtenido el valor de tensiones obtenido en los puntos en los que se ha llevado a cabo el ensayo.

En el esquema siguiente, Fig. 4.1.236, se muestra la ubicación de la carga para cada caso y la localización de los puntos en los que se han realizado los ensayos. Como puede comprobarse, hay dos situaciones distintas para la carga. Para cada una de ellas se ha realizado un análisis tensional, registrando los valores para cada uno de los puntos señalados.

Por su parte en la Tabla 4.1.44 se han relacionado para cada uno de los cinco ensayos Hole Drilling realizados, la posición de su centro respecto al sistema coordenado adoptado en la Fig. 4.1.236.

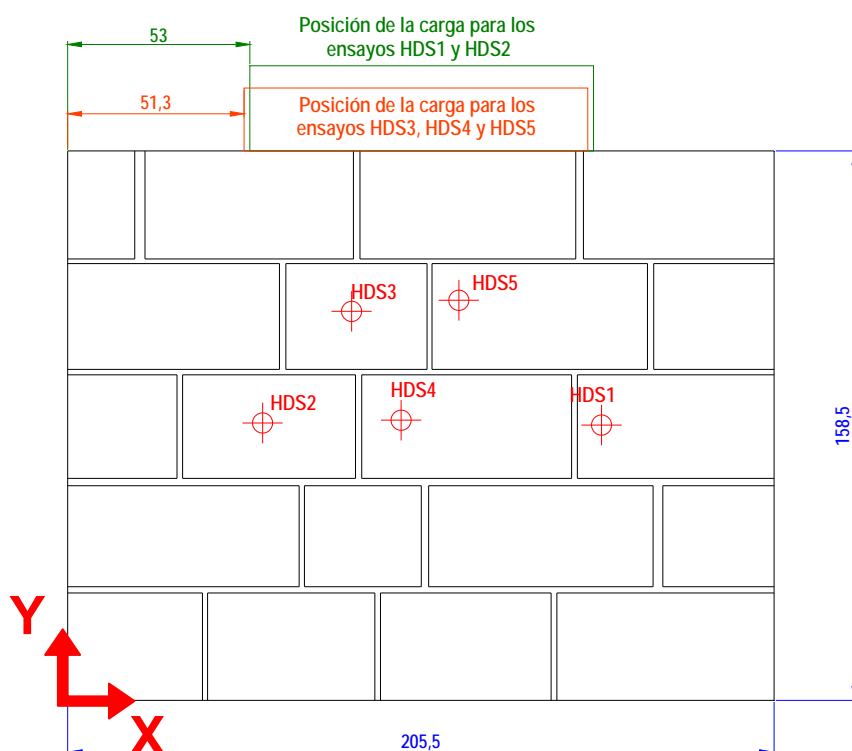


Fig. 4.1.236: Ubicación en el muro de los 5 ensayos Hole Drilling realizados, así como las dos posiciones de la carga introducida en la cabeza del muro.

Tabla 4.1.44: Coordenadas de ubicación de los ensayos de Hole Drilling realizados.

	HDS1	HDS2	HDS3	HDS4	HDS5
x_i (cm)	155.3	56.7	82.6	97	113.8
y_i (cm)	79.4	80	112.2	80.8	115.4

Los mapas tensionales obtenidos para las dos ubicaciones de la carga se muestran en la Fig. 4.1.237, para la carga situada a 53 cm del borde, y en la Fig. 4.1.238, para la situada a 51.3 cm del extremo del muro.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

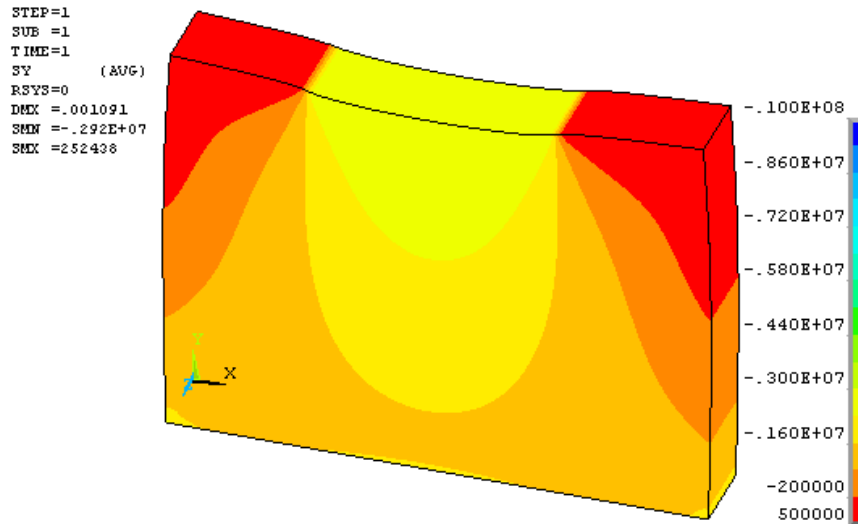


Fig. 4.1.237: Distribución de tensiones (N/m^2) para la posición de la carga a 53 cm del borde superior izquierdo (ensayos HDS1 y HDS2).

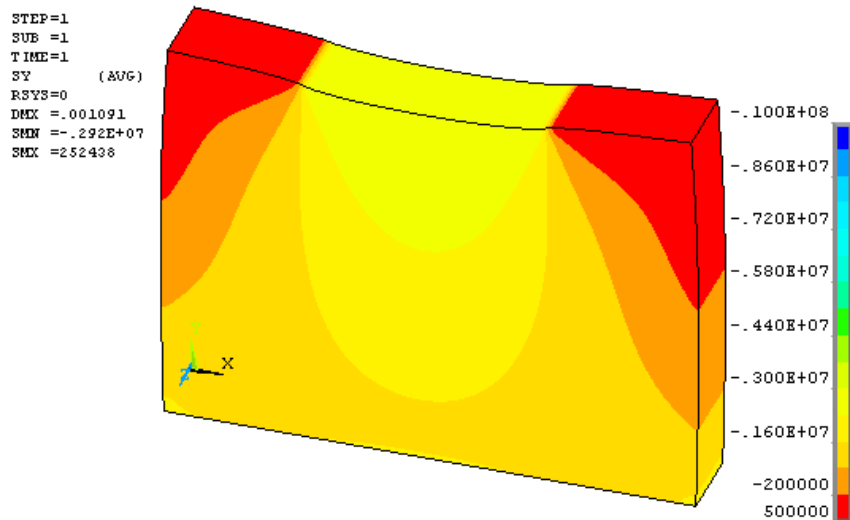


Fig. 4.1.238: Distribución de tensiones (N/m^2) para la posición de la carga a 51.3 cm del borde superior izquierdo (ensayos HDS3, HDS4 y HDS5).

A partir de estos registros se puede obtener el valor aproximado de la tensión en cada uno de los puntos en los que se ha realizado el ensayo de Hole-drilling, obteniendo los valores presentados en la Tabla 4.1.45, para cada uno de los cuales se indica el nodo al que corresponden con sus coordenadas.

Tabla 4.1.45: Tensión vertical en el nodo más próximo al centro de cada uno de los Hole Drilling realizados.

	HDS1	HDS2	HDS3	HDS4	HDS5
Nº nodo	71867	71917	8630	71896	8716
x_i (cm)	155.6	55.9	81.8	97.8	113.7
y_i (cm)	80.1	80.1	113.1	80	115.1
$\sigma_{y,MEF}$ (N/m^2)	-0.14108E+07	-0.15392E+07	-0.24335E+07	-0.20967E+07	-0.25372E+07
$\sigma_{y, MEF}$ (MPa)	-1.41	-1.54	-2.43	-2.10	-2.54
$\sigma_{y, media 23^\circ}$ (MPa)	-1.78	-	-2.09	-	-2.14
$\sigma_{y, experimental}$ (MPa)	-1.63	-	-2.07	-	-1.87

4.1.8 Ensayos mini-presurométricos desarrollados en el muro de sillería

En el muro de sillería fue realizado un ensayo mini-presurométrico, cuya posición se ilustra en la Fig. 4.1.239. Como puede comprobarse se alcanzó una profundidad de perforación de 62.2 cm, la cuál trata de ilustrarse en la Fig. 4.1.240, pudiendo comprobar la regularidad de la misma.

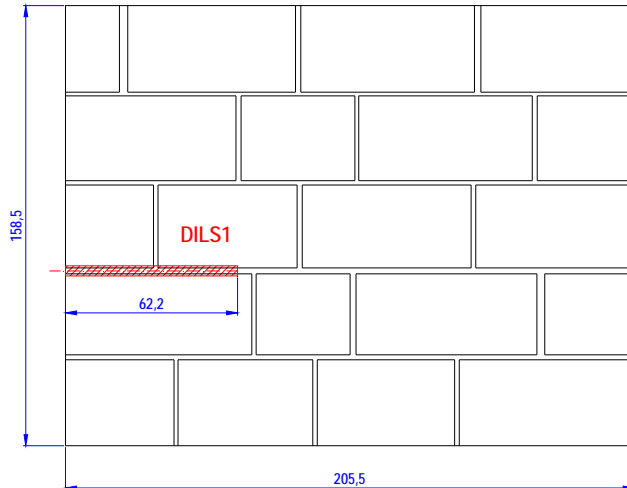


Fig. 4.1.239: Ubicación de la sonda presurométrica dentro del alzado del muro de sillería.

Fig. 4.1.240: Detalle del interior de la perforación realizada.

Una vez ejecutada la perforación y montado el dispositivo de ensayo como se ha referido en el capítulo 3.4, “Materiales y procedimientos empleados en los ensayos con técnicas mini-presurométricas”, se pasó a introducir la sonda (Fig. 4.1.241) y a realizar el ensayo, presurizando de forma creciente la sonda y registrando el volumen inyectado en la misma (Fig. 4.1.242).



Fig. 4.1.241: Introducción de la sonda mini-presurométrica en la perforación realizada.

Fig. 4.1.242: Instante tomado durante la ejecución del ensayo mini-presurométrico.

En la Tabla 4.1.46 se relacionan los incrementos volumétricos obtenidos durante el ensayo para cada nivel de presión introducido. Igualmente, en las Fig. 4.1.243 y 4.1.244 se representa la curva de expansión obtenida tras 15”, 30” y 60” de introducir el nivel de presión correspondiente. Puede apreciarse como para niveles bajos de presión (inferiores a 2 Ba) la sonda todavía se está inflando sin haber contactado con las paredes de la perforación, circunstancia que se aprecia tanto en la variación volumétrica a diferentes tiempos, como en que aún no se ha alcanzado la rama pseudo-elástica.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.1.46: Incrementos volumétricos obtenidos en el ensayo mini-presuométrico realizado en la sillería.

Presión (Ba)	Incrementos de volumen (cm ³)		
	15"	30"	60"
0	0	0	0
0.5	35	42.5	46
1	85	100	115
1.5	126	127	127
2	132.5	132.5	133
2.5	138	138	138
3	142	142	142
3.5	144	144	144
4	145	145	145
4.5	146	146	146
5	147	147	147
6	148	148	148
7	150	150	150
8	150.5	150.5	150.5
9	151	151	151
10	152	152	152
11	152.5	152.5	152.5
12	154	154	154
13	155	155	155
14	155.5	155.5	155.5
15	156	156	156
16	156.5	156.5	156.5
18	157.5	157.5	158
20	160	160	160
22	161	161	161
24	162.5	162.5	162.5

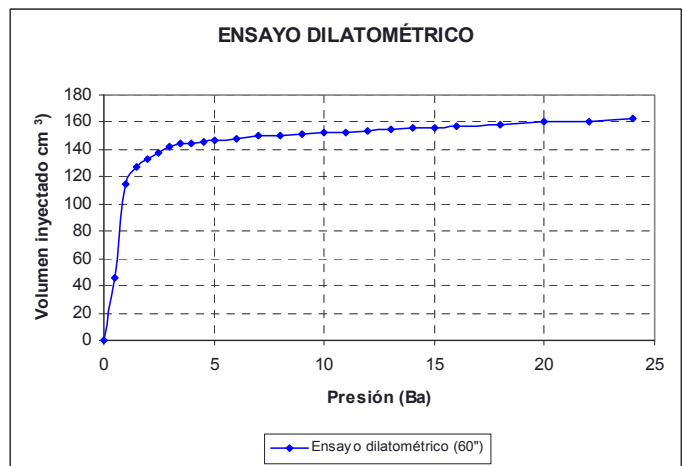
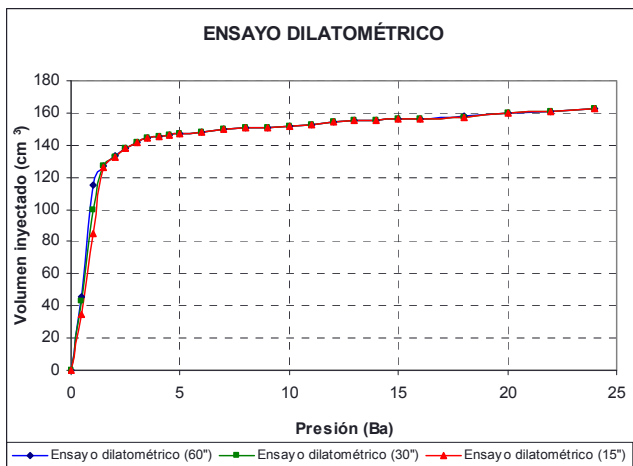


Fig. 4.1.243 y 4.1.244: Curva de expansión de la sonda mini-presuométrica empleada en el ensayo a diferentes tiempos.

En base a la gráfica obtenida puede apreciarse que se alcanzó la máxima capacidad del dispositivo mini-presuométrico con el que se realizaron los ensayos (24 Ba de presión), no habiéndose alcanzado la plastificación del área de ensayo y, por ende, no pudieron estimarse las características mecánicas (modulo presuométrico) relacionadas.

4.1.9 Demolición controlada

Con la finalidad de obtener la mayor cantidad de datos posibles sobre la geometría de las rozas ejecutadas en los ensayos de gato plano GPS-A y GPS-B, y de la perforación realizada a colación del ensayo mini-presurométrico ejecutado, se realizó una demolición controlada del muro, tomando datos y fotografías a lo largo del proceso. En lo que sigue se exponen las anotaciones relacionadas con el muro de sillería.

4.1.9.1 Gatos planos GPS-A

4.1.9.1.1 Gato plano GPS-A-Superior

En las Fig. 4.1.245 y 4.1.246 se ilustra la posición relativa del gato con los sillares circundantes, ya en fase de demolición controlada. Los sillares componentes del muro de sillería arenisca fueron desmontándose paulatinamente, extremando el cuidado para no alterar la huella de la roza, ni la posición del gato plano GPS-A Superior respecto de ésta.



Fig. 4.1.245: Detalle de la posición del gato plano GPS-A Superior en fase de demolición de la sillería.

Fig. 4.1.246: Detalle de la posición relativa del gato plano respecto de los sillares circundantes.

En las Fig. 4.1.247 y 4.1.248 se ilustra la posición relativa del gato plano respecto de la roza realizada. También puede apreciarse la existencia de dos láminas de papel, entre las que se dispuso una lámina de papel carbonoso, introducidas junto con el gato plano con la finalidad de estimar el área efectiva de contacto entre el gato plano y el muro.



Fig. 4.1.247: Detalle de la posición relativa del gato plano respecto de la roza. Pueden apreciarse los contornos con nitidez.

Fig. 4.1.248: Planta en la que puede comprobarse la posición relativa del gato plano respecto de la roza.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Por su parte, en las Fig. 4.1.249 y 4.1.250 se presenta nuevamente la posición relativa del gato plano GPS-A Superior, respecto de la roza, una vez marcados los contornos. A partir de la Fig. 4.1.249, empleando un programa de cad, pudo estimarse con relativa precisión el área de la roza.



Fig. 4.1.249 y 4.1.250: Contornos de la roza y del gato plano GPS-A Superior.

En la Fig. 4.1.251 se presenta el papel de calco referido con anterioridad, así como la huella generada por éste en una de las láminas de papel. Tras un cuidadoso proceso de marcado manual de las áreas en las que se existía un contacto efectivo, se escaneó la lámina de papel obteniendo la Fig. 4.1.252. A partir de dicha imagen, empleando un programa de cad, se estimó el área de contacto efectivo existente entre el gato plano y el muro de sillería.

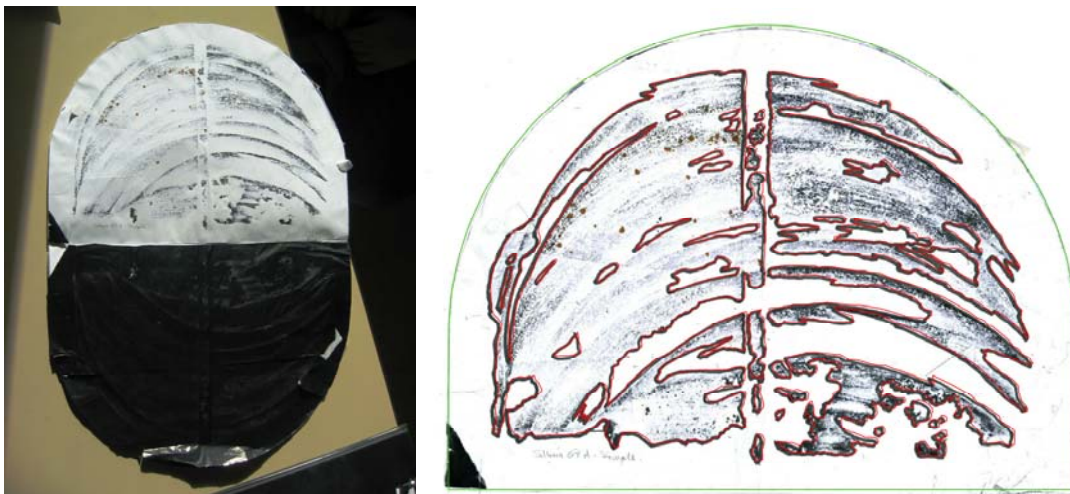


Fig. 4.1.251: Conjunto formado por dos láminas de papel, entre las que se dispuso una lámina de papel carbonoso. Puede comprobarse como en las zonas donde existía un contacto efectivo entre el muro y el gato plano quedaban marcadas las láminas de papel por efecto de la presión.

Fig. 4.1.252: Aspecto del área de contacto tras escanear el marcado realizado manualmente.

Finalmente, en las Fig. 4.1.253 y 4.1.254 se ha representado la relación gráfica existente entre el área de la roza ejecutada, el área del gato plano GPS-A Superior y el contacto de éste con el muro. Dichos valores de superficie han sido resumidos en la Tabla 4.1.47.

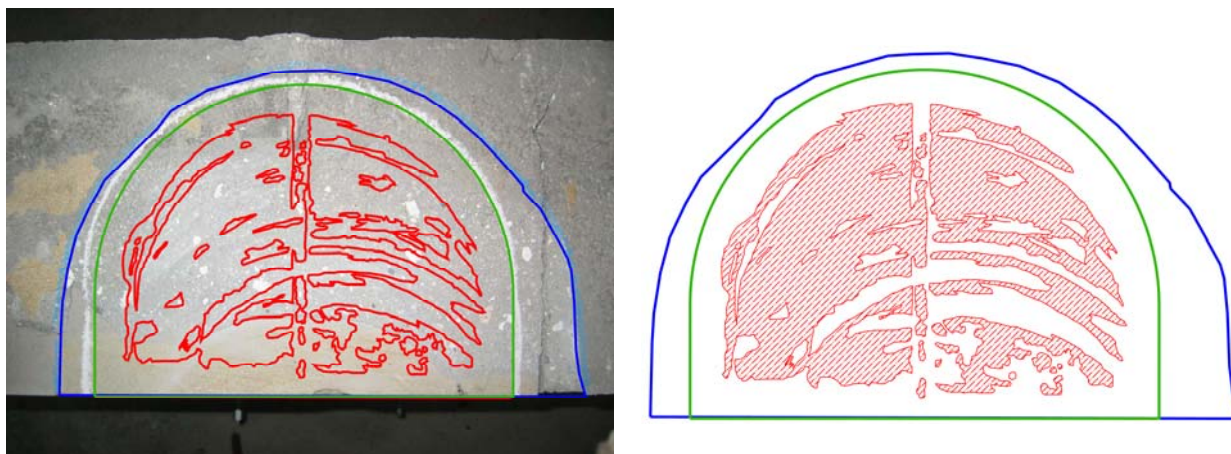


Fig. 4.1.253 y 4.1.254: Replanteo del área de la roza (963.38 cm²), el área del gato plano GPS-A Superior (778.56 cm²) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (355.28 cm²).

Tabla 4.1.47: Factores geométricos, k_a , obtenidos para el gato plano GPS-A Superior.

Factores geométricos, k_a , GPS-A Superior			
Áreas (cm ²)		Constantes derivadas	
A_{roza}	963.38	$K_{gato-roza}$	0.808
A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$	0.456
$A_{contacto}$	355.28	$K_{contacto-roza}$	0.369

4.1.9.1.2 Gato plano GPS-A-Inferior

En las Fig. 4.1.255 se ilustra la posición relativa del gato GPS-A Inferior y del GPS-B Inferior, ubicados a la izquierda y derecha respectivamente, con los sillares circundantes, ya en una fase avanzada de la demolición controlada.



Fig. 4.1.255: Detalle de la posición de los gatos planos GPS-A Inferior (izquierda) y GPS-B Inferior (derecha) en una fase avanzada del proceso de demolición.

En las Fig. 4.1.256-258 se ilustra la posición relativa del gato plano respecto de la roza realizada. También puede apreciarse la existencia de dos láminas de papel, entre las que se dispuso una lámina de papel carbonoso, introducidas junto con el gato plano, en este caso por su cara inferior, con la finalidad de estimar el área efectiva de contacto entre el gato plano y el muro.

A partir de la Fig. 4.1.258 pudo estimarse con relativa precisión el área de la roza. A su vez, partiendo de la Fig. 4.1.259 en la que se ilustra la imagen obtenida tras escanear el papel marcado por el calco, en los puntos en los que existía presión efectiva, pudo obtenerse el área de contacto entre el gato plano y el muro.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido



Fig. 4.1.256 y 4.1.257: Detalle de la posición relativa del gato plano GPS-A Inferior respecto de la roza.



Fig. 4.1.258: Detalle de la posición relativa del gato plano respecto de la roza. Pueden apreciarse los contornos con nitidez.

Fig. 4.1.259: Aspecto del área de contacto del gato GPS-A Inferior tras escanear el marcado realizado manualmente.

Finalmente, en las Fig. 4.1.260 y 4.1.261 se ha representado la relación gráfica existente entre el área de la roza ejecutada, el área del gato plano GPS-A Inferior y el contacto de éste con el muro. Dichos valores de superficie han sido resumidos en la Tabla 4.1.48.

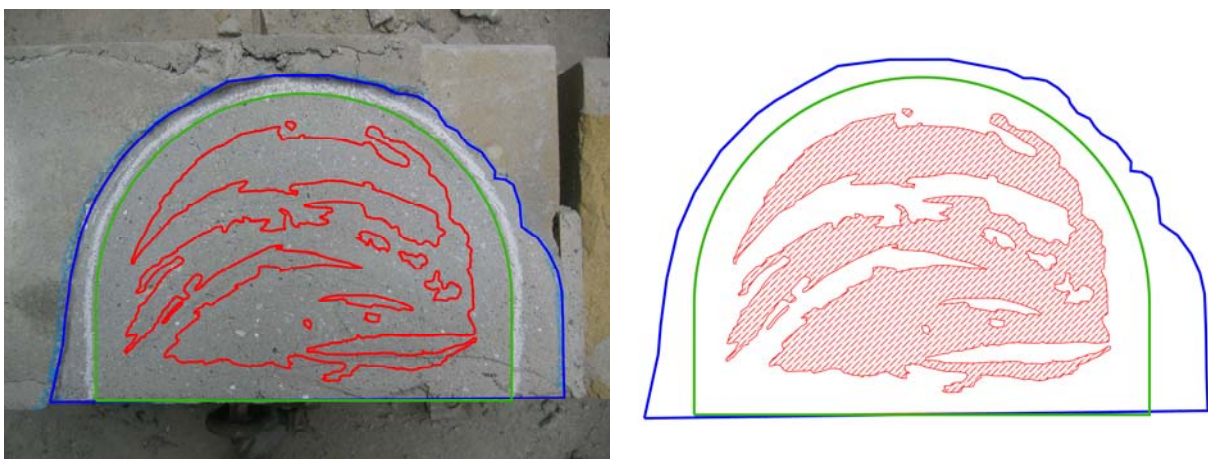


Fig. 4.1.260 y 4.1.261: Replanteo del área de la roza (957.43 cm^2), el área del gato plano GPS-A Inferior (778.56 cm^2) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (345.73 cm^2).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.1.48: Factores geométricos, k_a , obtenidos para el gato plano GPS-A Inferior.

Factores geométricos, k_a , GPS-A Inferior			
Áreas (cm ²)		Constantes derivadas	
A_{roza}	957.43	$K_{gato-roza}$	0.813
A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$	0.444
$A_{contacto}$	345.73	$K_{contacto-roza}$	0.361

4.1.9.2 Gatos planos GPS-B

4.1.9.2.1 Gatos plano GPS-B-Superior

En las Fig. 4.1.262 se muestra un instante captado durante el proceso de desmontaje del muro. Por su parte, en la Fig. 4.1.263 se ilustra la posición relativa del gato GPS-B Superior y del GPS-A Superior, ubicados a la derecha e izquierda de la imagen respectivamente, con los sillares circundantes.



Fig. 4.1.262: Instante captado durante el proceso de demolición controlada.

Fig. 4.1.263: Detalle de la posición de los gatos planos GPS-B Superior (derecha) y GPS-A Superior (izquierda) durante el proceso de demolición.

En las Fig. 4.1.264-266 se ilustra la posición relativa del gato plano respecto de la roza realizada. También puede apreciarse la existencia de dos láminas de papel, entre las que se dispuso una lámina de papel carbonoso, introducidas junto con el gato plano, con la finalidad de estimar el área efectiva de contacto entre el gato plano y el muro.

A partir de la Fig. 4.1.266 pudo estimarse con relativa precisión, empleando un programa de dibujo asistido por ordenador, el área de la roza. A su vez, partiendo de la Fig. 4.1.267 en la que se ilustra la imagen obtenida tras escanear el papel marcado por el calco, en los puntos en los que existía presión efectiva, pudo obtenerse el área de contacto entre el gato plano y el muro.



Fig. 4.1.264 y 4.1.265: Detalle de la posición relativa del gato plano GPS-B Superior respecto de la roza.



Fig. 4.1.266: Detalle de la posición relativa del gato plano GPS-B Superior respecto de la roza. Pueden apreciarse los contornos con nitidez.

Fig. 4.1.267: Aspecto del área de contacto del gato GPS-B Superior tras escanear el marcado realizado manualmente.

Finalmente, en las Fig. 4.1.268 y 4.1.269 se ha representado la relación gráfica existente entre el área de la roza ejecutada, el área del gato plano GPS-B Superior y el contacto de éste con el muro. Dichos valores de superficie han sido resumidos en la Tabla 4.1.49.

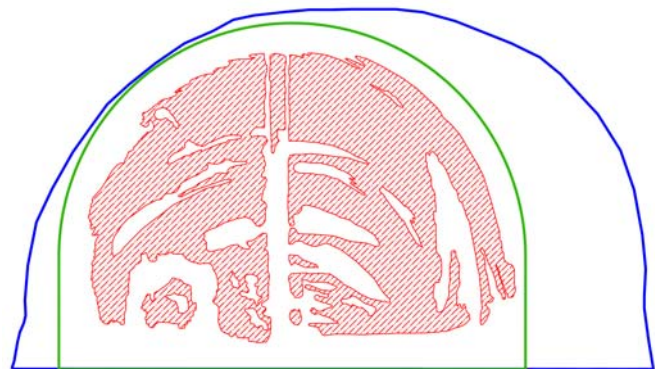
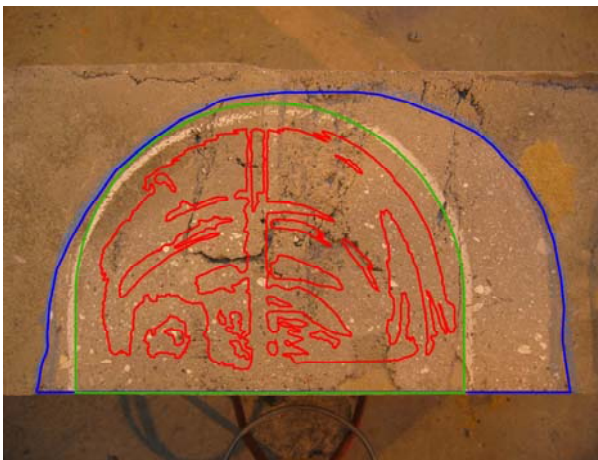


Fig. 4.1.268 y 4.1.269: Replanteo del área de la roza (1,067.19 cm²), el área del gato plano GPS-B Superior (778.56 cm²) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (381.63 cm²).

Tabla 4.1.49: Factores geométricos, k_a , obtenidos para el gato plano GPS-B Superior.

Factores geométricos, k_a , GPS-B Superior			
Áreas (cm ²)		Constantes derivadas	
A_{roza}	1,067.19	$K_{gato-roza}$	0.730
A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$	0.490
$A_{contacto}$	381.63	$K_{contacto-roza}$	0.358

4.1.9.2.2 Gato plano GPS-B-Inferior

En las Fig. 4.1.270 se ilustra la posición relativa del gato GPS-B Inferior y del GPS-A Inferior, ubicados en la parte superior-derecha e inferior-izquierda de la imagen respectivamente, con los sillares circundantes, ya en una fase avanzada de la demolición controlada.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido



Fig. 4.1.270: Detalle de la posición de los gatos planos GPS-B Inferior (superior-derecha) y GPS-A Inferior (inferior-izquierda) en una fase avanzada del proceso de demolición.

Fig. 4.1.271: Detalle de la posición relativa del gato plano GPS-B Inferior respecto de la roza.

En la Fig. 4.1.271 y 4.1.272 se ilustra la posición relativa del gato plano respecto de la roza realizada, permitiendo estimar, con relativa precisión, el área de la roza.

A su vez, partiendo de la Fig. 4.1.273, en la que se ilustra la imagen obtenida tras escanear el papel marcado por el calco, en los puntos en los que existía presión efectiva, pudo obtenerse, empleando un programa de cad, el área de contacto entre el gato plano y el muro.

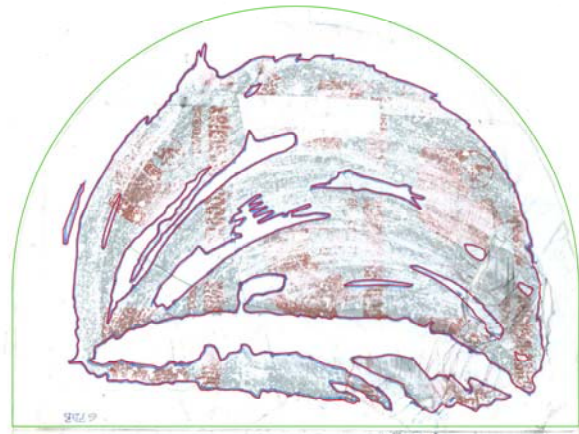


Fig. 4.1.272: Detalle de la posición relativa del gato plano GPS-B Superior respecto de la roza. Pueden apreciarse los contornos con nitidez.

Fig. 4.1.273: Aspecto del área de contacto del gato GPS-B Inferior tras escanear el marcado realizado manualmente.

Por su parte, en las Fig. 4.1.274 y 4.1.275 se muestra la remoción del mortero existente en el tendel movilizado a ese nivel, y la huella generada en el sillar de arenisca subyacente como consecuencia de la presión introducida por el gato plano, circunstancia que pone de relieve la poca competencia de la arenisca movilizada.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

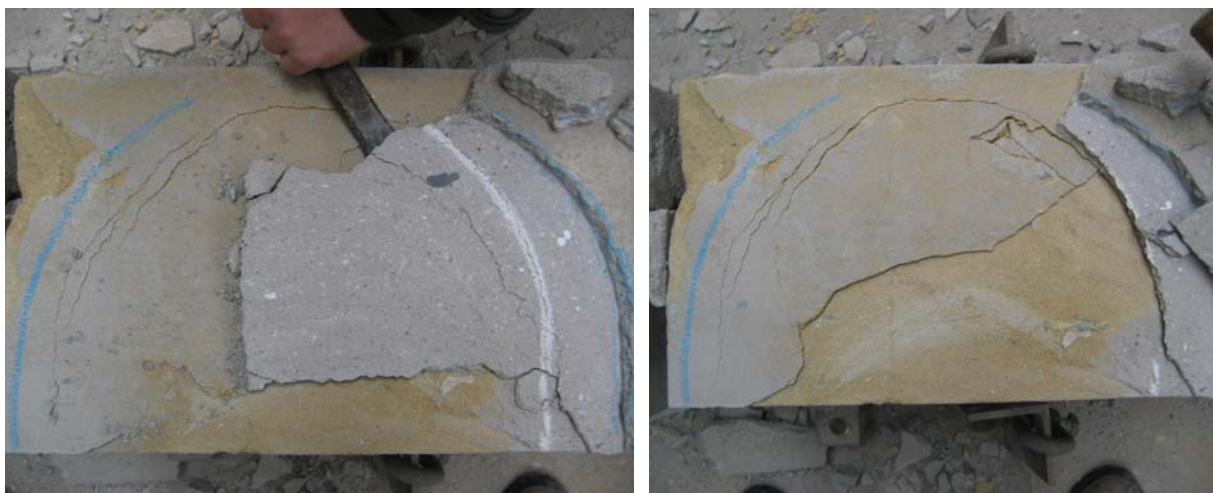


Fig. 4.1.274 y 4.1.275: Remoción del mortero dejando a la vista la huella generada en el sillar de arenisca subyacente como consecuencia de la presión introducida por el gato plano.

Finalmente, en las Fig. 4.1.276 y 4.1.277 se ha representado la relación gráfica existente entre el área de la roza ejecutada, el área del gato plano GPS-B Inferior y el contacto de éste con el muro. Dichos valores de superficie han sido resumidos en la Tabla 4.1.50.

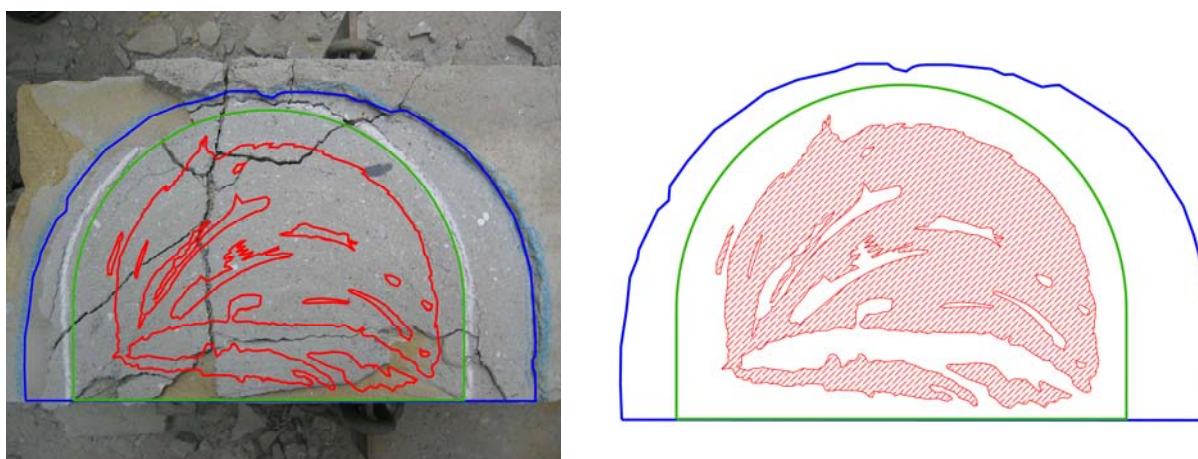


Fig. 4.1.276 y 4.1.277: Replanteo del área de la roza (1,076.51 cm²), el área del gato plano GPS-B Inferior (778.56 cm²) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (399.99 cm²).

Tabla 4.1.50: Factores geométricos, k_a , obtenidos para el gato plano GPS-B Inferior.

Factores geométricos, k_a , GPS-B Inferior			
Áreas (cm ²)		Constantes derivadas	
A_{roza}	1,076.51	$K_{gato-roza}$	0.723
A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$	0.514
$A_{contacto}$	399.99	$K_{contacto-roza}$	0.372

4.1.9.3 Mini-presurómetro DiLS1

En la Fig. 4.1.278 se ilustra una perspectiva general de la localización del mini-presurómetro DiLS1. Por su parte en las Fig. 4.1.279 y 4.1.280 se presenta la huella dejada por la perforación realizada mediante corona hueca.



Fig. 4.1.278: Perspectiva general de la localización del mini-presurómetro DILS1.

Fig. 4.1.279 y 4.1.280: Detalles de la huella dejada por la perforación del mini-presurómetro DILS1.

Por su parte, en las Fig. 4.1.281 y 4.1.282 se ilustra la posición relativa de la sonda mini-presurométrica respecto de la perforación.



Fig. 4.1.281 y 4.1.282: Posición relativa de la sonda respecto de la perforación del ensayo mini-presurométrico DILS1.

4.1.10 Contraste de los resultados obtenidos en la sillería arenisca.

4.1.10.1 Bondad de los niveles tensionales obtenidos mediante la técnica hole drilling.

En la Tabla 4.1.51 se resumen los resultados obtenidos en los ensayos de hole drilling realizados en la sillería de arenisca.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.1.51: Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos hole drilling realizados sobre la sillería de arenisca. Comparación de los niveles tensionales obtenidos experimentalmente con los estimados de forma teórica (Resultados de esta Tesis).

Ensayo	Código	Fecha	E (Mpa)	ν	$\sigma_{\text{experimental}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{teórica, media } 23^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{teor, MEF}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{teór, media } 23^\circ}$	$\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{teor, MEF}}$
HDS1	Lab0810	16/06/2008	3,420.00	0.13	1.63	1.78	1.41	0.92	1.16
HDS2	Lab0811	18/06/2008	-	-	-	-	1.54	-	-
HDS3	Lab0812	20/06/2008	3,474.80	0.25	2.07	2.09	2.43	0.99	0.85
HDS4	Lab0813	23/06/2008	-	-	-	-	2.10	-	-
HDS5	Lab0814	25/06/2008	3,516.60	0.26	1.87	2.14	2.54	0.87	0.74
HDS6	Lab0833	05/12/2008	9,233.40	0.24	2.77	3.11	-	0.89	-
HDS7 (FO)	Lab0834	05/12/2008	9,233.40	0.24	2.85	3.11	-	0.92	-
HDS8	Lab0819	22/07/2008	9,233.40	0.24	3.52	3.11	-	1.13	-
$(\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{teor}})_{\text{Promedio}}$								0.95	0.91
$(\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{teor}})_{\text{Desvest}}$								0.10	0.22
$(\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{teor}})_{\text{Coef. Var.}}$								10.09%	23.71%

Como puede apreciarse, **la relación promedio entre la tensión experimental obtenida y la estimada teóricamente, como valor medio en el plano horizontal de ejecución de los ensayos suponiendo un ángulo de apertura de cargas de 23°, es de 0.95**, presentando un coeficiente de variación del 10.08% (desviación típica de 0.10).

Por su parte, la relación promedio entre **la tensión experimental obtenida y la estimada teóricamente, mediante elementos finitos, es de 0.91**, presentando un coeficiente de variación del 23.71% (desviación típica de 0.12).

A modo de contraste, cabe referir que en la experimentación desarrollada por el Prof. Sánchez Beitia sobre un muro de sillería arenisca, en el marco del proyecto SICEXPAR (Tabla 4.1.52), la relación promedio entre la tensión experimental, obtenida a partir de los parámetros A_t y B_t (previo conocimiento de las características mecánicas, misma metodología que la empleada en la presente tesis doctoral), y la tensión teórica, alcanzó un valor promedio de 0.74, presentando un coeficiente de variación del 24.37% (desviación típica de 0.18).

Tabla 4.1.52: Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos hole drilling realizados sobre la sillería arenisca. Comparación de los niveles tensionales obtenidos experimentalmente con los estimados de forma teórica (Sánchez Beitia, proyecto SICEXPAR).

Ensayo	Código	$\sigma_{\text{experimental}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{teórica}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{teor}}$
HDS1	7I-HD	1.30	2.00	0.65
HDS2	8I-HD	2.00	2.00	1.00
HDS3	7E-HD	1.40	2.00	0.70
HDS4	8EI-HD	1.20	2.00	0.60
$(\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{est}})_{\text{Promedio}}$				0.74
$(\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{est}})_{\text{Desvest}}$				0.18
$(\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{est}})_{\text{Coef. Var.}}$				24.37%

Por ello que los resultados obtenidos, tanto en base a la comparación respecto de la tensión media en el plano horizontal de ejecución de los ensayos suponiendo un ángulo de apertura de cargas de 23°, como en base a los niveles tensionales deducidos por elementos finitos, mejoran los alcanzados en experiencias previas, circunstancia que demuestra la **idoneidad del método aplicado a sillerías, a nivel de laboratorio**.

El hecho de haber obtenido mejores resultados que en campañas previas se achaca, principalmente, a que el registro de las deformaciones ha sido mucho más continuo (con una frecuencia de muestreo de un dato por segundo) lo cuál ha permitido determinar de forma más exacta los valores de estabilización de las deformaciones antes y después del taladrado. Igualmente, como se ha justificado, también se han deducido las características mecánicas en

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

cada uno de los puntos de ensayo, aspecto que también tiene un impacto importante en la bondad de los resultados.

Finalmente, en este apartado también merece resumir las conclusiones alcanzadas en base a la comparación de la ejecución de la técnica hole drilling con extensometría resistiva, óptica y mediante videocorrelación (VIC).

En base a los resultados obtenidos en los **ensayos de comparación entre extensometría resistiva (HDS6) y óptica (HDS7)**, y pese a que como ya se refirió algunas de las galgas ópticas no presentaron una estabilización de la deformación tras el taladrado, puede concluirse que **los niveles tensionales estimados fueron bastante aproximados**, tal y como puede comprobarse en la Tabla 4.1.51. Además, **ambos casos permitieron una buena estimación del nivel tensional teórico existente**.

A día de hoy, el hecho de que la extensometría resistiva ofrezca unas condiciones de instalación en el elemento portante mucho más sencillas y menos cuidadosas que el requerido en la puesta en obra de la cadena óptica, sumado a que el precio de la extensometría resistiva es mucho más accesible que el relacionado con la solución óptica, hace que **para la práctica habitual de la técnica de hole drilling sea mucho más apropiado el empleo de extensometría resistiva**. Solo en casos más específicos, como en los que se emplee la técnica hole drilling para tratar de monitorizar a largo plazo el estado tensional en función del tiempo, podría ser más eficiente el empleo de extensometría óptica, si bien se debe tomar conciencia previa de las dificultades relacionadas.

En relación con la videocorrelación, pese a que la técnica resulta muy atractiva e intuitiva, en lo que se refiere a la interpretación de los fenómenos que se desarrollan en el área de ensayo a lo largo del proceso, en estos momentos y circunscrito al equipamiento empleado en el ensayo realizado, se concluye que **la precisión de las medidas alcanzadas no se ajusta a los requerimientos esperados para la interpretación de las deformaciones registradas mediante ensayos hole drilling en estructuras de fábrica**.

4.1.10.2 Bondad de los niveles tensionales obtenidos mediante gato plano simple.

En relación con los ensayos de gato plano simple fueron ejecutados dos ensayos. Previamente a emitir ningún juicio cabe referir que los resultados obtenidos en el ensayo GPS-A Simple (Tabla 4.1.53) parecen ser un tanto elevados, circunstancia que puede estar relacionada con que la ejecución del ensayo no fue todo lo buena que cabría esperar.

Tabla 4.1.53: Ensayo GPS-A Simple sobre sillería de arenisca: Relación entre las tensiones existentes y las estimadas tanto experimental como numéricamente, para diferentes valores del coeficiente k_a .

	GPS-A Simple			
	Tensiones teóricas estimadas		Tensión obtenida en el ensayo	Tensión obtenida mediante MEF
	$\sigma_{\text{teor, media}23^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{MEF, inicial}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{experimental}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{MEF, necesaria}}$ (MPa)
$K_{\text{gato-roza}}^3$	2.05	2.40	3.49	3.00
$K_{\text{contacto-gato}}$	2.05	2.40	1.97	-
$K_{\text{contacto-roza}}$	2.05	2.40	1.59	10.00

En lo que respecta al ensayo GPS-A Simple, la tensión existente en el plano de ensayo fue deducida de dos formas diferentes: considerando la tensión media en el plano horizontal de ejecución del ensayo suponiendo un ángulo de apertura de cargas de 23° ($\sigma_{\text{teor, media}23^\circ}$), y mediante un macromodelo de elementos finitos en el que se supuso comportamiento lineal, elástico e

³ Relación geométrica propuesta por la normativa.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

isótropo ($\sigma_{MEF, inicial}$); los parámetros mecánicos introducidos en el modelo correspondieron a los obtenidos experimentalmente mediante gato plano doble.

Como era de esperar, el resultado obtenido mediante la primera aproximación (2.05 MPa) es menor que el correspondiente al cálculo numérico (2.40 MPa), ya que la distribución real de tensiones, en forma de bulbo, hace que el área de reparto de carga sea menor que el considerado mediante la apertura lineal de cargas.

En lo que atañe a los resultados del ensayo, el nivel tensional fue valorado experimentalmente teniendo en cuenta los diferentes factores geométricos, k_a , obtenidos ($\sigma_{experimental}$).

A su vez, fue reproducido el proceso ideal del ensayo mediante el macromodelo referido, obteniendo el nivel de tensión que es necesario transmitir a la fábrica mediante el gato plano para recuperar las distancias mensuradas entre los puntos de control previamente a la ejecución de la roza. De la misma forma, también fueron tenidos en cuenta diferentes escenarios correspondientes al empleo de varios factores geométricos, k_a , ($\sigma_{MEF, necesaria}$). En este sentido cabe relacionar lo siguiente:

- El procedimiento simulado de forma numérica (ver apartado 4.1.7.3.5, Cálculo 3) consistente en implementar la forma real de la roza y del gato, suponiendo la tensión aplicada únicamente en los puntos en los que se registró un contacto efectivo (es lo equivalente a tomar un factor geométrico $k_a=k_{contacto-roza}$) no es adecuado para reproducir el comportamiento real experimentado por el componente de sillería durante el ensayo.
- El procedimiento simulado de forma numérica (ver apartado 4.1.7.3.4, Cálculo 2) consistente en implementar la forma real de la roza y del gato, suponiendo la carga aplicada sobre todo el área de éste (es lo equivalente a tomar un factor geométrico $k_a=k_{gato-roza}$) es el que reproduce más fielmente el nivel tensional preexistente con anterioridad a la ejecución de la roza (2.40 MPa). Además, el nivel tensional necesario obtenido numéricamente, para restablecer la situación preexistente (3.0 MPa) se aproxima bastante a la tensión obtenida de forma experimental (3.49 MPa), obviamente no presentan valores más aproximados en tanto que el nivel tensional deducido mediante elementos finitos solamente tiene en cuenta deformación de carácter elástico, mientras que la obtenida de forma experimental, además del comportamiento elástico, probablemente está afectada por una componente inelástica desarrollada a consecuencia del proceso de corte y por ello es lógico que presente un valor un poco más elevado, pues la tensión introducida debe de recuperar la deformación elástica e inelástica.

Por lo referido una conclusión es que **el factor geométrico más adecuado parece corresponder con el que relaciona el área de la roza con el área del gato plano ($k_a=k_{gato-roza}$), que a su vez es el que propone la normativa existente.**

Por su parte en lo que respecta al ensayo GPS-B Simple, en la Tabla 4.1.54 se relacionan los niveles tensionales obtenidos experimentalmente mediante la técnica de gato plano simple, para cada combinación del factor de corrección por rigidez, k_m , con cada uno de los factores geométricos, k_a , considerados.

Tabla 4.1.54: Ensayo GPS-B Simple sobre sillería de arenisca: Relación entre el nivel tensional obtenido experimentalmente y el estimado de forma teórica, para diferentes valores del coeficiente k_a .

	GPS-B Simple		
	$\sigma_{teor, media 23^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{experimental}$ (MPa)	$\sigma_{exp}/\sigma_{teor}$
$K_{gato-roza}^4$	2.15	2.50	1.16
$K_{contacto-gato}$	2.15	1.68	0.78
$K_{contacto-roza}$	2.15	1.23	0.57

⁴ Relación geométrica propuesta por la normativa.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En relación con la bondad de los resultados cabe referir que al igual que se encontró en el ensayo anterior, el error cometido al emplear el factor geométrico que relaciona el área efectiva de contacto con el área de la roza está en torno al 43%, por tanto cabría concluir que no parece ser el coeficiente geométrico más adecuado (esta conclusión es consistente con la obtenida mediante la reproducción del ensayo GPS-A Simple de forma numérica).

En relación a los otros dos factores, la bondad obtenida con ambos entraría dentro del margen de error del ensayo, presentando un mejor ajuste la obtenida empleando el factor geométrico que relaciona el área de la roza con el área del gato plano.

4.1.10.3 Bondad de las características mecánicas obtenidas mediante gato plano doble.

La bondad de los resultados se ha tratado de estimar de dos formas:

1. Mediante la comparación del módulo de elasticidad obtenido mediante gato plano doble y el obtenido mediante un ensayo a compresión al uso, empleando para el registro de desplazamientos transductores potenciométricos.
2. Comprobando que el módulo de elasticidad obtenido está dentro de los valores habituales obtenidos mediante otros ensayos de gato plano doble realizados en fábricas de sillería.

En lo que atañe a la primera vía de comparación, en las Tablas 4.1.55 y 4.1.56 se presentan, en función del factor de corrección geométrico empleado, las características mecánicas estimadas.

Tabla 4.1.55: Características mecánicas estimadas en el ensayo GPS-A Doble en función del factor de corrección geométrico empleado.

	K_a	K_m	ν_{exp}	E_{exp} (N/mm ²)	$E_{teorico}$ (N/mm ²)	$E_{exp}/E_{teorico}$
$K_{gato-roza}^5$	0.811	0.95	0.04	2,638.29	1,711.80	1.54
$K_{contacto-gato}$	0.45	0.95	0.04	1,463.90	1,711.80	0.85
$K_{contacto-roza}$	0.365	0.95	0.04	1,187.40	1,711.80	0.69

Tabla 4.1.56: Características mecánicas estimadas en el ensayo GPS-B Doble en función del factor de corrección geométrico empleado.

	K_a	K_m	ν_{exp}	E_{exp} (N/mm ²)	$E_{teorico}$ (N/mm ²)	$E_{exp}/E_{teorico}$
$K_{gato-roza}$	0.726	0.95	0.19	3,582.23	1,711.80	2.09
$K_{contacto-gato}$	0.502	0.95	0.19	2,476.96	1,711.80	1.45
$K_{contacto-roza}$	0.365	0.95	0.19	1,800.99	1,711.80	1.05

Puede comprobarse como las relaciones obtenidas no son representativas de lo que cabría esperar y más que por la incorrecta ejecución de los ensayos de gato plano doble, podría relacionarse con que el módulo de deformación obtenido mediante transductores parece bastante reducido.

En lo que respecta a la comparación con los valores obtenidos en otras fábricas de sillería (Tabla 2.79), cabe insistir en que la tipología de la piedra forme del elemento constructivo tiene una influencia muy importante en las características mecánicas obtenidas. En el caso concreto de estudio, dada la escasa compacidad de la arenisca empleada en la construcción del muro, disgregable con la uña, y la ternura del mortero bastardo de cal y cemento (en el que la cal apenas tuvo siete meses para sufrir procesos de carbonatación), los parámetros mecánicos promedio alcanzados empleando el coeficiente geométrico propuesto por la normativa que relaciona el área del gato plano con el área de la roza ($K_{gato-roza}$) parecen razonables:

- Módulo de elasticidad secante de 3,110.3 MPa.
- Coeficiente de Poisson: 0.19.

⁵ Relación geométrica propuesta por la normativa.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Como resumen de los gatos planos realizados, puede sintetizarse la información obtenida experimentalmente en la Tabla 4.1.57.

Tabla 4.1.57: Resultados de los ensayos de gato plano realizados en un muro de sillería arenisca ensayado en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

Fecha	Cód.	A _{mortero} /A _{piezas}	E _{sec, prom} (MPa)	v _{prom}	σ _{servicio} (MPa)	σ _{Límite elástico} (MPa)	σ _{rotura} (MPa)	E/σ _k ⁶
15-07-08	GPS-A Simple	-	-	-	3.49	-	-	-
16-07-08	GPS-A Doble	0.09	2,638.30	0.04	-	> 3.08	6.28	600.16
16-07-08	GPS-B Simple	-	-	-	2.50	-	-	-
17-07-08	GPS-B Doble	0.06	3,582.23	0.19	-	> 2.76	4.57	1,119.80

Conviene referir que el valor promedio estimado para la tensión de rotura de la sillería, obtenido ajustando una regresión logarítmica a la parte de comportamiento no lineal de cada una de las dos envolventes obtenidas en otros tantos ensayos de gato plano doble, alcanza un valor de 5.43 MPa para una deformación en rotura del 3‰.

A modo de contraste, si consideramos una resistencia a compresión media para la roca arenisca, f_b, de 34.12 MPa (Anexo 7) y una resistencia a compresión media para el mortero bastardo de cal y cemento, f_m, de 4.73 MPa (Anexo 2), en base a relaciones existentes en la bibliografía, puede obtenerse una resistencia a compresión promedio para la fábrica de 11.51 MPa (Tabla 4.1.58). Puede apreciarse la importante dispersión (coeficiente de variación del 48.5%) obtenida para la resistencia a compresión de la fábrica estimada en base a las referencias empleadas.

Tabla 4.1.58: Resistencia a compresión de la fábrica de sillería en base a referencias de otros autores.

Referencia		f (MPa)
BD 21/93 (Martínez et al. 2001)	$f = 0.55 \cdot f_b^{0.63} \cdot 2.5^{0.25}$	5.77
Ohler (Martínez et al. 2001)	$f = \frac{a \cdot f_b}{1 + \frac{b \cdot \alpha \cdot f_b}{2}}$ $\alpha = \frac{h_m}{h_b} = 0.05; a = 0.811; b = 0.960$	18.70
UIC (Martínez et al. 2001)	$f = 0.5 \cdot \left(f_m + \frac{a \cdot f_b - f_m}{1 + \frac{b \cdot \alpha \cdot 0.5 \cdot f_b}{2}} \right)$ $\alpha = \frac{h_m}{h_b} = 0.05; a = 1.0; b = 2.2$	11.85
PIET 70	-	6.25 (f _k)
BS 5628: Part 1:1978	f _b ≈30 MPa; mortero tipo iii	15.00 (f _k)
		11.51 ± 5.58 MPa

⁶ De acuerdo con las recomendaciones del CEN, Eurocode 8, Part 1-4, el valor de σ_k (valor característico) debe ser obtenido multiplicando el valor medio, σ_{rotura}, por un factor de 0.7.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

A juicio del autor, en vista de la escasa competencia de la roca arenisca forme de la sillería y de la ternura del mortero bastardo de cal y cemento empleado, el valor estimado experimentalmente de 5.43 MPa parece un umbral razonable para la tensión de rotura.

Por su parte la relación entre el módulo de deformación secante obtenido mediante gato plano doble y la tensión característica en rotura estimada, σ_k , toma un valor de 600.16 y 1,119.80 en cada uno de los dos ensayos de gato plano doble realizados. Estas cifras que están en la línea de lo propuesto por el CIB, la DIN 1053 y el EC-6 (ver Tabla 2.75), y por los intervalos presentados en la Tabla 2.77.

4.1.10.4 Bondad de los ensayos mini-presurométricos desarrollados en el muro de sillería

Como ya se ha justificado, durante el ensayo fue alcanzada la máxima capacidad del dispositivo mini-presurométrico con el que se realizaron los ensayos (24 Ba de presión), no alcanzándose la plastificación del área de ensayo y, por ende, no pudo estimarse el modulo presurométrico (E_{PMT}) de la fábrica.

4.2 Campaña experimental sobre componentes de mampostería.

4.2.1 Construcción del muro

Con fecha 28 de diciembre de 2007 fue construido en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria un muro de mampostería caliza. En la Fig. 4.2.1 se presenta la geometría de dicho muro.

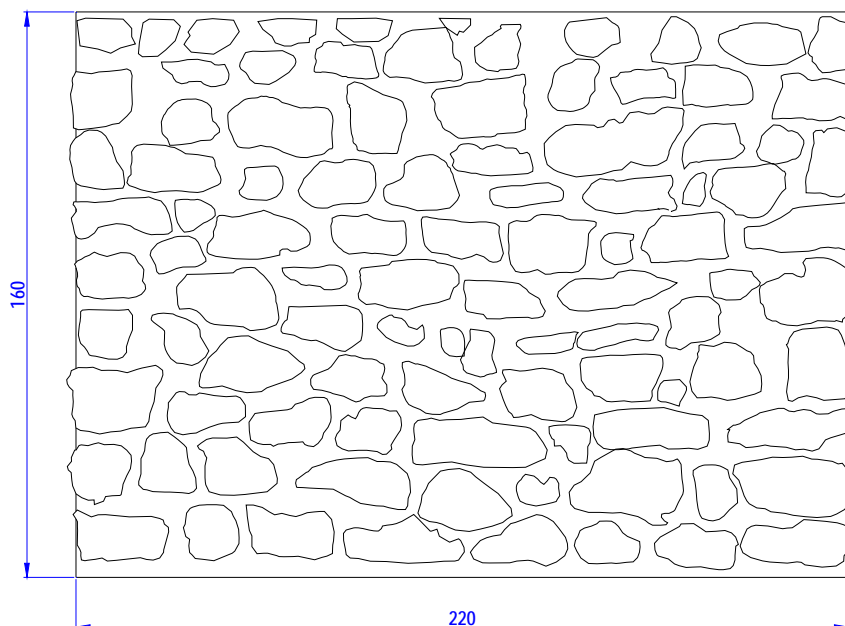


Fig. 4.2.1: Geometría general del muro de mampostería caliza ensayado en la presente tesis doctoral. Las cotas referidas son cm. El espesor del muro es de 31 cm.

Para su confección se empleó roca caliza y mortero bastardo tipo M-20b (según la NBE-FL 90) 1:2:10 (cemento:cal:arena, proporciones en volumen), Fig. 4.2.2-4.2.5, mediante el cuál se fabricaron muestras prismáticas de dimensiones 160 x 40 x 40 mm (largo x ancho x alto). Sobre dichas probetas fueron realizados una serie de ensayos que permitieron obtener una carga de rotura a flexión promedio de 37 t con un coeficiente de variación de 32.23%, y una resistencia a compresión promedio de 4.73 N/mm² con un coeficiente de variación de 52.65%. Dichos ensayos fueron realizados los días 29-05-08, 06-06-08 y 12-06-08 sobre probetas elaboradas el 28-12-07 (ver Anexo 2).



Fig. 4.2.2 y 4.2.3: Instantes tomados durante la construcción del muro de mampostería armado a base de roca caliza y mortero bastardo tipo M-20b, 1:2:10 (cemento:cal:arena, proporciones en volumen).



Fig. 4.2.4 y 4.2.5: Instantes tomados durante la construcción del muro de mampostería armado a base de roca caliza y mortero bastardo tipo M-20b, 1:2:10 (cemento:cal:arena, proporciones en volumen).

4.2.2 Transporte del muro

En relación con facilitar el adecuado transporte del muro bajo el pórtico de carga, y con la finalidad de no causarle ningún tipo de sollicitación que podría desembocar en el debilitamiento estructural o colapso del elemento constructivo, se ideó un dispositivo de transporte denominado “maleta” constituido por dos perfiles UPN, uno inferior con 5 planos de rigidizadores de cara a evitar su inestabilidad durante los procesos posteriores de carga, sobre el que se construye el muro en si mismo, y otro superior a modo de capucha.

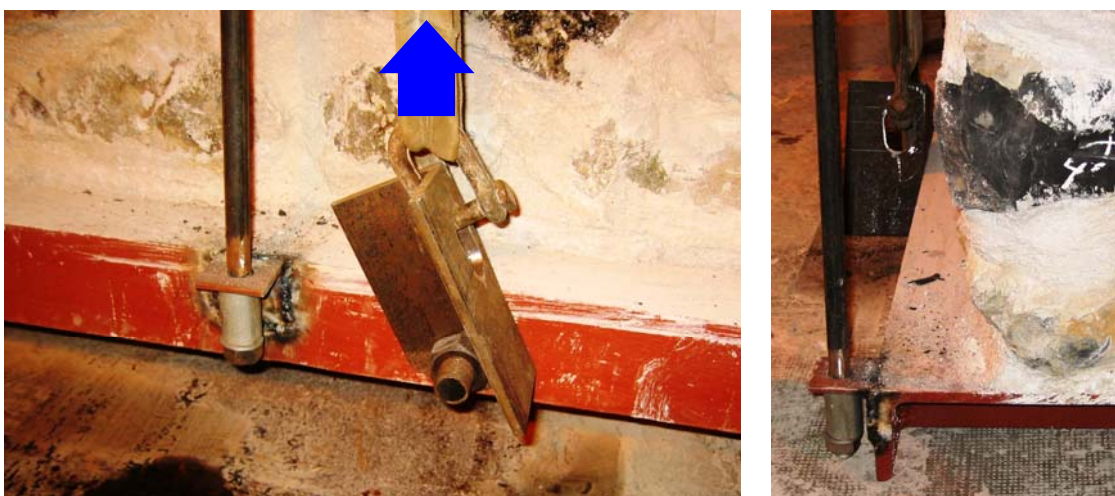


Fig. 4.2.6: Detalle de uno de los cuatro elementos de izado dispuestos sobre el UPN rigidizado sobre el que se construyó el muro de mampostería.

Fig. 4.2.7: Detalle de una de las 8 barras roscadas verticales con las que se introducía cierto nivel de compresión en el muro, de cara a evitar la aparición de tracciones durante el transporte del mismo.

Dichos perfiles UPN contaban con un total de cuatro dispositivos, dos por cada lado, que permitían realizar el izado y movimiento del muro (Fig. 4.2.6), los cuáles se pretensaban mediante ocho barras verticales (Fig. 4.2.7), roscadas, para motivar una leve compresión en el muro y evitar la aparición de tracciones durante el transporte (Fig. 4.2.8) del mismo que podrían desembocar en daño estructural.

En la Fig. 4.2.9 se muestra una perspectiva del muro de mampostería una vez ubicado bajo el pórtico de carga.

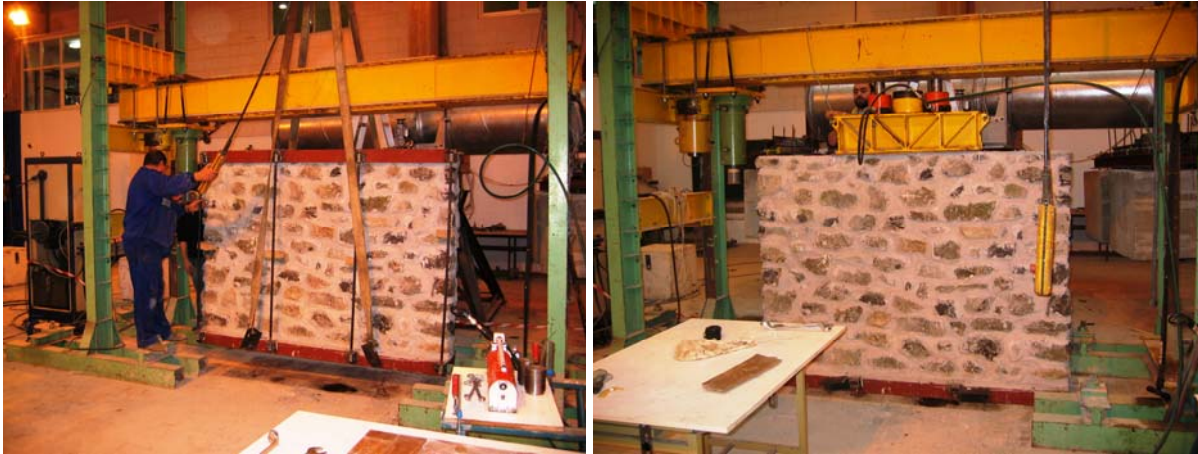


Fig. 4.2.8: Instante tomado durante el transporte del muro de mampostería bajo el pórtico de carga.

Fig. 4.2.9: Detalle del muro de mampostería una vez posicionado en el pórtico de carga.

4.2.3 Determinación del ángulo de apertura de cargas en el muro de mampostería.

Dada la extensión del muro realizado y teniendo en cuenta que el elemento de reparto de cargas que se disponía era de 1 metro de longitud, fue necesario obtener el ángulo de apertura de cargas en el seno del muro.

Pese a que en la norma NBE-FL 90 se alude a que puede tomarse un ángulo de apertura de carga, como norma general, de 30° , en cada muro particular, dependiendo de la rigidez de sus componentes, dicho parámetro puede ser objeto de cambio. Igualmente, el valor obtenido puede ser un indicador más preciso que el general aportado por la norma referida para la evaluación de la apertura de cargas en el plano del muro en construcciones reales.

En este sentido se dispusieron un total de 5 galgas extensométricas en la forma que indican las Fig. 4.2.10 y 4.2.11 para registrar las deformaciones captadas por cada una de ellas durante el proceso de carga.

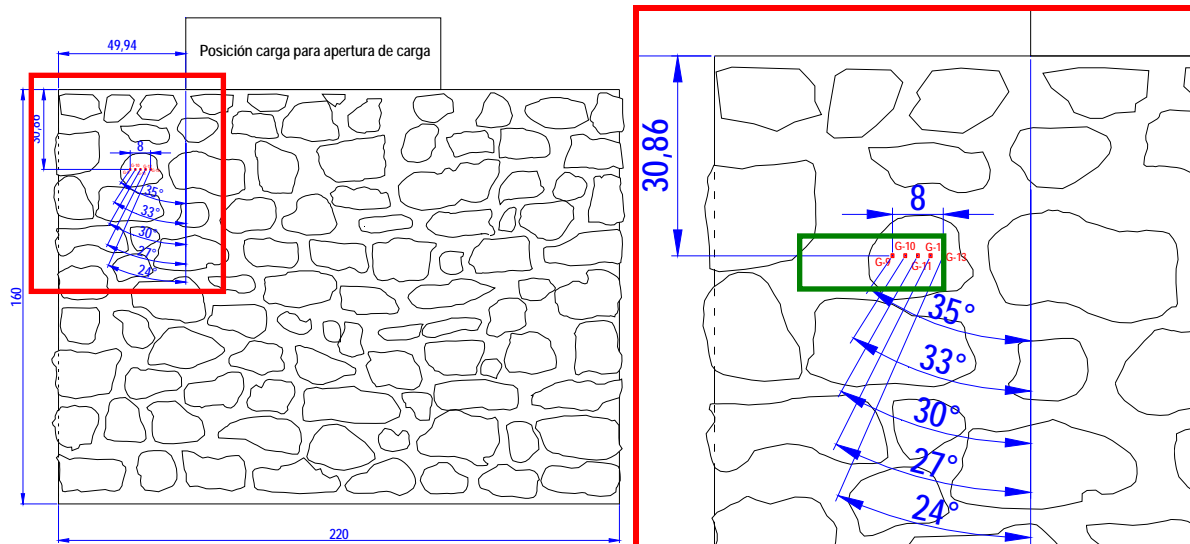


Fig. 4.2.10-4.2.11: Detalles de la localización de las galgas extensométricas en el seno del muro de mampostería.

Como puede comprobarse dichas bandas extensométricas se dispusieron a 30.86 cm de la coronación del muro, cada dos centímetros, de forma que la galga central definiría con el punto extremo de la viga de reparto de la carga un ángulo de 30° , Fig. 4.2.12 y 4.2.13.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

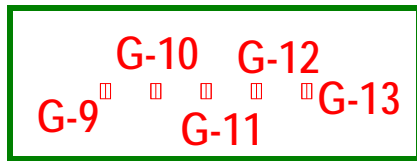


Fig. 4.2.12-4.2.13: Detalle de la numeración de dichas galgas en el proceso de toma de datos y fotografía ilustrativa de la ubicación de las mismas.

Con la viga de reparto en la posición indicada se realizó un proceso de carga hasta un total aproximado de 35 t, en cuatro escalones: 20.5 t, 24.5 t, 30.5 t y 35.0 t (Fig. 4.2.14).

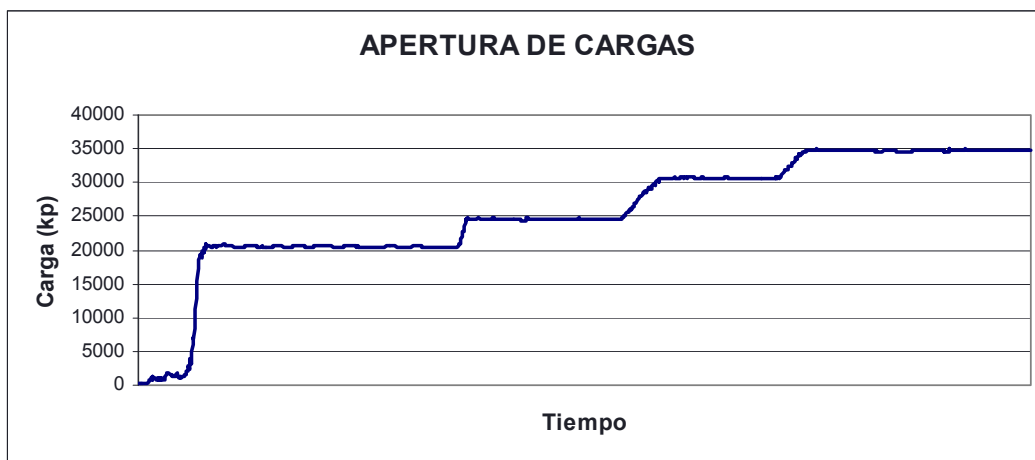


Fig. 4.2.14: Evolución de la carga introducida a lo largo del tiempo. Se realizó un proceso de carga hasta un total aproximado de 35 t, en cuatro escalones: 20.5 t, 24.5 t, 30.5 t y 35.0 t.

Mientras se realizó el proceso descrito se registró la evolución de las deformaciones en los cinco puntos de control (Fig. 4.2.15). Puede comprobarse como las deformaciones registradas por las cinco galgas presentan una tendencia similar, apenas registrando deformación.

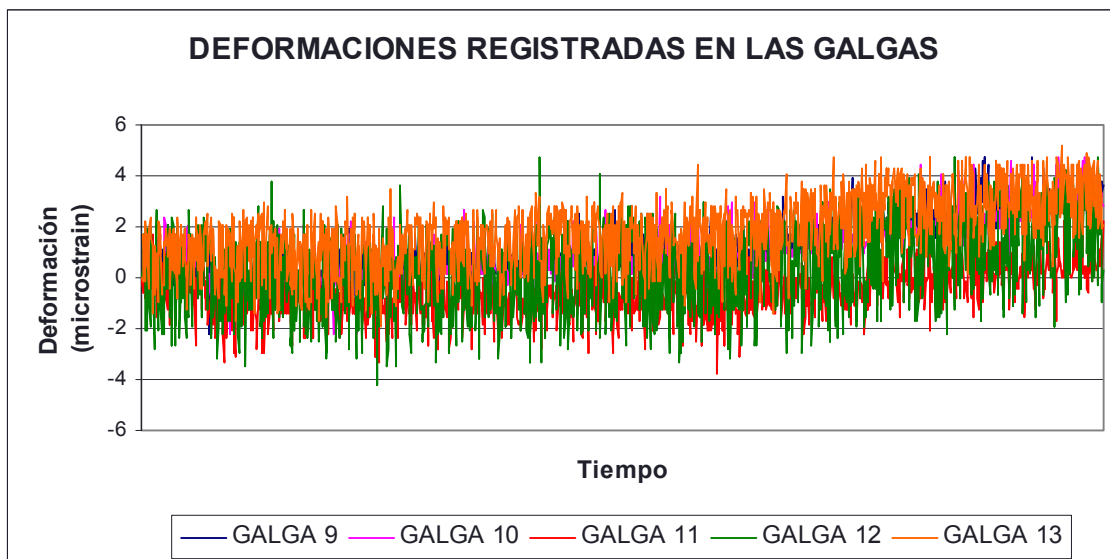


Fig. 4.2.15: Evolución de las deformaciones registradas a lo largo del tiempo. Las galgas extensométricas apenas sufren deformación.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tratando de obtener algo más de información del ensayo realizado, en la Tabla 4.2.1 siguiente se muestra para cada uno de los ciclos de carga motivados, el valor promedio de la deformación en cada uno de dichos escalones.

Tabla 4.2.1: Valor promedio de la deformación registrada por cada galga en cada escalón de carga

Ciclo	Carga (kp)	Galga 9	Galga 10	Galga 11	Galga 12	Galga 13
1	220.0*	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	20526.6	0.2	0.1	-0.9	-0.2	1.0
3	24583.8	0.8	0.6	-0.9	0.1	1.4
4	30671.5	1.3	1.0	-0.8	0.4	1.9
5	34736.9	2.7	2.3	0.2	1.5	3.1

* Representa el peso propio de los dispositivos de carga y de reparto de la misma en el muro.

En la Fig. 4.2.16 se ha representado para cada una de las galgas, el valor promedio de la deformación para cada nivel de carga. Puede apreciarse como la tendencia de todas las galgas es similar, pudiéndose comprobar como, en general, desde inicio, las galgas sufren tracciones, circunstancia que parece indicar que la línea de presiones queda a la derecha de la galga nº 13 (probablemente fuera del mampuesto en que están ubicadas las bandas).

En este tipo de fábricas, las deformaciones experimentadas por los mampuestos y, por ende, los estados tensionales, dependen mucho de las conexiones existentes entre estos (Fig. 4.2.17). Obviamente, esta dependencia depende de la rigidez del mortero de unión (y relleno), cuanto más deformable más impera el fenómeno referido. Esta circunstancia genera que pese a que la carga introducida sea eminentemente vertical, no necesariamente las deformaciones registradas dentro de un mampuesto deben de experimentar variaciones en dicha dirección.

Hubiera sido más acertado haber dispuesto bandas extensométricas en el mampuesto escogido y en los inmediatamente localizados a su derecha e izquierda con la finalidad de estudiar el comportamiento global de dichos mampuestos (considerando los mecanismos de sólido rígido movilizados fruto de los contactos existentes entre ellos), y de esa forma poder emitir conclusiones más acertadas.

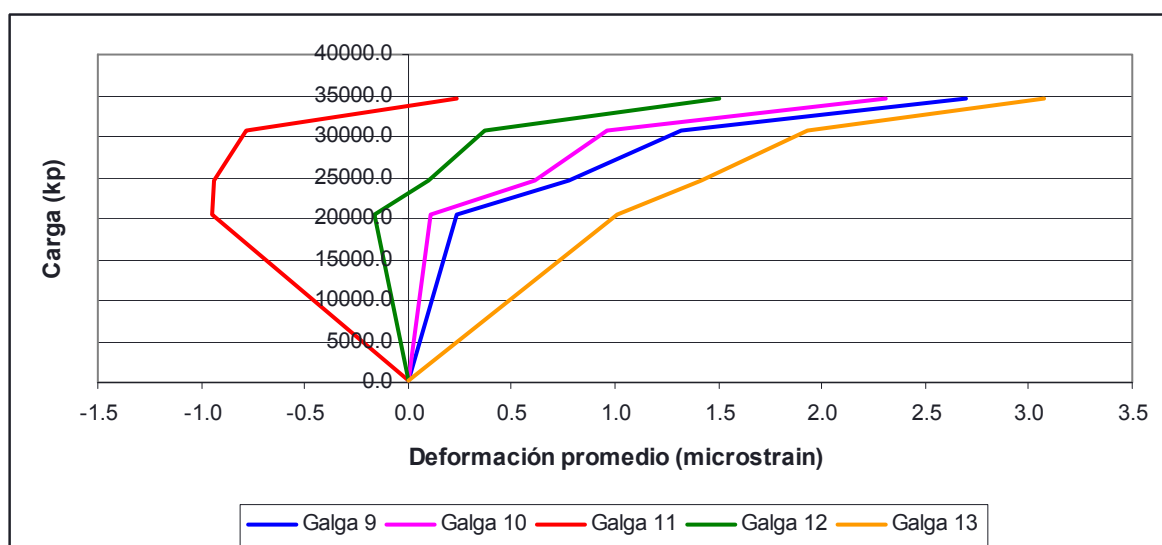


Fig. 4.2.16: Valor promedio de la deformación de cada galga extensométrica para cada nivel de carga.

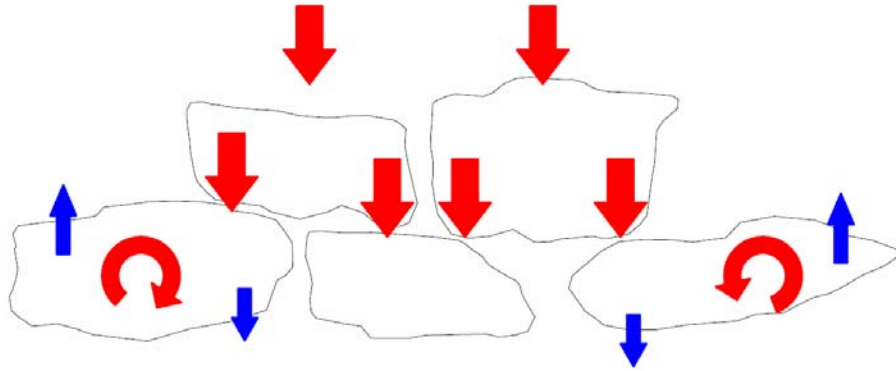


Fig. 4.2.17: Comportamiento de un conjunto de piedras sueltas ante la acción de las que les rodean. Ante un esfuerzo aplicado, eminentemente vertical, los estados tensionales generados en las piedras subyacentes dependen de las reacciones desarrolladas en los contactos existentes (imperla el comportamiento friccional).

En cualquier caso, las deformaciones registradas no superan los $\pm 5 \mu\text{m}/\text{m}$, umbral que puede estar afectado por el “ruido” presente en los registros adquiridos, por lo que la única conclusión plausible es que la carga aplicada apenas afecta a los puntos de control. De forma que no puede emitirse, con rigor, un valor concreto para el ángulo de apertura de carga en dicho muro.

A falta de más datos se ha considerado adoptar el valor de 30° que propone la normativa referida.

4.2.4 Determinación de las características mecánicas del muro.

Con la finalidad de obtener las características mecánicas (módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson) del muro para posterior contraste de los resultados alcanzados mediante técnicas no destructivas, se colocaron dos transductores potenciométricos, uno vertical y otro horizontal, con anterioridad al ensayo realizado mediante gato plano doble.

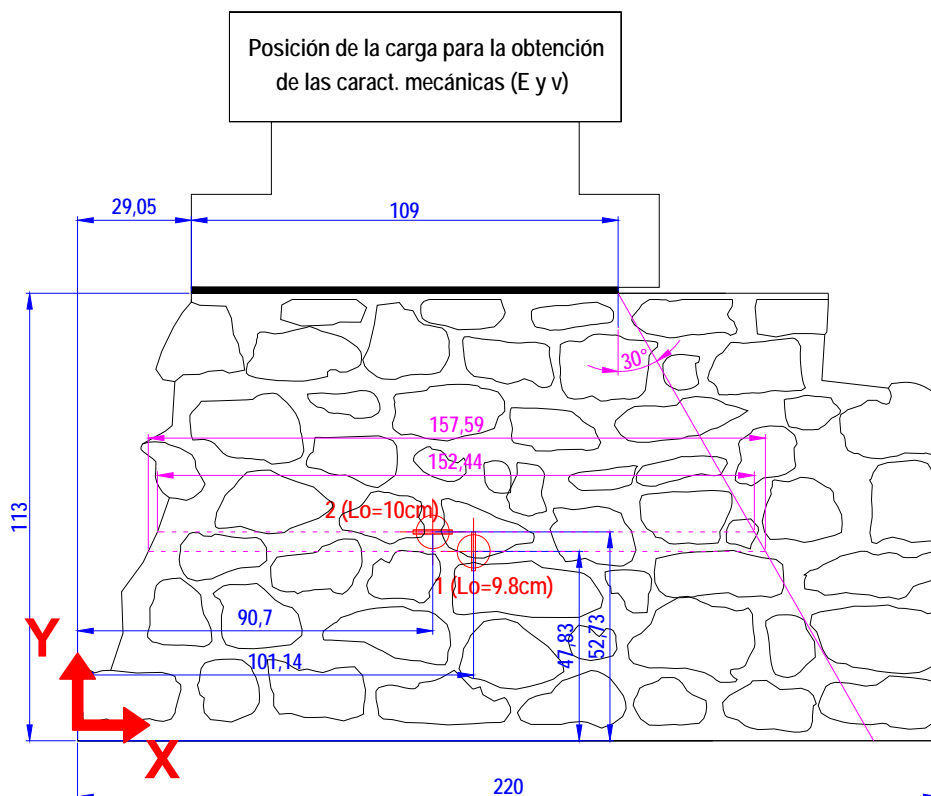


Fig. 4.2.18: Posición de los dos transductores potenciométricos, dispuestos para estimar las características mecánicas del muro. De los mismos se representa su punto central, así como la longitud inicial de medida. Todas las cotas relacionadas están en cm.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Es necesario referir que con fecha 28 de abril de 2008, durante la ejecución de un ensayo de gato plano simple, se produjo el colapso parcial de la cabeza del muro de mampostería (Fig. 4.2.18 y 4.2.19), circunstancia que motivo el desmontaje de los mampuestos existentes en la zona dañada y la posterior consolidación del elemento portante. Fruto de dicho imprevisto la geometría del muro se redujo a la que se ilustra en las figuras indicadas.

En el croquis adjunto (Fig. 4.2.18) puede comprobarse la ubicación de dichos transductores, así como la línea ideal de la apertura de cargas, una vez adoptado el ángulo comentado en el apartado anterior.

En la Tabla 4.2.2 se relaciona la posición del centro de cada uno de los dos transductores en el sistema coordenado (x,y) referido, así como la anchura de muro afectada por la carga, a nivel del punto central de los transductores, haciendo la hipótesis de apertura lineal, para la obtención del nivel tensional vertical medio en cada nivel.

Tabla 4.2.2: Posición del centro de cada uno de los transductores en el sistema coordenado (x,y) referido, así como la anchura de muro afectada por la carga en cada nivel.

Transductor	Posición del centro de cada transductor		Anchura de carga
	X (cm)	Y (cm)	H _i (cm)
1	101.14	47.83	157.59
2	90.70	52.73	152.44

Para el control de la puesta en carga durante la ejecución de los ensayos se empleó un transductor de presión de 400 Ba (5 voltios) y dos gatos hidráulicos de 126.70 cm² de área cada uno.

Debido a lo referido una señal de presión registrada de 1 voltio equivale a una carga de 20,272 kp.

$$400 \frac{kp}{cm^2} \approx 5 \text{ voltios} \rightarrow 1 \text{ voltio} \approx 80 \frac{kp}{cm^2}$$

$$1 \text{ voltio} \approx 80 \frac{kp}{cm^2} \cdot 126.70 cm^2 \cdot 2 = 20,272 kp$$

El área dibujada sobre el muro, Fig. 4.2.18, corresponde a los elementos empleados para introducción de la carga en el muro de mampostería. Por ello que también hay que considerar que el peso muerto que representan dichos elementos reparto, en este caso, asciende a un total de 488 kp.

Igualmente, en la Fig. 4.2.19 se ilustra la ubicación de los transductores dentro del alzado del muro, presentado un detalle de la colocación de los mismos en la Fig. 4.2.20.

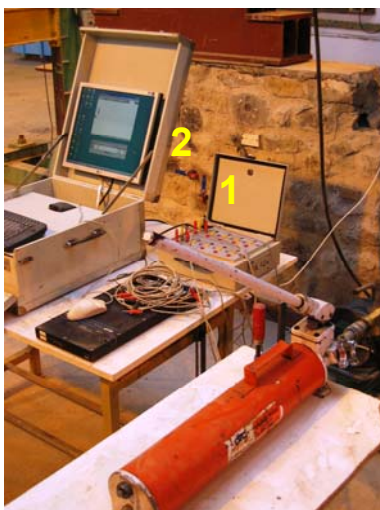


Fig. 4.2.19: Ubicación de los transductores dentro del alzado del muro.

Fig. 4.2.20: Detalle de la colocación de los transductores en la mampostería.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Con la viga de reparto en la posición indicada en la Fig. 4.2.19 (en el borde izquierdo del muro) se realizó un proceso de carga (hasta aproximadamente 41.0 toneladas), en escalones sucesivos (10.5 t, 20.5 t y 31.0 t). Dicho proceso es ilustrado en la Fig. 4.2.21.

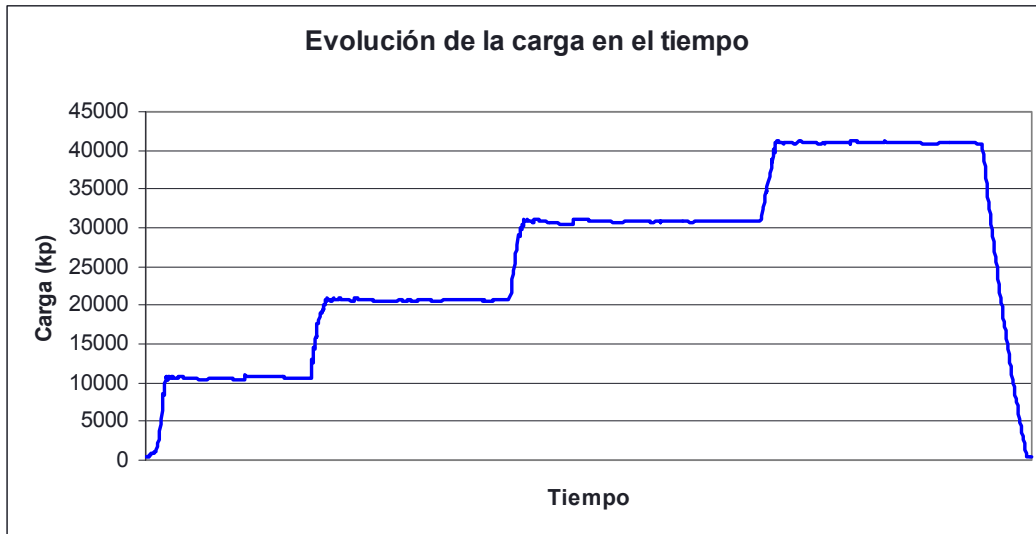


Fig. 4.2.21: Evolución temporal de la carga en el tiempo. Pueden apreciarse los cuatro escalones de carga introducidos para obtener un total, en cabeza del muro, de 41 toneladas.

De la misma forma, en la Fig. 4.2.22 se ilustra la evolución de las deformaciones registradas por el transductor nº 1 (vertical) y el nº 2 (horizontal) bajo la acción de la carga referida. Puede apreciarse como la deformación vertical es de compresión y de mayor amplitud que la tracción experimentada en el transductor horizontal.

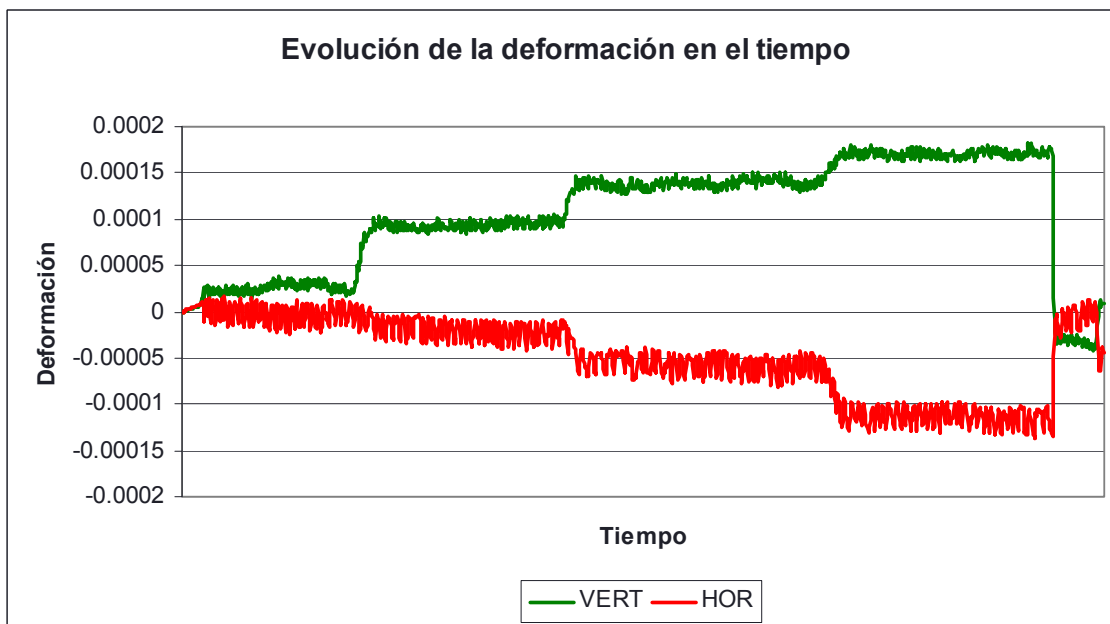


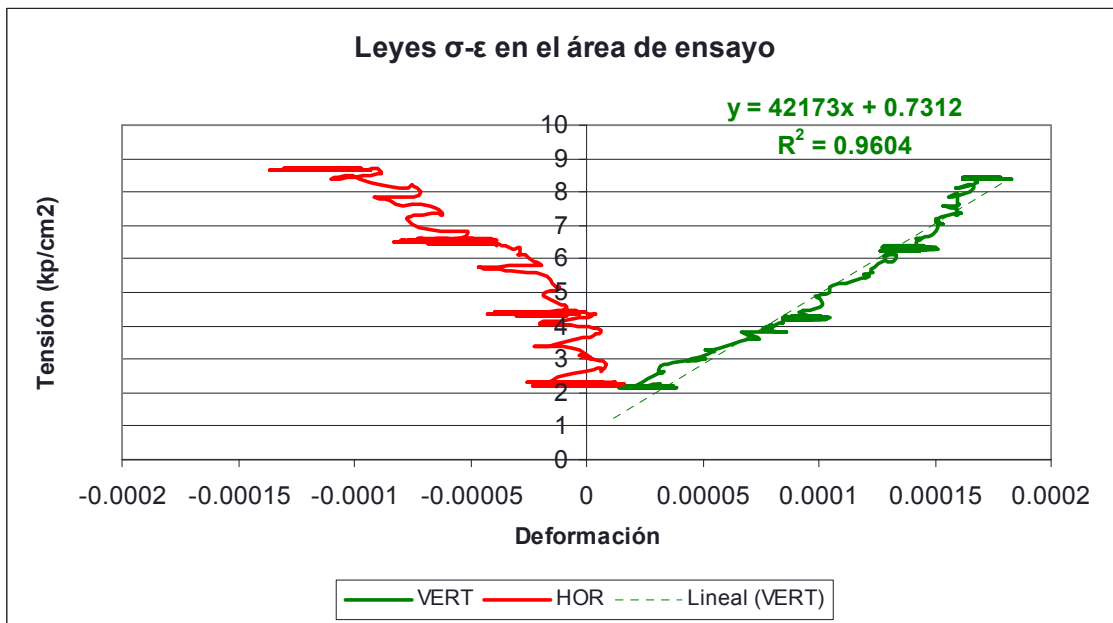
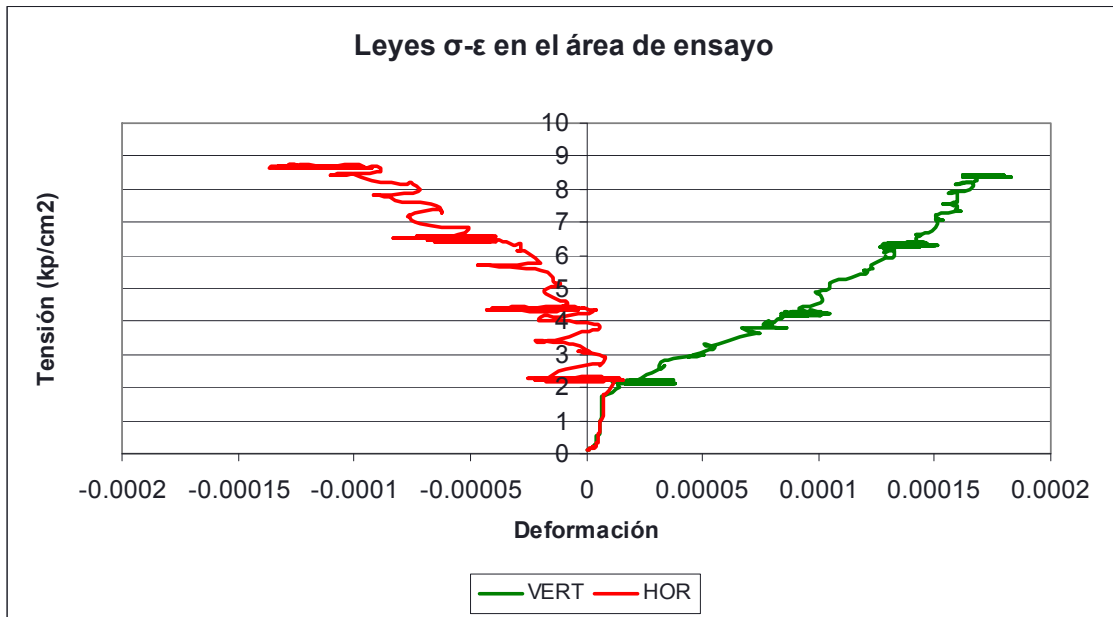
Fig. 4.2.22: Evolución temporal de las deformaciones verticales y horizontales.

Mediante la composición de la tensión media estimada en el punto central de cada uno de los transductores, obtenida haciendo la hipótesis de apertura lineal de cargas, y la deformación registrada durante el ensayo, en la Fig. 4.2.23 se presentan las leyes tensión – deformación obtenidas.

De la misma forma, en la Fig. 4.2.24 se presenta el ajuste lineal realizado en la rama elástica del muro, con el objetivo de obtener el módulo de deformación, que en el área local de ensayo asciende a **4,217.3 MPa**. Por su parte, el coeficiente de Poisson obtenido, mediante la relación

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

entre la deformación horizontal y la vertical en la rama elástica considerada, presenta un valor de **0.44**.



Conviene llamar la atención de que los parámetros mecánicos obtenidos se refieren a un área muy local de ensayo, constituyendo únicamente un orden de magnitud de los mismos, con el único objetivo de establecer una comparación con los obtenidos en el ensayo de gato plano doble que se presenta más adelante. Igualmente, conviene referir, nuevamente, que se han estimado suponiendo el nivel tensional vertical medio en el área donde se ubica cada transductor, admitiendo una apertura lineal de cargas con un ángulo de 30°, circunstancias que son meras aproximaciones a la realidad.

4.2.5 Ensayos de Hole Drilling

Se realizaron un total de cuatro ensayos Hole Drilling, con la finalidad de estimar el nivel de tensión vertical en otros tantos puntos diferentes del muro de mampostería construido. Los dos primeros (HDM1 y HDM2) se llevaron a cabo previamente al colapso de la zona superior del muro, Fig. 4.2.25, mientras que los dos últimos (HDM3 y HDM4) fueron realizados una vez producido éste, Fig. 4.2.26.

En las Fig. 4.2.25 y 4.2.26 referidas puede comprobarse la ubicación de cada uno de estos ensayos dentro del muro. Igualmente en la Tabla 4.2.3 se relacionan las coordenadas del centro de cada una de las perforaciones realizadas respecto de un origen relativo compuesto por la esquina inferior izquierda del muro.

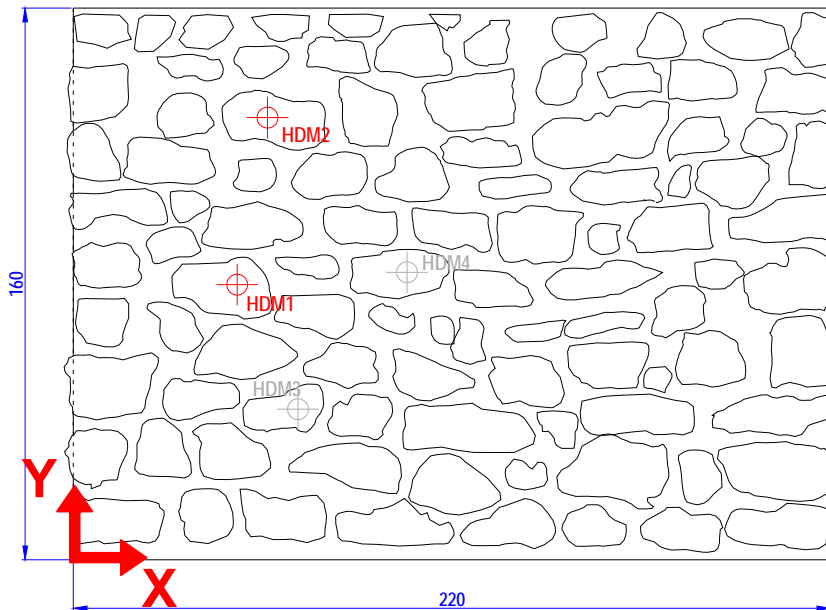


Fig. 4.2.25: Ubicación en el muro de los 2 ensayos de Hole Drilling realizados (HDM1 y HDM2) previamente al colapso de la cabeza del muro. Las cotas relacionadas están en cm.

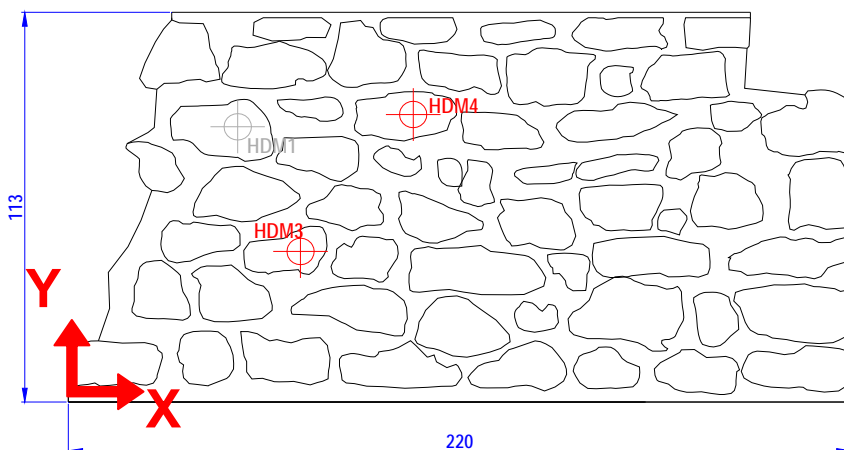


Fig. 4.2.26: Ubicación en el muro de los 2 ensayos de Hole Drilling realizados (HDM3 y HDM4) tras el colapso de la cabeza del muro. Las cotas relacionadas están en cm.

Tabla 4.2.3: Coordenadas de ubicación de los ensayos de Hole Drilling realizados en el muro de mampostería.

	HD1	HD2	HD3	HD4
x_i (cm)	47.60	56.42	65.26	96.93
y_i (cm)	79.80	128.23	43.67	83.37

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Para la ejecución de los ensayos se empleó un transductor de presión de 400 Ba (5 voltios) y dos gatos hidráulicos de 126.70 cm² de área cada uno. De forma que, tal y como se ha justificado, una señal de presión registrada de 1 voltio equivale a una carga de 20,272.0 kp.

Igualmente, también hay que considerar que el peso muerto que representan los elementos de reparto de carga empleados en el ensayo es de 220 kp previamente al colapso de la cabeza del muro, y 488 kp tras desarrollarse el mismo.

4.2.5.1 HDM1

En la Fig. 4.2.27 siguiente se muestra la localización del Hole Drilling denominado HDM1 dentro del conjunto del muro de fábrica.

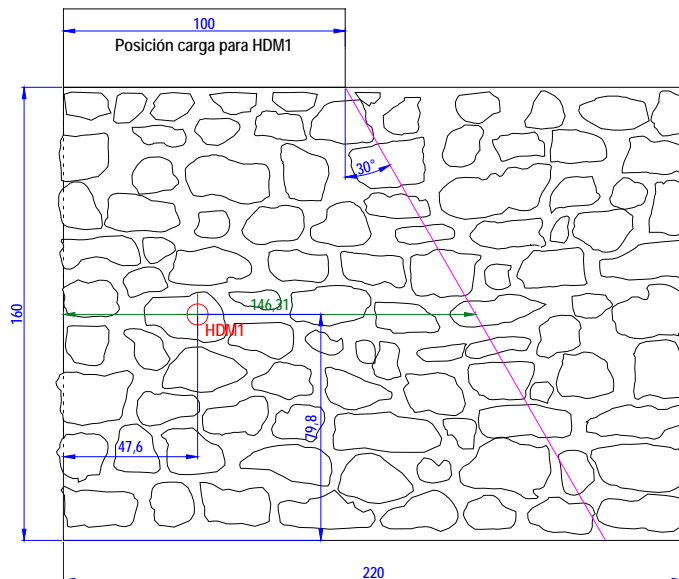


Fig. 4.2.27: Alzado del muro de mampostería con la localización del HDM1. El espesor del muro son 31 cm. Las cotas referidas son cm.

Se realizaron dos ciclos de carga (Fig. 4.2.28), uno inicial para el reajuste del sistema (gatos, viga de reparto, etc.), y un segundo hasta 40 t, valor que se mantuvo constante a lo largo del ensayo.



Fig. 4.2.28: Introducción de la carga durante el ensayo. El nivel medio de carga vertical mantenido constante en la cabeza del muro fue de 40,018.5 kp.

En la Fig. 4.2.29 se presentan los registros de la evolución de la deformación de cada galga a lo largo del ensayo.

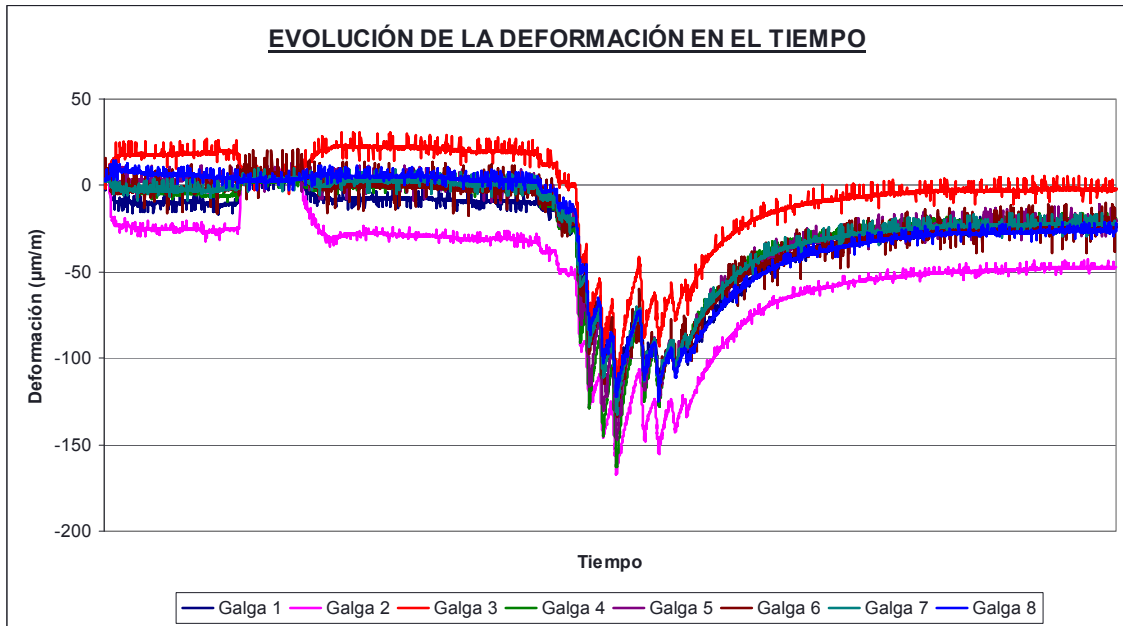


Fig. 4.2.29: Evolución registrada en la deformación de cada galga a lo largo del ensayo HDM1.

Bajo la carga referida mantenida constante, tomando como origen relativo los valores de la deformación, previamente al taladrado, una vez estabilizados (Tabla 4.2.4), la gráfica de evolución de la deformación con el tiempo toma el aspecto siguiente (Fig. 4.2.30):

Tabla 4.2.4: Deformación registrada por cada banda una vez estabilizada la carga previamente al taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	-8.2	-29.6	21.2	-1.0	0.6	-1.0	1.8	4.6

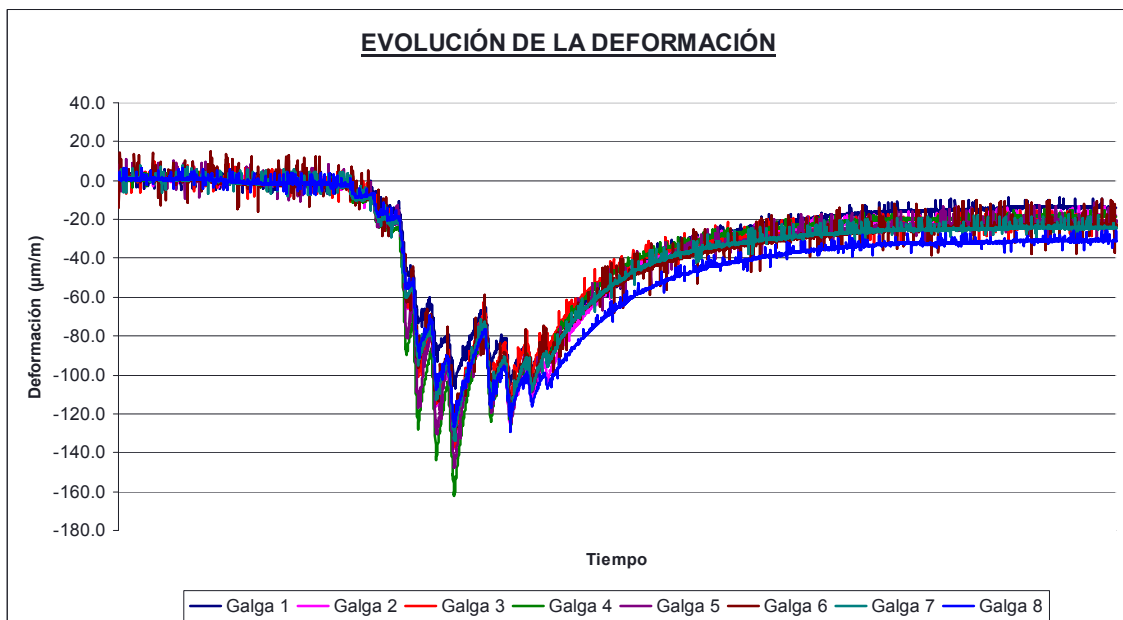


Fig. 4.2.30: Traslación de los registros con el objetivo de tomar como origen relativo para el procesado del ensayo, el instante en que los valores presentados por las galgas se estabilizan antes del taladrado.

Las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$ durante los últimos minutos del ensayo. En vista de lo referido, se considera como incremento deformacional de las galgas, tras el taladrado, los valores de la Tabla 4.2.5.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

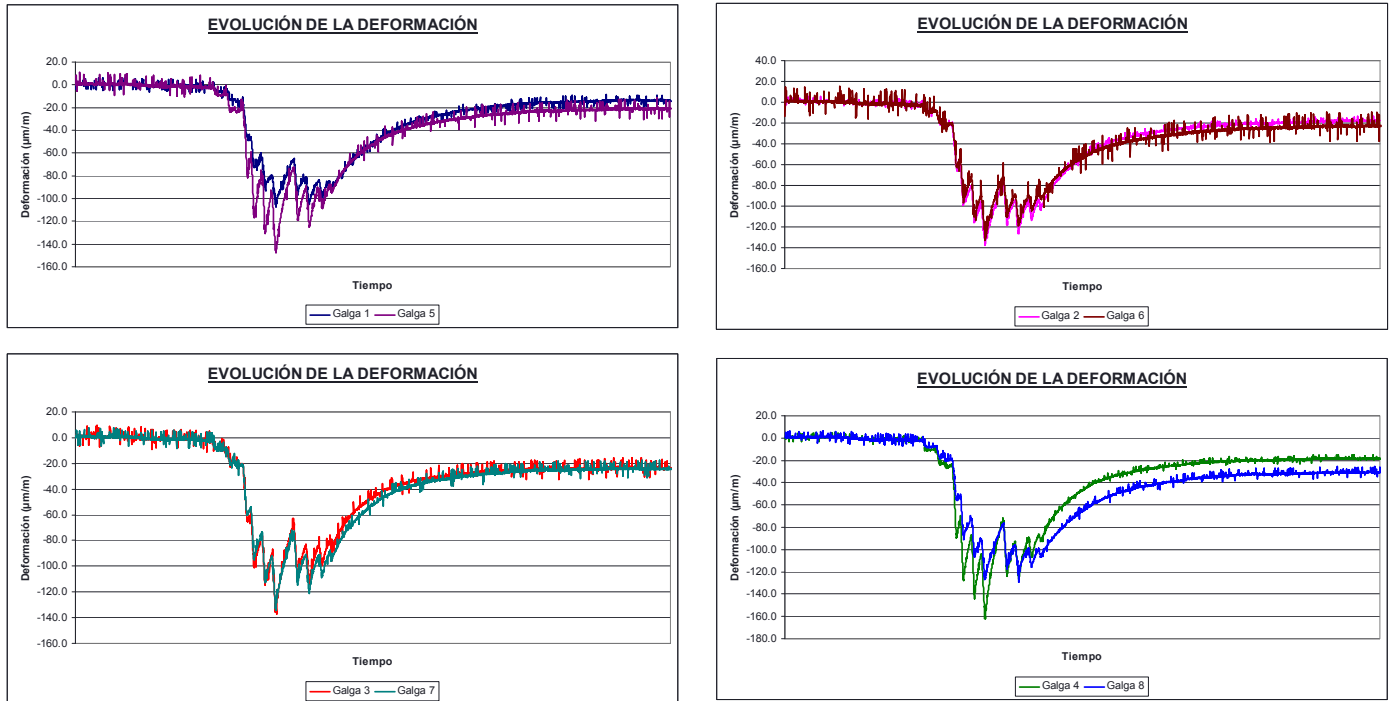


Fig. 4.2.31-4.2.34: Evolución de la deformación de las galgas en el tiempo, dos a dos (se representan conjuntamente las diametralmente opuestas).

Tabla 4.2.5: Incremento deformacional registrado por las galgas extensométricas, manteniendo constante la carga en coronación del muro, después del taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	-13.7	-17.9	-23.3	-18.4	-21.0	-22.8	-24.1	-30.9

Como ya se ha referido dado que las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$, el registro asociado a cada una de ellas se considera válido. En base a las deformaciones referidas y procediendo con la teoría de la elasticidad, para cada una de las ocho combinaciones de galgas extensométricas existentes, pueden obtenerse (Tabla 4.2.6) las tensiones principales máxima y mínima, σ_{\max} y σ_{\min} , el ángulo existente, medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Tabla 4.2.6: Obtención, para cada una de las combinaciones de galgas, de las tensiones principales máxima y mínima, σ_{\max} y σ_{\min} , el ángulo existente (β), medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Combinación	Canales	σ_{\max} (N/mm^2)	σ_{\min} (N/mm^2)	β ($^\circ$)	σ_{vert} (N/mm^2)
1*	1, 3, 6	2.91	2.03	69	2.14
2*	2, 4, 7	2.83	2.01	46	2.01
3	3, 5, 8	3.56	2.35	41	2.87
4*	4, 6, 1	3.25	2.25	-54	2.27
5	5, 7, 2	3.35	2.67	-54	2.90
6*	6, 8, 3	3.95	3.21	-69	3.83
7*	7, 1, 4	2.88	2.16	-3	2.16
8*	8, 2, 5	3.75	2.75	-14	3.02
$\sigma_{\text{vert, Promedio}}$ (N/mm^2)					2.89
$\sigma_{\text{vert, Desvest}}$ (N/mm^2)					0.02
Coef. de variación					0.74%

* Las combinaciones 1, 2, 4, 6, 7 y 8 no se han tenido en cuenta desde un punto de vista estadístico (coeficiente de variación menor del 10%).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Desde un punto de vista estadístico (coeficiente de variación del orden del 10%) solo se han tenido en cuenta las combinaciones 3 y 5. Para estas combinaciones la tensión vertical promedio estimada en el ensayo es de **2.89 N/mm² (tracción)**, presentando un coeficiente de variación de 0.74%. En la Tabla 4.2.7 adjunta se relaciona el nivel de tensión vertical promedio, su desviación típica y su coeficiente de variación en función de las combinaciones de galgas adoptado. Como puede apreciarse a medida que se discriminan las combinaciones, cuyo nivel tensional vertical se diferencia del valor promedio obtenido para cada conjunto de combinaciones una magnitud mayor que la desviación típica calculada para cada conjunto de éstas, el coeficiente de variación disminuye.

Tabla 4.2.7: Obtención, para diferentes combinaciones de galgas, de la tensión vertical promedio existente, la desviación típica y el coeficiente de variación relacionado.

Combinaciones	$\sigma_{vert, Promedio}$ (N/mm ²)	$\sigma_{vert, Desvest}$ (N/mm ²)	Coef. de variación
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8	2.65	0.62	23.41%
1, 3, 4, 5, 7 y 8	2.56	0.41	16.05%
3, 4, 5 y 7	2.55	0.39	15.28%
3, 4 y 5	2.68	0.36	13.26%
3 y 5	2.89	0.02	0.74%

Para una consulta detallada del ensayo realizado se remite al lector al registro de ensayo Lab0807 adjunto en el Anexo 6 “Registro de los ensayos hole drilling realizados en laboratorio sobre el muro de mampostería”.

Por otra parte la tensión vertical media existente en el punto de ensayo es de **0.88 N/mm²** (compresión):

$$\sigma_{media} = \frac{40,018.5kp}{146.31 \cdot 31cm^2} = 8.82 \frac{kp}{cm^2} = 0.88 \frac{N}{mm^2} \text{ (compresión)}$$

4.2.5.2 HDM2

En la Fig. 4.2.35 se muestra la localización del Hole Drilling denominado HDM2 dentro del conjunto del muro de fábrica.

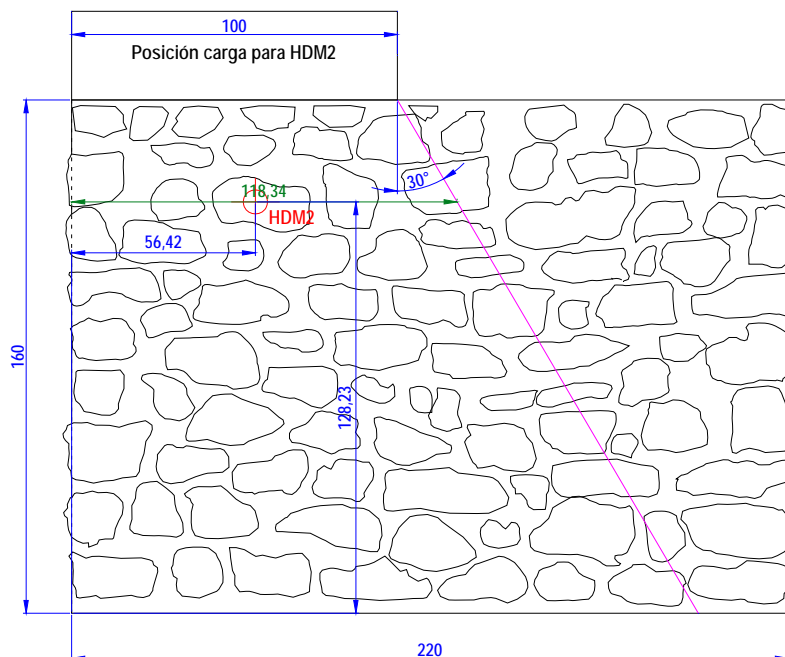


Fig. 4.2.35: Alzado del muro de mampostería con la localización del HDM2. El espesor del muro son 31 cm. Las cotas referidas son cm.

La carga se introduce de forma monótona creciente hasta un valor de 33.7 t, el cuál se mantiene constante a lo largo del ensayo (Fig. 4.2.36).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido



Fig. 4.2.36: Introducción de la carga durante el ensayo. El nivel medio de carga vertical mantenido constante en la cabeza del muro fue de 33,674.4 kp.

En la Fig. 4.2.37 se presentan los registros de la evolución de la deformación de cada galga a lo largo del ensayo.

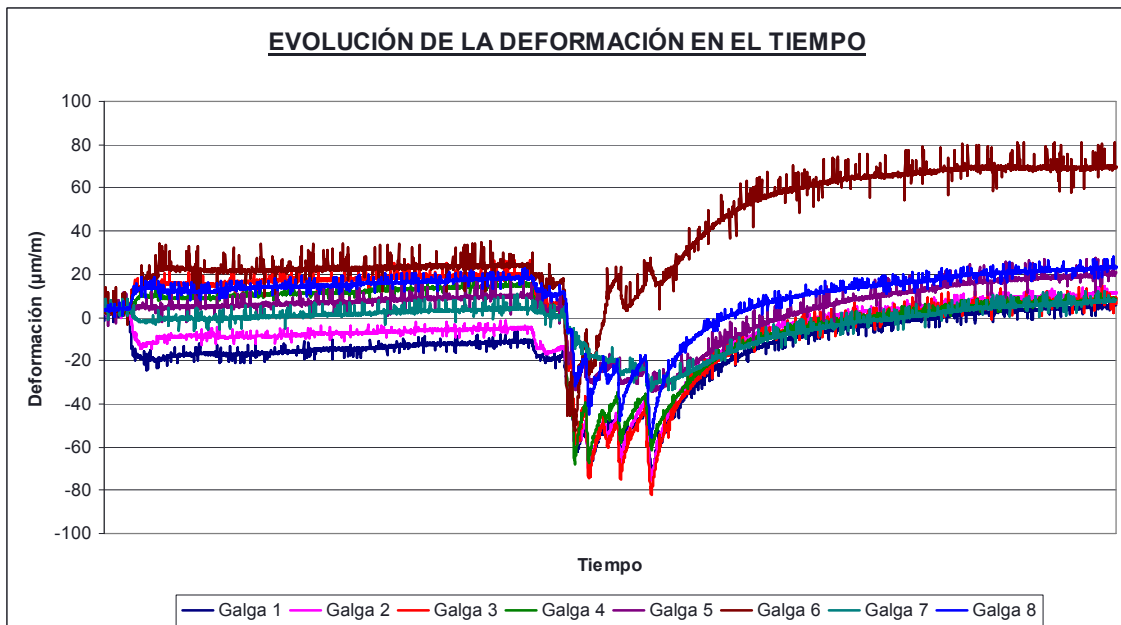


Fig. 4.2.37: Evolución registrada en la deformación de cada galga a lo largo del ensayo HDM2.

Bajo la carga referida mantenida constante, tomando como origen relativo los valores de la deformación, previamente al taladrado, una vez estabilizados (Tabla 4.2.8), la gráfica de evolución de la deformación con el tiempo toma el aspecto siguiente (Fig. 4.2.38):

Tabla 4.2.8: Deformación una vez estabilizada la carga previamente al taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	-11.9	-5.5	19.7	14.2	9.5	24.1	3.7	17.6

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

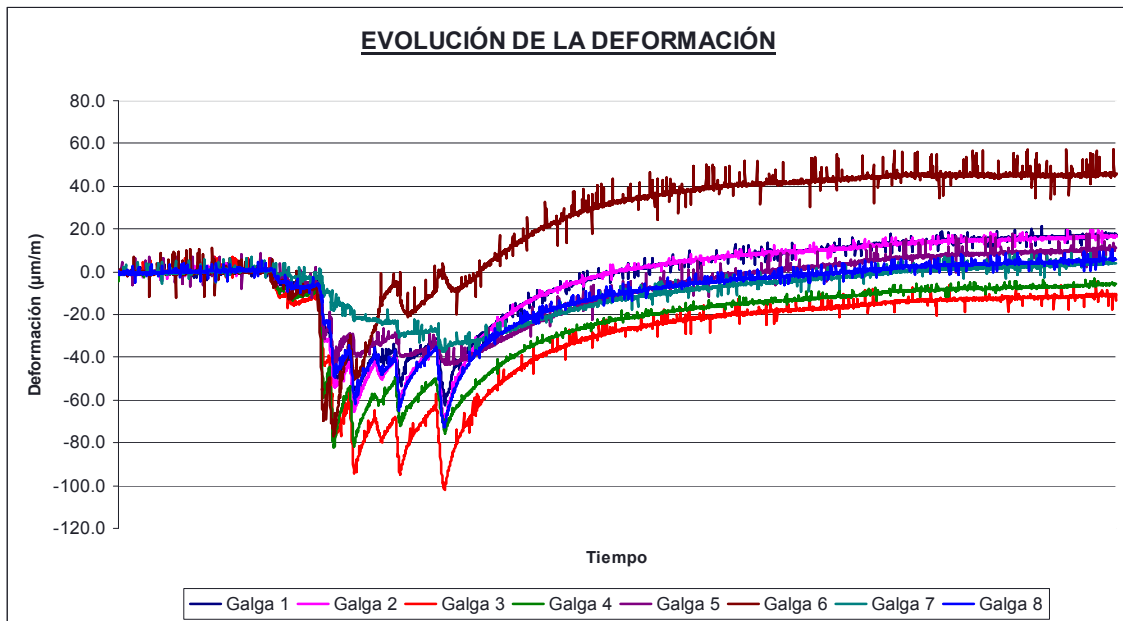


Fig. 4.2.38: Traslación de los registros con el objetivo de tomar como origen relativo para el procesado del ensayo, el instante en que los valores presentados por las galgas se estabilizan.

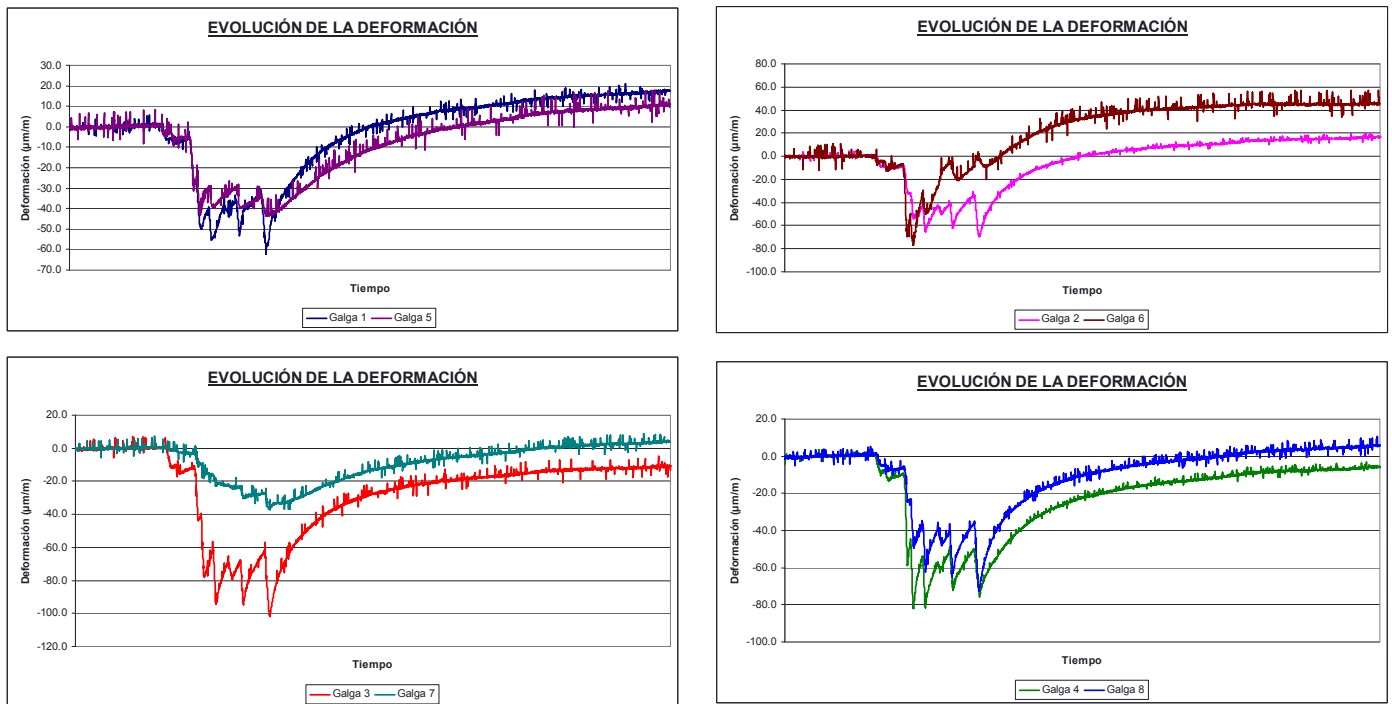


Fig. 4.2.39-4.2.42: Evolución de la deformación de las galgas en el tiempo, dos a dos (se representan conjuntamente las diametralmente opuestas).

Las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$ durante los últimos minutos del ensayo. En vista de lo referido, se considera como incremento deformacional de las galgas, tras el taladrado, los valores de la siguiente Tabla 4.2.9:

Tabla 4.2.9: Incremento deformacional registrado por las galgas extensométricas, manteniendo constante la carga en coronación del muro, después del taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	16.8	16.1	-11.4	-6.4	10.1	45.5	3.6	5.1

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Como ya se ha referido dado que las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$, el registro asociado a cada una de ellas se considera válido. En base a las deformaciones referidas y procediendo con la teoría de la elasticidad, para cada una de las ocho combinaciones de galgas extensométricas existentes, pueden obtenerse (Tabla 4.2.10) las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente, medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Tabla 4.2.10: Obtención, para cada una de las combinaciones de galgas, de las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente (β), medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Combinación	Canales	σ_{max} (N/mm ²)	σ_{min} (N/mm ²)	β (°)	σ_{vert} (N/mm ²)
1	1, 3, 6	3.08	-3.85	-54	-1.46
2*	2, 4, 7	0.18	-1.57	87	-0.79
3*	3, 5, 8	1.03	-0.85	-14	-0.74
4*	4, 6, 1	-0.79	-4.8	3	-2.59
5	5, 7, 2	-0.22	-1.73	-55	-1.23
6*	6, 8, 3	-0.39	-6.84	59	-6.46
7*	7, 1, 4	-0.08	-2.83	34	-1.97
8	8, 2, 5	-1.09	-1.94	3	-1.47
$\sigma_{\text{vert, Promedio}}$ (N/mm²)					-1.39
$\sigma_{\text{vert, Desvest}}$ (N/mm²)					0.14
Coef. de variación					9.79%

* Las combinaciones 2, 3, 4, 6 y 7 no se han tenido en cuenta desde un punto de vista estadístico (coeficiente de variación menor del 10%).

Desde un punto de vista estadístico (coeficiente de variación del orden del 10%) solo se han tenido en cuenta las combinaciones 1, 5 y 8. Para estas combinaciones la tensión vertical promedio estimada en el ensayo es de **1.39 N/mm² (compresión)**, presentando un coeficiente de variación de 9.79%. En la Tabla 4.2.11 adjunta se relaciona el nivel de tensión vertical promedio, su desviación típica y su coeficiente de variación en función de las combinaciones de galgas adoptado. Como puede apreciarse a medida que se discriminan las combinaciones, cuyo nivel tensional vertical se diferencie del valor promedio obtenido para cada conjunto de combinaciones una magnitud mayor que la desviación típica calculada para cada conjunto de éstas, el coeficiente de variación disminuye.

Tabla 4.2.11: Obtención, para diferentes combinaciones de galgas, de la tensión vertical promedio existente, la desviación típica y el coeficiente de variación relacionado.

Combinaciones	$\sigma_{\text{vert, Promedio}}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{vert, Desvest}}$ (N/mm ²)	Coef. de variación
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8	-2.09	1.87	89.37%
1, 2, 3, 4, 5, 7 y 8	-1.46	0.65	44.58%
1, 5, 7 y 8	-1.53	0.31	20.36%
1, 5 y 8	-1.39	0.14	9.79%

Para una consulta más detallada del ensayo, se remite al lector al registro de ensayo Lab0808 adjunto en el Anexo 6.

Por otra parte la tensión vertical media existente en el punto de ensayo es de **0.92 N/mm² (compresión)**:

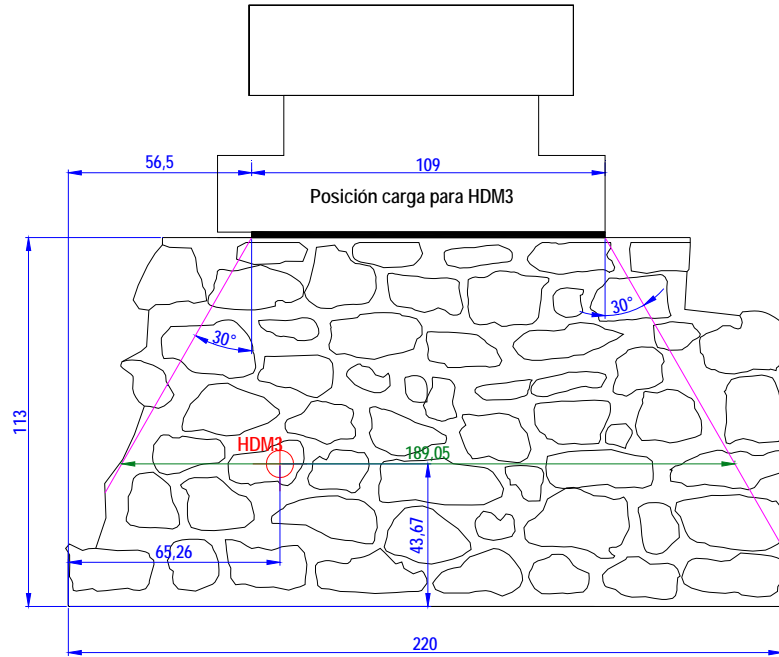
$$\sigma_{\text{media}} = \frac{33,674.4kp}{118.34 \cdot 31cm^2} = 9.18 \frac{kp}{cm^2} = 0.92 \frac{N}{mm^2} \text{ (compresión)}$$

4.2.5.3 HDM3

En la Fig. 4.2.43 siguiente se muestra la localización del Hole Drilling denominado HDM3 dentro del conjunto del muro de fábrica.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Fig. 4.2.43: Alzado del muro de mampostería con la localización del HDM3. El espesor del muro son 31 cm. Las cotas referidas son cm.



La carga final que operó a lo largo del ensayo se introdujo mediante cinco escalones respectivos de 11 t, 21 t, 31 t, 41 t y 51 t (Fig. 4.2.44).



Fig. 4.2.44: Introducción de la carga durante el ensayo. El nivel medio de carga vertical mantenido constante en la cabeza del muro fue de 51,095.9 kp.

En la Fig. 4.2.45 se presentan los registros de la evolución de la deformación de cada galga a lo largo del ensayo.

Bajo la carga referida mantenida constante, tomando como origen relativo los valores de la deformación, previamente al taladrado, una vez estabilizados (Tabla 4.2.12), la gráfica de evolución de la deformación con el tiempo toma el aspecto siguiente (Fig. 4.2.46):

Tabla 2.4.12: Deformación una vez estabilizada la carga previamente al taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	-44.1	-24.3	5.0	2.1	-29.1	-13.9	-2.5	-4.3

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

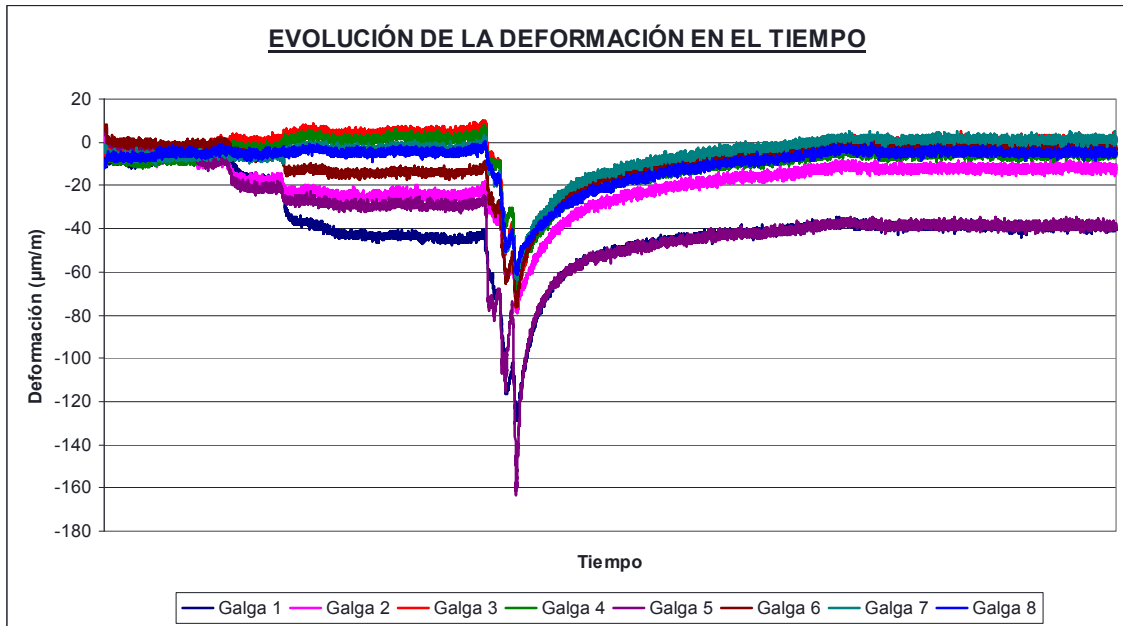


Fig. 4.2.45: Evolución registrada en la deformación de cada galga a lo largo del ensayo HDM3.

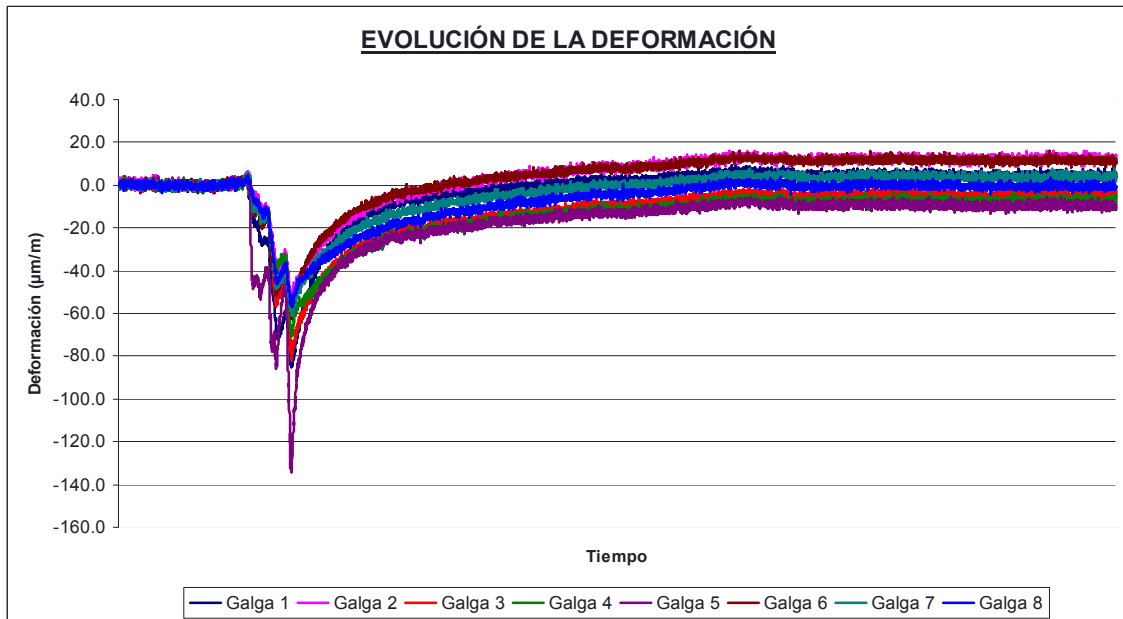


Fig. 4.2.46: Traslación de los registros con el objetivo de tomar como origen relativo para el procesamiento del ensayo, el instante en que los valores presentados por las galgas se estabilizan.

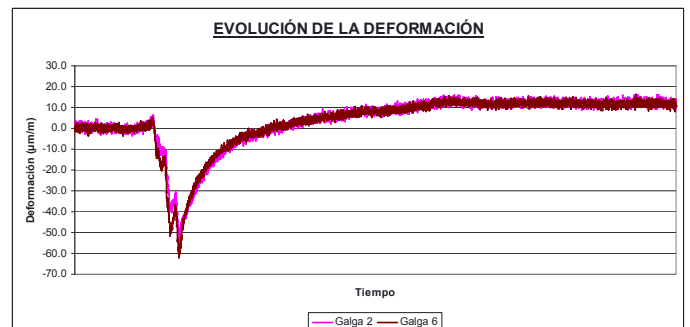
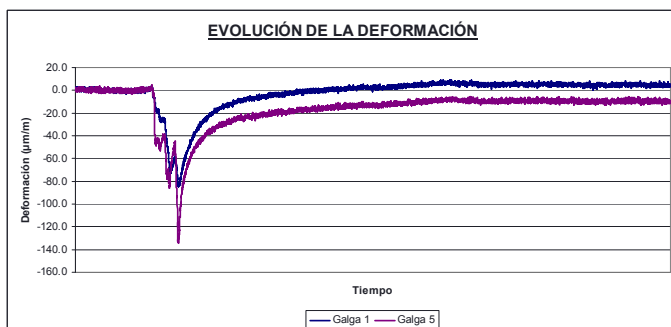


Fig. 4.2.47-4.2.48: Evolución de la deformación de las galgas en el tiempo, dos a dos (se representan conjuntamente las diametralmente opuestas).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

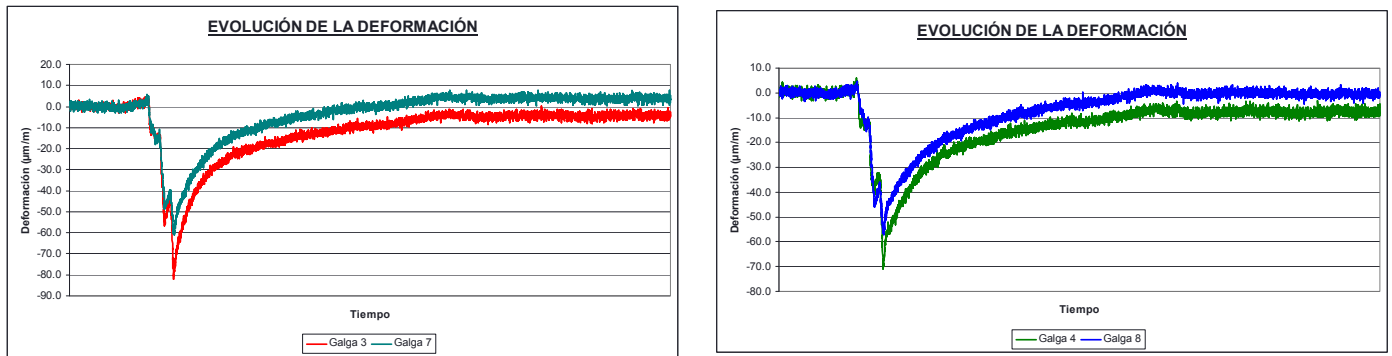


Fig. 4.2.49-4.2.50: Evolución de la deformación de las galgas en el tiempo, dos a dos (se representan conjuntamente las diametralmente opuestas).

Las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$ durante los últimos 30 minutos del ensayo. En vista de lo referido, se considera como incremento deformacional de las mismas, tras el taladrado, los valores de la siguiente Tabla 4.2.13:

Tabla 4.2.13: Incremento deformacional registrado por las galgas extensométricas, manteniendo constante la carga en coronación del muro, después del taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	5.0	12.2	-4.4	-7.8	-9.5	11.7	3.8	-0.3

Como ya se ha referido dado que las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$, el registro asociado a cada una de ellas se considera válido. En base a las deformaciones referidas y procediendo con la teoría de la elasticidad, para cada una de las ocho combinaciones de galgas extensométricas existentes, pueden obtenerse (Tabla 4.2.14) las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente, medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Tabla 4.2.14: Obtención, para cada una de las combinaciones de galgas, de las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente (β), medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Combinación	Canales	σ_{max} (N/mm^2)	σ_{min} (N/mm^2)	β ($^\circ$)	σ_{vert} (N/mm^2)
1	1, 3, 6	1.7	-1.83	-56	-0.73
2	2, 4, 7	0.9	-1.99	-85	-0.29
3	3, 5, 8	2.77	0.72	-55	2.10
4	4, 6, 1	0.98	-1.94	-9	-0.93
5	5, 7, 2	3.06	-1.64	-33	1.67
6	6, 8, 3	0.25	-3.11	60	-2.88
7	7, 1, 4	0.65	-2.85	44	-1.16
8	8, 2, 5	0.9	-3.87	34	0.73
$\sigma_{\text{vert, Promedio}}$ (N/mm^2)					-0.19
$\sigma_{\text{vert, Desvest}}$ (N/mm^2)					1.63
Coef. de variación					874.65%

Como puede comprobarse la **dispersión de los resultados obtenidos es intolerable** (teniendo en cuenta las 8 combinaciones de galgas, el coeficiente de variación es del 874.65%), por lo que **el valor tensional vertical promedio obtenido carece de rigor alguno**.

En la Tabla 4.2.15 se relaciona el nivel de tensión vertical promedio, su desviación típica y su coeficiente de variación en función de las combinaciones de galgas adoptado. Como puede apreciarse a medida que se discriminan las combinaciones, cuyo nivel tensional vertical se diferencia del valor promedio obtenido para cada conjunto de combinaciones una magnitud mayor que la desviación típica calculada para cada conjunto de éstas, el coeficiente de variación disminuye.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.2.15: Obtención, para diferentes combinaciones de galgas, de la tensión vertical promedio existente, la desviación típica y el coeficiente de variación relacionado.

Combinaciones	$\sigma_{vert, Promedio} (N/mm^2)$	$\sigma_{vert, Desvest} (N/mm^2)$	Coef. de variación
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8	-0.19	1.63	874.65%
1, 2, 4, 7 y 8	-0.48	0.75	156.77%
1, 2, 4 y 7	-0.78	0.37	47.52%
1 y 4	-0.83	0.14	17.04%

Para una consulta más detallada del ensayo, se remite al lector al registro de ensayo Lab0821 adjunto en el Anexo 6.

Por otra parte la tensión vertical media existente en el punto de ensayo es de **0.87 N/mm²** (compresión):

$$\sigma_{media} = \frac{51,095.9kp}{189.05 \cdot 31cm^2} = 8.72 \frac{kp}{cm^2} = 0.87 \frac{N}{mm^2} \text{ (compresión)}$$

En base a dicha Tabla 4.2.15, discriminando las combinaciones de galgas en base al criterio adoptado, para las n^{os} 1 y 4 se obtendría un nivel tensional vertical promedio de 0.83 MPa (compresión) con un coeficiente de variación del 17.04%.

La buena correspondencia obtenida entre el nivel tensional obtenido con las combinaciones n^{os} 1 y 4, y la tensión vertical promedio estimada, con apertura lineal de cargas, al nivel del ensayo HDM3, se considera, única y exclusivamente, fruto de la casualidad.

4.2.5.4 HDM4

En la Fig. 4.2.51 siguiente se muestra la localización del Hole Drilling denominado HDM4 dentro del conjunto del muro de fábrica.

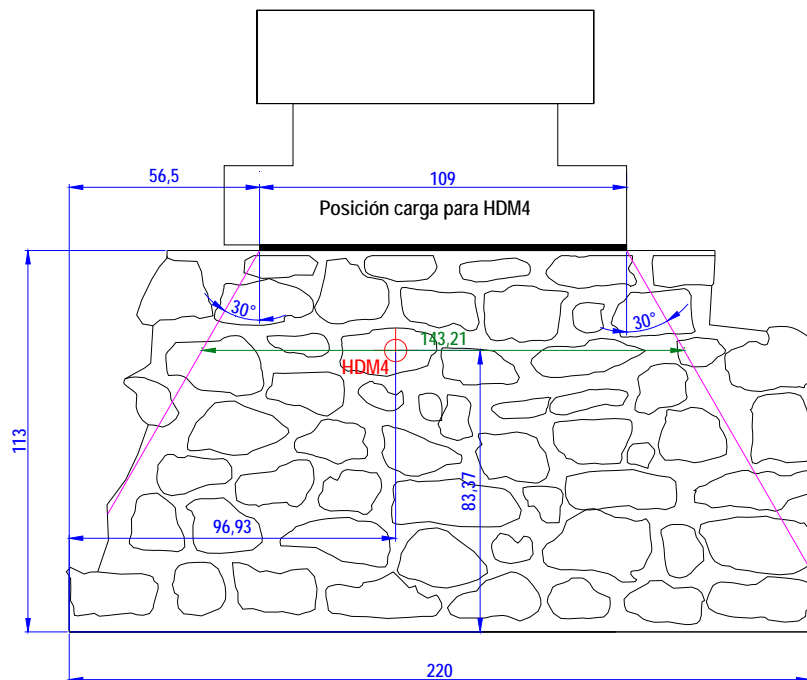


Fig. 4.2.51: Alzado del muro de mampostería con la localización del HDM4. El espesor del muro son 31 cm. Las cotas referidas son cm.

La carga final que operó a lo largo del ensayo se introdujo mediante cinco escalones respectivos de 11 t, 21 t, 31 t, 41 t y 51.4 t (Fig. 4.2.52).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido



Fig. 4.2.52: Introducción de la carga durante el ensayo. El nivel medio de carga vertical mantenido constante en la cabeza del muro fue de 51,359.5 kp.

En la Fig. 4.2.53 se presentan los registros de la evolución de la deformación de cada galga a lo largo del ensayo.

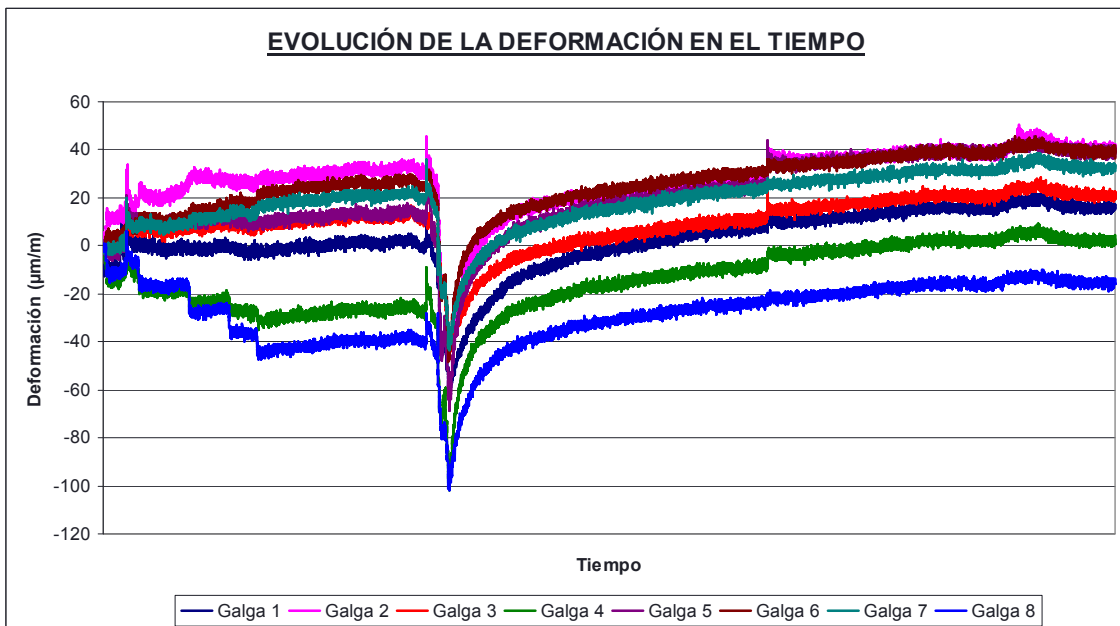


Fig. 4.2.53: Evolución registrada en la deformación de cada galga a lo largo del ensayo HDM4.

Bajo la carga referida mantenida constante, tomando como origen relativo los valores de la deformación, previamente al taladrado, una vez estabilizados (Tabla 4.2.16), la gráfica de evolución de la deformación con el tiempo toma el aspecto siguiente (Fig. 4.2.54):

Tabla 4.2.16: Deformación una vez estabilizada la carga previamente al taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	1.3	31.8	12.0	-26.5	13.3	26.3	20.9	-39.3

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

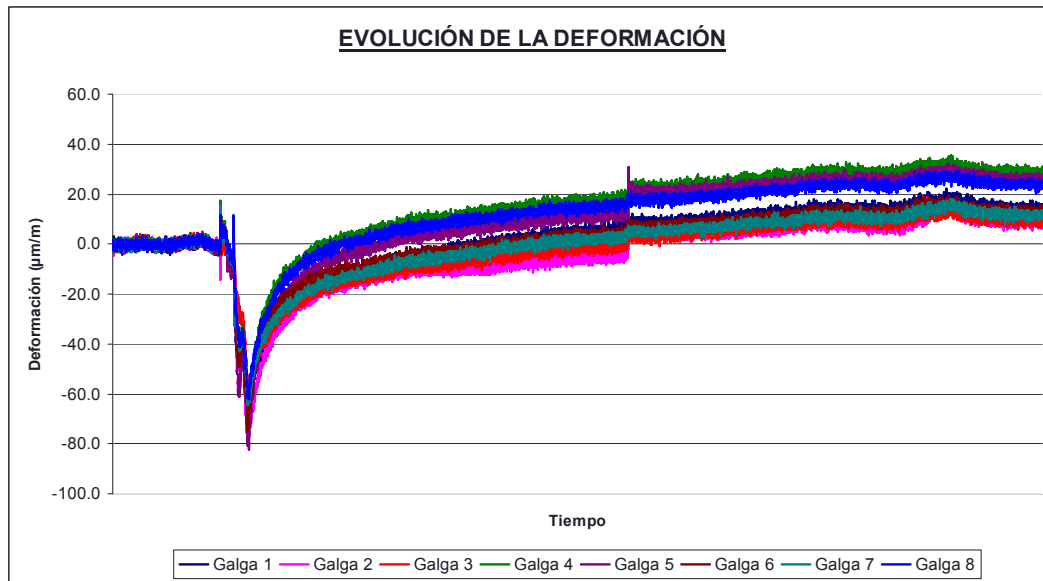


Fig. 4.2.54: Traslación de los registros con el objetivo de tomar como origen relativo para el procesado del ensayo, el instante en que los valores presentados por las galgas se estabilizan con anterioridad a la ejecución de la perforación.

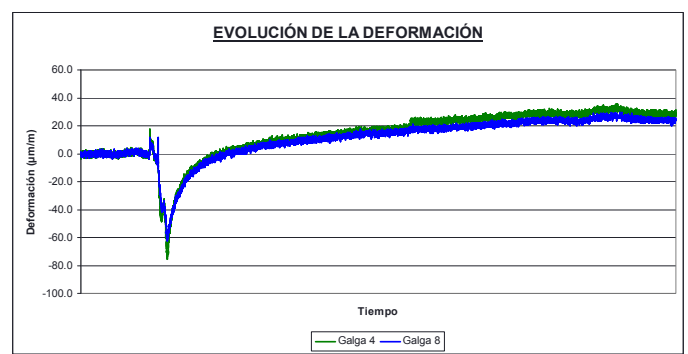
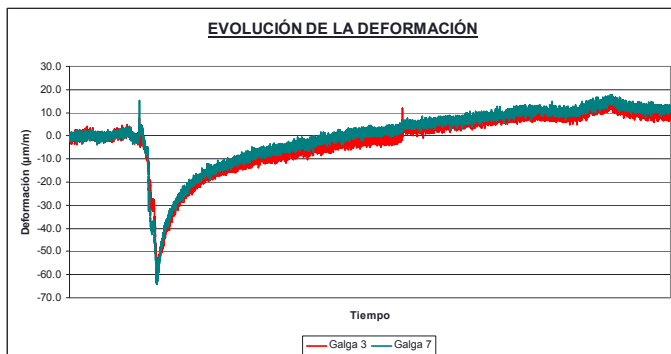
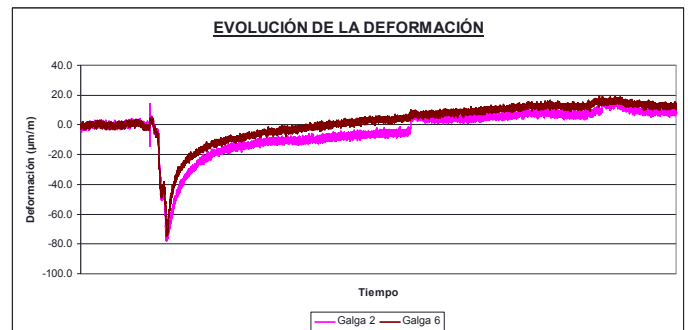
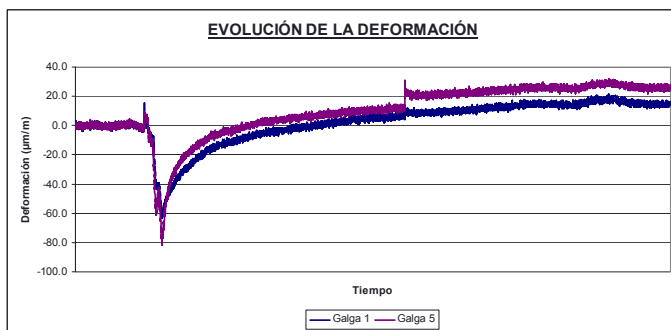


Fig. 4.2.55-4.2.58: Evolución de la deformación de las galgas en el tiempo, dos a dos (se representan conjuntamente las diametralmente opuestas).

Las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$ durante los últimos minutos del ensayo. En vista de lo referido, se considera como incremento deformacional de las galgas, tras el taladrado, los valores de la siguiente Tabla 4.2.17:

Tabla 4.2.17: Incremento deformacional registrado por las galgas extensométricas, manteniendo constante la carga en coronación del muro, después del taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	14.6	8.5	9.0	28.5	25.6	13.0	11.6	23.9

Como ya se ha referido dado que las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$, el registro asociado a cada una de ellas se considera válido. En base a las deformaciones

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

referidas y procediendo con la teoría de la elasticidad, para cada una de las ocho combinaciones de galgas extensométricas existentes, pueden obtenerse (Tabla 4.2.18) las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente, medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Tabla 4.2.18: Obtención, para cada una de las combinaciones de galgas, de las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente (β), medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Combinación	Canales	σ_{max} (N/mm ²)	σ_{min} (N/mm ²)	β (°)	σ_{vert} (N/mm ²)
1*	1, 3, 6	-1.46	-1.92	-79	-1.90
2	2, 4, 7	-1.71	-3.58	17	-3.17
3	3, 5, 8	-1.66	-3.29	-19	-3.12
4	4, 6, 1	-2.2	-3.73	71	-2.49
5	5, 7, 2	-1.71	-3.59	62	-3.18
6*	6, 8, 3	-1.8	-3.47	30	-3.36
7*	7, 1, 4	-0.67	-3.06	-42	-1.99
8	8, 2, 5	-1.39	-3.25	-65	-3.03
$\sigma_{vert, Promedio}$ (N/mm²)					-3.00
$\sigma_{vert, Desvest}$ (N/mm²)					0.29
Coef. de variación					9.68%

* Las combinaciones 1, 6 y 7 no se han tenido en cuenta desde un punto de vista estadístico (coeficiente de variación menor del 10%).

Desde un punto de vista estadístico (coeficiente de variación del orden del 10%) solo se han tenido en cuenta las combinaciones 2, 3, 4, 5, y 8. Para estas combinaciones la tensión vertical promedio estimada en el ensayo es de **3.00 N/mm² (compresión)**, presentando un coeficiente de variación del 9.68%. En la Tabla 4.2.19 adjunta se relaciona el nivel de tensión vertical promedio obtenido, su desviación típica y su coeficiente de variación en función de las combinaciones de galgas adoptado. Como puede apreciarse a medida que se discriminan las combinaciones, cuyo nivel tensional vertical se diferencie del valor promedio obtenido para cada conjunto de combinaciones una magnitud mayor que la desviación típica calculada para cada conjunto de éstas, el coeficiente de variación disminuye.

Tabla 4.2.19: Obtención, para diferentes combinaciones de galgas, de la tensión vertical promedio existente, la desviación típica y el coeficiente de variación relacionado.

Combinaciones	$\sigma_{vert, Promedio}$ (N/mm ²)	$\sigma_{vert, Desvest}$ (N/mm ²)	Coef. de variación
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8	-2.78	0.57	20.66%
2, 3, 4, 5 y 8	-3.00	0.29	9.68%

Para una consulta más detallada del ensayo, se remite al lector al registro de ensayo Lab0822 adjunto en el Anexo 6.

Por otra parte la tensión vertical media existente en el punto de ensayo es de **1.16 N/mm²** (compresión):

$$\sigma_{media} = \frac{51,359.5kp}{143.21 \cdot 31cm^2} = 11.57 \frac{kp}{cm^2} = 1.16 \frac{N}{mm^2} \text{ (compresión)}$$

4.2.6 Ensayos de Gato plano

En el muro de mampostería objeto de análisis fue desarrollada una campaña de gato plano. La finalidad de estos ensayos fue contrastar experimentalmente los niveles tensionales obtenidos con la técnica de gato plano simple, dado que el nivel tensional medio en la zona de ejecución del gato plano era conocido a priori, así como el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson obtenidos mediante el ensayo de gato plano doble, en tanto que previamente se habían valorado dichas características mecánicas mediante la disposición de transductores potenciométricos.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

No obstante, al igual que se realizó en los otros muros estudiados, también se pretendía ahondar en la afección de las constantes de carácter geométrico (k_a) que afectan a los resultados, en tanto que es uno de los factores de paso de presiones registradas en la bomba a niveles tensionales en servicio. En este sentido se llevó a cabo un registro pormenorizado tanto de la superficie de la roza, como del área neta de contacto del gato con la estructura muraria, de cara a tratar de discernir cuál es la implicación, de cada uno de estos factores geométricos, en los resultados obtenidos.

Para la ejecución de los ensayos se empleó un transductor de presión de 400 Ba (5 voltios) y dos gatos hidráulicos de 126.70 cm^2 de área cada uno. Debido a lo referido una señal de presión registrada de 1 voltio equivale a una carga de $20,272.0 \text{ kp}$. Igualmente, también hay que considerar que el peso muerto que representa la viga de reparto empleada en el ensayo es de 220 kp (Fig. 4.2.59) previamente a su colapso y de 488 kp tras el fallo de la coronación del muro.

En base a lo referido y teniendo en cuenta que para el ensayo GPMS0 la señal mantenida por el transductor de presión a lo largo del ensayo fue 1.30 voltios (Fig. 4.2.60) y para el GPMS1 fue de 2.5 voltios, las cargas introducidas en coronación del muro, y mantenidas a lo largo de cada ensayo de gato plano simple, fueron de $26,573.6 \text{ kp}$ y $51,168.0 \text{ kp}$, respectivamente.

Fig. 4.2.59: Puesta en carga del muro para la ejecución del ensayo de gato plano simple.

Fig. 4.2.60: Nivel de voltaje introducido en la cabeza del muro, equivalente a 26.5 toneladas.



4.2.6.1 Gato plano GPMS0 (simple)

En la Fig. 4.2.61 se esquematiza la distribución del gato plano simple ejecutado con fecha 28-04-08 en la mampostería caliza, así como las magnitudes necesarias para obtener el nivel tensional medio en el plano donde se ejecutó dicho ensayo, considerando un ángulo de apertura de cargas de 30° .

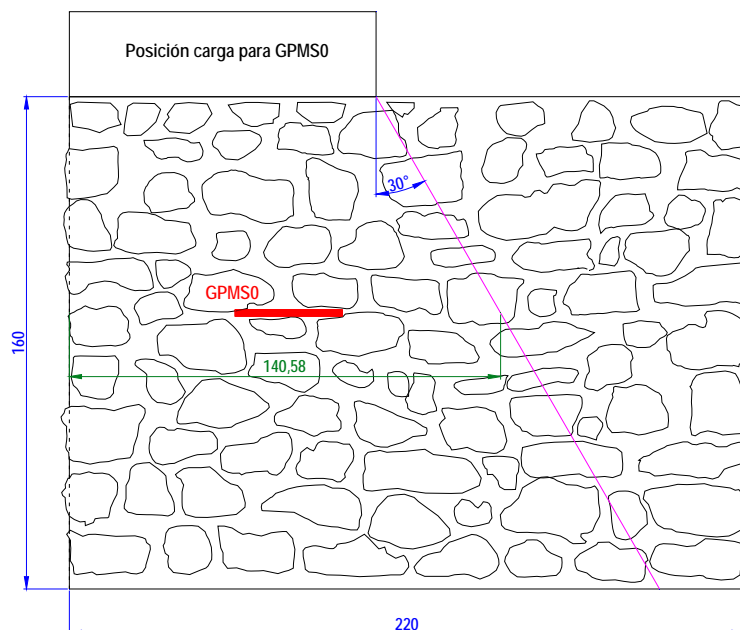


Fig. 4.2.61: Ubicación del ensayo de gato plano simple GPMS0 en el alzado del muro de mampostería. Las cotas relacionadas están en cm.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tras la preparación de la zona de ensayo (pegado de los puntos de control), se procedió a la ejecución del **ensayo de gato plano simple**, con la finalidad de obtener el nivel tensional vertical de compresión en servicio. Para ello, previamente fue necesario registrar la distancia existente entre los puntos de control antes del corte (Fig. 4.2.62). A continuación, se procedió a llevar a cabo una hendidura, mediante el empleo de una sierra de disco manual, para guiado previo de la sierra de disco orbital que proporcionará el corte definitivo para la posterior inserción del gato plano (Fig. 4.2.63). Como consecuencia del corte y de la carga vertical existente, se producirá una relajación del elemento estructural en la zona de ensayo.

Una vez introducido el gato se procederá a aumentar su presión interna mediante bombeo hidráulico hasta que la distancia medida inicialmente, antes de la ejecución de la roza, se recupere (Fig. 4.2.64). En ese momento, dicha presión interna ($P_{cancelación}$), corregida con unos coeficientes relacionados con la rigidez inherente del gato, K_m , y, según la literatura, con la relación de áreas existente entre el gato y la roza practicada, K_a , permitiría obtener el nivel tensional en servicio del elemento estructural analizado (σ).



Fig. 4.2.62: Medida de la distancia de control previamente al corte.

Fig. 4.2.63: Ejecución de la roza para insertar el gato plano simple.

Fig. 4.2.64: Proceso de presurización del gato plano y control de la evolución de las deformaciones experimentas por los puntos de control.

Durante la fase de presurizado del gato plano se produjo el colapso de parte de la coronación de la mampostería (Fig. 4.2.65-4.2.67). Circunstancia que arruinó el ensayo que se estaba desarrollando, precisando, además, el eliminar los mampuestos de la zona dañada y consolidar los restantes, mediante mortero bastardo de cal y cemento equivalente al empleado en su construcción (M-20b)



Fig. 4.2.65-4.2.67: Diferentes perspectivas del colapso local de la cabeza del muro de mampostería.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

El objetivo fue reparar el muro para tratar de calibrar la técnica de gatos planos en la porción de mampostería restante. Ello supuso un periodo de espera de 6 meses, hasta octubre de 2008, para favorecer, en lo posible, cierto endurecimiento del mortero empleado.

4.2.6.2 Gatos planos GPM1 (simple y doble)

En la Fig. 4.2.68 se esquematiza la distribución de los dos gatos planos dentro del muro de mampostería, así como las magnitudes necesarias para obtener el nivel tensional medio en cada uno de los planos donde se ejecutaron los gatos planos, considerando un ángulo de apertura de cargas de 30° .

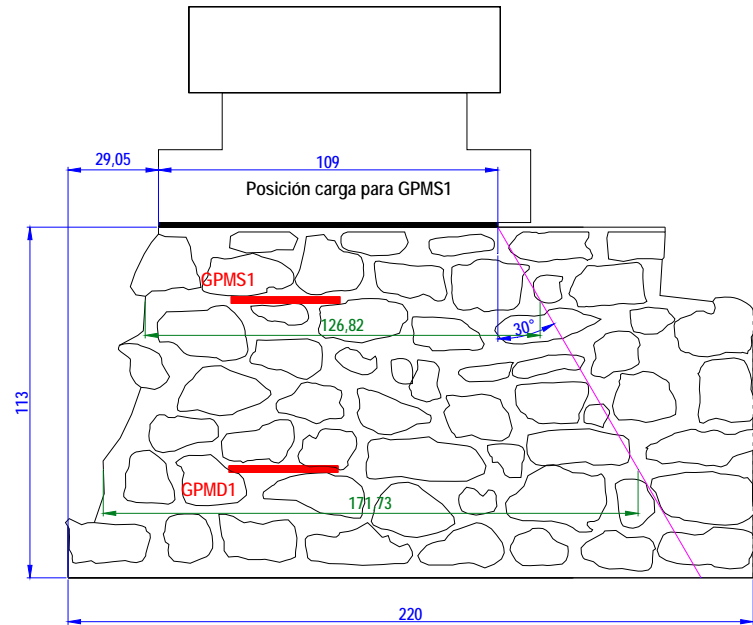


Fig. 4.2.68: Ubicación del ensayo de gato plano simple GPMS1 (el emplazado en la parte superior) y del de gato plano doble GPMD1 en el alzado del muro de mampostería. Las cotas relacionadas están en cm.

Tras la preparación de la zona de ensayo (pegado de los puntos de control, Fig. 4.2.69), se procedió a la ejecución del **ensayo de gato plano simple**, con la finalidad de obtener el nivel tensional vertical de compresión en servicio. Para ello, previamente fue necesario registrar la distancia existente entre los puntos de control antes del corte (Fig. 4.2.70). A continuación, se procedió a llevar a cabo una hendidura, mediante el empleo previo de una sierra de disco manual y, con posterioridad, de la sierra de disco orbital (Fig. 4.2.71). Como consecuencia del corte y de la carga vertical existente, se producirá una relajación del elemento estructural en la zona de ensayo.



Fig. 4.2.69: Instante tomado durante el pegado de los puntos de control.

Fig. 4.2.70: Medida de las distancias de control previamente al corte.

Fig. 4.2.71: Ejecución de la roza para insertar el gato plano simple.

Previamente a la inserción de los gatos planos en la roza, se trató de replantear la superficie de las mismas, de forma aproximada, mediante la medida de la profundidad de corte cada 5 cm. En

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

este sentido en la Fig. 4.2.72 se ilustra el área aproximada, en relación con el gato plano una vez insertado.

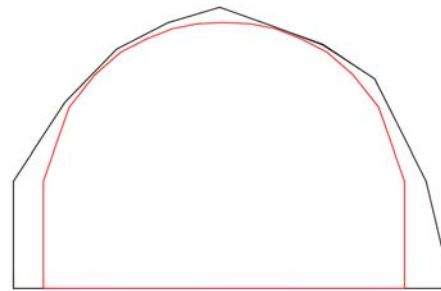


Fig. 4.2.72: Relación entre el área de la roza (890.50 cm²) y el área del gato plano del ensayo GPMS1 (778.56 cm²).

En base al área obtenida para la roza ejecutada y conociendo la geometría del gato plano empleado en el ensayo (Semioval 350x260x3.5mm), es posible obtener la relación geométrica ($K_{\text{gato-roza}}$) existente entre el área de la roza y la superficie del gato plano, en este caso alcanza un valor de 0.874.

Por su parte, en relación a la constante de calibración de los gatos planos, k_m , se ha adoptado un valor de 0.95 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

En las Fig. 4.2.73 y 4.2.74 se ha representado el área de ensayo con la finalidad de ubicar la posición de los puntos de control en el conjunto de la fábrica.



Fig. 4.2.73 y 4.2.74: Croquis del área de ensayo de gato plano simple realizado.

Una vez introducido el gato se procederá a aumentar su presión interna mediante bombeo hidráulico hasta que la distancia medida inicialmente, antes de la ejecución de la roza, se recupere (Fig. 4.2.75 y 4.2.76). En ese momento, el nivel tensional en servicio del elemento estructural analizado (σ), se obtendrá corrigiendo dicha presión interna ($P_{\text{cancelación}}$) con los coeficientes K_m y K_a ya referidos.



Fig. 4.2.75: Proceso de presurización del gato plano y control de la evolución de las deformaciones experimentas por los puntos de control.

Fig. 4.2.76: Detalle general del gato plano GPMS1 insertado en la mampostería.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Los resultados completos del ensayo se recogen en el registro Lab0823, el cuál se adjunta en el Anexo 8. No obstante, de dicho registro, se recoge a continuación la Fig. 4.2.77 que ilustra el nivel tensional en servicio existente en el elemento estructural caso de utilizar el coeficiente geométrico $K_{\text{gato-roza}}=0.874$. Igualmente en la Fig. 4.2.78 se representa para varios niveles de tensión proporcionados por el gato plano, la evolución de las deformaciones experimentadas por cada par de puntos de control.

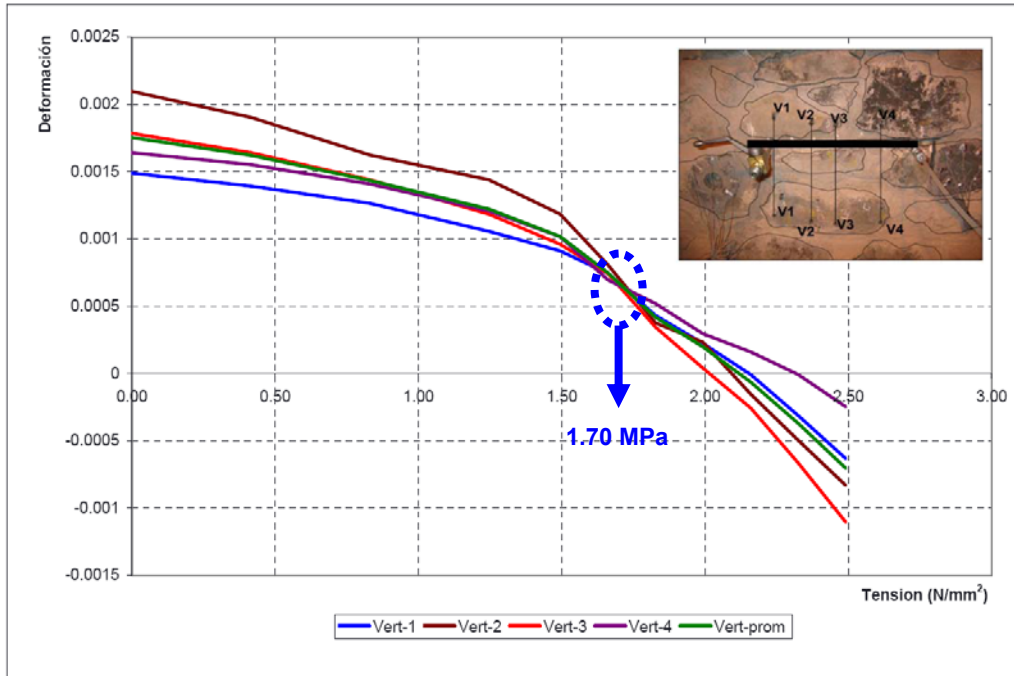


Fig. 4.2.77: Nivel tensional obtenido mediante el ensayo de gato plano simple, empleando como coeficiente corrector geométrico el que liga el área de la roza y el área del gato plano ($K_{\text{gato-roza}}$).

El nivel tensional, obtenido por interpolación lineal, para el cuál se recuperaron las distancias medidas previamente a la ejecución del corte fue de 2.12 MPa.

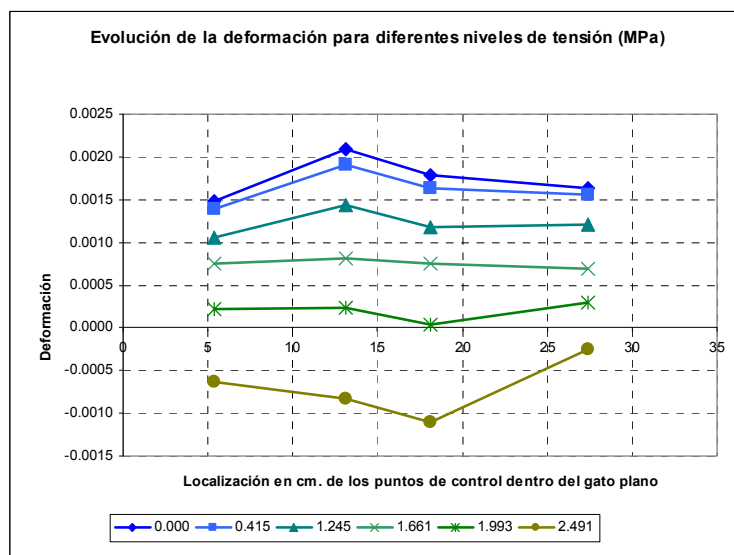


Fig. 4.2.78: Evolución de las deformaciones experimentadas por cada par de puntos de control, para varios niveles de tensión proporcionados por el gato plano.

Ahora bien, Ronca et al. (1997), en base a campañas experimentales en laboratorio (Ronca 1996 y 1996a) e in situ en la torre de Monza, justificaron la incidencia del desarrollo del fenómeno inelástico durante la ejecución de los gatos planos (se remite al lector al estado del arte, apartado 2.2.1.5). Si dicho efecto se evidencia concluyeron que puede obtenerse una buena convergencia al valor correcto de la presión de cancelación, p , mediante el punto común de intersección definido

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

por las curvas, asociado con el momento en el que se produce la recuperación de la deformación elástica componente de la deformación total. A dicho punto lo denominaron “punto de desplazamiento residual”.

En el caso presentado en la Fig. 4.2.77, se evidencia una clara convergencia de los cuatro puntos de control a un punto de intersección (el denominado punto de desplazamiento residual) que establece un **nivel tensional** del orden de **1.70 MPa**, por ello que, en base a los comentarios descritos en las referencias aludidas, se considera como el valor real de tensión existente en el muro de fábrica de mampostería caliza.

En lo que respecta al **ensayo de gato plano doble**, cuyo objetivo es obtener la ley σ - ϵ de la porción de fábrica movilizada en el ensayo, fue necesario, tras disponer los puntos de control pertinentes, ejecutar una segunda roza, paralela con la realizada para el ensayo de gato plano simple (Fig. 4.2.80 y 4.2.81), para lo cuál previamente se llevó a cabo una guía mediante una sierra de disco manual (Fig. 4.2.79).



Fig. 4.2.79: Ejecución, mediante sierra de disco, de una roza para guiado de la sierra orbital.

Fig. 4.2.80 y 4.2.81: Instantes captados durante la ejecución de la roza mediante la sierra orbital.

Previamente a la inserción de los gatos planos en la roza, se trató de replantear la superficie de las mismas, de forma aproximada, mediante la medida de la profundidad de corte cada 5 cm. En este sentido en la Fig. 4.2.82 se ilustra el área aproximada, en relación con el gato plano una vez insertado, para la roza superior, y en la Fig. 4.2.83 para el gato plano inferior.

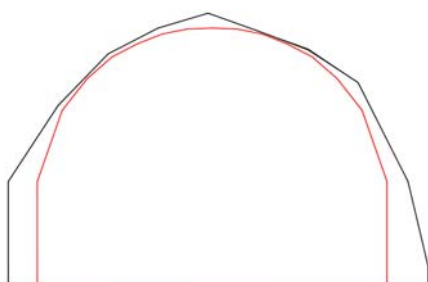


Fig. 4.2.82: Relación entre el área de la roza (890.50 cm^2) y el área del gato plano superior del ensayo GPMD1 (778.56 cm^2).

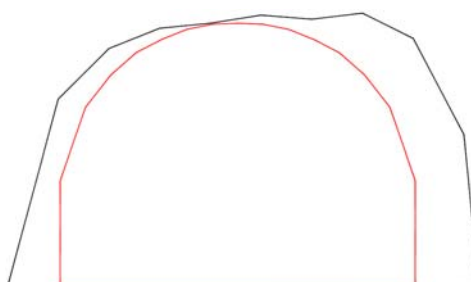


Fig. 4.2.83: Relación entre el área de la roza ($1,039.75 \text{ cm}^2$) y el área del gato plano inferior del ensayo GPMD1 (778.56 cm^2).



Fig. 4.2.84: Área de contacto entre el gato plano superior del ensayo GPMD1 y el muro (323.00 cm^2).

En la Fig. 4.2.84 se ha indicado el área de contacto entre el gato plano inferior y el muro de mampostería. Para ello en el instante de inserción de los gatos planos se dispuso entre dos láminas de papel otra de papel carbonoso (calco), con la finalidad de que en las láminas de papel

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

quedasen impresas, por acción del calco, los puntos en los que existía una presión efectiva entre el gato plano y el muro.

En base a las áreas obtenidas tanto para las rozas ejecutadas, como para el área efectiva de contacto, y conociendo la geometría de los gatos planos empleados en el ensayo (Semioval 350x260x3.5mm), es posible obtener diferentes relaciones geométricas (k_a). En la Tabla 4.2.20 se resumen los factores geométricos obtenidos.

Tabla 4.2.20: Factores geométricos, k_a , obtenidos para cada uno de los dos gatos planos involucrados en el ensayo GPMD1.

Factores geométricos, k_a , GPMD1			
		Áreas (cm ²)	Constantes derivadas
Gato plano superior (Fig. 4.2.82)	A_{roza}	890.50	$K_{gato-roza}$ 0.874
	A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$ -
	$A_{contacto}$	-	$K_{contacto-roza}$ -
Gato plano inferior (Fig. 4.2.83 y 4.2.84)	A_{roza}	1,039.75	$K_{gato-roza}$ 0.749
	A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$ 0.415
	$A_{contacto}$	323.00	$K_{contacto-roza}$ 0.311

A su vez, en la Tabla 4.2.21 se presentan los valores medios obtenidos para dichos factores geométricos.

Tabla 4.2.21: Valores medios obtenidos para los factores geométricos, k_a , involucrados en el ensayo GPMD1.

Factores geométricos, k_a , GPMD1	
$K_{gato-roza}$	0.812
$K_{contacto-gato}$	0.415
$K_{contacto-roza}$	0.311

Por su parte, en relación a la constante de calibración de los gatos planos, k_m , se ha adoptado un valor de 0.95 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

Una vez introducido el segundo gato, y tras el purgado del aire contenido en el interior del mismo hasta llenarlo de fluido hidráulico bombeado, se realizan ciclos de presurizado – despresurizado de los gatos (Fig. 4.2.85), registrando para cada nivel de presión el desplazamiento de los puntos verticales (Fig. 4.2.86) y horizontales (Fig. 4.2.87) y, por ende, obteniendo las deformaciones asociadas a cada ciclo. De esta manera se grafica la ley σ - ϵ para la porción de fábrica ensayada, de la cuál puede obtenerse el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.



Fig. 4.2.85: Instante captado durante uno de los ciclos de presurizado, concretamente a 10 bar de presión instalada en los gatos planos.

Fig. 4.2.86: Registro de la evolución de la deformación de los puntos de control vertical a lo largo del ensayo GPMD1.

Fig. 4.2.87: Registro de la evolución de la deformación de los puntos de control horizontal a lo largo del ensayo GPMD1.

En la Fig. 4.2.88 se presentan los resultados obtenidos para los cuatro puntos de control vertical y los dos horizontales tras la realización de 3 ciclos de carga y descarga, considerando como factor

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

geométrico el que relaciona el área del gato plano con el área de las rozas ejecutadas ($K_{\text{gato-roza}}$). El punto de control vertical n° 1 registró un comportamiento muy discordante del resto de puntos de control vertical, mostrando un comportamiento mucho más rígido, por ello que dicho punto n° 1 no se tuvo en cuenta en el procesado posterior de los datos.

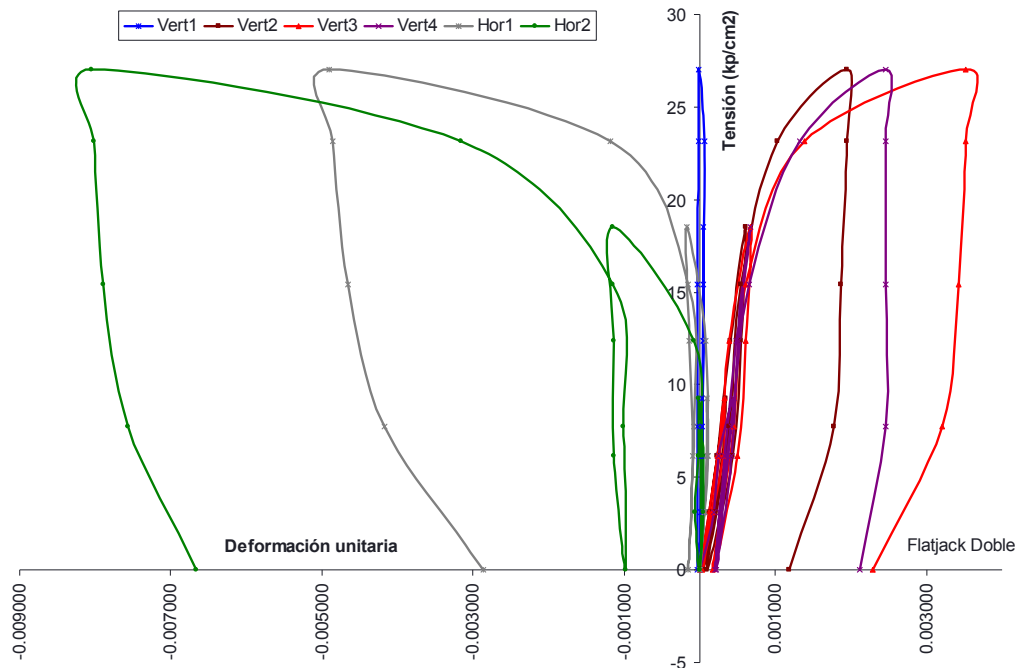


Fig. 4.2.88: Leyes σ - ϵ obtenidas para los cuatro puntos de control vertical (base de medida 200 mm) y para los dos puntos de control horizontal (base de medida 200 mm).

Finalmente, en la Fig. 4.2.89 se presentan las leyes tensión – deformación promedio, obtenidas en el área de ensayo tanto para los puntos de control verticales, a excepción del n° 1, como para los horizontales.

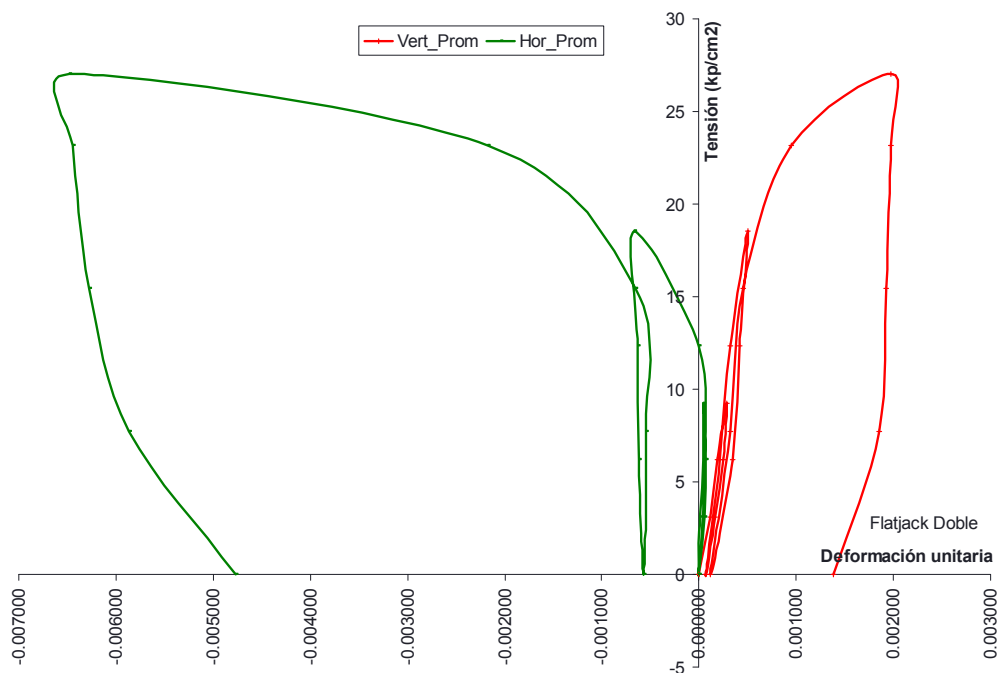


Fig. 4.2.89: Leyes σ - ϵ promedio obtenidas en el ensayo GPMD1.

A partir de las curvas anteriores puede comprobarse que las mismas presentan un comportamiento lineal hasta el entorno de los 1.20 MPa, por ello que dicha magnitud se relacione

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

con el límite elástico de la fábrica. Por su parte en la Fig. 4.2.90 se han representado los ciclos realizados así como los puntos máximos que definen la envolvente de los mismos, en la zona de comportamiento no lineal. A dichos puntos se ha ajustado una curva logarítmica en base a la cuál se ha estimado la tensión de rotura asociada a una deformación del 3‰ (Tassios 1988), obteniendo un valor de 3.12 MPa.

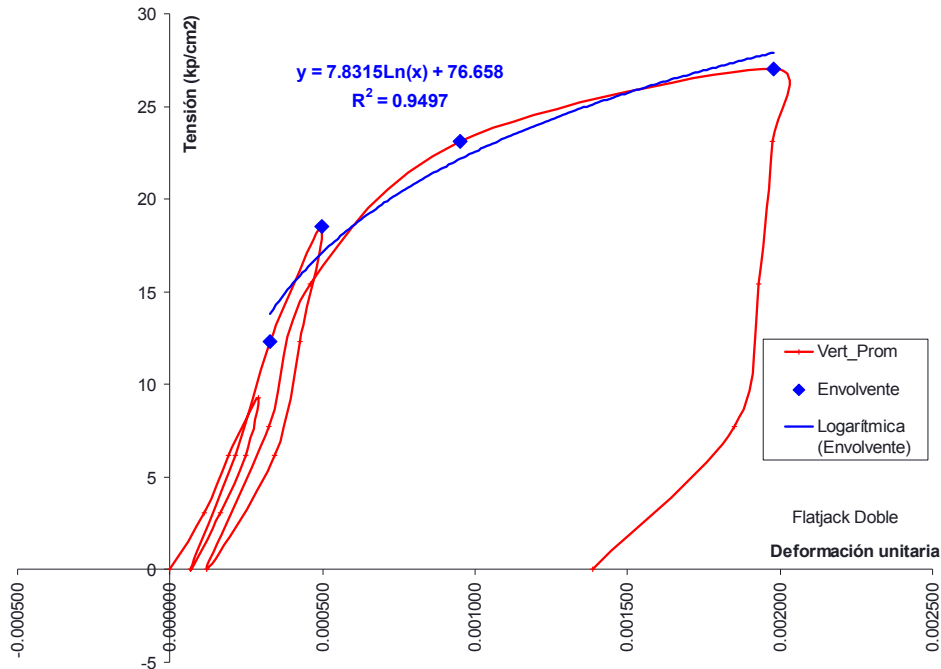


Fig. 4.2.90: Envolvente de rotura y ajuste logarítmico obtenido ($R^2 = 0.9497$)

Igualmente, a partir de las curvas obtenidas (Fig. 4.2.88 y 4.2.89) puede estimarse las características mecánicas, módulo de deformación y coeficiente de Poisson, para dicha mampostería caliza. Dichos parámetros mecánicos serán función de los factores k_a y k_m , en tanto que la tensión instalada depende de la presión interna movilizada en los gatos planos mediante el grupo de bombeo y de dichos factores de corrección.

En la Tabla 4.2.22 se presentan las características mecánicas obtenidas en cada uno de los tres ciclos realizados considerando como factor geométrico el que relaciona el área del gato plano con el área de las rozas ejecutadas ($K_{\text{gato-roza}}$). Cabe llamar la atención a que dichas características mecánicas se corresponden con las obtenidas para un intervalo de presiones $[p_1, p_2]$, por ello que el módulo de deformación obtenido sea un módulo secante.

Tabla 4.2.22: Características mecánicas, E y ν , obtenidas en el ensayo GPMD1 empleando como factor geométrico $k_a = K_{\text{gato-roza}}$.

Ciclo	p_1^* (kp/cm ²)	p_2^* (kp/cm ²)	E_{p1-p2} (kp/cm ²)				$E_{p1-p2_promedio}$ (kp/cm ²)	$\nu_{p1-p2_promedio}$
			Vert 1	Vert 2	Vert 3	Vert 4		
1	0	8	192,850	25,713	25,713	24,884	25,437	-
2	0	8	192,850	29,669	26,600	55,100	37,123	-0.02
3	0	10	192,850	26,785	26,785	37,087	30,219	-0.26
							30,926	-0.14

* p_1 y p_2 indican el intervalo de presiones para el cuál se ha obtenido el módulo de elasticidad secante (E_{p1-p2}) y el coeficiente de Poisson (ν_{p1-p2}).

De la misma forma podrían obtenerse las características mecánicas teniendo en cuenta los factores geométricos que relacionan el área del gato y el área efectiva de contacto entre el gato plano y el muro ($K_{\text{contacto-gato}}$), o el que relaciona las áreas de las rozas con dicha área de contacto

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

($K_{\text{contacto-roza}}$). Un resumen de las características mecánicas obtenidas en cada uno de los ciclos empleando los diferentes factores geométricos obtenidos se presentan en la Tabla 4.2.23.

Tabla 4.2.23: Características mecánicas, E y ν , obtenidas en el ensayo GPMD1 empleando los diferentes factores geométricos, k_a , calculados,

Ciclo	P_1 (kp/cm ²)	P_2 (kp/cm ²)	k_m	K_a		$E_{p1-p2_promedio}$ (kp/cm ²)	$\nu_{p1-p2_promedio}$
1	0	8	0.95	$K_{\text{gato-roza}}$	0.812	25,436.67	-
				$K_{\text{contacto-gato}}$	0.415	13,000.67	-
				$K_{\text{contacto-roza}}$	0.311	9,742.33	-
2	0	8	0.95	$K_{\text{gato-roza}}$	0.812	37,123.00	-0.02
				$K_{\text{contacto-gato}}$	0.415	18,973.00	-0.02
				$K_{\text{contacto-roza}}$	0.311	14,218.33	-0.02
3	0	10	0.95	$K_{\text{gato-roza}}$	0.812	30,219.00	-0.26
				$K_{\text{contacto-gato}}$	0.415	15,444.00	-0.26
				$K_{\text{contacto-roza}}$	0.311	11,574.00	-0.26

Como conclusión, aceptando el considerar como factor geométrico, k_a , el que relaciona el área del gato plano con el área de las rozas ejecutadas ($K_{\text{gato-roza}}$), dado que es el que propone la normativa de referencia, podría considerarse un módulo de elasticidad secante de 3,092.6 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.14.

Para una consulta más detallada del ensayo, se remite al lector al registro Lab0824, el cuál se adjunta en el Anexo 8.

En las Fig. 4.2.91-4.2.92 se ha representado el área de ensayo con la finalidad de ubicar la posición de los puntos de control en el conjunto de la fábrica.

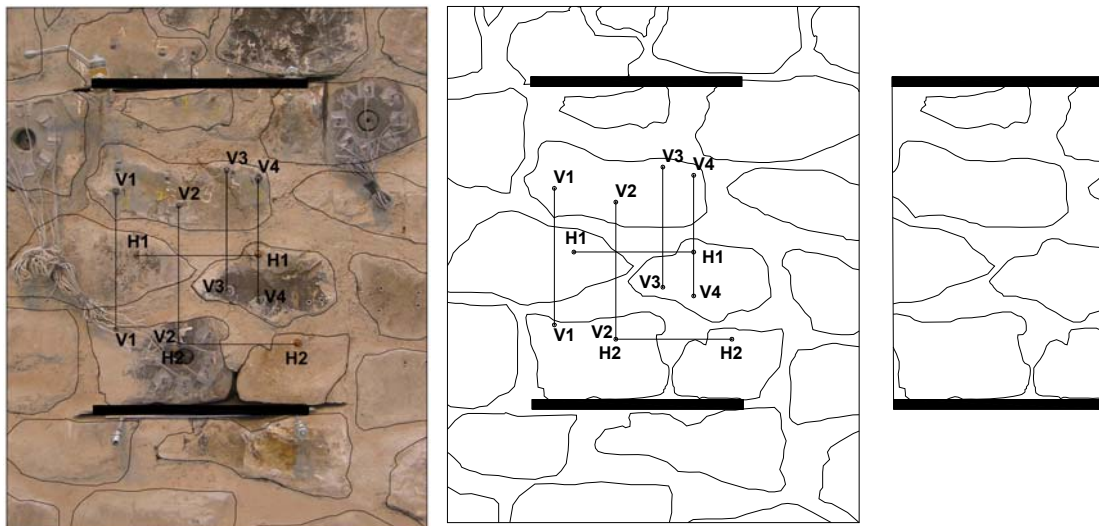


Fig. 4.2.91 y 4.2.92: Croquis del área de ensayo realizado.

Fig. 4.2.93: Detalle del área movilizada entre los dos gatos planos.

Por su parte en la Fig. 4.2.93 se ha individualizado el área rectangular definida por dos gatos planos y sendas verticales por sus extremos, con el objetivo de cuantificar, en superficie, la relación existente entre el área de mortero y el área de piedra movilizada. El fin perseguido es aportar un punto para la evaluación de la posible relación existente entre el módulo de deformación y la proporción de la fase pétreo y de la fase mortero, para el caso de una mampostería de caliza de resistencia media y mortero de cal. En este sentido en la Tabla 4.1.24 se presentan las áreas computadas y la relación referida.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.2.24: Área total, de piedras y de mortero calculadas a partir de la Fig. 4.2.93. Relación entre el área de mortero y el área de las piedras.

A_{total} (cm ²)	1,810.87
$A_{piedras}$ (cm ²)	1,194.81
$A_{mortero}$ (cm ²)	616.07
$A_{mortero}/A_{piedras}$	0.52
E (MPa)	3,092.6

4.2.7 Ensayos mini-presurométricos desarrollados en el muro de mampostería.

En el muro de mampostería fueron realizados un total de 3 ensayos mini-presurométricos, cuyo emplazamiento se ilustra en las Fig. 4.2.94 y 4.2.95. Puede comprobarse que se corresponden en posición debido a que en primer lugar fue realizado el ensayo denominado DILM1 durante el cuál a un nivel reducido de presión (en torno a los 10 Ba) se registró la rotura de la sonda, circunstancia que motivó, tras montar un nuevo dispositivo, la repetición del ensayo en la misma posición (DILM2), si bien se registró nuevamente la rotura de la sonda a un nivel de presión equivalente.

Tras el análisis de sendas roturas la causa fue achacada a que la goma que sufre la expansión bajo la acción de la presión interna, tiene una tensión de rotura en el umbral de los 8-10 Ba, por ello que si en alguna zona puntual de la sonda no se materializaría una correcta transmisión de la presión a las paredes de la perforación, por ejemplo a consecuencia de una coquera, se produciría la rotura de la misma.

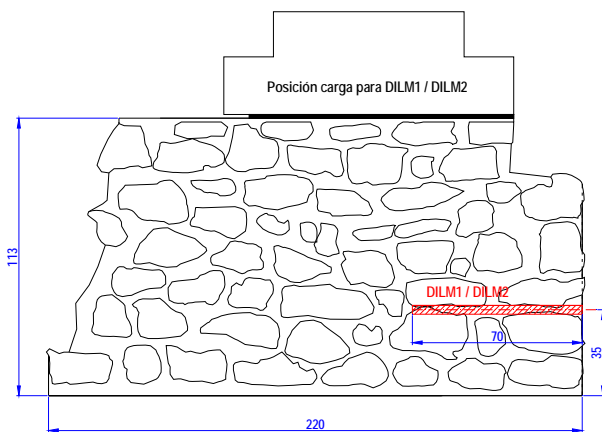


Fig. 4.2.94: Ubicación de la sonda presurométrica dentro del alzado del muro de mampostería (ensayos DILM1 y DILM2).

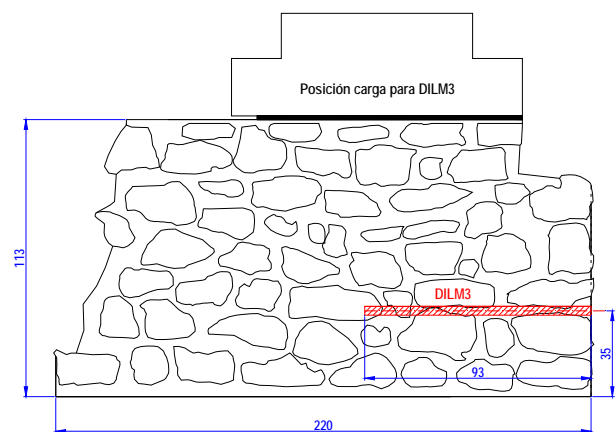


Fig. 4.2.95: Ubicación de la sonda presurométrica dentro del alzado del muro de mampostería (DILM3).

Debido a lo referido, se realizó una pausada inspección de la perforación mediante endoscopia (Fig. 4.2.96), localizándose a 40 cm de profundidad, respecto del borde de la perforación, una coquera de tamaño apreciable generada durante el proceso de construcción del muro, ya que dada la irregularidad de los mampuestos no se puede garantizar que el mortero de asentamiento rellene completamente todas las irregularidades existentes en los mismos. Debido a la existencia de dicha coquera, la cobertura de goma de la sonda sufriría dilataciones diferenciales apreciables, que desembocarían, una vez alcanzada la tensión última del material componente de la cobertura, en la rotura de la misma.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Fig. 4.2.96: Inspección de la perforación tras la realización del ensayo DILM2 mediante endoscopia. Se verificó la presencia de una coquera de tamaño apreciable que afectaba a la dilatación uniforme de la cobertura de goma.



Fig. 4.2.97: Profundización de la perforación hasta alcanzar los 93 cm de profundidad.



Por este motivo, se aumentó la profundidad de la perforación en 23 cm (Fig. 4.2.97), de forma que una vez introducida la sonda hasta el fondo de la misma, ésta no se viese afectada por el defecto referido con anterioridad (se recuerda que la longitud de la sonda es del orden de 400 mm, siendo su diámetro máximo de 34 mm). Seguidamente se volvió a inspeccionar la perforación y pese a que se localizaron defectos en la zona de ensayo, de menor entidad que el referido con anterioridad, se repitió el ensayo (DILM3).

En lo que sigue pasa a describirse cada uno de los tres ensayos realizados.

4.2.7.1 Mini-presurómetro DILM1.

Una vez ejecutada la perforación y montado el dispositivo de ensayo como se ha referido en el capítulo 3.4, “Materiales y procedimientos empleados en los ensayos con técnicas presurométricas”, se pasó a introducir la sonda (Fig. 4.2.98) y a realizar el ensayo, presurizándola de forma creciente y registrando el volumen inyectado en la misma (Fig. 4.2.99).



Fig. 4.2.98: Introducción de la sonda presurométrica en la perforación realizada (DILM1).

Fig. 4.2.99: Instante tomado durante la ejecución del ensayo presurométrico.

Fig. 4.2.100: Aspecto de la rotura producida en la sonda a un nivel de presión de 11 Ba.

En la Tabla 4.2.25 se relacionan los incrementos volumétricos obtenidos durante el ensayo para cada nivel de presión introducido. Igualmente, en la Fig. 4.2.103 se representa la curva de expansión obtenida tras 15”, 30” y 60” de introducir el nivel de presión correspondiente. Como ya se ha referido, a una presión de 11 Ba se produjo el reventón de la sonda (Fig. 4.2.100-4.2.102), anulando cualquier atisbo de resultado válido del ensayo (no esperado tampoco dada la reducida capacidad del equipo y la rigidez apreciable del muro).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.2.25: Incrementos volumétricos obtenidos en el ensayo presurométrico DILM1.

Presión (Ba)	Incrementos de volumen (cm ³)		
	15"	30"	60"
0	0	0	0
1	77.5	82	92
2	152.5	152.5	152.5
3	165	165	166
4	175	175	175
5	185	185	185
6	192.5	192.5	193
7	197.5	198	198
8	202.5	203	204
9	208	208	210
10	214	215	215
11	222	222	Revienta la Sonda

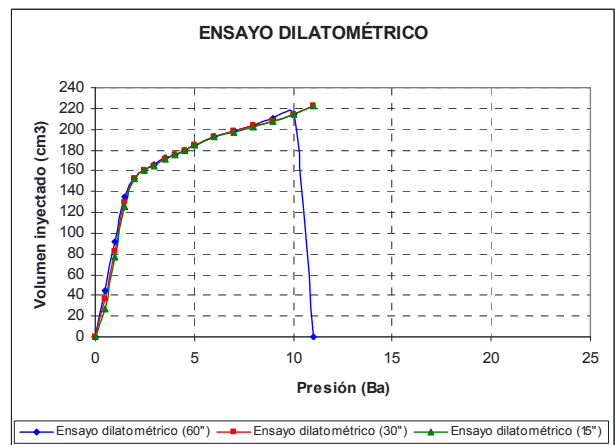


Fig. 4.2.101 y 4.2.102: Detalles de la rotura de la sonda.

Fig. 4.2.103: Curva de expansión de la sonda presurométrica empleada en el ensayo DILM1.

4.2.7.2 Mini-presurómetro DILM2.

Una vez ejecutada la perforación y montado el dispositivo de ensayo, se paso a introducir la sonda (Fig. 4.2.104) y a realizar el ensayo, presurizándola de forma creciente y registrando el volumen inyectado en la misma.

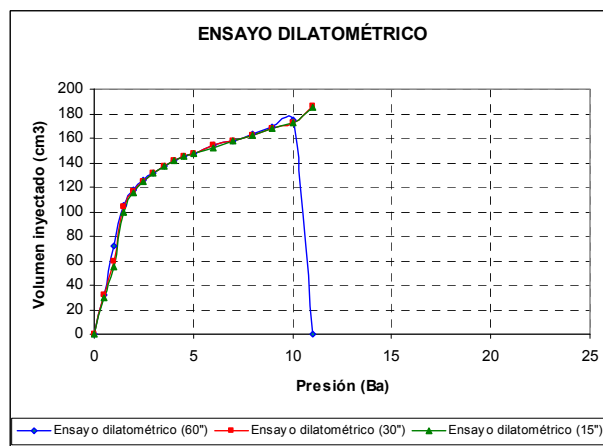


Fig. 4.2.104: Introducción de la sonda presurométrica en la perforación realizada (DILM2).

Fig. 4.2.105: Curva de expansión de la sonda presiométrica empleada en el ensayo DILM2.

Fig. 4.2.106: Aspecto de la rotura producida en la sonda a un nivel de presión de 11 Ba.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En la Fig. 4.2.105 se representan los incrementos volumétricos registrados durante el ensayo, a 15", 30" y 60" después de introducir cada nivel de presión. Como ya se ha referido, a una presión de 11 Ba se produjo, nuevamente, el reventón de la sonda (Fig. 4.2.106), invalidando cualquier posible resultado.

4.2.7.3 Mini-presurómetro DILM3.

En relación con este ensayo, en la Fig. 4.2.107 se representan los incrementos volumétricos registrados durante el ensayo, a 15", 30" y 60" después de introducir cada nivel de presión. Al igual que en los dos ensayos anteriores, se volvió a producir la rotura de la cobertura de goma de la sonda a una presión de 10 Ba (Fig. 4.2.108).

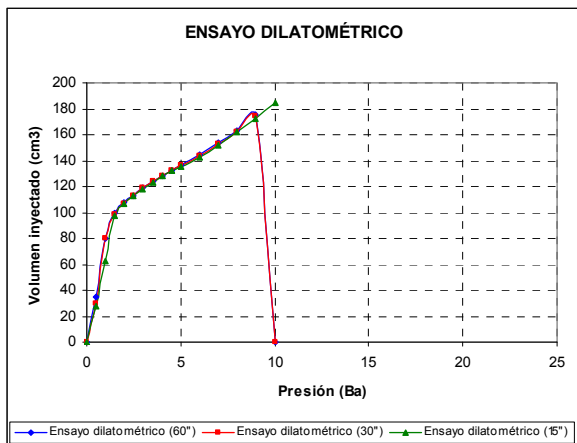


Fig. 4.2.107: Curva de expansión de la sonda presiométrica empleada en el ensayo DILM3.

Fig. 4.2.108: Aspecto de la rotura producida en la sonda a un nivel de presión de 10 Ba.

Como **conclusión** de la campaña experimental desarrollada con el minipresurómetro de 34 mm de diámetro sobre componentes de mampostería cabe argumentar:

- El campo de aplicación de esta técnica se relaciona con la posibilidad de caracterizar mecánicamente los rellenos internos, bastante deformables, de muros de varias hojas, dado que los paramentos externos pueden ser caracterizados mediante la técnica de gato plano doble. Por ello, puede resultar comprensible que debido a la reducida capacidad del dispositivo, su aplicación en elementos rígidos como los ensayos realizados sobre sillería, ladrillo o incluso en la presente mampostería, no conduzca a la plastificación del material, y por ende a la determinación de su rigidez.
- Ahora bien, en tanto que su aplicación potencial se centra en elementos lo suficientemente deformables como para poder plastificarlos, aplicándoles un nivel de presión inferior a los 24 Ba, y en concreto en rellenos internos de muros, la naturaleza inherente de los mismos se traduce en la existencia de un número importante de defectos internos, de dimensiones apreciables, dispersos en el volumen del muro. Debido a estos defectos y a la escasa resistencia a tracción de la goma de cobertura, y frente a cortadura de los elementos plásticos de conexión de ésta con la sonda, si no se garantiza una transmisión uniforme de la presión introducida a las paredes de la perforación se produciría la rotura del dispositivo. Por ello que, por una parte, en vista de la gran probabilidad que existe de intersectar un defecto a lo largo de la profundidad de la perforación en el material de relleno que se pretende caracterizar y, por otra, debido a la reducidas prestaciones resistentes de la sonda, **se considera que el dispositivo mini-presurométrico empleado en la realización de los ensayos no es adecuado para el fin que se le pretende, desaconsejando al lector su empleo**, dado que en una cantidad apreciable de los ensayos a realizar se producirán dilataciones diferenciales de la sonda en las proximidades de los defectos referidos, que desembocarán en la rotura sistemática de la goma de

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

cobertura del dispositivo, invalidando el ensayo, con la consecuente pérdida de tiempo, de dinero e insatisfacción personal.

4.2.8 Demolición controlada

Con la finalidad de obtener la mayor cantidad de datos posibles sobre la geometría de las rozas ejecutadas en los ensayos de gato plano GPM1, y de la perforación realizada a colación de los ensayos mini-presurométricos ejecutados, se realizó una demolición controlada del muro, tomando datos y fotografías a lo largo del proceso. En lo que sigue se exponen las anotaciones relacionadas con el muro de mampostería.

4.2.8.1 GPMD1

4.2.8.1.1 GPMD1-Superior

En las Fig. 4.2.109 y 4.2.110 se ilustra la posición relativa del gato con los mampuestos circundantes, ya en fase de demolición controlada. Los mampuestos componentes del muro de mampostería caliza fueron desmontándose paulatinamente, extremando el cuidado para no alterar la huella de la roza, ni la posición del gato plano GPMD1-Superior (correspondiente también al ensayo de gato plano GPM1-Simple) respecto de ésta. En este caso dado lo ajustado de la roza ejecutada respecto del espesor gato plano fue imposible introducir el papel carbonoso, ubicado entre dos láminas de papel, para obtener el área efectiva existente entre el muro y el gato plano.

Fig. 4.2.109: Detalle de la posición del gato plano GPMD1-Superior en fase de demolición de la mampostería.

Fig. 4.2.110: Detalle del gato plano GPMD1-Superior en el seno de la fábrica.



En las Fig. 4.2.111 y 4.2.112 se ilustra la posición relativa del gato plano respecto de la roza realizada.



Fig. 4.2.111: Detalle de la posición relativa del gato plano respecto de la roza. Pueden apreciarse los contornos con nitidez.

Fig. 4.2.112: Planta en la que puede comprobarse la posición relativa del gato plano respecto de la roza.

Por su parte, en la Fig. 4.2.113 se presenta nuevamente la posición relativa del gato plano GPMD1-Superior, respecto de la roza, mientras que en la Fig. 4.2.114 se ilustra una planta del área de ensayo una vez removido el gato plano.



Fig. 4.2.113: Posición relativa del gato plano GPMD1-Superior, respecto de la roza.

Fig. 4.2.114: Planta del área de ensayo una vez removido el gato plano

4.2.8.1.2 GPMD1-Inferior

En la Fig. 4.2.115 se ilustra la posición relativa del gato GPMD1-Inferior con los mampuestos circundantes, ya en una fase avanzada de la demolición controlada.



Fig. 4.2.115: Detalle de la posición del gato GPMD1-Inferior en una fase avanzada del proceso de demolición.

Fig. 4.2.116: Perspectiva de la posición relativa del gato plano GPMD1-Inferior en relación a dos mampuestos del muro.

Por su parte, la Fig. 4.2.116 refiere la posición del gato plano en relación a dos mampuestos existentes en la parte frontal del muro, con la consecuente deformación residual existente en el dispositivo hidráulico, la cuál se detalla, desde otra perspectiva, en la Fig. 4.2.117 una vez removidos los dos mampuestos relacionados. En dicha Fig. 4.2.117 también puede apreciarse la existencia de dos láminas de papel, entre las que se dispuso una lámina de papel carbonoso, introducidas junto con el gato plano por su cara inferior, con la finalidad de estimar el área efectiva de contacto entre el gato plano y el muro.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido



Fig. 4.2.117: Deformación residual existente en el gato plano GPMD1-Inferior tras la realización del ensayo.

Fig. 4.2.118: Detalle de la posición relativa del gato plano respecto de la roza.

En las Fig. 4.2.118-4.2.120 se ilustra la posición relativa del gato plano respecto de la roza realizada. A partir de la Fig. 4.2.119 pudo estimarse con relativa precisión el área de la roza.



Fig. 4.2.119: Detalle de la posición relativa del gato plano GPMD1-Inferior respecto de la roza. Pueden apreciarse los contornos con nitidez.

Fig. 4.2.120: Detalle del contorno de la roza (en azul) y de la posición del gato plano (en blanco).

Partiendo de la Fig. 4.2.121, en la que se ilustra la imagen obtenida, tras escanear el papel marcado por el calco, de los puntos en los que existía presión efectiva, pudo obtenerse el área de contacto entre el gato plano y el muro.

Finalmente, en la Fig. 4.2.122 se ha representado la relación gráfica existente entre el área de la roza ejecutada, el área del gato plano GPMD1-Inferior y el contacto de éste con el muro. Dichos valores de superficie han sido resumidos en la Tabla 4.2.26.

Tabla 4.2.26: Factores geométricos, k_a , obtenidos para el gato plano GPMD1-Inferior.

Factores geométricos, k_a, GPMD1-Inferior			
Áreas (cm ²)		Constantes derivadas	
A_{roza}	1,039.75	$K_{gato-roza}$	0.749
A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$	0.415
$A_{contacto}$	323.00	$K_{contacto-roza}$	0.311

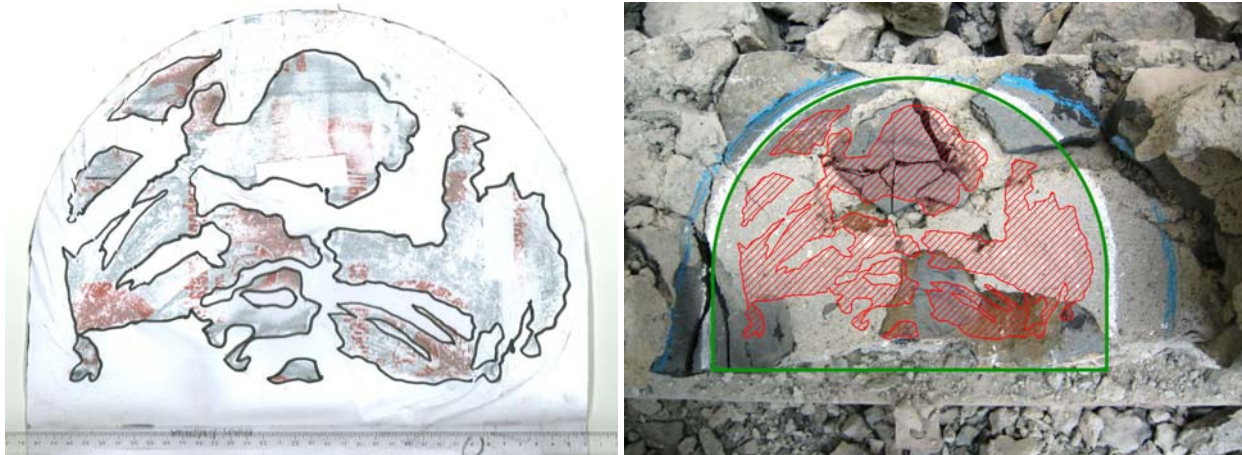


Fig. 4.2.121: Aspecto del área de contacto del gato GPDM1-Inferior tras escanear el marcado realizado manualmente con anterioridad.

Fig. 4.2.122: Replanteo del área de la roza ($1,039.75 \text{ cm}^2$), el área del gato plano GPS-A Inferior (778.56 cm^2) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (323.00 cm^2).

4.2.8.2 Ensayos mini-presurómetros DILM1-3.

En la Fig. 4.2.123 se presenta una perspectiva general de la localización de los mini-presurómetros. Por su parte en las Fig. 4.2.124-4.2.126 se ilustra la huella dejada por las perforaciones realizadas mediante corona hueca.



Fig. 4.2.123: Perspectiva general de la localización de los mini-presurómetros.

Fig. 4.2.124 y 4.2.125: Detalles de la huella dejada por las perforaciones realizadas en relación a los mini-presurómetros DILM1-3.

En dichas imágenes puede apreciarse como la perforación afecto tanto a mampuestos como al mortero de cal empleado para el asentamiento de los mismos.



Fig. 4.2.126: Montaje fotográfico en el que puede apreciarse una vista en planta de la localización de los ensayos mini-presurométricos realizados en el muro de mampostería.

4.2.9 Contraste de los resultados obtenidos en la mampostería caliza.

4.2.9.1 Bondad de los niveles tensionales obtenidos mediante la técnica hole drilling.

En la Tabla 4.2.27 se resumen los resultados obtenidos en los ensayos de hole drilling realizados en laboratorio sobre la mampostería de caliza.

Tabla 4.2.27: Resumen de los resultados obtenidos de los ensayos hole drilling realizados en laboratorio sobre la mampostería de caliza. Comparación de los niveles tensionales obtenidos experimentalmente con los estimados de forma teórica (Resultados de esta Tesis).

Ensayo	Código	Fecha	E (Mpa)	v	$\sigma_{\text{experimental}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{teórica, media } 30^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{teór, media } 30^\circ}$
HDM1	Lab0807	24/04/2008	33,218.20	0.26	-2.89	0.88	-3.28
HDM2	Lab0808	25/04/2008	36,589.43	0.32	1.39	0.92	1.51
HDM3	Lab0821	23/10/2008	67,180.20	0.34	0.19	0.87	0.22
HDM4	Lab0822	24/10/2008	36,589.43	0.32	3.00	1.16	2.59
						$(\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{est}})$ Promedio	0.26
						$(\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{est}})$ Desvest	2.55
						$(\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{est}})$ Coef. Var.	989.75%

Como puede apreciarse, la relación promedio entre la tensión experimental obtenida mediante los ensayos hole drilling realizados en el muro de mampostería y la estimada teóricamente, como valor medio en el plano horizontal de ejecución de los ensayos suponiendo un ángulo de apertura de cargas de 30° , es de 0.26, prestando un coeficiente de variación del 989.75% (desviación típica de 2.55). Por lo que puede concluirse que **el método hole drilling no se ha mostrado eficaz en lo referente a estimar las tensiones verticales de compresión en el muro ensayado en el laboratorio.**

Esta circunstancia se relaciona con que, debido a la geometría del mismo, las condiciones de contorno del muro tienen una fuerte influencia en los resultados, debido a que las deformaciones experimentadas por los mampuestos y, por ende, los estados tensionales movilizados, dependen mucho de las relaciones existentes entre éstos. Obviamente, esta dependencia depende de la rigidez del mortero de unión (y relleno), cuanto más deformable más impera el fenómeno referido, por lo que un mortero de cal tierno, sin carbonatar, redundará negativamente en las interacciones locales desarrolladas entre los mampuestos. Este aspecto genera que pese a que la carga introducida sea eminentemente vertical, no necesariamente las deformaciones registradas dentro

de un mampuesto deben de experimentar variaciones en dicha dirección (considerando los mecanismos de sólido rígido movilizados fruto de los contactos existentes entre las piedras).

En tanto que es la primera ocasión que en la comunidad científico-técnica internacional se aplica la técnica de hole drilling a una mampostería en laboratorio no se disponen de datos de contraste.

4.2.9.2 Bondad de los niveles tensionales obtenidos mediante gato plano simple.

Debido al colapso de la cabeza del muro de mampostería durante la ejecución del ensayo de gato plano simple GPM0, fue necesario eliminar los mampuestos de la zona dañada y consolidar los restantes. En consecuencia la geometría del componente estructural de mampostería quedó reducida por lo que únicamente fue realizado un ensayo de gato plano simple y otro de gato plano doble.

En relación con el ensayo de gato plano simple el nivel tensional, obtenido por interpolación lineal, para el cuál se recuperaron las distancias medidas previamente a la ejecución del corte fue de 2.12 MPa, si bien se comprobó el desarrollo de deformaciones inelásticas durante la ejecución del ensayo (Ronca et al. 1997; Ronca 1996 y 1996a) evidenciando una clara convergencia de la evolución de los cuatro puntos de control a un punto de intersección (el denominado punto de desplazamiento residual) que establece un nivel tensional del orden de 1.70 MPa. Dicho punto se asocia con el momento en el que se produce la recuperación de la deformación elástica componente de la deformación total.

En la Tabla 4.2.28 se refiere el nivel tensional experimental obtenido para la relación geométrica existente entre el área de la roza y el área del gato plano.

Tabla 4.2.28: Ensayo GPM1-Simple sobre mampostería de caliza: Relación entre el nivel tensional obtenido experimentalmente, empleando como coeficiente geométrico el que relaciona el área del gato con la de la roza ejecutada ($K_{\text{gato-roza}}$), y el estimado de forma teórica.

	K_m	K_a	$\sigma_{\text{experimental}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{teor, media } 30^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{exp}} / \sigma_{\text{teor, media } 30^\circ}$
$K_{\text{gato-roza}}^1$	0.95	0.874	1.70	1.30	1.31

La tensión vertical media de compresión, obtenida para un ángulo de apertura de carga de 30°, en el plano del gato plano es de 1.30 MPa (Fig. 4.2.68).

$$\sigma_{\text{media}} = \frac{51,168.0kp}{126.8231cm^2} = 13.01 \frac{kp}{cm^2} = 1.30 \frac{N}{mm^2} \text{ (compresión)}$$

En relación con la bondad de los resultados cabe referir que el error cometido está en torno al 30%.

A modo de contraste, en base a los ensayos de gato plano simple aplicados a fábricas de mampostería, consultados en el estado del arte de esta tesis doctoral y presentados en la Tabla 2.44, la relación entre la tensión medida experimentalmente y la estimada de forma teórica para fábricas de mampostería presenta una variabilidad significativa, tomando un valor de 1.16 ± 0.64 (Tabla 2.45). Por ello que la relación obtenida en el ensayo de calibración realizado en laboratorio se ajusta a los resultados encontrados en el estudio bibliográfico previo.

4.2.9.3 Bondad de las características mecánicas obtenidas mediante gato plano doble.

La bondad de los resultados se ha tratado de estimar de dos formas:

¹ Relación geométrica propuesta por la normativa.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

1. Mediante la comparación del módulo de elasticidad obtenido mediante gato plano doble y el obtenido mediante un ensayo a compresión al uso, empleando para el registro de desplazamientos transductores potenciométricos.
2. Comprobando que el módulo de elasticidad obtenido está dentro de los valores habituales obtenidos mediante otros ensayos de gato plano doble realizados en fábricas de mampostería.

En lo que atañe a la primera vía de comparación, en la Tabla 4.2.29 se presentan, en función del factor de corrección geométrico empleado, las características mecánicas estimadas. Se recuerda que el módulo de elasticidad teórico ($4,217.30 \text{ N/mm}^2$) fue obtenido en el apartado 4.2.4.

Tabla 4.2.29: Características mecánicas estimadas en el ensayo GPMD1 en función del factor de corrección geométrico empleado.

	K_a	K_m	ν_{exp}	$E_{exp} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$E_{teorico} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$E_{exp}/ E_{teorico}$
$K_{gato-roza}^2$	0.812	0.95	0.14	3,092.62	4,217.30	0.73
$K_{contacto-gato}$	0.415	0.95	0.14	1,580.59	4,217.30	0.37
$K_{contacto-roza}$	0.311	0.95	0.14	1,184.49	4,217.30	0.28

Puede comprobarse que el valor obtenido para el módulo de elasticidad empleando el coeficiente geométrico propuesto por la normativa (el que relaciona el área del gato plano con las áreas de las dos rozas ejecutadas) es el que presenta una mayor aproximación al módulo de deformación obtenido mediante transductores (valor a considerar con cautela ya se responde a una estimación local de la fábrica, distinta de la que se localizó el ensayo de gato plano doble). La relación encontrada es de 0.73, es decir se ha estimado a la baja el módulo de elasticidad en un 27%.

Por su parte, los valores obtenidos en el estudio bibliográfico para el módulo de elasticidad en otras fábricas de mampostería (Tabla 2.80), mediante ensayos de gato plano doble, oscila, habitualmente, entre 90-4,000 MPa.

En base a ambos comentarios, los parámetros mecánicos alcanzados empleando el coeficiente geométrico propuesto por la normativa, que relaciona el área del gato plano con el área de la roza ($K_{gato-roza}$), parecen razonables:

- Módulo de elasticidad secante de 3,092.62 MPa.
- Coeficiente de Poisson: 0.14.

Como resumen de los gatos planos realizados, puede sintetizarse la información obtenida experimentalmente en la Tabla 4.2.30.

Tabla 4.2.30: Resultados de los ensayos de gato plano realizados en un muro de mampostería caliza ensayado en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

Fecha	Código	$A_{mortero}/A_{piezas}$	$E_{sec, prom} \text{ (MPa)}$	ν_{prom}	$\sigma_{servicio} \text{ (MPa)}$	$\sigma_{Limite\ elástico} \text{ (MPa)}$	$\sigma_{rotura} \text{ (MPa)}$	E/σ_k^3
27-10-08	GPMS1	-	-	-	1.70	-	-	-
28-10-08	GPMD1	0.52	3,092.6	0.14	-	1.20	3.12	1,416.02

Conviene referir que el valor estimado para la tensión de rotura de la mampostería, obtenido ajustando una regresión logarítmica a la parte de comportamiento no lineal de la envolvente obtenida en el ensayo de gato plano doble, alcanza un valor de 3.12 MPa para una deformación en rotura del 3‰.

² Relación geométrica propuesta por la normativa.

³ De acuerdo con las recomendaciones del CEN, Eurocode 8, Part 1-4, el valor de σ_k (valor característico) debe ser obtenido multiplicando el valor medio, σ_{rotura} , por un factor de 0.7.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

A modo de contraste, si consideramos una resistencia a compresión media para la roca caliza, f_b , de 74.93 MPa (Anexo 7) y una resistencia a compresión media para el mortero bastardo de cal y cemento, f_m , de 4.73 MPa (Anexo 2), en base a relaciones existentes en la bibliografía, puede obtenerse una resistencia a compresión promedio para la fábrica de 4.08 MPa (Tabla 4.2.31). Puede apreciarse la importante dispersión (coeficiente de variación del 69.4%) obtenida para la resistencia a compresión de la fábrica estimada en base a las referencias consultadas.

Tabla 4.2.31: Resistencia a compresión de la fábrica de mampostería en base a referencias de otros autores.

Referencia		f (MPa)
UIC (Martínez et al. 2001) Mampostería no concertada o relleno de cascote	$f = 0.5 \cdot \left(f_m + \frac{a \cdot f_b - f_m}{1 + \frac{b \cdot \alpha}{2} \cdot 0.5 \cdot \frac{f_b}{f_m}} \right)$ $\alpha = \frac{h_m}{h_b} = \frac{3.91}{10.84} = 0.36; a = 0.1; b = 0.4$	2.93
PIET 70	$f_b \approx 75$ MPa; concertada con mortero mínimo M-5	2.00 (f_k)
BS 5628: Part 1:1978	-	7.30 (f_k)
		4.08 ± 2.83 MPa

En vista de lo referido, a juicio del autor, el valor estimado experimentalmente de 3.12 MPa parece un umbral razonable para la tensión de rotura.

Por su parte la relación entre el módulo de deformación secante obtenido mediante gato plano doble y la tensión característica en rotura estimada, σ_k , toma un valor de 1,416.02. Esta cifra está dentro del intervalo de relaciones encontradas en el estudio bibliográfico (Tabla 2.77) para mamposterías, cuya relación varía entre 170-3,620.

4.2.9.4 Bondad de los ensayos mini-presurométricos desarrollados en el muro de mampostería.

En relación con la campaña experimental desarrollada con el minipresurómetro de 34 mm de diámetro máximo sobre componentes de mampostería cabe argumentar que dado que el campo de aplicación de esta técnica se relaciona con la posibilidad de caracterizar mecánicamente los rellenos internos de muros de varias hojas, dado que los paramentos externos más rígidos pueden ser caracterizados mediante la técnica de gatos planos; y teniendo en cuenta que la naturaleza inherente de los rellenos de las mamposterías se traduce en la existencia de un número importante de defectos internos, de dimensiones apreciables, dispersos en el volumen del muro; debido a estos defectos y a la escasa resistencia a tracción de la goma de cobertura de la sonda, y frente a cortadura de los elementos plásticos de conexión de ésta con la sonda, si no se garantiza una transmisión uniforme de la presión introducida a las paredes de la perforación se produciría la rotura del dispositivo.

Por ello que, por una parte, en vista de la gran probabilidad que existe de intersectar un defecto a lo largo de la profundidad de la perforación en el material de relleno que se pretende caracterizar y, por otra, debido a la reducidas prestaciones resistentes de la sonda, se considera que el dispositivo mini-presurométrico empleado en la realización de los ensayos no es adecuado para el fin que se le pretende, desaconsejando al lector su empleo, en tanto que en una cantidad apreciable de ensayos se producirá la rotura de la envolvente de goma no conduciendo a ningún resultado válido.

4.3 Campaña experimental sobre componentes de ladrillo.

4.3.1 Construcción del muro de ladrillo.

Con fecha 9 de agosto de 2007 fue construido en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria un muro de ladrillo con la siguiente geometría (Fig. 4.3.1):

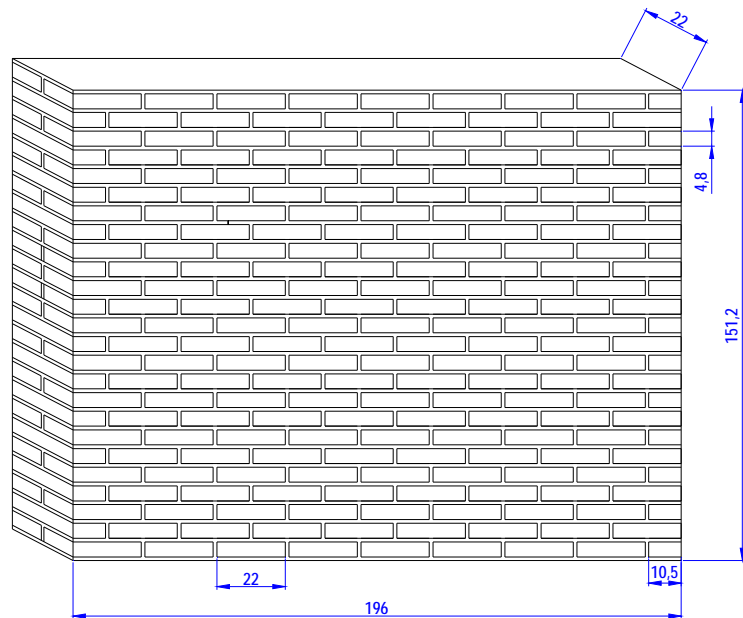


Fig. 4.3.1: Geometría del muro de ladrillo construido en laboratorio (cotas en cm.)

Cotas en cm.

Para su confección se emplearon ladrillos cerámicos cara vista y mortero bastardo tipo M-80a 1:4 (cemento:arena, proporciones en volumen), según la NBE-FL 90. En la Fig. 4.3.2 se ilustra un instante tomado durante la ejecución del componente estructural. Por su parte en la Fig. 4.3.3 se presenta una perspectiva general del muro una vez finalizado.



Fig. 4.3.2: Instante tomado durante la construcción del muro de fábrica de ladrillo.

Fig. 4.3.3: Perspectiva general del muro de ladrillo una vez finalizado.

Los ladrillos presentaban unas dimensiones de 220 x 105 x 48 mm (soga x tizón x grueso) según UNE 67019, y el fabricante garantizaba una resistencia a compresión de 50 N/mm². Para una consulta más detallada de las características de los mismos, se remite al lector al Anexo 9: “Ladrillos cerámicos cara vista (Tejerías “La Covadonga”) empleados e la construcción del muro de ladrillo”.

En lo que respecta al mortero (Anexo 2) se elaboraron muestras prismáticas (Fig 4.3.4 y 4.3.5) de dimensiones 160 x 40 x 40 (largo x ancho x alto), en base a las cuáles se estimo una carga de

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

rotura a flexión promedio de 470 kp con un coeficiente de variación del 15.63%, y una resistencia a compresión promedio de 13.6 N/mm² con un coeficiente de variación de 13.68%. Dichos ensayos fueron realizados el día 29-05-08 sobre probetas elaboradas el 9-08-07.

El espesor aproximado de los tendeles de mortero fue de 12 mm.



Fig. 4.3.4 y 4.3.5: Instantes tomados durante la ejecución de probetas prismáticas (160 x 40 x 40 mm) de mortero M-80a.

4.3.2 Transporte del muro de ladrillo.

En relación con facilitar el adecuado transporte del muro bajo el pórtico de carga (Fig. 4.3.6), y con la finalidad de no causarle ningún tipo de sollicitación que podría desembocar en el debilitamiento estructural o colapso del elemento constructivo, se ideó un dispositivo de transporte denominado “maleta” (Fig. 4.3.6-a) constituido por dos perfiles UPN, uno inferior con 5 planos de rigidizadores de cara a evitar su abollamiento durante los procesos posteriores de carga, sobre el que se construye el muro en si mismo, y otro superior a modo de capucha.

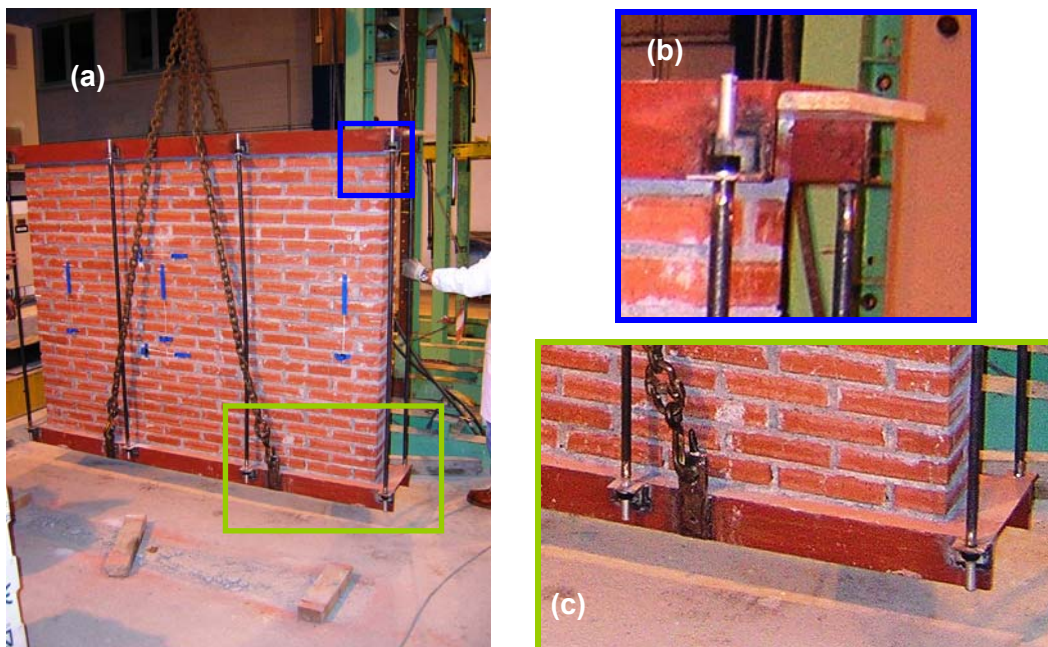


Fig. 4.3.6: Detalles del sistema empleado para transportar el muro bajo el pórtico de carga.

Dichos perfiles UPN contaban con un total de cuatro dispositivos, dos por cada lado (Fig. 4.3.6-c), que permitían realizar el izado y movimiento del muro. Por su parte también se diseñaron 8 puntos para el anclaje de otras tantas barras verticales (Fig. 4.3.6-b y Fig. 4.3.7), roscadas, las cuáles se pretensaban para motivar una leve compresión en el muro y evitar la aparición de tracciones durante el transporte del mismo que podría desembocar daño.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Finalmente, en la Fig. 4.3.8 se ilustra el muro una vez dispuesto bajo el pórtico de carga.



Fig. 4.3.7: Detalle de parte de las barras para introducir un leve pretensado en le muro con la finalidad de generarle daño durante el transporte.

Fig. 4.3.8: Perspectiva del muro una vez ubicado bajo el pórtico de carga.

4.3.3 Determinación del ángulo de apertura de cargas en el muro de ladrillo.

Dada la extensión del muro realizado y teniendo en cuenta que el elemento de reparto de cargas que se disponía era de 1 metro de longitud, fue necesario obtener el ángulo de apertura de cargas en el seno del muro.

Con esta finalidad se dispusieron un total de 5 galgas extensométricas en la forma que indican las Fig. 4.3.9 y 4.3.10 para registrar las deformaciones captadas por cada una de ellas durante un proceso de carga.

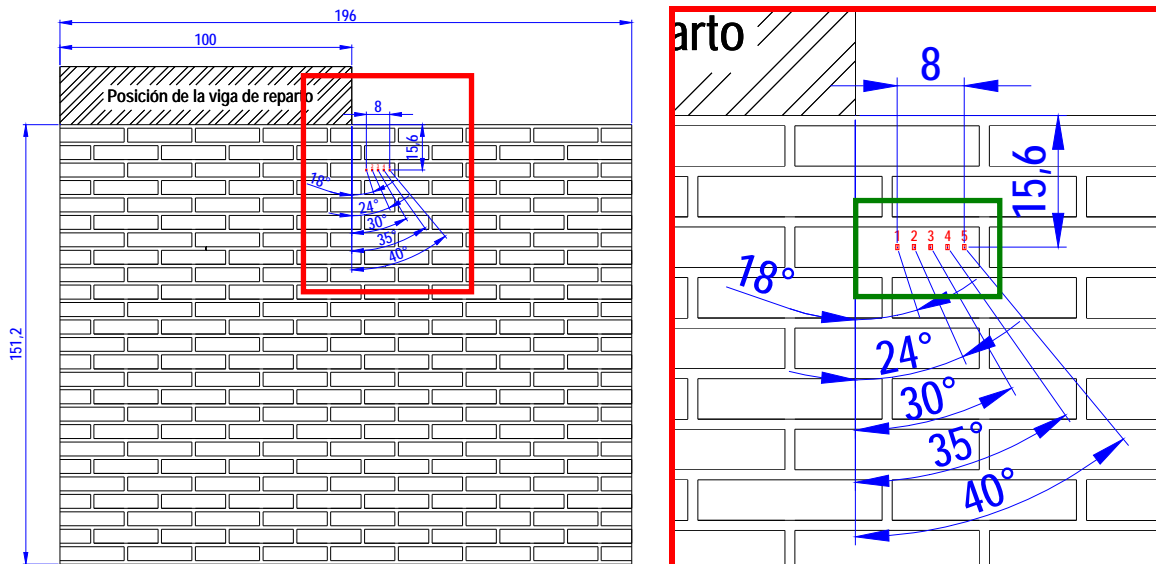


Fig. 4.3.9 y 4.3.10: Detalles de la localización de las galgas extensométricas en el seno del muro de ladrillo.

Como puede comprobarse (Fig. 4.3.11 y 4.3.12) dichas bandas extensométricas se dispusieron a 15.6 cm de la coronación del muro, cada dos centímetros, de forma que el centro de la galga central, denominada 3, definiría con el punto extremo de la viga de reparto de la carga un ángulo de 30°.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

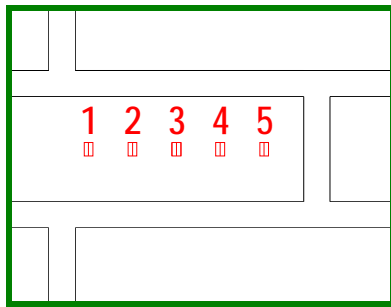


Fig. 4.3.11 y 4.3.12: Detalle de la numeración de dichas galgas en el proceso de toma de datos y fotografía ilustrativa de la ubicación de las mismas.

Con la viga de reparto en la posición indicada se realizó un proceso de carga hasta un total de 62 toneladas (Fig. 4.3.13), en cuatro escalones: 14 t, 30 t, 46 t y 62 t.

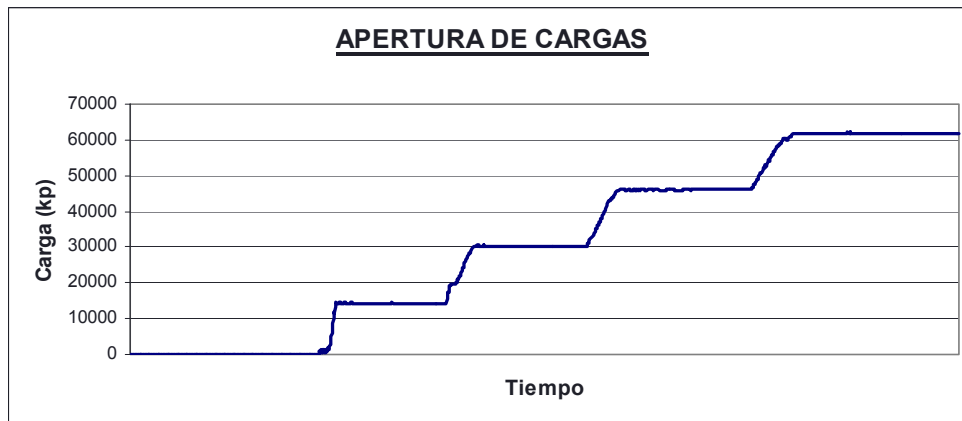


Fig. 4.3.13: Evolución de la carga introducida a lo largo del tiempo. Se realizó un proceso de carga hasta un total aproximado de 62 toneladas, en cuatro escalones: 14 t, 30 t, 46 t y 62 t.

Mientras se realizó el proceso descrito se registró la evolución de las deformaciones en los cinco puntos de control (Fig. 4.3.14). Puede comprobarse como las deformaciones registradas por las cinco galgas presentan una tendencia similar, apenas registrando deformación. Por tanto la carga apenas afectaría a dichos puntos de control.

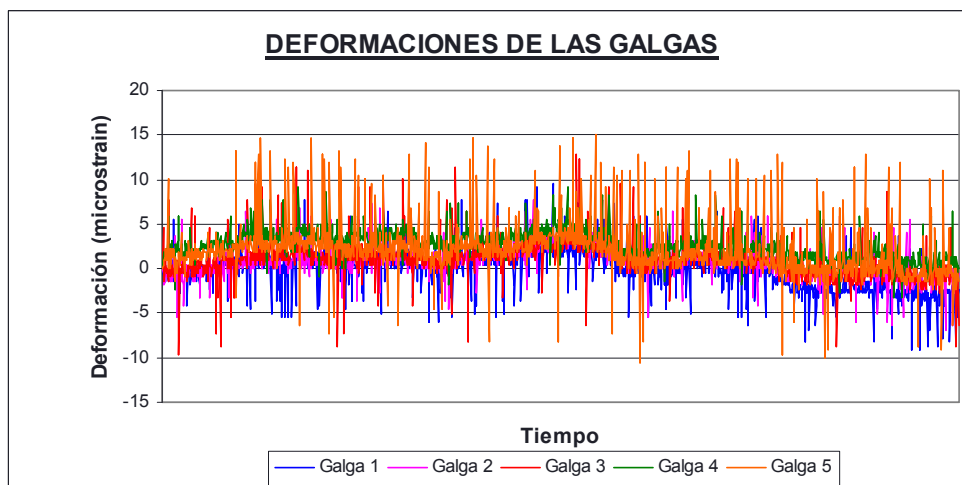


Fig. 4.3.14: Evolución de las deformaciones registradas por las galgas a lo largo del tiempo. Apenas se registró deformación.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tratando de obtener algo más de información del ensayo realizado, en la Tabla 4.3.1 siguiente se muestra para cada uno de los ciclos de carga motivados, el valor promedio de la deformación en cada uno de dichos escalones.

Tabla 4.3.1: Valor promedio de la deformación registrada por cada galga en cada escalón de carga

Ciclo	Carga (kp)	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5
1	220.0*	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	14289.2	0.2	0.5	0.3	0.2	-0.3
3	30176.1	1.5	2.1	1.3	1.0	0.9
4	46004.1	-0.2	0.6	0.1	-0.5	-0.6
5	61806.9	-3.0	-1.4	-1.8	-2.0	-2.3

* Representa el peso propio de los dispositivos de carga y de reparto de la misma en el muro.

En la Fig. 4.3.15 se ha representado para cada una de las galgas, el valor promedio de la deformación para cada nivel de carga. Puede apreciarse como la tendencia de todas las galgas es similar, pudiéndose comprobar como para niveles bajos de carga (por debajo de 30 t) las galgas sufren tracciones, para a partir de dicho umbral de carga comenzar a comprimirse.

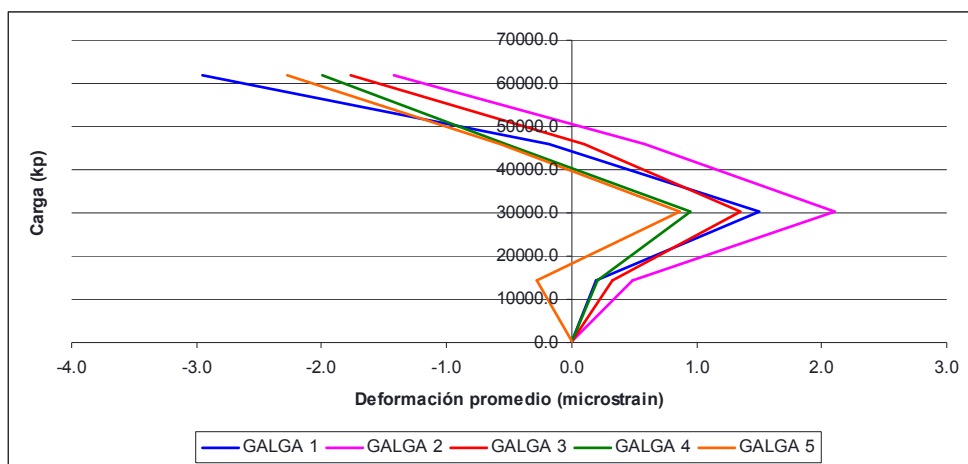


Fig. 4.3.15: Valor promedio de la deformación de cada galga extensométrica para cada nivel de carga. El signo – representa compresión.

Si bien, como ya se ha referido, las deformaciones registradas no superan los $\pm 5 \mu\text{m/m}$, umbral que puede estar afectado por el “ruido” presente en los registros adquiridos, por lo que la única conclusión plausible es que la carga aplicada apenas afecta a los puntos de control. De forma que no puede emitirse, con rigor, un valor concreto para el ángulo de apertura de carga en dicho muro y, por supuesto, éste no sería el valor de 30° propuesto en la NBE-FL 90.

Si que parece razonable, dada la rigidez del muro (compuesto por ladrillos cerámicos cara vista de resistencia a compresión $> 50 \text{ N/mm}^2$ y por un mortero de cemento de 13.6 N/mm^2 de resistencia a compresión), que la carga sea transmitida al muro de forma bastante directa, con un ángulo de apertura de carga reducido.

A falta de más datos se adopta un valor para dicho ángulo de 18° , dado que es el que forma la galga 1, la más próxima a la viga de reparto de carga, con ésta.

4.3.4 Determinación de las características mecánicas del muro de ladrillo.

Con la finalidad tener obtener las características mecánicas (módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson) del muro para posterior contraste de los resultados alcanzados mediante técnicas no destructivas, se colocaron una serie de transductores potenciométricos, tanto verticales como horizontales.

En el croquis adjunto (Fig. 4.3.16) y en las fotografías Fig. 4.3.17 - 4.3.19, puede comprobarse la ubicación de dichos transductores, así como la línea ideal de la apertura de cargas, una vez estimado el ángulo en el apartado anterior. Los transductores indicados entre paréntesis coinciden

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

en posición con los ubicados en la cara mostrada del muro, si bien están ubicados en la cara opuesta del mismo.

Por su parte en la Tabla 4.3.2 se indican las coordenadas de los centros de los transductores dispuestos respecto del sistema coordenado de la Fig. 4.3.16.

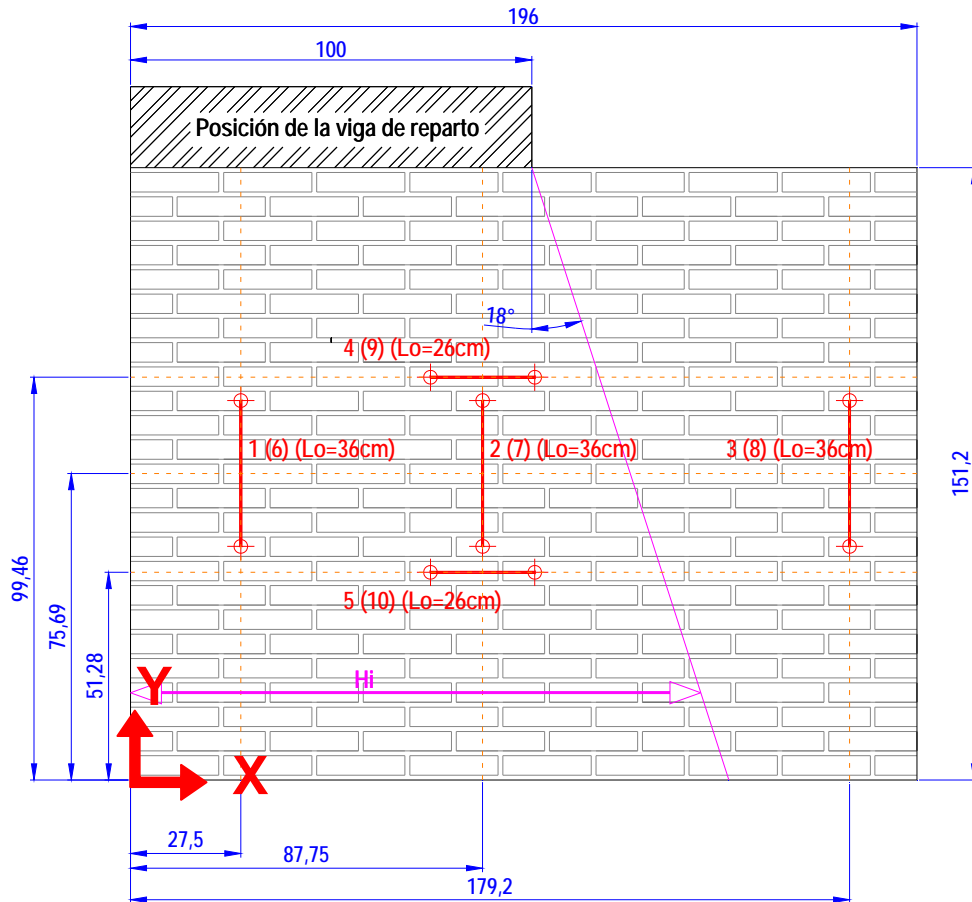


Fig. 4.3.16: Ubicación de los transductores en el conjunto del muro (los indicados entre paréntesis coinciden en posición con los ubicados en la cara mostrada del muro, si bien están ubicados en la cara opuesta del mismo). Las cotas corresponden a cm.

Tabla 4.3.2: Coordenadas de los transductores dispuestos.

Transductor	L _o (cm)	Posición del centro de cada transductor		Anchura de carga
		X (cm)	Y (cm)	H _i (cm)
1	36	27.5	75.7	124.53
2	36	87.75	75.7	124.53
3	36	179.2	75.7	124.53
4	26	87.75	99.5	116.81
5	26	87.75	51.3	132.46
6*	36	27.5	75.7	124.53
7*	36	87.75	75.7	124.53
8*	36	179.2	75.7	124.53
9*	26	87.75	99.5	116.81
10*	26	87.75	51.3	132.46

* Los transductores 6 – 10 están en la cara opuesta del muro en la misma posición, respectivamente, que el 1 – 5.

Para el control de la puesta en carga durante la ejecución de los ensayos se empleó un transductor de presión de 400 Ba (5 voltios) y dos gatos hidráulicos de 126.70 cm² de área cada uno. Debido a lo referido una señal de presión registrada de 1 voltio equivale a una carga de 20,272.0 kp.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

$$400 \frac{kp}{cm^2} \approx 5 \text{ voltios} \quad \square \quad 1 \text{ voltio} \approx 80 \frac{kp}{cm^2}$$

$$1 \text{ voltio} \approx 80 \frac{kp}{cm^2} \cdot 126.70 cm^2 \cdot 2 = 20,272 kp$$

Igualmente, también hay que considerar que el peso muerto que representa la viga de reparto empleada en el ensayo es de 220 kp.

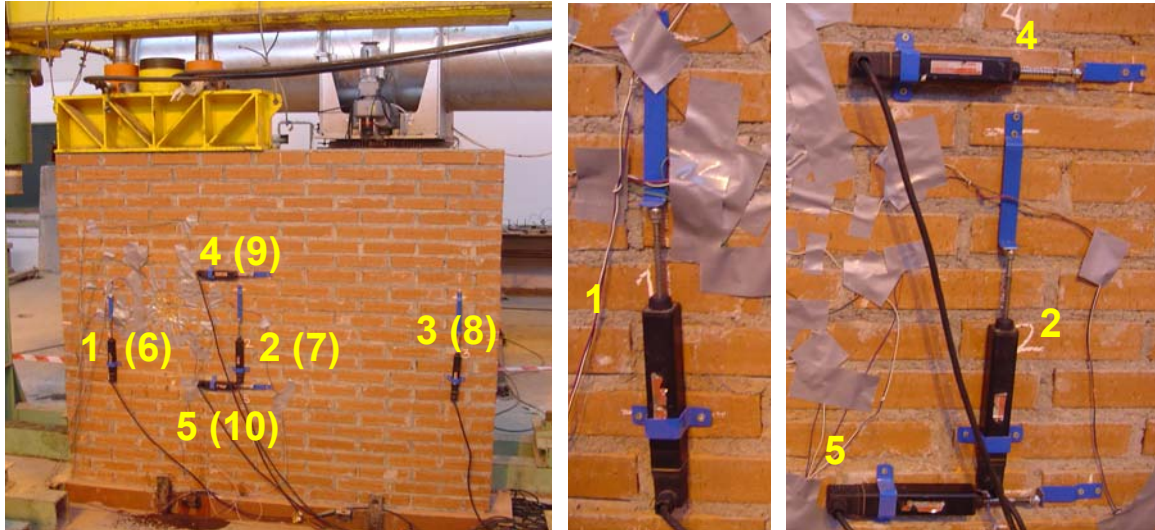


Fig. 4.3.17: Fotografía general con la ubicación de los transductores en el conjunto del muro. Los transductores indicados entre paréntesis coinciden en posición con los ubicados en la cara mostrada del muro, si bien están ubicados en la cara opuesta del mismo.

Fig. 4.3.18 y 4.3.19: Detalle de alguno de los transductores emplazados.

Con la viga de reparto en la posición indicada en la Fig. 4.3.20 (en el borde izquierdo del muro) se realizó un primer proceso de carga (hasta aproximadamente 88.5 toneladas) y descarga, para generar un reacomodo del sistema (muro, viga de reacción y gatos hidráulicos); seguido de un proceso final de carga, en un único escalón, hasta nuevamente las 88.5 toneladas referidas (Fig. 4.3.20).

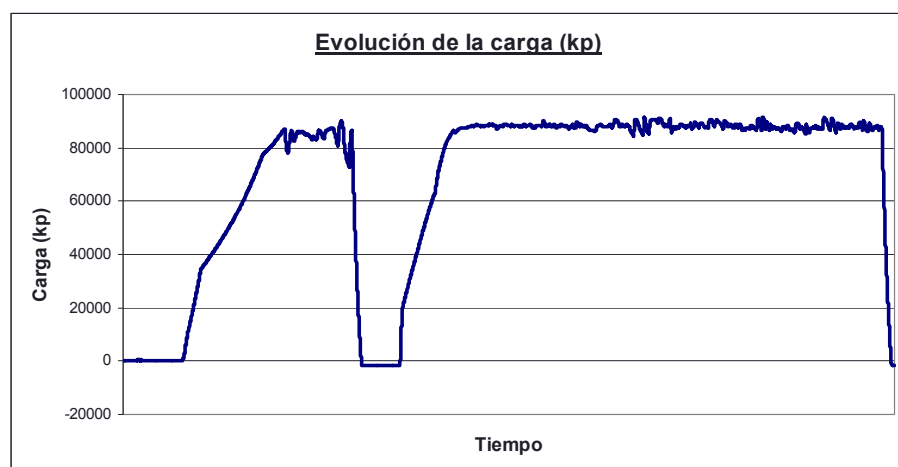


Fig. 4.3.20: Proceso de carga efectuado.

En las Fig. 4.3.21 - 4.3.25 siguientes se muestra la evolución de la deformación registrada por cada uno de los 10 transductores dispuestos. Conviene referir que para una mejor comparación de las medidas registradas todos los gráficos referidos presentan una escala equivalente (salvo la

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

de los transductores nº 5 y 10 debido a la magnitud de las deformaciones registradas por el denominado 10).

Puede apreciarse como los transductores verticales nº 1 y 6 (Fig. 4.3.21) registran deformaciones de compresión significativas, mientras que los también verticales nº 2, 3 y 7 (Fig. 4.3.22 y 4.3.23) también han registrado deformaciones de compresión, pero de menos de la mitad de magnitud que las registradas por los anteriores nº 1 y 6. Por otra parte el transductor vertical nº 8 (dispuesto en la misma localización que el nº 3 pero en la cara opuesta del muro, Fig. 4.3.23) apenas ha manifestado evolución en la deformación, siendo en este caso de tracción (circunstancia que concuerda con el ángulo de apertura de cargas estimado).

Por otra parte conviene aludir a que los transductores nº 3 y 6 no presentan un comportamiento adecuado, ya que sin aplicación de carga (al principio del ensayo) registran deformaciones, bastante significativas en el caso del denominado nº 6, circunstancia que hace pensar que la fijación de los mismos al sustrato cerámico no fue todo lo óptima que se hubiera deseado. Por ello que las lecturas registradas por ambos dispositivos no se consideran adecuadas para procesados posteriores.

Fig. 4.3.21:
Evolución de las deformaciones registradas por los transductores verticales 1 y 6.

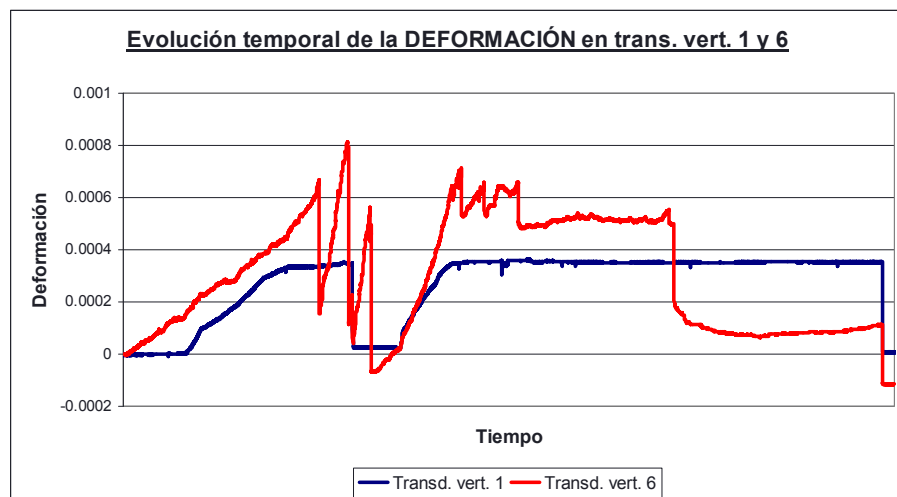
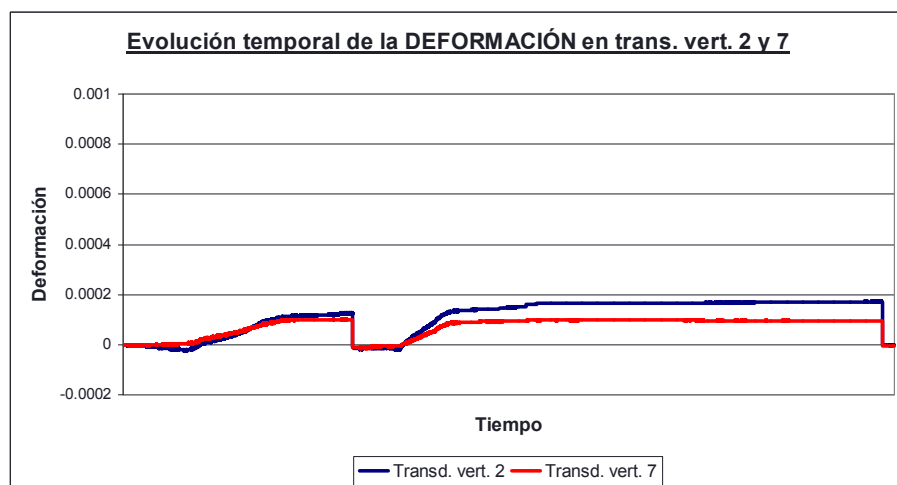
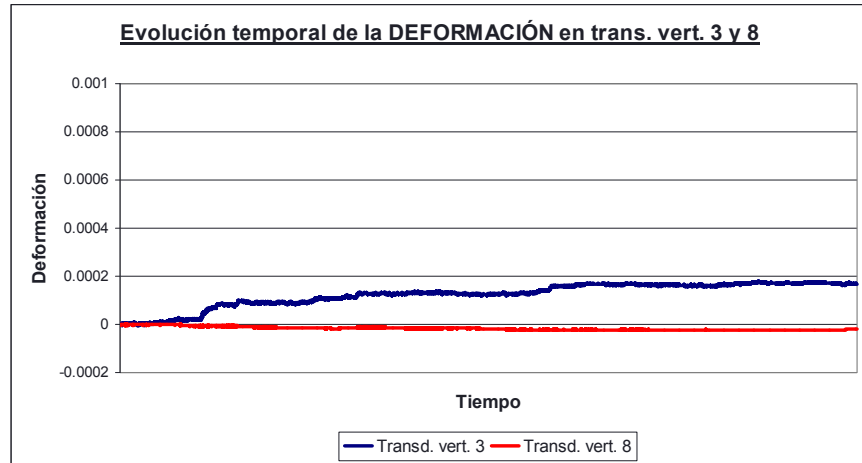


Fig. 4.3.22:
Evolución de las deformaciones registradas por los transductores verticales 2 y 7.



Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Fig. 4.3.23: Evolución de las deformaciones registradas por los transductores verticales 3 y 8.



En lo que respecta a los transductores horizontales puede apreciarse como los denominados nº 4, 5 y 9 (Fig. 4.3.24 y 4.3.25) apenas han registrado deformación, dado que los movimientos relacionados son poco significativos en comparación con otros transductores.

Por otra parte el nº 10 (Fig. 4.3.25) no presenta un comportamiento razonable desde inicio, debido a ello tampoco se considera como de utilidad.

Fig. 4.3.24: Evolución de las deformaciones registradas por los transductores horizontales 4 y 9.

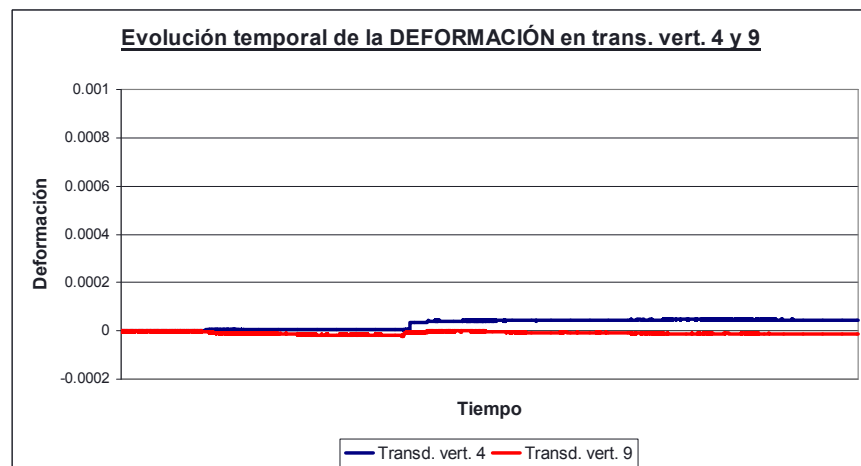
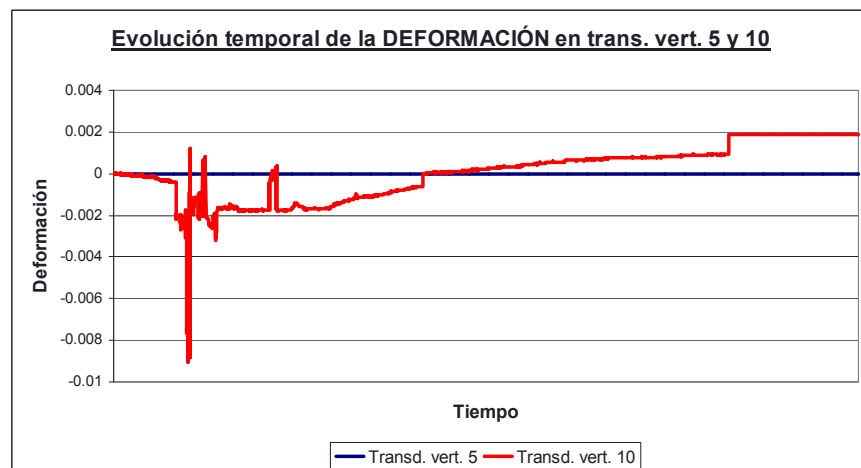


Fig. 4.3.25: Evolución de las deformaciones registradas por los transductores horizontales 5 y 10.



Si se reduce la escala en los gráficos relacionados con los transductores nº 4, 5 y 9 (Fig. 4.3.26 y 4.3.27) se aprecia con mayor detalle las deformaciones experimentadas. De esta forma el transductor nº 4 experimenta deformaciones de compresión, circunstancia ilógica dado que por efecto Poisson la deformación horizontal debiera ser de tracción. Por su parte, el transductor nº 9

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

tiene un comportamiento razonable. Y, finalmente, el transductor nº 5 apenas registra deformación.

Fig. 4.3.26: Evolución de las deformaciones registradas por los transductores horizontales 4 y 9 a mayor escala.

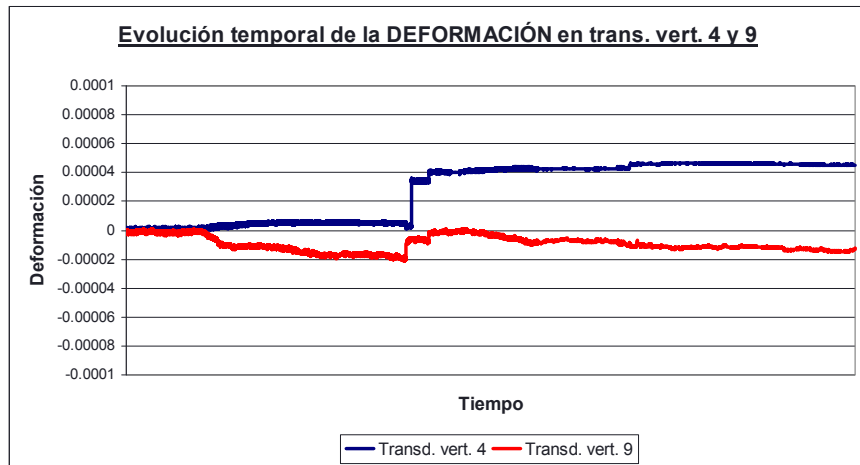
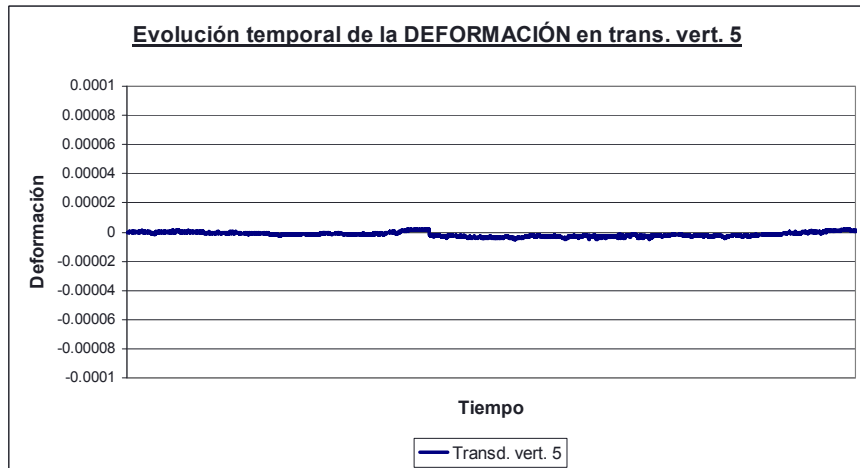


Fig. 4.3.27: Evolución de las deformación registrada por el transductor horizontal 5 a mayor escala.



Por todo lo referido, de cara a estimar el módulo de elasticidad solo se tiene en cuenta el transductor denotado con el número nº 1, puesto que aunque tanto el nº 2 y 7 presentan un comportamiento adecuado, dado que las deformaciones registradas son del orden de la mitad de las manifestadas por el nº 1, el módulo de elasticidad estimado con dichos transductores nº 2 y 7 será, sensiblemente, el doble que el obtenido mediante el nº 1 (pues a un mismo nivel de tensión vertical media las deformaciones son en torno a la mitad).

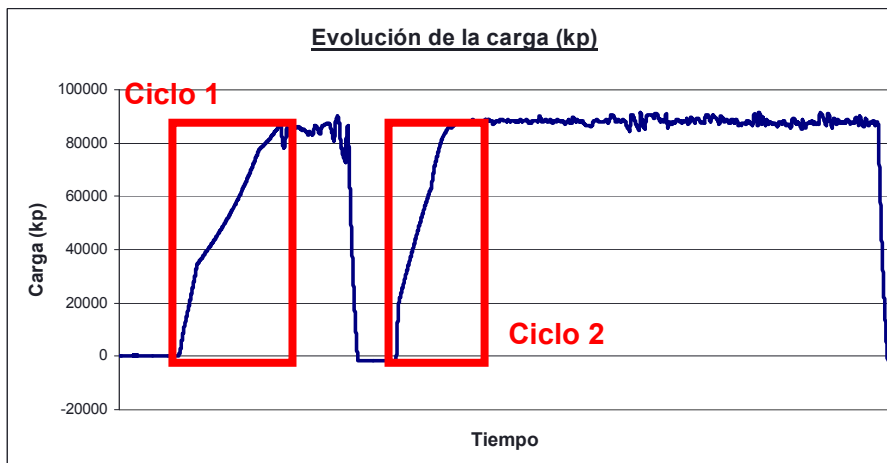


Fig. 4.3.28: Detalle de los dos ciclos de carga para los que se han estimado los módulos de elasticidad.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

La regresión lineal realizada para obtener los módulos de elasticidad en los dos ciclos de carga efectuados (Fig. 4.3.28) se ilustran en las Fig. 4.3.29 y 4.3.30.

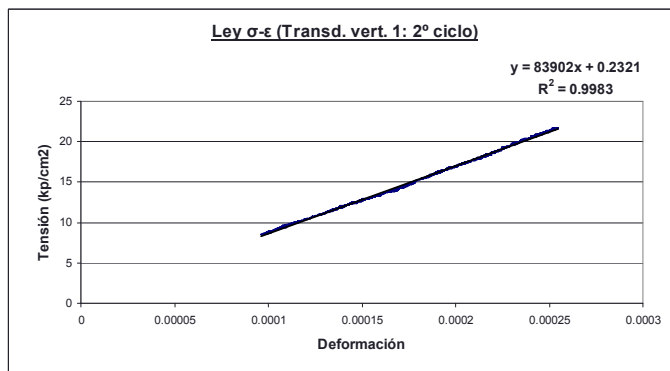
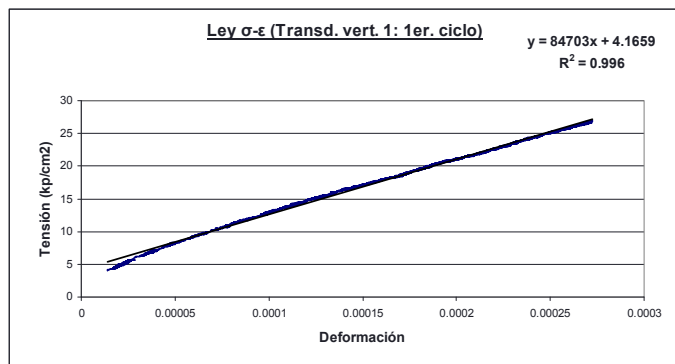


Fig. 4.3.29: Tramo lineal de la ley σ - ϵ correspondiente al primer ciclo de carga registrado por el transductor vertical 1.

Fig. 4.3.30: Tramo lineal de la ley σ - ϵ correspondiente al segundo ciclo de carga registrado por el transductor vertical 1.

El valor promedio estimado para el **módulo de elasticidad** es de **8,430.25 N/mm²** (Tabla 4.3.3). Por su parte, en lo que respecta a la estimación del coeficiente de Poisson (Tabla 4.3.4) teniendo en cuenta el cociente entre la deformación promedio horizontal registrada por el transductor 9 y la deformación promedio vertical registrada por el transductor 1, en cada uno de los dos ciclos de carga realizados, puede concretarse que el **coeficiente de Poisson** promedio en ambos ciclos es de **0.041**.

Tabla 4.3.3: Módulos de elasticidad estimados.

	E (Kp/cm ²)	E (N/mm ²)
E _{1,ciclo1}	84,703.0	8,470.30
E _{1,ciclo2}	83,902.0	8,390.20
E _{promedio}	84,302.5	8,430.25

Tabla 4.3.4: Coeficientes de Poisson estimados.

	Coef. Poisson (v)
V _{9-1,ciclo1}	-0.068
V _{9-1,ciclo2}	-0.013
V _{promedio}	-0.041

En base a lo redactado el lector puede hacerse una idea de la dificultad encontrada para estimar las características mecánicas de las fábricas de forma unívoca y suficientemente representativa.

4.3.5 Ensayos hole drilling en el muro de ladrillo.

Se realizaron un total de seis ensayos Hole Drilling, con la finalidad de estimar el nivel de tensión vertical en otros tantos puntos del muro de ladrillo construido, si bien tres de los cuáles resultaron improductivos: uno debido a que era el primer hole drilling que se realizaba adoleciendo de problemas procedimentales, y los otros dos debido a problemas en el registro de datos con el data logger. Por ello, en lo que sigue, solo se va a exponer los resultados alcanzados en los tres ensayos restantes.

En la Fig. 4.3.31 puede comprobarse la ubicación de cada uno de estos ensayos dentro del muro. Igualmente en la Tabla 4.3.5 se relacionan las coordenadas del centro de cada una de las perforaciones realizadas respecto de un origen relativo compuesto por la esquina inferior izquierda del muro.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Cabe referir que los ensayos HDL2 y HDL3 fueron ejecutados de forma simultánea y, por tanto, afectados por la misma carga en la coronación del muro.

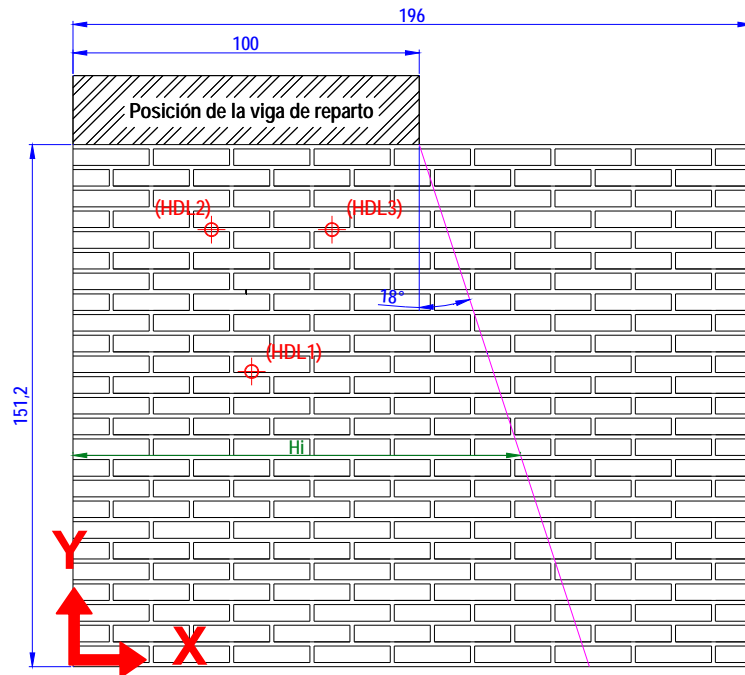


Fig. 4.3.31: Ubicación en el muro de los 3 ensayos de Hole Drilling (cotas en cm).

Tabla 4.3.5: Coordenadas de ubicación de los ensayos de Hole Drilling realizados.

	HDL1	HDL2	HDL3
x_i (cm)	51.6	40.0	74.8
y_i (cm)	85.5	126.6	126.6
H_i (cm)	121.4	108.0	108.0

4.3.5.1 HDL1

En la Fig. 4.3.32 se muestra la localización del Hole Drilling denominado HDL1 dentro del conjunto del muro de fábrica.

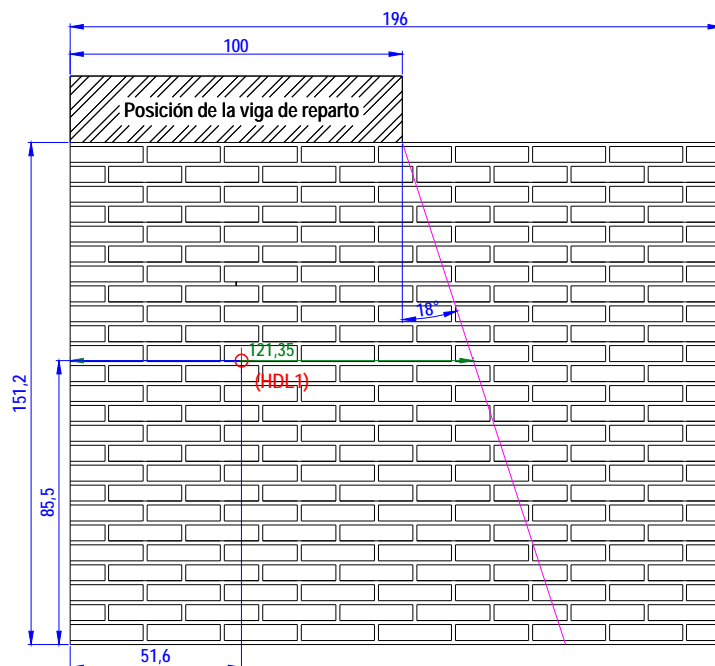


Fig. 4.3.32: Ubicación del ensayo HDL1 (cotas en cm). El ensayo se realizó en la cara opuesta a la ilustrada.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

La carga introducida se mantuvo constante durante todo el ensayo, en un valor de 89.4 t.

Una vez estabilizada la carga, al comienzo del taladrado (todavía no se había progresado en profundidad) se resbaló la corona hueca en la superficie del muro provocando la rotura de los cables de conexión de las galgas 5 y 6 (Fig. 4.3.33 - 4.3.35). Puede apreciarse el salto en el registro de las señales captadas por dicha galgas en la Fig. 4.3.36.



Fig. 4.3.33: Instante antes de la perforación del orificio.

Fig. 4.3.34: Instante durante el comienzo de la perforación de la guía para el posterior taladrado. En este momento la broca resbala en la superficie del muro seccionando las galgas 5 y 6.

Fig. 4.3.35: Detalle de las galgas tras la ejecución de la soldadura de las galgas 5 y 6 cuyo cable de conexión había sido seccionado.

Debido a ello fue necesario soldar las galgas a los cables nuevamente, tras lo cuál fue preciso esperar hasta que dichas soldaduras se enfriasen, de modo que la lectura de las galgas alcanzase nuevamente un valor uniforme en sus medidas.

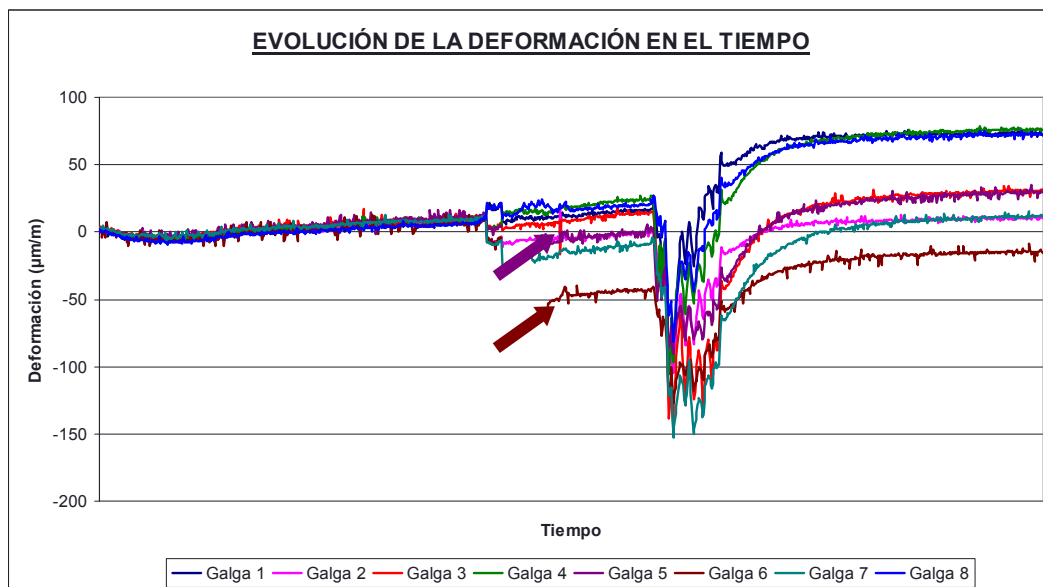


Fig. 4.3.36: Evolución de las deformaciones en el tiempo. Puede apreciarse (marcado con las flechas) como el registro de las galgas 5 y 6 presenta una discontinuidad relacionada con el periodo de tiempo transcurrido desde su corte hasta su soldadura.

Tomando como origen relativo los valores de la deformación, previamente al taladrado, una vez estabilizados tras soldar las conexiones de as dos galgas que habían sido seccionadas por el taladro (Tabla 4.3.6), la gráfica de evolución de la deformación con el tiempo toma el aspecto de la Fig. 4.3.37.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.3.6: Deformación una vez estabilizada la carga previamente al taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	13.4	-3.1	10.4	20.8	-3.2	-45.6	-12.8	18.2

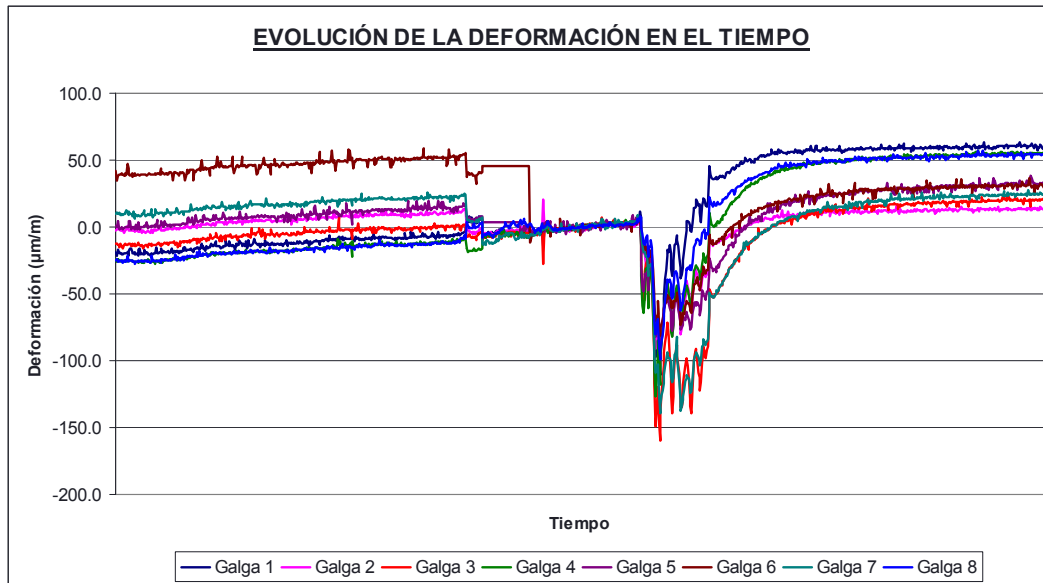


Fig. 4.3.37: Traslación de los registros con el objetivo de tomar como origen relativo para el procesamiento del ensayo, el instante en que los valores presentados por las galgas se estabilizan (tras la soldadura de las 5 y 6).

Igualmente, en la Fig. 4.3.38 se muestra la misma curva que la recogida en la Fig. 4.3.37 omitiendo los datos registrados hasta el nuevo cero, dado que no son significativos para la interpretación del ensayo.

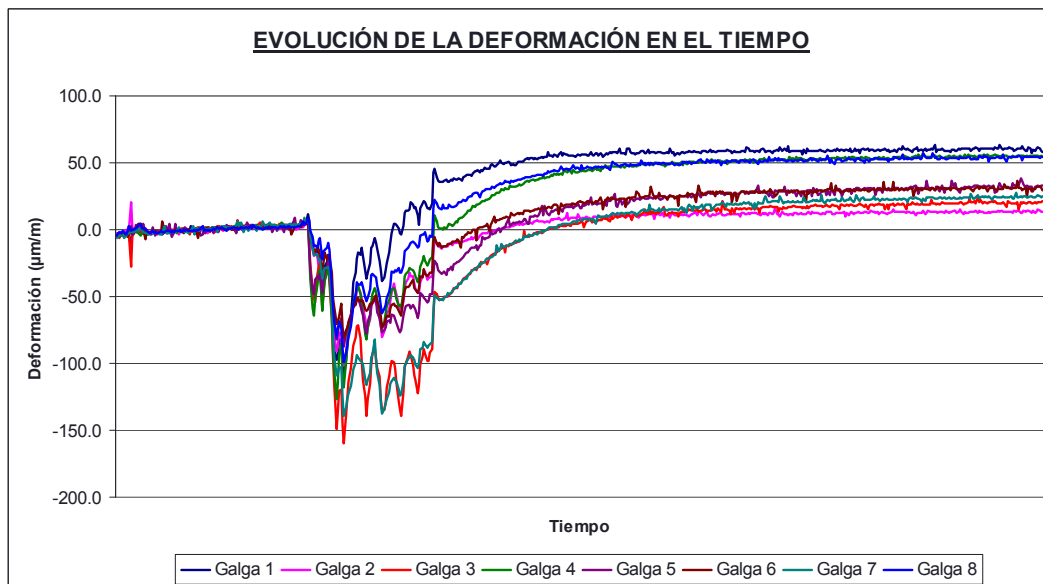


Fig. 4.3.38: Registro definitivo para el procesamiento del ensayo.

Las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$ durante los 40 últimos minutos del ensayo. En vista de lo referido, se considera como incremento deformacional de las galgas, tras el taladrado, los valores de la Tabla 4.3.7.

Tabla 4.3.7: Incremento deformacional registrado por las galgas extensométricas, manteniendo constante la carga en coronación del muro, después del taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	59.8	13.0	18.9	54.2	30.8	30.0	23.0	53.2

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

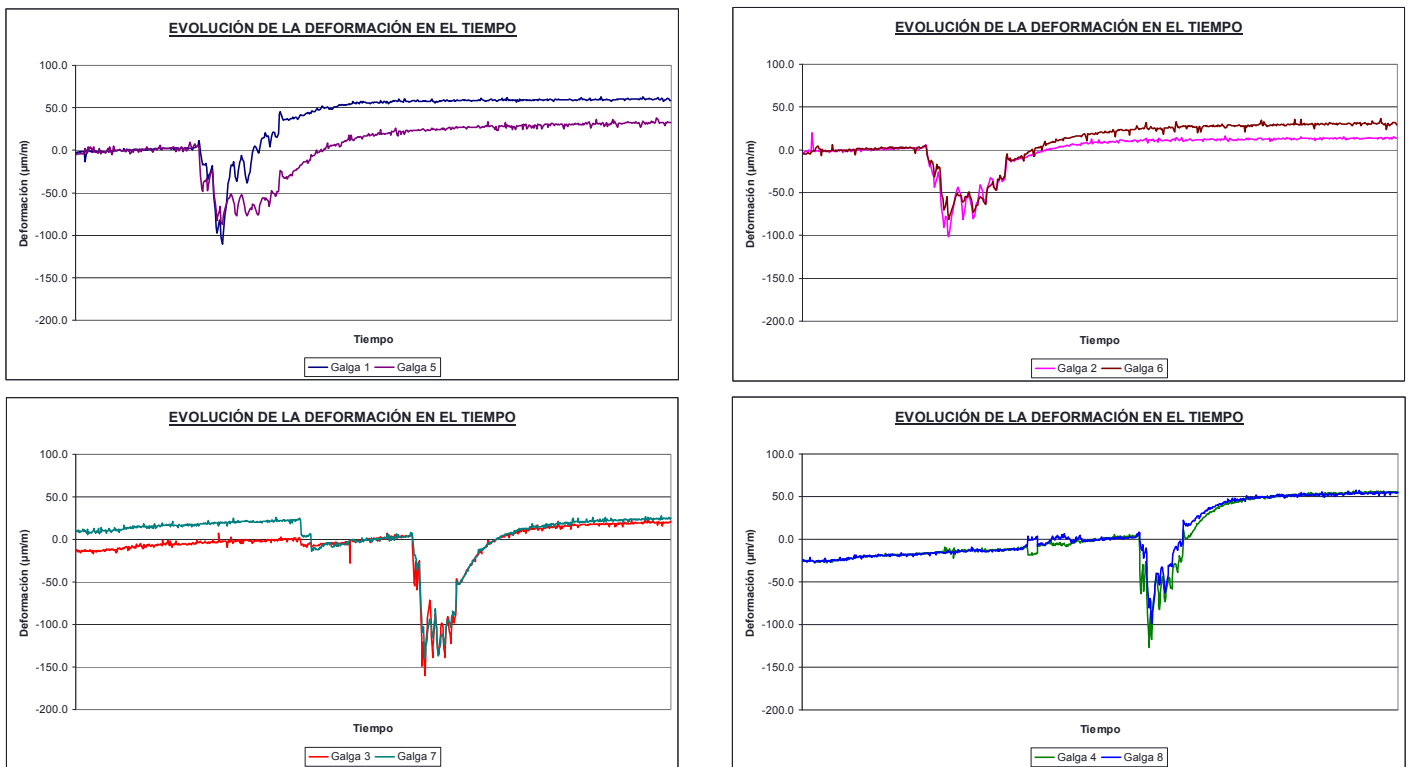


Fig. 4.3.39-4.3.42: Evolución de la deformación de las galgas en el tiempo, dos a dos (se representan conjuntamente las diametralmente opuestas).

Como ya se ha referido dado que las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$, se considera el registro asociado a cada una de ellas como válido. En la Tabla 4.3.8, en base a las deformaciones referidas y procediendo con la teoría de la elasticidad, para cada una de las ocho combinaciones de galgas extensométricas existentes, se relaciona, para cada una de las combinaciones referidas, las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente, medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Tabla 4.3.8: Obtención, para cada una de las combinaciones de galgas, de las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente (β), medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Combinación	Canales	σ_{max} (N/mm ²)	σ_{min} (N/mm ²)	β (°)	σ_{vert} (N/mm ²)
1	1, 3, 6	-1.22	-2	78	-1.97
2*	2, 4, 7	-0.97	-1.78	14	-1.57
3*	3, 5, 8	-0.51	-1.52	-39	-1.12
4	4, 6, 1	-1.35	-2.09	-62	-2.03
5*	5, 7, 2	-0.85	-1.35	53	-1.17
6	6, 8, 3	-1.26	-2.14	31	-2.09
7	7, 1, 4	-1.3	-2.08	-17	-2.01
8*	8, 2, 5	-1	-1.7	87	-1.31
$\sigma_{\text{vert, Promedio}}$ (N/mm²)					-2.03
$\sigma_{\text{vert, Desvest}}$ (N/mm²)					0.05
Coef. de variación					2.47%

* Las combinaciones 2, 3, 5 y 8 no se han tenido en cuenta desde un punto de vista estadístico (coeficiente de variación menor del 10%).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Desde un punto de vista estadístico (coeficiente de variación inferior al 10%) solo se tienen en cuenta las combinaciones 1, 4, 6 y 7. Para estas combinaciones la tensión vertical promedio estimada en el ensayo fue de 2.03 N/mm² (compresión), presentando un coeficiente de variación de 2.47%.

Para una consulta más detallada de los resultados del ensayo se remite al lector al registro de ensayo Lab0803 adjunto en el Anexo 10 “Registros de los ensayos Hole Drilling realizados en el muro de ladrillo”.

Por otra parte la tensión vertical media existente en el punto de ensayo, considerando una apertura de carga de 18°, es de 3.42 N/mm² (compresión):

$$\sigma_{media} = \frac{89,416.8kp}{121.4 \cdot 22cm^2} = 33.48 \frac{kp}{cm^2} = 3.42 \frac{N}{mm^2} \text{ (compresión)}$$

4.3.5.2 HDL2

En la Fig. 4.3.43 siguiente se muestra la localización del Hole Drilling denominado HDL2 dentro del conjunto del muro de fábrica.

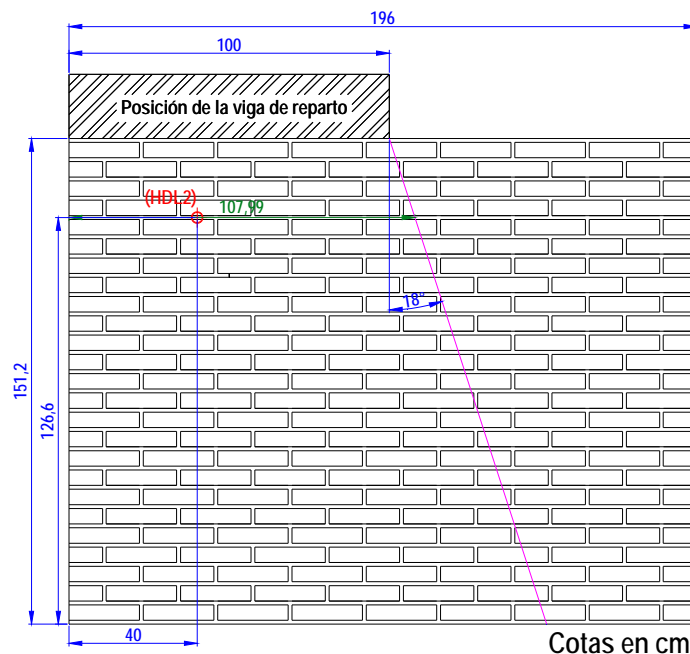


Fig. 4.3.43: Ubicación del ensayo HDL2 (cotas en cm). El ensayo se realizó en la cara opuesta a la ilustrada.

La carga se introduce de forma monótona creciente hasta un valor de 71.5 t, el cuál se mantiene constante a lo largo del ensayo (Fig. 4.3.44).

En la Fig. 4.3.45 se presentan los registros de la evolución de la deformación de cada galga a lo largo del ensayo.

Bajo la carga referida mantenida constante, tomando como origen relativo los valores de la deformación, previamente al taladrado, una vez estabilizados (Tabla 4.3.9), la gráfica de evolución de la deformación con el tiempo toma el aspecto siguiente (Fig. 4.3.46):

Tabla 4.3.9: Deformación una vez estabilizada la carga previamente al taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ε (µm/m)	-31.9	32.2	32.0	-101.5	-29.8	11.9	34.0	-81.7

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

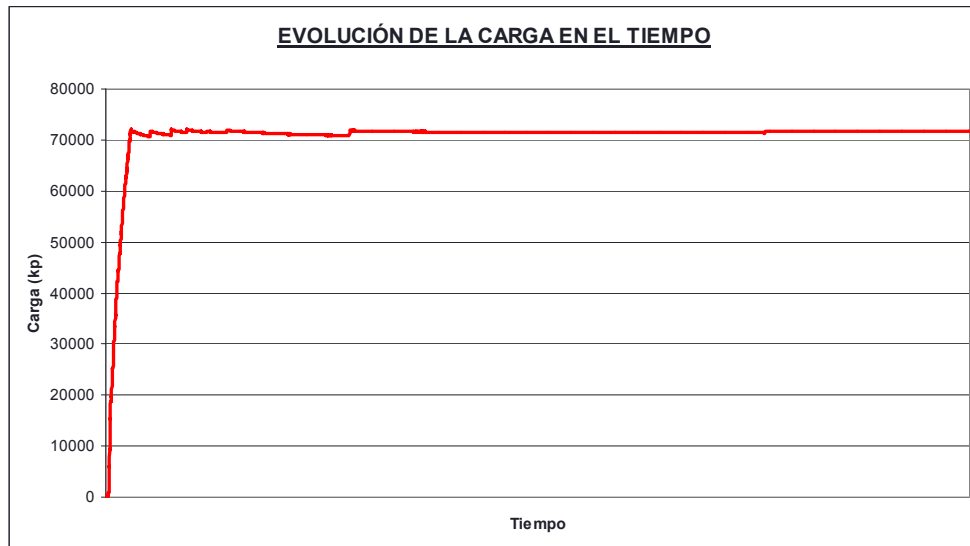


Fig. 4.3.44: Evolución de la carga en el tiempo.

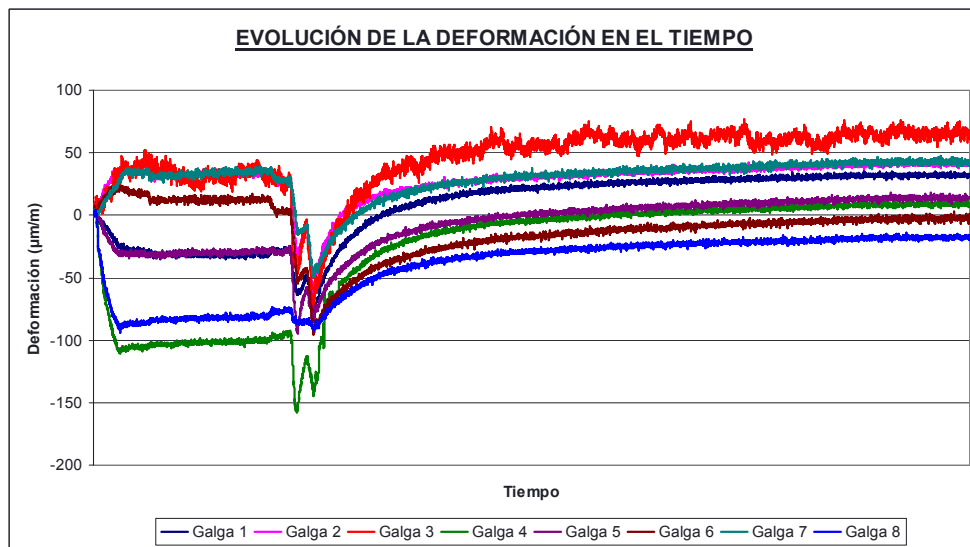


Fig. 4.3.45: Evolución de la deformación en el tiempo.

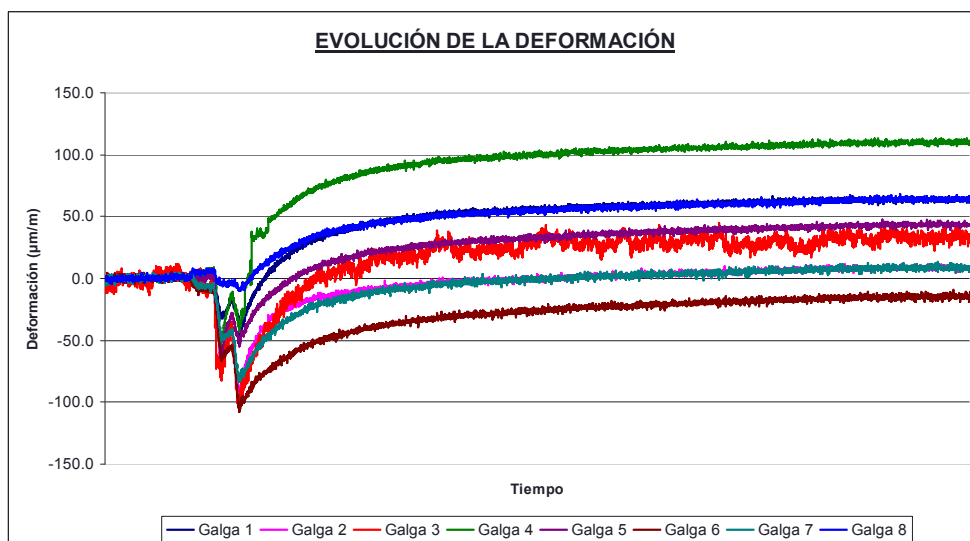


Fig. 4.3.46: Traslación de los registros con el objetivo de tomar como origen relativo para el procesado del ensayo, el instante en que los valores presentados por las galgas se estabilizan.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

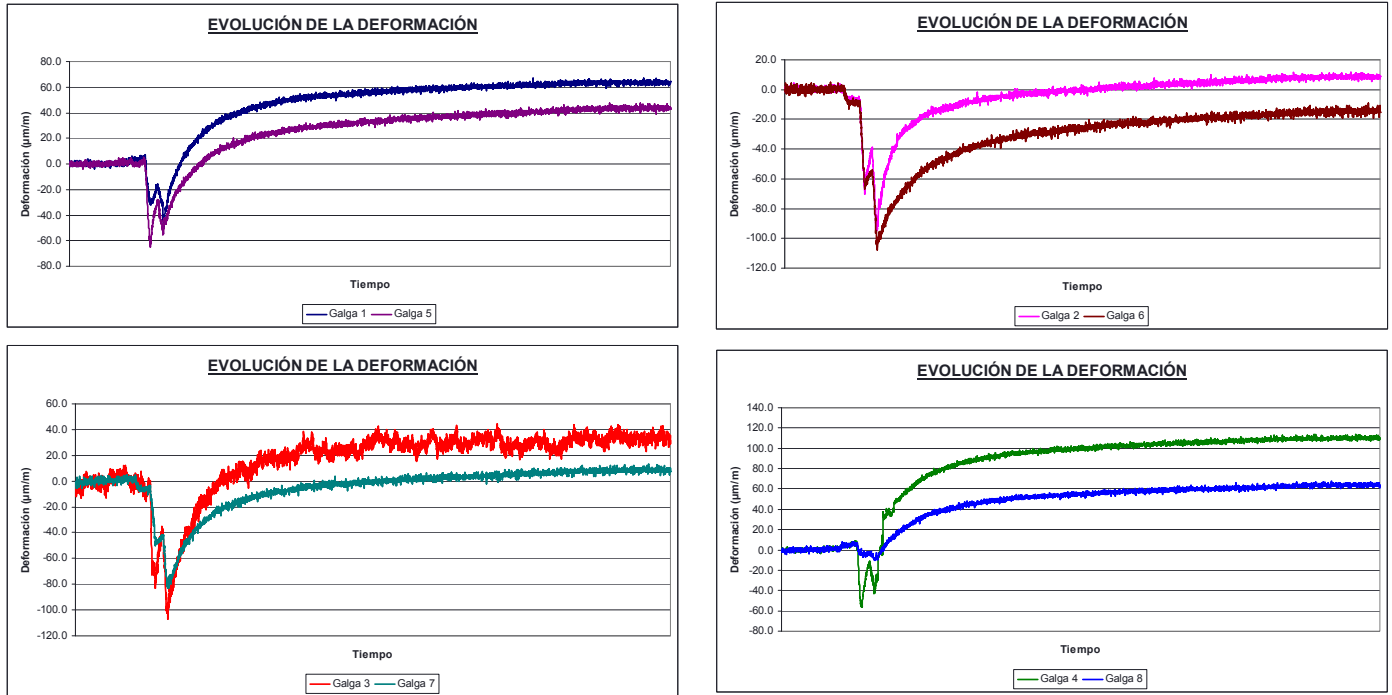


Fig. 4.3.47 - 4.3.50: Evolución de la deformación de las galgas en el tiempo, dos a dos (se representan conjuntamente las diametralmente opuestas).

Las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$ durante los últimos minutos del ensayo. En vista de lo referido, se considera como incremento deformacional de las galgas, tras el taladrado, los valores de la siguiente Tabla 4.3.10:

Tabla 4.3.10: Incremento deformacional registrado por las galgas extensométricas, manteniendo constante la carga en coronación del muro, después del taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	63.6	8.5	33.4	110.0	43.4	-14.8	8.4	63.7

En base a las deformaciones referidas y procediendo con la teoría de la elasticidad, para cada una de las ocho combinaciones de galgas extensométricas existentes, puede obtenerse (Tabla 4.3.11), para cada una de las combinaciones referidas, las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente, medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Tabla 4.3.11: Obtención, para cada una de las combinaciones de galgas, de las tensiones principales σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente (β), medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Combinación	Canales	σ_{max} (N/mm²)	σ_{min} (N/mm²)	β (°)	σ_{vert} (N/mm²)
1	1, 3, 6	-0.85	-3.11	52	-2.25
2*	2, 4, 7	-1.17	-3.67	23	-3.32
3*	3, 5, 8	-1.12	-2.02	-39	-1.66
4	4, 6, 1	-0.82	-3.06	-83	-2.21
5*	5, 7, 2	-0.63	-1.49	68	-1.37
6*	6, 8, 3	-0.3	-1.7	-6	-0.85
7	7, 1, 4	-0.1	-2.84	-35	-1.94
8*	8, 2, 5	-0.98	-1.97	-83	-1.59
σ_{vert}, Promedio (N/mm²)					-2.13
σ_{vert}, Desvest (N/mm²)					0.17
Coef. de variación					7.90%

* Las combinaciones 2, 3, 5, 6 y 8 no se tuvieron en cuenta desde un punto de vista estadístico (coeficiente de variación menor del 10%).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Desde un punto de vista estadístico (coeficiente de variación inferior al 10%) solo se tienen en cuenta las combinaciones 1, 4 y 7. Para estas combinaciones la tensión vertical promedio estimada en el ensayo es de 2.13 N/mm² (compresión), presentando un coeficiente de variación de 7.90%.

Para una consulta más detallada de los resultados del ensayo se remite al lector al registro de ensayo Lab0903 adjunto en el Anexo 10 “Registros de los ensayos Hole Drilling realizados en el muro de ladrillo”.

Por otra parte la tensión vertical media existente en el punto de ensayo, considerando una apertura de carga de 18°, es de 3.07 N/mm² (compresión):

$$\sigma_{media} = \frac{71,544.3kp}{107.99 \cdot 22cm^2} = 30.11 \frac{kp}{cm^2} = 3.01 \frac{N}{mm^2} \text{ (compresión)}$$

4.3.5.3 HDL3

En la Fig. 4.3.51 siguiente se muestra la localización del Hole Drilling denominado HDL3 dentro del conjunto del muro de fábrica.

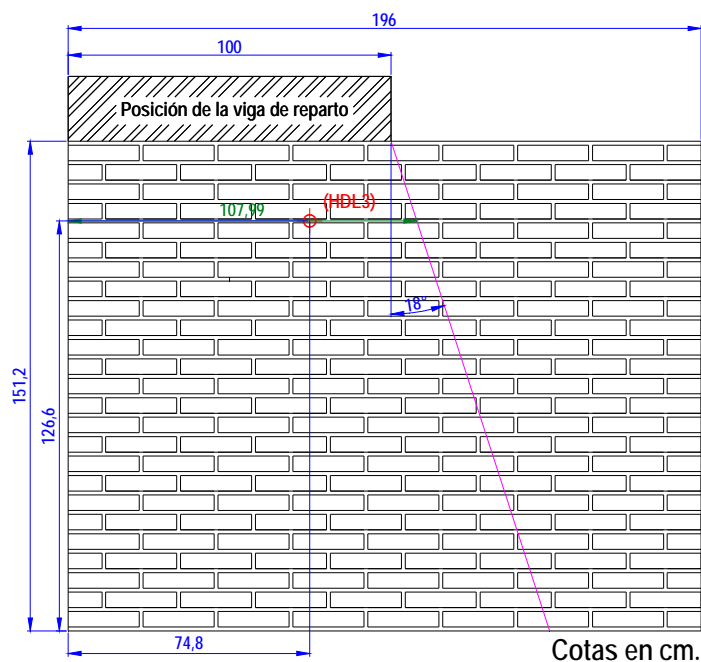


Fig. 4.3.51: Ubicación del ensayo HDL3 (cotas en cm). El ensayo se realizó en la cara opuesta a la ilustrada.

La carga se introduce de forma monótona creciente hasta un valor de 71.5 t, el cuál se mantiene constante a lo largo del ensayo (Fig. 4.3.52).



Fig. 4.3.52: Evolución de la carga en el tiempo.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En la Fig. 4.3.53 se presentan los registros de la evolución de la deformación de cada galga a lo largo del ensayo. Puede apreciarse como todas las bandas registraron un salto en su registro hacia el comienzo del ensayo, esta circunstancia no tiene importancia en el desarrollo del mismo, dado que lo que interesa es el conocer el valor de estabilización de cada una tanto antes de realizar la perforación, como tiempo después de haberla realizado.

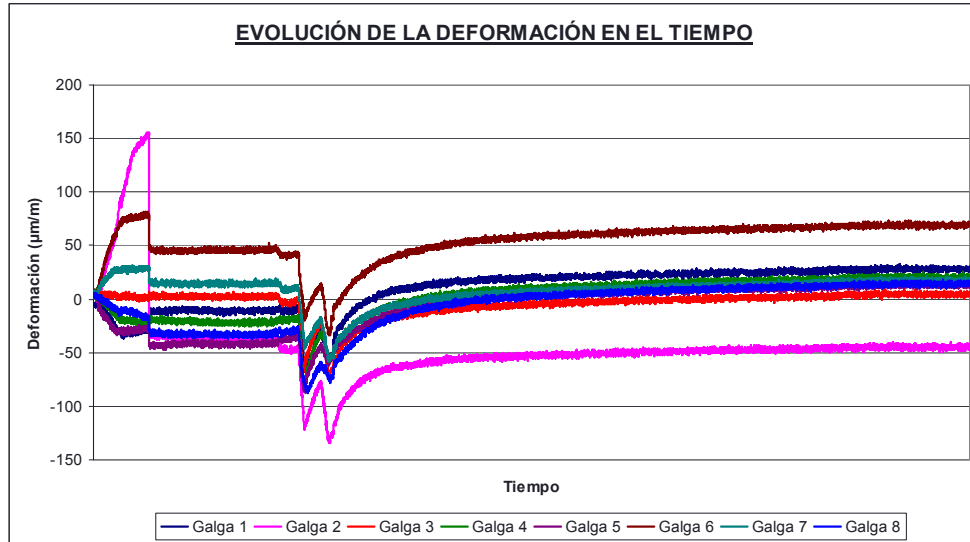


Fig. 4.3.53: Evolución de la deformación en el tiempo.

Bajo la carga referida mantenida constante, tomando como origen relativo los valores de la deformación, previamente al taladrado, una vez estabilizados (Tabla 4.3.12), la gráfica de evolución de la deformación con el tiempo toma el aspecto siguiente (Fig. 4.3.54):

Tabla 4.3.12: Deformación una vez estabilizada la carga previamente al taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	-11.2	-37.5	2.5	-21.7	-41.7	45.7	14.5	-32.9

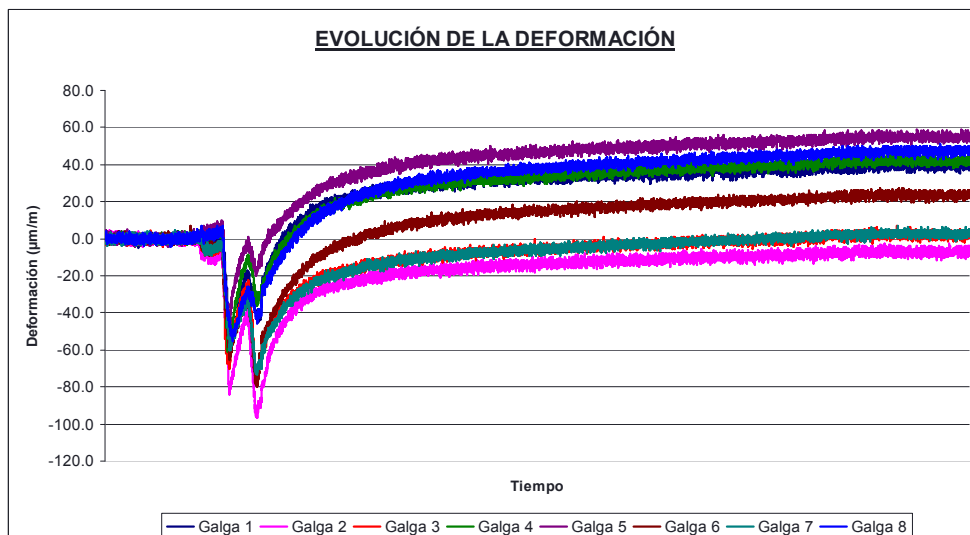


Fig. 4.3.54: Traslación de los registros con el objetivo de tomar como origen relativo para el procesado del ensayo, el instante en que los valores presentados por las galgas se estabilizan.

Las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$ durante los últimos minutos del ensayo. En vista de lo referido, se considera como incremento deformacional de las galgas, tras el taladrado, los valores de la Tabla 4.3.13.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

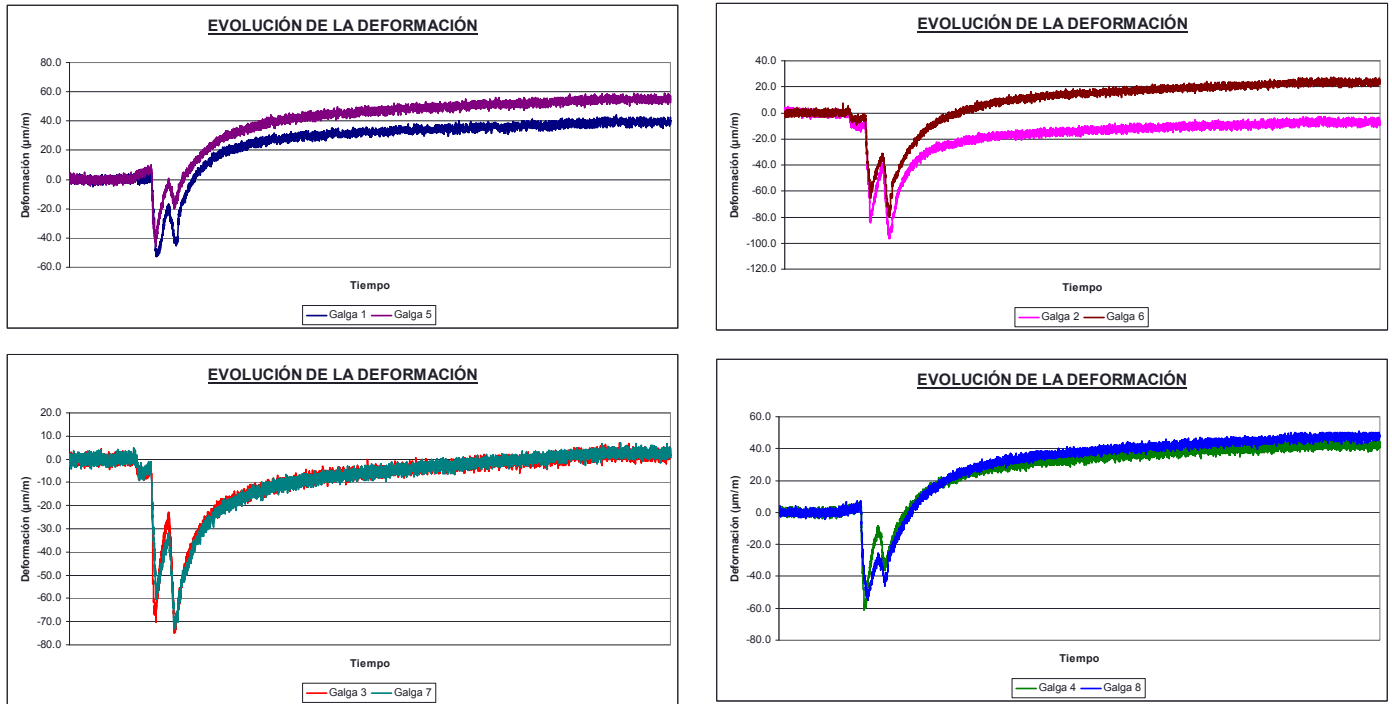


Fig. 4.3.55 - 4.3.58: Evolución de la deformación de las galgas en el tiempo, dos a dos (se representan conjuntamente las diametralmente opuestas).

Tabla 4.3.13: Incremento deformacional registrado por las galgas extensométricas, manteniendo constante la carga en coronación del muro, después del taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	39.4	-7.0	2.1	42.0	54.9	23.5	2.7	47.1

Como ya se ha referido dado que las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$, se consideran el registro asociado a cada una de ellas como válido. En base a las deformaciones referidas y procediendo con la teoría de la elasticidad, para cada una de las ocho combinaciones de galgas extensométricas existentes, puede obtenerse (Tabla 4.3.14), para cada una de las combinaciones referidas, las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente, medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Tabla 4.3.14: Obtención, para cada una de las combinaciones de galgas, de las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente (β), medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Combinación	Canales	σ_{max} (N/mm^2)	σ_{min} (N/mm^2)	β ($^\circ$)	σ_{vert} (N/mm^2)
1*	1, 3, 6	-0.52	-1.17	-86	-1.17
2*	2, 4, 7	-0.22	-1.21	16	-0.98
3	3, 5, 8	-0.6	-1.73	-18	-1.62
4	4, 6, 1	-1.14	-1.54	-72	-1.46
5	5, 7, 2	-0.4	-1.95	63	-1.63
6*	6, 8, 3	-0.83	-2.06	35	-2.02
7*	7, 1, 4	-0.37	-1.34	-24	-1.18
8	8, 2, 5	-0.05	-1.59	-64	-1.43
$\sigma_{\text{vert, Promedio}}$ (N/mm^2)					-1.54
$\sigma_{\text{vert, Desvest}}$ (N/mm^2)					0.10
Coef. de variación					6.82%

* Las combinaciones 1, 2, 6 y 7 no se tuvieron en cuenta desde un punto de vista estadístico (coeficiente de variación menor del 10%).

Desde un punto de vista estadístico (coeficiente de variación inferior al 10%) solo se tienen en cuenta las combinaciones 3, 4, 5 y 8. Para estas combinaciones la tensión vertical promedio

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

estimada en el ensayo fue de 1.54 N/mm² (compresión), presentando un coeficiente de variación de 6.82%.

Para una consulta más detallada de los resultados del ensayo se remite al lector al registro de ensayo Lab0904 adjunto en el Anexo 10 “Registros de los ensayos Hole Drilling realizados en el muro de ladrillo”.

Por otra parte la tensión vertical media existente en el punto de ensayo, considerando una apertura de carga de 18°, es de 3.07 N/mm² (compresión):

$$\sigma_{media} = \frac{71,544.3kp}{107.99 \cdot 22cm^2} = 30.11 \frac{kp}{cm^2} = 3.07 \frac{N}{mm^2} \text{ (compresión)}$$

4.3.6 Ensayos de gato plano en el muro de ladrillo.

En el muro de ladrillo objeto de análisis fueron desarrollados dos campañas de gato plano. La finalidad de estos ensayos fue contrastar experimentalmente los niveles tensionales obtenidos con la técnica de gato plano simple, dado que el nivel tensional medio en la zona de ejecución del gato plano era conocido a priori, así como el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson obtenidos mediante el ensayo de gato plano doble, en tanto que previamente se habían valorado dichas características mecánicas mediante la disposición de transductores potenciométricos.

También se ejecutó un ensayo de corte in situ que se expondrá más adelante.

Para la ejecución de los ensayos se empleó un transductor de presión de 400 Ba (5 voltios) y dos gatos hidráulicos de 126.70 cm² de área cada uno. Debido a lo comentado, y como ya se justificó en el apartado 4.3.4 “Determinación de las características mecánicas del muro de ladrillo”, una señal de presión registrada de 1 voltio equivale a 20,272.0 kp. Igualmente, también hay que recordar que el peso muerto que representa la viga de reparto empleada en el ensayo y de los gatos utilizados para la introducción de la carga era de 220 kp.

4.3.6.1 Gatos planos GPL-A (simple y doble).

En la Fig. 4.3.59 se esquematiza la distribución de los dos gatos planos dentro del muro de ladrillo, así como las magnitudes necesarias para obtener el nivel tensional medio en cada uno de los planos donde se ejecutaron los ensayos, considerando un ángulo de apertura de cargas de 18° (ver apartado 4.3.3 “Determinación del ángulo de apertura de cargas en el muro de ladrillo”).

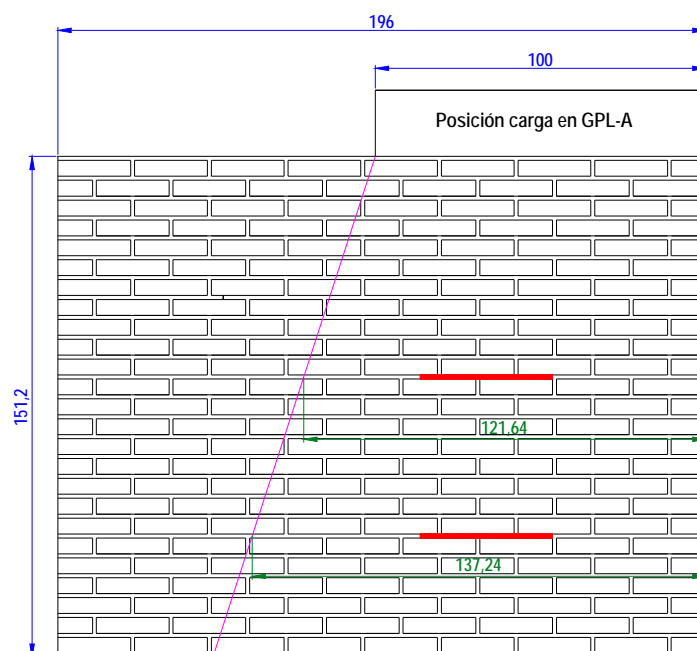


Fig. 4.3.59: Localización de los dos gatos planos (GPL-A) dentro del muro de ladrillo (cotas en cm). El gato plano superior corresponde al ensayo de gato plano simple.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tras la preparación de la zona de ensayo (pegado de los puntos de control, Fig. 4.3.60), se procedió a la ejecución del **ensayo de gato plano simple**, con la finalidad de obtener el nivel tensional vertical de compresión en servicio. Para ello, previamente fue necesario registrar la distancia existente entre los puntos de control antes del corte.

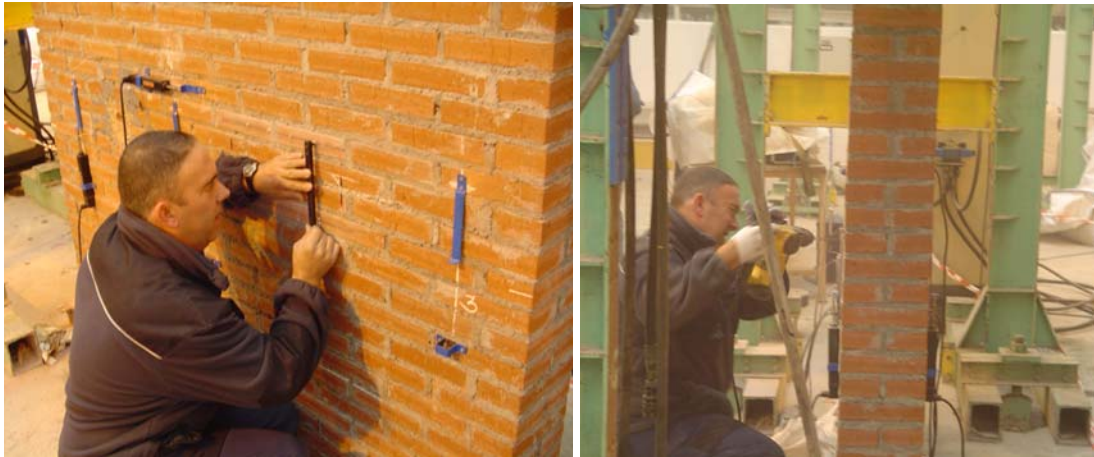


Fig. 4.3.60: Instante durante el pegado de los puntos de control.

Fig. 4.3.61: Ejecución de la hendidura mediante empleo combinado de taladro y sierra de disco.

A continuación, se procedió a llevar a cabo una hendidura, mediante el empleo combinado de sierra de disco y taladro (Fig. 4.3.61) para la posterior inserción del gato plano rectangular (de dimensiones 400x200x6mm). Como consecuencia de la hendidura practicada y de la carga vertical existente, se producirá una relajación del elemento estructural en la zona de ensayo.

Una vez introducido el gato (Fig. 4.3.62) se procedió a aumentar su presión interna mediante bombeo hidráulico hasta que la distancia medida inicialmente entre cada par de puntos de control, antes de la ejecución de la roza, se recupere (Fig. 4.3.63). En ese momento, dicha presión interna ($P_{cancelación}$), corregida con unos coeficientes relacionados con la rigidez inherente del gato, K_m (0.95, según Anexo 4), y, según la literatura, con la relación de áreas existente entre el gato (800.00 cm²) y la roza practicada (924.00 cm²), K_a (0.866), permitiría obtener el nivel tensional en servicio del elemento estructural analizado (σ).



Fig. 4.3.62: Instante durante la introducción del gato plano rectangular.

Fig. 4.3.63: Instante durante la presurización del gato plano.

Los resultados del ensayo se recogen en el registro 07906, el cuál se adjunta en el Anexo 11. No obstante, de dicho registro, se recoge a continuación la Fig. 4.3.64 que ilustra el nivel tensional en servicio existente en el elemento estructural caso de utilizar el coeficiente geométrico $K_a=K_{gato-roza}$, en este caso dicho valor alcanza, mediante extrapolación, los 3.85 MPa.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

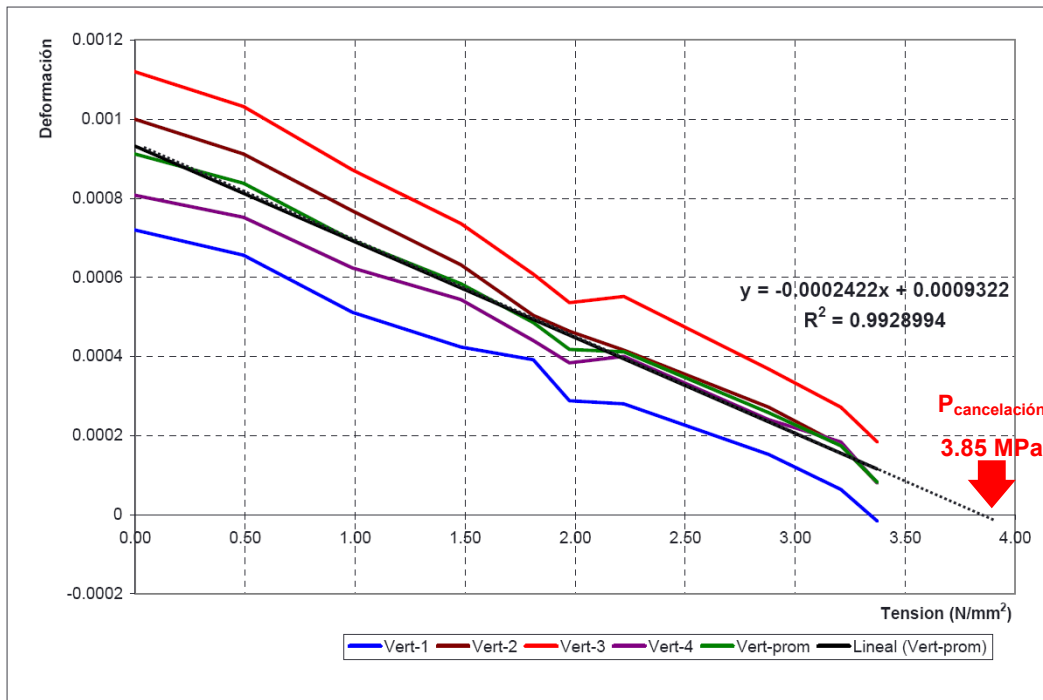
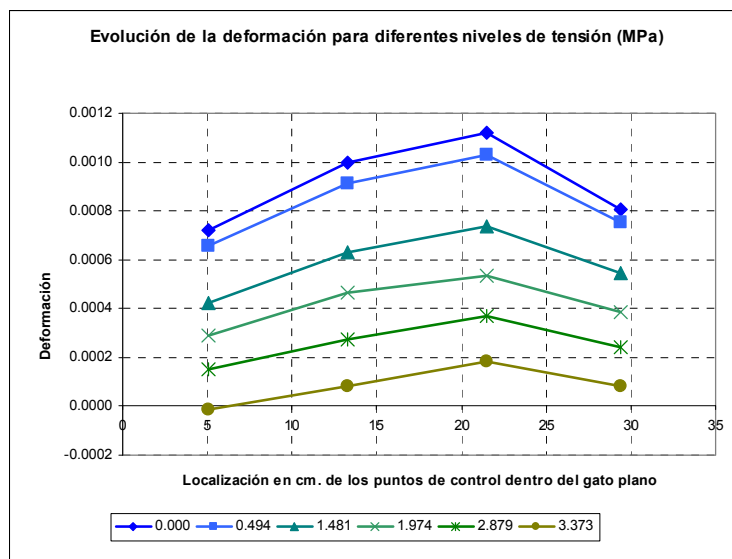


Fig. 4.3.64: Nivel tensional obtenido mediante el ensayo de gato plano simple, empleando como coeficiente corrector geométrico el que liga el área de la roza y el área del gato plano ($K_{\text{gato-roza}}$).

Igualmente en la Fig. 4.3.65 se representa para varios niveles de tensión proporcionados por el gato plano, la evolución de las deformaciones experimentadas por cada par de puntos de control.

Fig. 4.3.65: Evolución de las deformaciones experimentadas por cada par de puntos de control, para varios niveles de tensión proporcionados por el gato plano.



Por su parte, la tensión vertical media en el plano del gato plano es de 3.34 MPa.

$$\sigma_{\text{media}} = \frac{4 \cdot 20,272kp + 220kp}{121.64 \cdot 22cm^2} = \frac{89,416.8kp}{121.64 \cdot 22cm^2} = 33.41 \frac{kp}{cm^2} = 3.34MPa \text{ (compresión)}$$

En lo que respecta al **ensayo de gato plano doble**, cuyo objetivo es obtener la ley σ - ϵ de la porción de fábrica de ladrillo movilizada en el ensayo, fue necesario, tras disponer los puntos de control pertinentes (Fig. 4.3.66), ejecutar una segunda roza, paralela con la realizada para el ensayo de gato plano simple (Fig. 4.3.67).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Fig. 4.3.66: Disposición de los puntos de control para el ensayo de doble gato plano.



Fig. 4.3.67: Ejecución de la zona empleando conjuntamente una sierra de disco y un taladro.



Una vez introducido el segundo gato, y tras el purgado del aire contenido en el interior del mismo hasta llenarlo de fluido hidráulico bombeado, se realizan ciclos de presurizado – despresurizado de los gatos, registrando para cada nivel de presión el desplazamiento de los puntos verticales (Fig. 4.3.68) y horizontales (Fig. 4.3.69) y, por ende, obteniendo las deformaciones asociadas a cada ciclo. De esta manera se grafica la ley σ - ϵ para la porción de fábrica ensayada, de la cuál puede obtenerse el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.

Fig. 4.3.68: Registro del movimiento de los puntos verticales.



Fig. 4.3.69: Registro del movimiento de los puntos horizontales.



En la Tabla 4.3.15 se relacionan las áreas de las dos rozas ejecutadas, y la relación de áreas entre estas y la del gato plano rectangular. Puede apreciarse como el factor k_a promedio alcanza un valor de 0.866.

Tabla 4.3.15: Factores geométricos, $k_{\text{gato-roza}}$, obtenidos para cada uno de los dos gatos planos involucrados en el ensayo GPL-A Doble.

	Factores geométricos, k_a , GPL-A Doble			
	Áreas (cm ²)		Constantes derivadas	
Gato plano superior	A_{roza}	924.00	$K_{\text{gato-roza}}$	0.866
	A_{gato}	800.00		
Gato plano inferior	A_{roza}	924.00	$K_{\text{gato-roza}}$	0.866
	A_{gato}	800.00		

Por su parte, en relación a la constante de calibración de los gatos planos, k_m , se ha adoptado un valor de 0.95 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

En la Fig. 4.3.70 se presentan los resultados obtenidos para los cuatro puntos de control vertical y los dos horizontales tras la realización de 2 ciclos de carga y descarga, considerando como factor geométrico el referido. Los puntos de control 1 y 4, ubicados en ambos extremos, aparentemente presentan mayor rigidez, circunstancia que se relaciona con que sufrieron menor deformación que los centrales a consecuencia de que el gato plano no se expande de forma similar en toda su área, debido a que en los laterales su expansión se ve constreñida por la presencia de las

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

soldaduras. Por ello que dichos puntos no se tuvieron en cuenta en el procesado posterior de los datos.

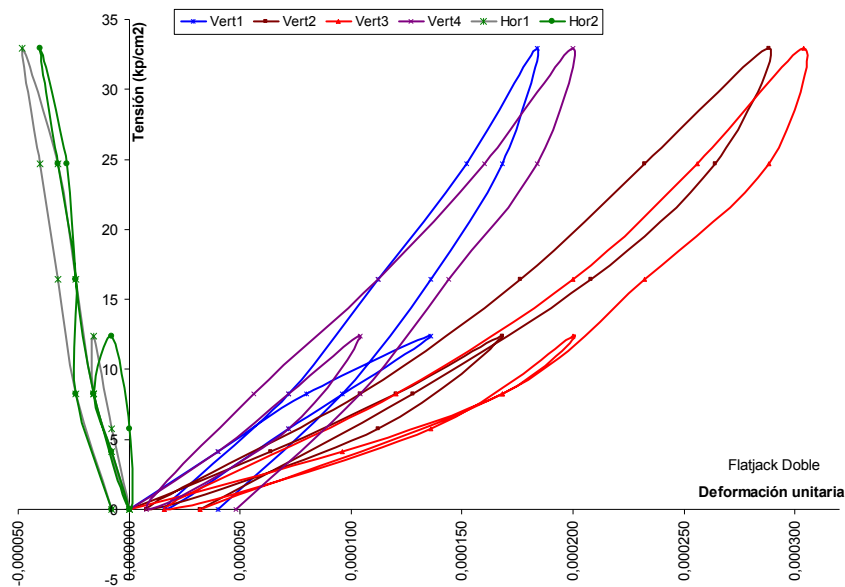


Fig. 4.3.70: Leyes σ - ϵ obtenidas para los cuatro puntos de control vertical (base de medida 200 mm) y para los dos puntos de control horizontal (base de medida 200 mm).

Por su parte, en la Fig. 4.3.71 se presentan las leyes tensión – deformación promedio, obtenidas en el área de ensayo tanto para los puntos de control vertical, a excepción de los n° 1 y 4, como para los horizontales.

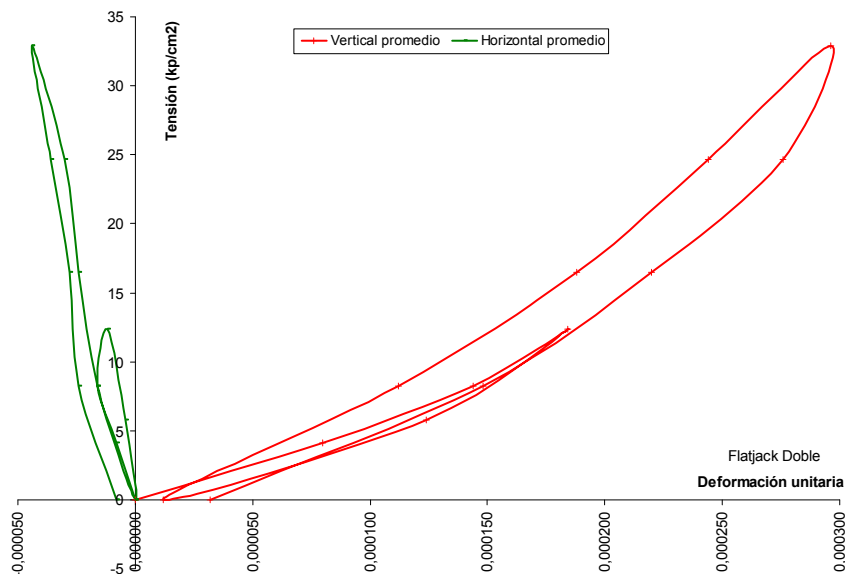


Fig. 4.3.71: Leyes σ - ϵ promedio obtenidas en el ensayo GPL-A Doble.

Puede comprobarse que las curvas referidas presentan un comportamiento relativamente elástico en toda su extensión, si bien reflejan una concavidad que puede interpretarse como que la fábrica está sufriendo un endurecimiento progresivo (mayor rigidez) durante los niveles de tensión introducidos.

En la Tabla 4.3.16 se presentan las características mecánicas obtenidas en cada uno de los ciclos realizados, sin tener en cuenta los puntos de control n° 1 y 4 debido a la justificación relacionada. Cabe llamar la atención a que dichas características mecánicas se corresponden con las obtenidas para un intervalo de presiones $[p_1, p_2]$, por ello que el módulo de deformación obtenido sea un módulo secante. En este sentido, el módulo de deformación promedio en los dos ciclos de

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

presurizado – despresurizado realizados toma un valor de 7,058.3 MPa y el coeficiente de Poisson de 0.14.

Tabla 4.3.16: Características mecánicas, E y ν , obtenidas en el ensayo GPL-A Doble. En la obtención de los valores promedio no se han tenido en cuenta los valores registrados por los puntos de control nº 1 y 4.

Ciclo	p_1^* (kp/cm ²)	p_2^* (kp/cm ²)	E_{p1-p2} (kp/cm ²)				$E_{p1-p2_promedio}$ (kp/cm ²)	$\nu_{p1-p2_promedio}$
			Vert 1	Vert 2	Vert 3	Vert 4		
1	0	10	102.837	68.558	48.970	114.264	58.764	-0,11
2	0	10	146.911	85.698	79.106	171.396	82.402	-0,16
							70.583	-0,14

* p_1 y p_2 indican el intervalo de presiones para el cuál se ha obtenido el módulo de elasticidad secante (E_{p1-p2}) y el coeficiente de Poisson (ν_{p1-p2}).

Para una consulta más detallada del ensayo, se remite al lector al registro 07907, el cuál se adjunta en el Anexo 11.

4.3.6.2 Gatos planos GPL-B (simple y doble).

En la Fig. 4.3.72 se esquematiza la distribución de los dos gatos planos dentro del muro de ladrillo, así como las magnitudes necesarias para obtener el nivel tensional medio en cada uno de los planos donde se ejecutaron los gatos planos, considerando un ángulo de apertura de cargas de 18°.

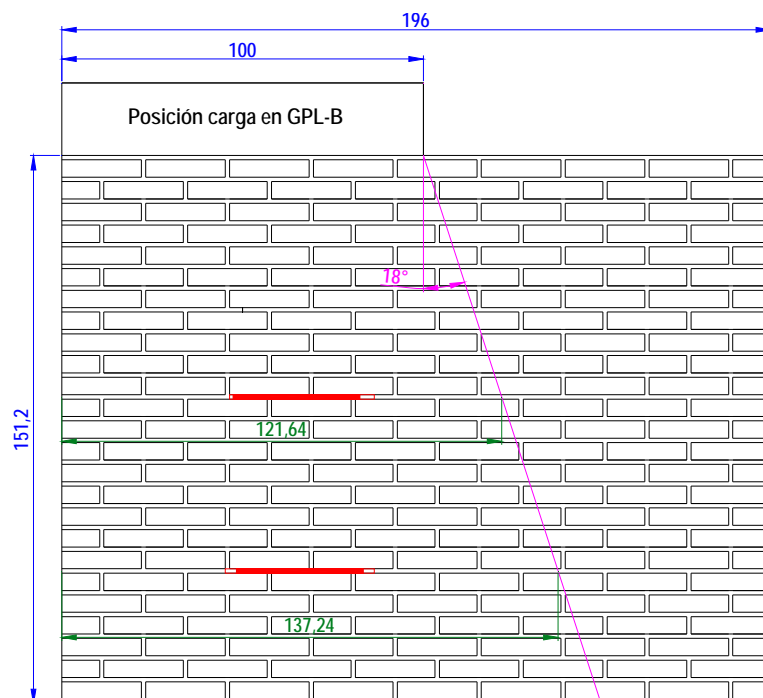


Fig. 4.3.72: Localización de los dos gatos planos (GPL-B) dentro del muro de ladrillo (cotas en cm). El gato plano superior corresponde al ensayo de gato plano simple.

Tras la preparación de la zona de ensayo (pegado de los puntos de control), se procedió a la ejecución del **ensayo de gato plano simple**, con la finalidad de obtener el nivel tensional vertical de compresión en servicio.

Para ello, previamente fue necesario registrar la distancia existente entre los puntos de control antes del corte (Fig. 4.3.73). A continuación, se procedió a llevar a cabo una hendidura, mediante el empleo de una sierra de disco manual, para posterior guiado de la sierra de disco orbital que proporcionará el corte para la posterior inserción del gato plano semioval, de dimensiones 350x260x3.5mm, (Fig. 4.3.74 y 4.3.75). Como consecuencia del corte y de la carga vertical existente, se producirá una relajación del elemento estructural en la zona de ensayo.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido



Fig. 4.3.73: Registro de la distancia existente entre los puntos de control antes del corte.

Fig. 4.3.74: Ejecución de hendidura mediante sierra de disco manual para guiado de la sierra de disco que generará el corte para la inserción del gato.

Fig. 4.3.75: Instante durante el proceso de corte del muro mediante la sierra de disco.

Una vez introducido el gato, y tras el purgado del aire contenido en el mismo, se procederá a aumentar su presión interna mediante bombeo hidráulico hasta que la distancia medida inicialmente, antes de la ejecución de la roza, se recupere (Fig. 4.3.76 y 4.3.77). En ese momento, el nivel tensional en servicio del elemento estructural analizado (σ), se obtendrá corrigiendo dicha presión interna ($P_{cancelación}$) con los coeficientes K_m y K_a ya referidos.

Fig. 4.3.76: Presurizado del gato mediante bombeo.

Fig. 4.3.77: Toma de lecturas de los movimientos de los puntos de control verticales.



Para la obtención del factor corrector geométrico, K_a , se determinó el área de la roza ejecutada (827.16 cm^2) y la de la porción de gato plano interceptado en el espesor del muro (717.51 cm^2). En la Fig. 4.3.78 se ilustra la relación de áreas existente ($K_a=0.867$).

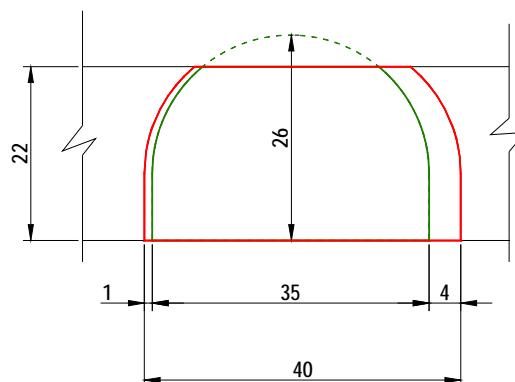


Fig. 4.3.78: Geometría de la roza y del gato plano simple respecto del espesor del muro (cotas en cm.).

Dado que la dimensión del gato plano semioval excedía el espesor del muro (Fig. 4.3.78), fue necesario disponer dos placas de acero de 1 cm de grosor, fijadas a la cara superior e inferior del

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

gato mediante husillos de apriete, para evitar la deformación del gato en dicha área excedente respecto del muro y, por ende, que los resultados del ensayo se viesan alterados por dicha circunstancia.

Por su parte, el coeficiente de corrección relacionado con la parte de la presión proporcionada por la bomba que se consume en deformar el gato plano (inherente a la rigidez propia del gato), K_m , tomó un valor de 0.95 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

Los resultados del ensayo se recogen en el registro Lab0804, el cuál se adjunta en el Anexo 11. No obstante, de dicho registro, se recoge a continuación la Fig. 4.3.79 que ilustra el nivel tensional en servicio existente en el elemento estructural caso de utilizar el coeficiente geométrico $K_a=K_{\text{gato-roza}}$, en este caso dicho valor alcanza los **2.77 MPa**. Igualmente en la Fig. 4.3.80 se representa para varios niveles de tensión proporcionados por el gato plano, la evolución de las deformaciones experimentadas por cada par de puntos de control.

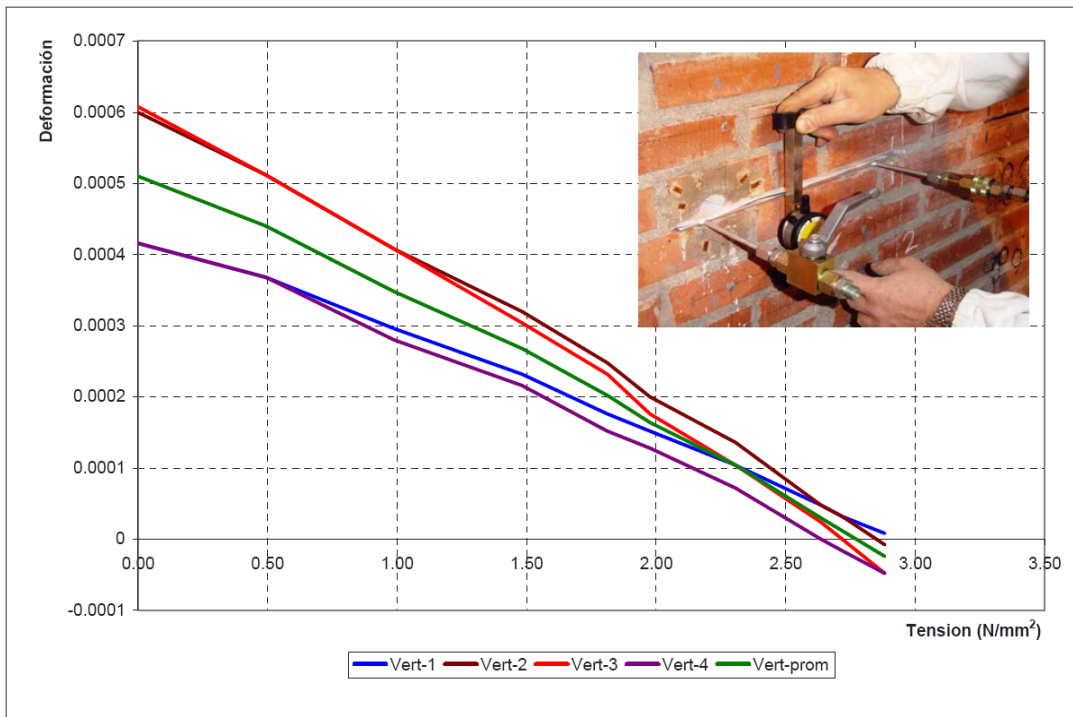


Fig. 4.3.79: Nivel tensional obtenido mediante el ensayo de gato plano simple, empleando como coeficiente corrector geométrico el que liga el área de la roza y el área del gato plano ($K_{\text{gato-roza}}$).

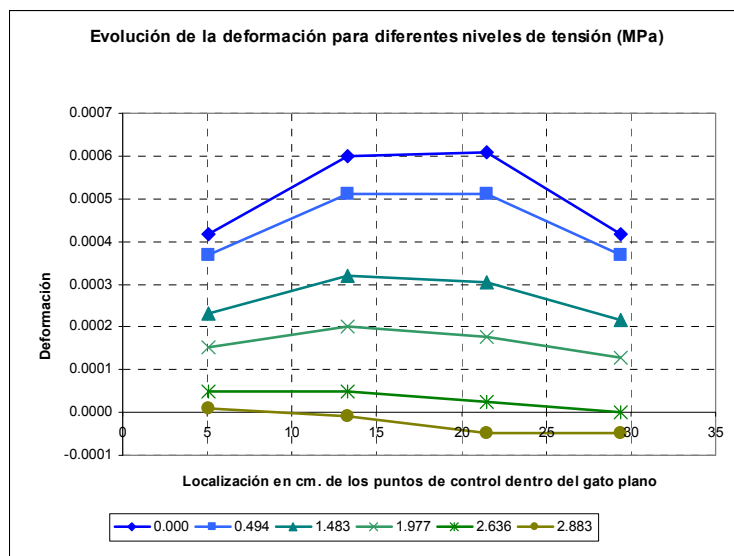


Fig. 4.3.80: Evolución de las deformaciones experimentadas por cada par de puntos de control, para varios niveles de tensión proporcionados por el gato plano.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Como puede comprobarse en las Fig. 4.3.81 y 4.3.82, fue registrada por el transductor de presión una señal de 2.73 voltios, equivalente a una carga mantenida en la cabeza del muro de 55,562.5 kp.

$$P_{vertical} = 20,272 \frac{kp}{voltio} \cdot 2.73 \text{ voltios} + 220 \text{ kp} = 55,562.5 \text{ kp}$$

Por ello que la tensión vertical media en el plano del gato plano es de 2.08 MPa.

$$\sigma_{media} = \frac{55,562.5 \text{ kp}}{121.64 \cdot 22 \text{ cm}^2} = 20.76 \frac{kp}{\text{cm}^2} = 2.08 \text{ MPa (compresión)}$$

Fig. 4.3.81: Vista general de la bomba manual para la puesta en carga del muro.



Fig. 4.3.82: Detalle de la carga (en voltios) introducida (unas 55,5 t.).



En lo que respecta al **ensayo de gato plano doble**, cuyo objetivo es obtener la ley σ - ϵ de la porción de fábrica movilizada, fue necesario, tras disponer los puntos de control pertinentes, ejecutar una segunda roza, paralela con la realizada para el ensayo de gato plano simple (Fig. 4.3.83 - 4.3.84).



Fig. 4.3.83 y 4.3.84: Ejecución de la segunda roza, paralela con la realizada para el ensayo de gato plano simple.

Una vez introducido el segundo gato, y tras el purgado del aire contenido en el interior del mismo hasta llenarlo de fluido hidráulico, se realizan ciclos de presurizado – despresurizado de los gatos, registrando para cada nivel de presión el desplazamiento de los puntos verticales (Fig. 4.3.85) y horizontales (Fig. 4.3.86) y, por ende, obteniendo las deformaciones asociadas a cada ciclo. De

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

esta manera se grafica la ley σ - ϵ para la porción de fábrica ensayada, de la cuál puede obtenerse el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.



Fig. 4.3.85: Registro del movimiento de los puntos verticales.

Fig. 4.3.86: Registro del movimiento de los puntos horizontales.

En la Fig. 4.3.87 se ilustran las áreas de los gatos interceptados en el espesor del muro y las de las rozas ejecutadas para la inserción de los mismos.

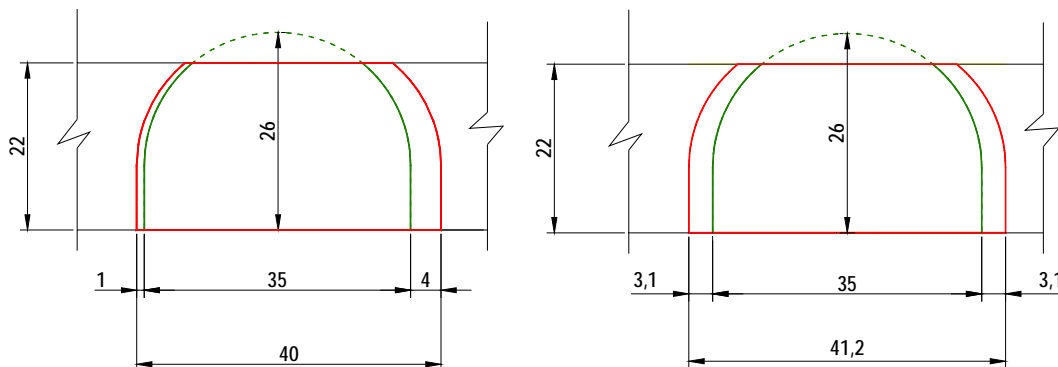


Fig. 4.3.87: Geometría de las rozas y de las porciones de los gatos interceptados en el espesor del muro, tanto en el gato plano superior (izquierda), como en el gato plano inferior (derecha). Cotas en cm.

En la Tabla 4.3.17 se relacionan las áreas de las dos rozas ejecutadas, y la relación de áreas entre éstas y el gato semioval. Puede apreciarse como el factor k_a promedio alcanza un valor de 0.854.

Tabla 4.3.17: Factores geométricos, $k_{\text{gato-roza}}$, obtenidos para cada uno de los dos gatos planos involucrados en el ensayo GPL-B Doble.

Factores geométricos, k_a , GPL-B Doble				
Áreas (cm ²)			Constantes derivadas	
Gato plano superior	A_{roza}	827.16	$K_{\text{gato-roza}}$	0.867
	A_{gato}	717.51		
Gato plano inferior	A_{roza}	853.90	$K_{\text{gato-roza}}$	0.840
	A_{gato}	717.51		

Por su parte, en relación a la constante de calibración de los gatos planos, k_m , se ha adoptado un valor de 0.95 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

En la Fig. 4.3.88 se presentan los resultados obtenidos para los cuatro puntos de control vertical y los dos horizontales tras la realización de 4 ciclos de carga y descarga. Al igual que ocurrió en el GPL-A Doble, los puntos de control 1 y 4, ubicados en ambos extremos, aparentemente presentan mayor rigidez, circunstancia que se relaciona con que sufrieron menor deformación que los centrales a consecuencia de que el gato plano no se expande de forma similar en toda su área,

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

debido a que en los laterales su expansión se ve constreñida por la presencia de las soldaduras. Por ello que dichos puntos no se tuvieron en cuenta en el procesamiento posterior de los datos.

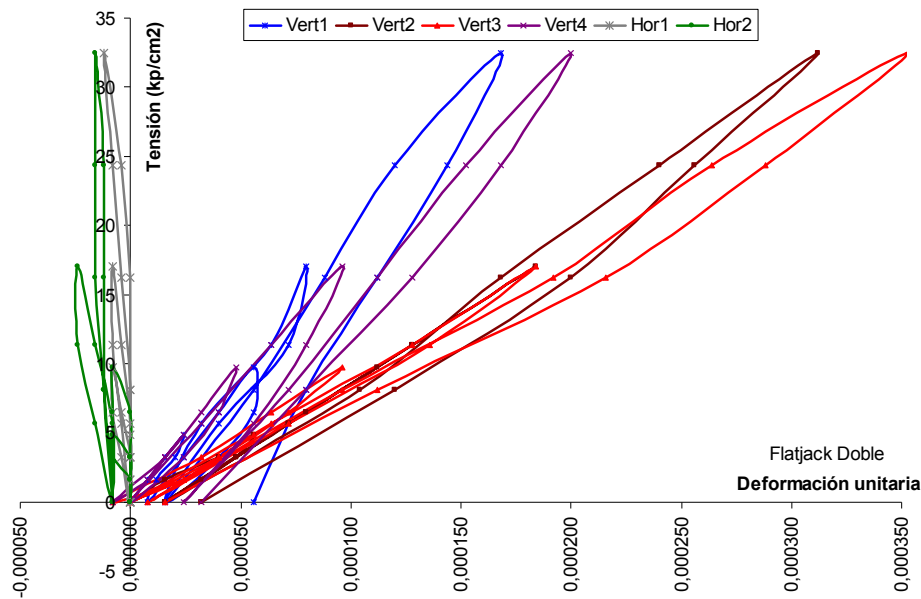


Fig. 4.3.88: Leyes σ - ϵ obtenidas para los cuatro puntos de control vertical (base de medida 200 mm) y para los dos puntos de control horizontal (base de medida 200 mm).

Por su parte, en la Fig. 4.3.89 se presentan las leyes tensión – deformación promedio, obtenidas en el área de ensayo tanto para los puntos de control vertical, a excepción de los n° 1 y 4, como para los horizontales.

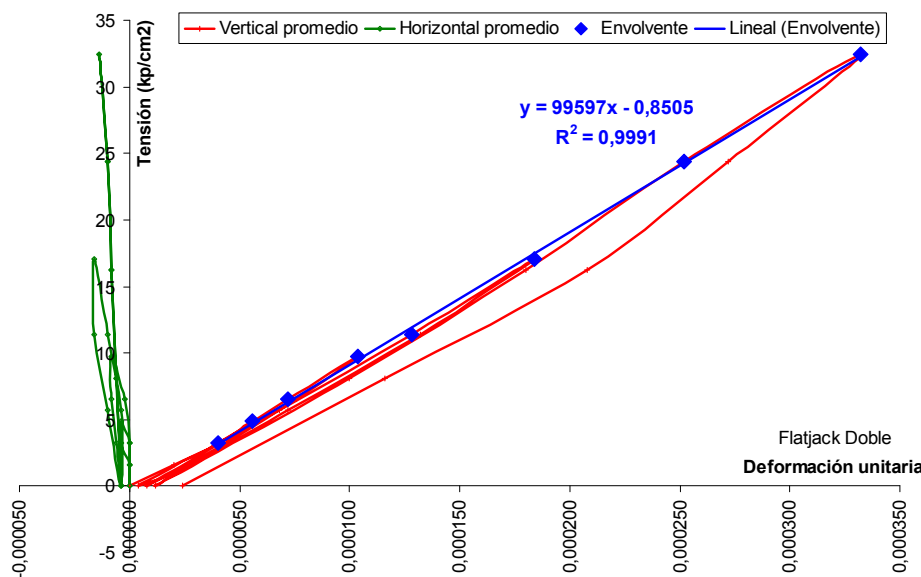


Fig. 4.3.89: Leyes σ - ϵ promedio obtenidas en el ensayo GPL-B Doble.

A partir de las curvas anteriores puede comprobarse que la envolvente de las mismas presenta un comportamiento lineal bastante acusado en toda su extensión. A partir de una regresión lineal en esta rama elástica (Fig. 4.3.89) se obtiene un módulo de deformación de 9,959.7 MPa.

En la Tabla 4.3.18 se presentan las características mecánicas promedio obtenidas en cada uno de los ciclos realizados, sin tener en cuenta los puntos de control n° 1 y 4 debido a la justificación relacionada. Cabe llamar la atención a que dichas características mecánicas se corresponden con las obtenidas para un intervalo de presiones $[p_1, p_2]$, por ello que el módulo de deformación obtenido sea un módulo secante. En este sentido, el módulo de deformación promedio en los

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

cuatro ciclos de presurizado – despresurizado realizados toma un valor de 9,236.3 MPa y el coeficiente de Poisson de 0.05.

Tabla 4.3.18: Características mecánicas, E y ν , obtenidas en el ensayo GPL-B Doble. En la obtención de los valores promedio no se han tenido en cuenta los valores registrados por los puntos de control nº 1 y 4.

Ciclo	p_1^* (kp/cm ²)	p_2^* (kp/cm ²)	E_{p1-p2} (kp/cm ²)				$E_{p1-p2_promedio}$ (kp/cm ²)	$\nu_{p1-p2_promedio}$
			Vert 1	Vert 2	Vert 3	Vert 4		
1	0	4	202.825	81.130	81.130	202.825	81.130	-0,10
2	0	8	202.825	101.413	90.144	162.260	95.779	-0,03
3	0	14	236.629	101.413	88.736	177.472	95.075	-0,05
4	0	20	225.361	106.750	88.185	184.386	97.468	-0,02
							92.363	-0,05

* p_1 y p_2 indican el intervalo de presiones para el cuál se ha obtenido el módulo de elasticidad secante (E_{p1-p2}) y el coeficiente de Poisson (ν_{p1-p2}).

Para una consulta más detallada del ensayo, se remite al lector al registro Lab0805, el cuál se adjunta en el Anexo 11.

4.3.6.3 Ensayo de corte in situ para la determinación de la tensión de adhesión y el coeficiente de fricción de la fábrica de ladrillo.

Previamente a la demolición del muro de ladrillo construido, tras realizarle todos los ensayos que se han expuesto hasta ahora (hole drilling y gatos planos) y los que se exponen después del presente apartado (mini-presurómetro y ensayos acústicos), y pese a que presentaba una degradación significativa a consecuencia de todas las pruebas realizadas, se estimó oportuno tratar de poner en práctica una metodología para estimar la tensión de adhesión, τ_0 , y el coeficiente de fricción de la fábrica, μ .

La metodología empleada consiste en la determinación de la resistencia al corte cuando el estado tensional de compresión in situ se controla durante el ensayo mediante el empleo de dos gatos planos. Igualmente, es necesario controlar el desplazamiento horizontal de la unidad ensayada. La configuración del método se muestra en la Fig. 4.3.90.

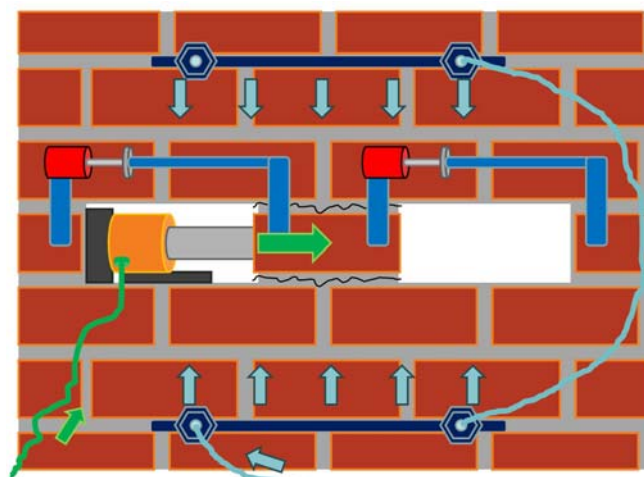


Fig. 4.3.90: Configuración del ensayo.

4.3.6.3.1 Preparación del emplazamiento del ensayo.

Dado que con anterioridad ya se había ejecutado el ensayo de gato plano doble denominado GPL-B Doble (Apartado 4.3.6.2), y ante la carencia de espacio físico en el muro para llevar a cabo dos nuevas rozas que cumplirían con total rigor las exigencias descritas en ASTM C 1531-03 (2003), se decidió llevar a cabo el proceso metodológico en el emplazamiento de dicho ensayo.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Por tanto ya se disponía de las rozas, llevadas a cabo en su momento, para ejecutar dicho ensayo GPL-B Doble.

Se seleccionó una pieza simple de fábrica para realizar la prueba, centrada en alzado respecto la ubicación de los dos gatos planos (Fig. 4.3.91). A continuación, se comenzó con la extracción de las dos piezas dispuestas en los laterales de la seleccionada.



Fig. 4.3.91: Detalle de las dos piezas a remover (rayadas) y de la pieza simple de fábrica escogida para realizar el ensayo (la dispuesta entre las dos anteriores).

Fig. 4.3.92: Perforación del contorno de una de las piezas a extraer.

Para la extracción de dichos ladrillos se empleó un taladro y una barra de uña. Inicialmente se perforó el contorno de las piezas a extraer (Fig. 4.3.92 y Fig. 4.3.93) mediante el taladro. A continuación se hizo palanca con la barra de uña provocando la fractura de las piezas. Finalmente, se acabó de remover el mortero adherido y las porciones de ladrillo residuales de la fractura.

En la Fig. 4.3.94 se muestra el aspecto de la zona de ensayo, previamente a la inserción de los gatos planos y del gato hidráulico horizontal.

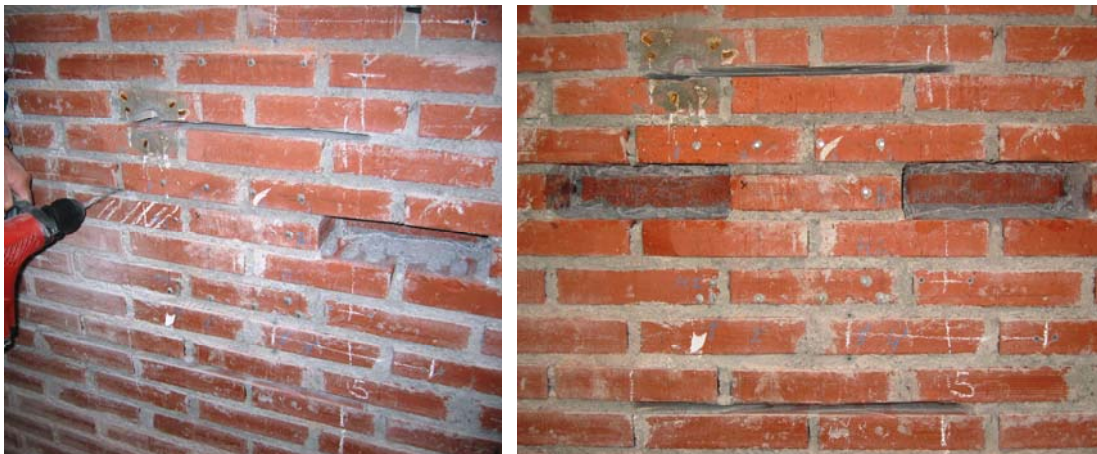


Fig. 4.3.93: Perforación del contorno de la otra de las piezas a extraer.

Fig. 4.3.94: Aspecto de la zona de ensayo una vez preparada, previamente a la inserción de los gatos.

En la Fig. 4.3.95 se muestra un detalle de la configuración del ensayo antes de su inicio. Puede observarse la disposición de:

- Los dos gatos planos. Como es lógico, la magnitud del nivel tensional de compresión normal a la junta, entre el mortero y el ladrillo, tendrá un efecto directo sobre la medida de la resistencia a corte, por ello que sea necesario conocerlo. En la metodología empleada, dicho nivel tensional perpendicular a la interfase se introduce mediante el empleo de dos gatos planos y, por ende, la tensión normal es conocida.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

- El gato hidráulico horizontal, con una serie de placas de acero para proceder a su puesta en carga. Dicho dispositivo es el encargado de introducir la fuerza paralela a la junta entre el mortero y el ladrillo, horizontal en este caso, que motiva los mecanismos de corte. Debido al reducido tamaño de los gatos y para tener mayor capacidad de carga, se dispusieron dos gatos hidráulicos en paralelo, poniendo cuidado en su colocación para proporcionar una fuerza horizontal centrada respecto de la pieza a ensayar. En estos dispositivos una señal de presión registrada de 1 voltio equivale a 7,200 kp:

$$1000 \frac{kp}{cm^2} \approx 4 \text{ voltios} \rightarrow 1 \text{ voltio} \approx 250 \frac{kp}{cm^2}$$

$$1 \text{ voltio} \approx 250 \frac{kp}{cm^2} \cdot 14,4 cm^2 \cdot 2 = 7,200 kp$$

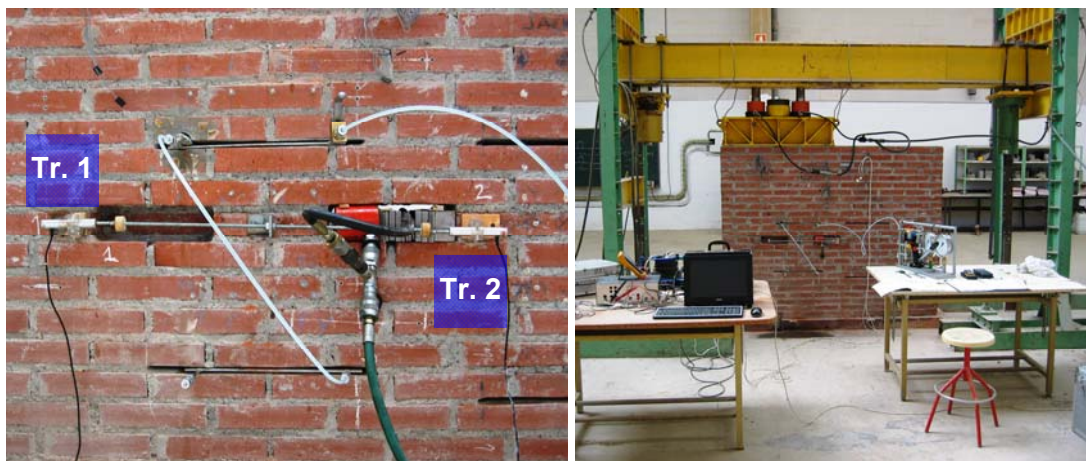


Fig. 4.3.95: Detalle de la configuración del ensayo antes de su inicio. No se aprecian agrietamientos verticales.

Fig. 4.3.96: Perspectiva general del muro bajo el pórtico de carga.

- Dos transductores electrónicos de desplazamiento, como se muestra también en la Fig. 4.3.95, dispuestos para controlar el movimiento horizontal de la pieza (nominados como 1, registra acortamientos, y 2, registra alargamientos).

Finalmente, en la Fig. 4.3.96 se ofrece una perspectiva general del muro bajo el pórtico de carga.

El ensayo consistió en:

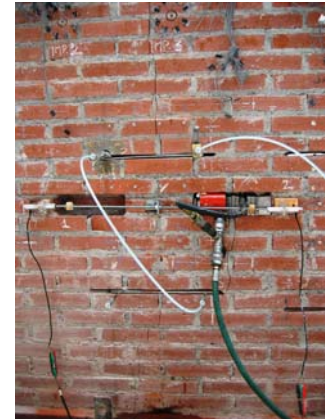
- 1.- Con presión nula dentro de los dos gatos planos y con la válvula de su circuito cerrada, se incrementó la presión en los gatos de carga horizontal gradualmente, registrando los desplazamientos de la unidad de ladrillo ensayada debidos a los pequeños incrementos de carga horizontal. Cuando la traba entre la pieza y la junta de mortero se rompa la unidad comenzará a desplazarse continuamente bajo una carga constante horizontal. Ésta representa la máxima carga horizontal para este nivel de tensiones normales de compresión (en este caso 0 kp/cm^2).
- 2.- Se incrementó la presión en los gatos planos para inducir el siguiente nivel de tensiones normales de compresión deseado (5 kp/cm^2), repitiendo el proceso de carga horizontal hasta alcanzar la máxima carga horizontal para este nivel de tensiones normales de compresión.

En la Fig. 4.3.97 puede comprobarse el nivel tensional de compresión de 5 kp/cm^2 comunicado al muro mediante los dos gatos planos. Durante el proceso de incremento de la fuerza horizontal se produjo un agrietamiento vertical que supuso la ruptura vertical completa del muro (Fig. 4.3.98).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Fig. 4.3.97: Nivel tensional de compresión introducido por los gatos planos: 5 kp/cm^2 .

Fig. 4.3.98: Durante el proceso de incremento de la fuerza horizontal se produjo un agrietamiento vertical que supuso la ruptura vertical del muro.



Dicho agrietamiento se extiende desde coronación del muro hasta el gato plano superior (Fig. 4.3.99), del gato plano superior al hueco en el que se aloja el gato hidráulico horizontal, de éste al gato plano inferior, y del gato plano inferior a la base del muro (Fig. 4.3.100).



Fig. 4.3.99 y 4.3.100: Detalles de los agrietamientos verticales promovidos.

Debido al referido deterioro que acumulaba el muro objeto de ensayo, fruto de la extensa campaña experimental previa, se provocó el colapso del mismo. Pese a todo, se continuó con el ensayo para poner en práctica el proceso metodológico iniciado.

3.- Se repitió, como se ha expuesto, la secuencia para diferentes niveles de tensión normal a la junta (en este caso 10, 15, 20 y 30 kp/cm^2), determinando la máxima carga horizontal asociada a cada uno de los niveles de tensión normal de compresión.

En la Fig. 4.3.101 se justifica el nivel de tensión normal de 10 kp/cm^2 alcanzado con los gatos planos. Mientras que en la Fig. 4.3.102 se ofrece una panorámica general durante el incremento de carga del gato hidráulico horizontal, para el nivel tensional de compresión referido.

Fig. 4.3.101: Nivel tensional de compresión introducido por los gatos planos: 10 kp/cm^2 .

Fig. 4.3.102: Panorámica general del ensayo durante el incremento de carga del gato hidráulico horizontal, para el nivel tensional de compresión referido.

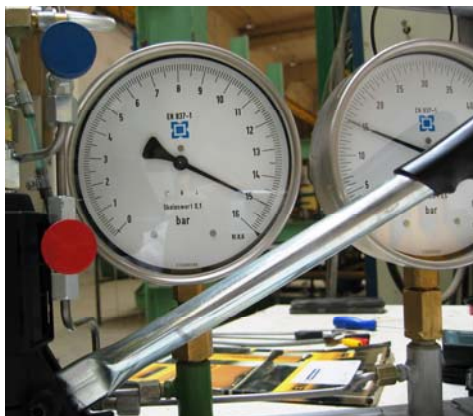


Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En la Fig. 4.3.103 se justifica el nivel de tensión normal de 15 kp/cm² alcanzado con los gatos planos. A su vez, la Fig. 4.3.104 muestra la amplificación de los agrietamientos verticales generados con anterioridad.

Fig. 4.3.103: Nivel tensional de compresión introducido por los gatos planos: 15 kp/cm².

Fig. 4.3.104: Amplificación de los agrietamientos verticales a ese nivel de carga vertical.



En la Fig. 4.3.105 se justifica el nivel de tensión normal de 30 kp/cm² alcanzado con los gatos planos. A su vez, la Fig. 4.3.106 muestra la amplificación de los agrietamientos verticales generados con anterioridad, una vez finalizado el ensayo.

- 4.- Una vez acabado el ensayo, se liberó la presión en el gato horizontal, después de que se habría tomado la medida final de desplazamiento, procediendo a su extracción. A continuación, se liberó la presión en los gatos planos, extrayéndolos, al igual que los dispositivos para medida de desplazamientos.

Finalmente, caso de realizar dicho ensayo en una fábrica real, in situ, cualquier hueco o hendidura creados durante la preparación del emplazamiento deberían de rellenarse empleando las piezas extraídas originarias o bien unas similares, y un mortero, u otro material, de coloración y resistencia similar a la del mortero original.

Fig. 4.3.105: Nivel tensional de compresión introducido por los gatos planos: 30 kp/cm².

Fig. 4.3.106: Amplificación de los agrietamientos verticales una vez finalizado el ensayo.



En las Fig. 4.3.107 - 4.3.110 se presentan los resultados del ensayo realizado. La Fig. 4.3.107 recoge la evolución de la carga introducida por el gato hidráulico horizontal para cada uno de los niveles tensionales verticales comunicados por los gatos planos.

En la Fig. 4.3.108 se aprecia como efectivamente se ha producido el colapso vertical del muro, dado que el transductor 2 (registra tracciones) se mueve de forma significativamente mayor que el transductor 1. Dicho movimiento no está relacionado con el deslizamiento del ladrillo, ya que en ese caso los desplazamientos de ambos transductores debieran de ser relativamente parecidos. El movimiento se debe a que lo que se mueve, hacia la derecha de la imagen Fig. 4.3.109, es la reacción (parte derecha del muro) sobre la que está reaccionando el gato horizontal, a consecuencia del agrietamiento vertical que ha seccionado, literalmente, el muro.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Fig. 4.3.107: Evolución de la carga introducida por el gato hidráulico horizontal. Se indica, para cada ciclo de carga, el nivel de tensión de compresión vertical existente, introducido por los gatos planos (P_{gp}).



Igualmente, en la Fig. 4.3.108 se aprecia muy bien, para cada nivel tensional vertical, el instante en que se produce un crecimiento muy rápido del desplazamiento registrado por los transductores (sobre todo por el nº 2). En condiciones normales de ensayo, en un muro sano sin el agrietamiento vertical generado, dado su deterioro acumulado, dicho crecimiento de los desplazamientos correspondería con el deslizamiento del ladrillo (y debieran de ser significativamente parecidos los acortamientos registrados por el transductor 1 y los alargamientos registrados por el 2), debiendo en ese momento de cesar la aplicación de la carga horizontal para, a continuación, incrementar el nivel tensional vertical y repetir nuevamente el proceso.

Fig. 4.3.108: Evolución de los desplazamientos registrados por los transductores (Fig. 4.3.109). Se indica, para cada ciclo de carga, el nivel de tensión de compresión vertical existente, introducido por los gatos planos (P_{gp}).

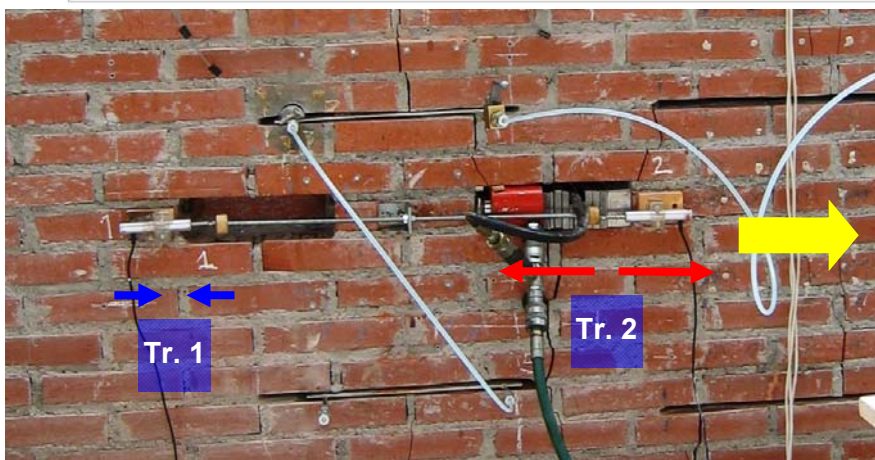
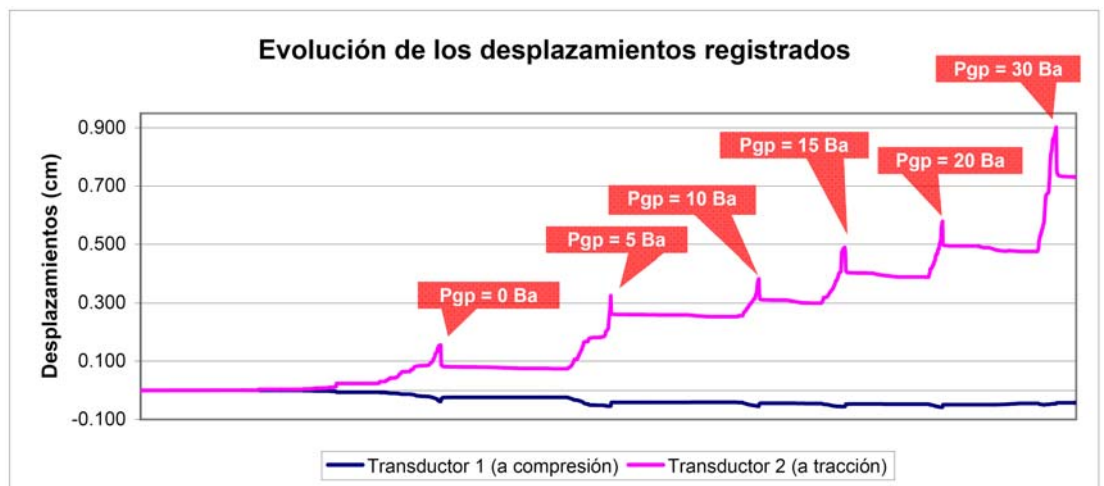
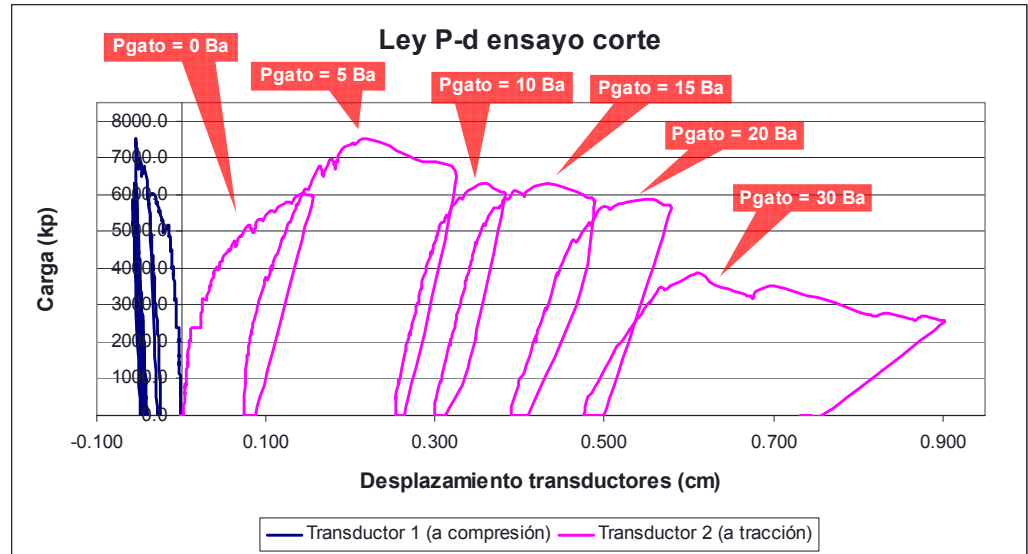


Fig. 4.3.109: A consecuencia del agrietamiento vertical la parte derecha del muro se desplaza hacia la derecha, debido a la reacción del gato de émbolo horizontal, motivando unas tracciones en el transductor 2 significativamente mayores que las compresiones registradas en el transductor 1.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Fig. 4.3.110: Ley carga horizontal – desplazamiento registrada. Se indica, para cada ciclo de carga, el nivel de tensión de compresión vertical existente una vez introducido por los gatos planos.



La Fig. 4.3.110 muestra la ley carga horizontal – desplazamiento, para cada uno de los dos transductores. En condiciones normales de ensayo, de dicha gráfica podría extraerse, para cada nivel de tensión vertical, la fuerza horizontal bajo la que la unidad de ladrillo comienza a desplazarse de forma continuada.

En este caso, pese a los inconvenientes surgidos con los agrietamientos verticales aparecidos a los que se viene haciendo constante referencia, los valores de dichas fuerzas horizontales, P_{hi} , para las que la unidad comienza a desplazarse de forma continuada, para cada nivel de tensión vertical, se relacionan en la Tabla 4.3.19.

Tabla 4.3.19: Fuerza horizontal para la que la unidad comienza a desplazarse de forma continuada (P_{hi}), tensión tangencial generada (τ_i), tensión vertical introducida por el gato plano (σ_{ff}) y el corregido (σ_v).

P_{hi} (kp)	τ_i (kp/cm ²) ^{1,2}	σ_{ff} (kp/cm ²)	σ_v (kp/cm ²) ³
6,015.60	13.0	0.0	0.0
7,525.00	16.3	5.0	8.5
6,321.00	13.7	10.0	17.0
6,291.50	13.6	15.0	25.5
5,873.80	12.7	20.0	34.0
3,869.20	8.4	30.0	51.0

¹ El área de la junta horizontal definida entre el ladrillo, supuesto macizo, y el mortero es $A = 22 \times 10.5 \text{ cm}^2 = 231 \text{ cm}^2$, y habría que multiplicarla por 2 dado que existe mortero tanto en la cara superior como en la inferior. En este caso, dada la naturaleza del ladrillo perforado empleado, sería más correcto tener en cuenta el área neta de mortero de la red maciza. Una estimación más afinada debiera de tener en cuenta, a su vez, el rozamiento del canto oculto del ladrillo con la pieza existente en la otra cara del muro.

² Obviamente los valores obtenidos para el índice medio de la resistencia a corte en la junta de mortero, τ_i , no son representativos de un ensayo de estas características, dado que a mayor nivel de tensión vertical, mayor debiera ser la fuerza horizontal para provocar el deslizamiento de la pieza y, por ende, mayor sería la tensión tangencial asociada. En el ensayo realizado esto no ocurre en tanto que, debido al deterioro acumulado por el muro, se generaron fuertes agrietamientos verticales en el mismo, de forma que la fuerza horizontal obtenida para cada nivel de tensión normal se relaciona con la necesaria para que la parte derecha del muro se desplace de forma continuada, no para que lo haga la pieza aislada de ladrillo sometida a ensayo.

³ $\sigma_v = 1.7 \cdot \sigma_{ff}$. Donde σ_v es la tensión normal sobre la pieza de ensayo y σ_{ff} la tensión aplicada por el gato plano a la fábrica (ASTM C 1531-02 2002)

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Finalmente, podría representarse el gráfico $\sigma_v - \tau_i$, Fig. 4.3.111, en el que cada punto correspondería a uno de los ciclos del ensayo realizado. Partiendo de éste, podría estimarse:

- El coeficiente de fricción de la fábrica, μ , cuyo valor corresponde con el de la pendiente de la recta de regresión que mejor se ajuste a la nube de puntos (envolvente de Mohr-Coulomb de la interfase mortero-ladrillo).
- El ángulo de rozamiento interno, $\Phi = \arctan(\mu)$.
- El índice de resistencia a corte en la junta a un nivel tensional normal cero, o tensión de adhesión, o cohesión, τ_0 , que se calcula como la intersección de la línea de regresión en el eje vertical (ordenada en el origen).
- La estimación de la resistencia al corte a otros niveles de tensión normal de compresión se calcula empleando la relación siguiente:

$$\tau_i = \tau_0 + \mu \cdot \sigma_v$$

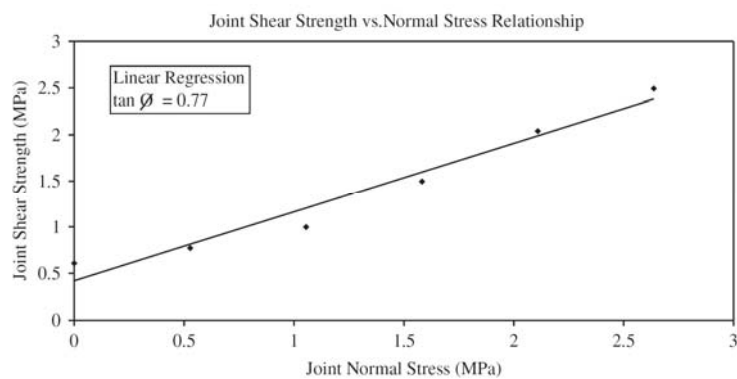


Fig. 4.3.111: Gráfico $\sigma_v - \tau_i$, del que puede obtenerse el coeficiente de fricción de la fábrica, μ , y la tensión de adhesión, τ_0 (Schuller 2003).

4.3.7 Ensayos mini-presurométricos en el muro de ladrillo.

En el muro de ladrillo fue realizado un ensayo mini-presurométrico, cuya posición se ilustra en la Fig. 4.3.112. Como puede comprobarse se alcanzó una profundidad de perforación de 45 cm, cuyo proceso se ilustra en la Fig. 4.3.113. Un detalle de los materiales obtenidos durante el proceso de perforación se presenta en la Fig. 4.3.114.

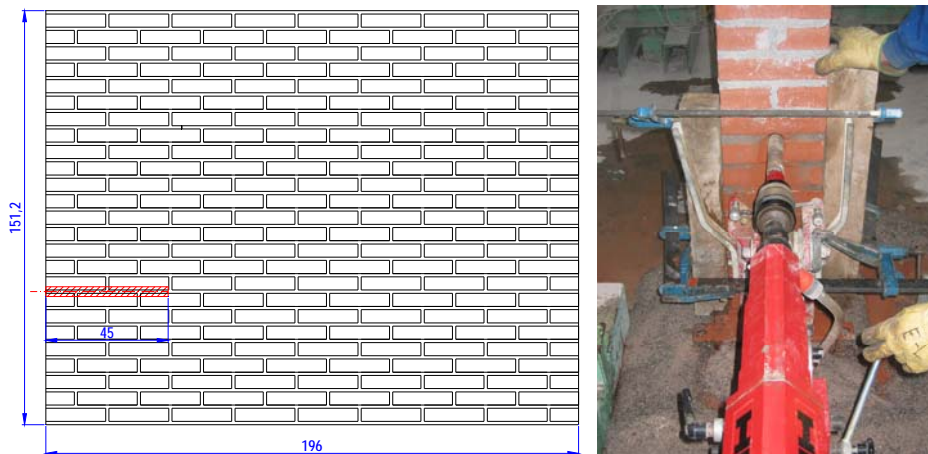


Fig. 4.3.112: Ubicación de la sonda mini-presurométrica dentro del alzado del muro de sillería.

Fig. 4.3.113: Instante tomado durante la ejecución de la perforación en el muro de ladrillo.

Una vez ejecutada la perforación y montado el dispositivo de ensayo como se ha referido en el capítulo 3.4, “Materiales y procedimientos empleados en los ensayos con técnicas mini-presurométricas”, se pasó a introducir la sonda (Fig. 4.3.115) y, posteriormente, a realizar el

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

ensayo, comunicando una presión de forma creciente y registrando el volumen inyectado en dicha operación.



Fig. 4.3.114: Detalle de los materiales obtenidos fruto de la perforación. Puede apreciarse que en la misma se ha movilizado tanto ladrillo como mortero.

Fig. 4.3.115: Instante tomado durante la introducción de la sonda en la perforación.

En la Tabla 4.3.20 se relacionan los incrementos volumétricos obtenidos durante el ensayo para cada nivel de presión introducido. Igualmente, en las Fig. 4.3.116 y 4.3.117 se representa la curva de expansión obtenida tras 15", 30" y 60" de introducir el nivel de presión correspondiente. Puede apreciarse como para niveles bajos de presión (inferiores a 2 Ba) la sonda todavía se está inflando sin haber contactado con las paredes de la perforación, circunstancia que se aprecia tanto en la variación volumétrica a diferentes tiempos, como en que aún no se ha alcanzado la rama pseudo-elástica.

Tabla 4.3.20: Incrementos volumétricos obtenidos en el ensayo mini-presurométrico realizado en la fábrica de ladrillo.

Presión (Ba)	Incrementos de volumen (cm ³)		
	15"	30"	60"
0	0	0	0
0.5	35	37.5	40
1	65	85	85
1.5	100	103	104
2	114	114	115
2.5	120	120	120
3	125	125	125
3.5	129	129	130
4	132.5	132.5	132.5
4.5	134	134	134
5	136	136	136
6	138	138	138
7	140	140	140
8	141	141	141
9	142.5	142.5	142.5
10	144	144	144
11	145	145	145
12	146	146	145
13	147	147	147
14	148	148	148
15	149	149	149
16	150	150	150
18	150	150	150
20	152	152	152

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

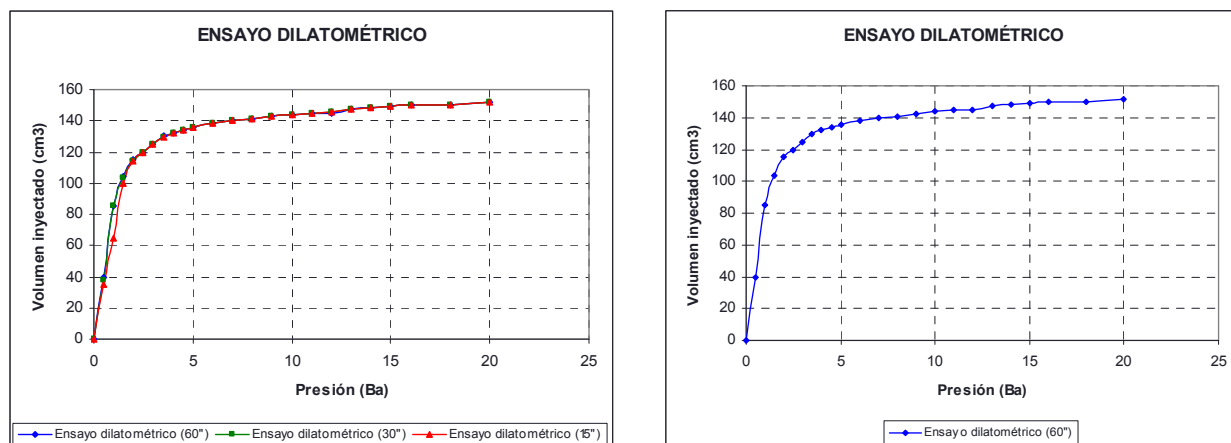


Fig. 4.3.116 y 4.3.117: Curvas de expansión de la sonda mini-presiométrica empleada en el ensayo a diferentes tiempos.

En base a la gráfica obtenida puede apreciarse que no pudo alcanzarse la plastificación del área de ensayo y, por ende, no pudieron estimarse las características mecánicas (módulo presurométrico) relacionadas.

4.3.8 Ensayos sínicos en componentes de ladrillo.

El objetivo general de este apartado fue tratar de incrementar el conocimiento experimental que se dispone, en relación con la evaluación dinámica de las obras de fábrica construidas en laboratorio, a partir de las técnicas de auscultación sínica e inspección ultrasónica. La campaña experimental fue desarrollada, en colaboración, por la Universidad de Cantabria y el Instituto Tecnológico de la Construcción de la Comunidad Valenciana (Aidico). En este sentido, con fecha 29/11/2007 en el Laboratorio de Estructuras de la UC se llevó a cabo la:

- Caracterización acústica de morteros similares a los empleados en la construcción de las estructuras de fábrica de ladrillo (muretes y muro) mediante inspección ultrasónica.
- Auscultación sínica y ultrasónica de 4 muretes de ladrillo de dimensiones aproximadas 46 x 10.5 x 52 cm (largo x ancho x alto). Comparación de los resultados con los obtenidos mediante un modelo simplificado de elementos finitos.
- Caracterización sínica y ultrasónica de muro de fábrica de dimensiones 196 x 22 x 151.2 cm (largo x ancho x alto).
- Variación de módulos de elasticidad (E) frente a cargas crecientes.

4.3.8.1 Caracterización mediante inspección ultrasónica de materiales formes de la fábrica de ladrillo: mortero y ladrillo.

Este apartado se refiere a las medidas por ultrasonidos realizadas sobre los materiales constituyentes de las fábricas de ladrillo construidas en laboratorio.

En lo que respecta al **mortero**, la inspección ultrasónica se efectuó sobre probetas de dimensiones aproximadas de 160 x 40 x 40 mm (largo x ancho x alto), Fig. 4.3.118.

Las medidas corresponden a la estimación de las velocidades longitudinal y transversal con una frecuencia de trabajo de 500 kHz y utilizando los siguientes medios (Fig. 4.3.119):

- Equipo Panametrics 5058PR para la generación y recepción de pulsos ultrasónicos de alto voltaje.
- Transductores de 500 kHz: V101 y V151 de Panametrics.
- Osciloscopio Tektronics TDS3012.
- Gel acoplante para cada tipo de onda.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

- Portátil para digitalización y análisis de datos.



Fig. 4.3.118: Caracterización de morteros similares a los empleados en muros de fábrica de ladrillo, probetas de dimensiones aproximadas 160 x 40 x 40 mm (largo x ancho x alto), mediante inspección ultrasónica.

Fig. 4.3.119: Detalle general de los equipos empleados.

Las medidas⁴ realizadas sobre mortero y ladrillo se resumen en la Tabla 4.3.21.

Tabla 4.3.21: Medidas ultrasónicas realizadas sobre las probetas de mortero y sobre los ladrillos.

Descripción	Dimensión (mm)	t_p (μ s)	V_p (m/s)	t_s (μ s)	V_s (m/s)
Mortero	161	55.87	2881.690	95.87	1679.357
Ladrillo	106.2 (tizón)	31.2	3403.846	52.8	2011.364

En un sólido infinito, elástico e isótropo, la relación entre las velocidades de onda P y S es función del coeficiente de Poisson, ν :

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\cdot\nu}{2\cdot(1-\nu)}} \rightarrow \nu = \frac{2\cdot\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 - 1}{2\cdot\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 - 2} \quad (4.3.1)$$

A partir de la ecuación 4.3.1 y mediante la relación de velocidades de propagación (Tabla 4.3.21), puede hallarse el coeficiente de Poisson, $\nu = 0.24$ para el mortero y $\nu = 0.23$ para las unidades cerámicas.

Por su parte, en un sólido infinito, elástico e isótropo, conocido ν , la densidad, ρ , y la velocidad de la onda S, puede obtenerse el módulo de rigidez transversal, G, a partir de la siguiente expresión:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\cdot\rho\cdot(1+\nu)}} \rightarrow G = V_s^2 \cdot \rho \quad (4.3.2)$$

Igualmente, conocida la velocidad la onda P, V_p , la densidad, ρ , y el coeficiente de Poisson, ν , puede estimarse, para un sólido infinito, elástico e isótropo, el valor del módulo de elasticidad, E:

$$V_p = \sqrt{\frac{E\cdot(1-\nu)}{\rho\cdot(1+\nu)\cdot(1-2\cdot\nu)}} \rightarrow E = V_p^2 \cdot \frac{\rho\cdot(1+\nu)\cdot(1-2\cdot\nu)}{(1-\nu)} \quad (4.3.3)$$

En este sentido, considerando una densidad aparente para el mortero de 2.40 t/m³ y de 1.70 t/m³ para el ladrillo, en base a las velocidades obtenidas experimentalmente (Tabla 4.3.21), al coeficiente de Poisson estimado para cada material y empleando las ecuaciones 4.3.2 y 4.3.3 referidas, pueden calcularse los Módulos Elásticos dinámicos (Tabla 4.3.22).

⁴ Los subíndices “p” hacen referencia a la onda primaria, mientras que los “s” a la onda secundaria.

Tabla 4.3.22: Módulos elásticos obtenidos para el mortero y el ladrillo.

Descripción	G (GPa)	E (GPa)
Mortero	6.77	16.83
Ladrillo	6.877	16.94

4.3.8.2 Auscultación sónica y ultrasónica de muretes de fábrica de ladrillo.

4.3.8.2.1 Auscultación ultrasónica de muretes de fábrica.

La caracterización de los muretes (dimensiones aproximadas de 46 x 10.5 x 52 cm, largo x ancho x alto) se ha realizado con una inspección ultrasónica en cada fila de ladrillos de los muros atravesando alternativamente una o dos llagas de mortero (Fig. 4.3.120).



Fig. 4.3.120: Instante captado durante la inspección ultrasónica en cada fila de ladrillos de los muretes, en este caso atravesando una llaga de mortero.

Con las medidas tomadas, relacionadas en la Tabla 4.3.23, se ha obtenido un valor promedio de velocidad de propagación (Tabla 4.3.24).

Tabla 4.3.23: Medidas obtenidas fruto de la inspección ultrasónica en las hiladas de la fábrica de ladrillo.

Tiempo Onda P(μs)	Distancia (mm)	V _p (km/s)	Tiempo Onda S(μs)	V _s (km/s)	V _s / V _p	Comentarios
134	0.46	3.46	266	1.74	0.50	1 llaga
136	0.46	3.40	232	2.00	0.59	2 llagas
132	0.46	3.51	274	1.69	0.48	1 llaga
136	0.46	3.40	284	1.63	0.48	2 llagas
136	0.46	3.40	258	1.79	0.53	1 llaga
136	0.46	3.41	238	1.95	0.57	2 llagas
128	0.46	3.62	246	1.88	0.52	1 llaga
		3.49±0.08				1 llaga
		3.40±0.03				2 llagas

Tabla 4.3.24. Resumen de las velocidades obtenidas para la onda primaria y secundaria.

Dimensión (mm)	t _p (μs)	V _p (m/s)	t _s (μs)	V _s (m/s)
460	132	3468	254	1811

A partir de una estimación de densidad aparente de la fábrica, $\rho = 2.1 \text{ t/m}^3$, y mediante la relación de velocidades de propagación, puede hallarse (ecuación 4.3.1) el coeficiente de Poisson, $\nu = 0.31$.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Por último, en base a las ecuaciones 4.3.2 y 4.3.3 pueden obtenerse los Módulos Elásticos dinámicos para el conjunto del murete de ladrillo (Tabla 4.3.25).

Tabla 4.3.25. Módulos elásticos estimados para el conjunto del murete.

Descripción	G (GPa)	E (GPa)
Conjunto del murete (1 o 2 llagas)	6.9	18.1

4.3.8.2.2 Auscultación sónica de muretes de fábrica.

La caracterización sónica ha consistido en la adquisición de las ondas sónicas en 4 puntos de los muretes de fábrica (Fig. 4.3.121 y 4.3.122).



Fig. 4.3.121 y 4.3.122: Instantes de la auscultación sónica mediante equipo sónico multicanal.

Con el objetivo de excitar modos propios de la estructura bajo análisis, el procedimiento de medida consistió en la realización de 3 tipos de impactos en cada uno de los tres muretes investigados, con 3-4 repeticiones de cada tipo de impacto para observar la repetitividad en las medidas (el motivo de llevar a cabo esta repetición se debe a que el procedimiento es estocástico donde la aleatoriedad se manifiesta en aspectos como en la forma y fuerza del impacto).

En la Tabla 4.3.26 se indica la localización de las tres zonas de impacto en cada murete.

Tabla 4.3.26: Auscultación sónica de muretes de ladrillo. Localización de las tres zonas de impacto en cada murete

Denominación	Localización
Impacto Central	En el centro de la cara expuesta en la Fig. 3.4.122 (cara de 46 x 52 cm, largo x alto)
Impacto Superior	En el centro de la capa de regularización de mortero
Impacto Transversal	En el centro de la altura del Muro (cara de 10.5 x 52 cm, ancho x alto), Fig. 3.4.123

Fig. 4.3.123: Instante de la auscultación sónica mediante equipo sónico multicanal con impacto tipo “Impacto Transversal”.



Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En las tres páginas siguientes se compendian los resultados obtenidos en la auscultación sónica de muretes de fábrica.

Para cada murete se presenta, en primer lugar, las señales registradas por los cuatro receptores dispuestos, en cada uno de los tres tipos de impacto realizado (Impacto Central, Superior y Transversal). A continuación, se presenta el espectro de frecuencia-amplitud para cada uno de los tres tipos de impacto realizado.

A continuación (Tablas 4.3.27 - 4.3.29), se muestran los valores de las primeras frecuencias de resonancia representativas, las cuáles han sido extraídas de los espectros de frecuencia-amplitud referidos.

Tabla 4.3.27: Contenido espectral (Frecuencias en Hz) del murete 2

Sensor	Impacto Central	Impacto Superior	Impacto Transversal
Ch2	366	1099	654
Ch3	1587	-	-
Ch4	2563	2319	2808
Ch5	3662	3662	4028-7209

Tabla 4.3.28: Contenido espectral (Frecuencias en Hz) del murete 3

Sensor	Impacto Central	Impacto Superior	Impacto Transversal
Ch2	244	-	610
Ch3	1587	1567	1465
Ch4	2441	2517	-
Ch5	3662	3416	3296-3281

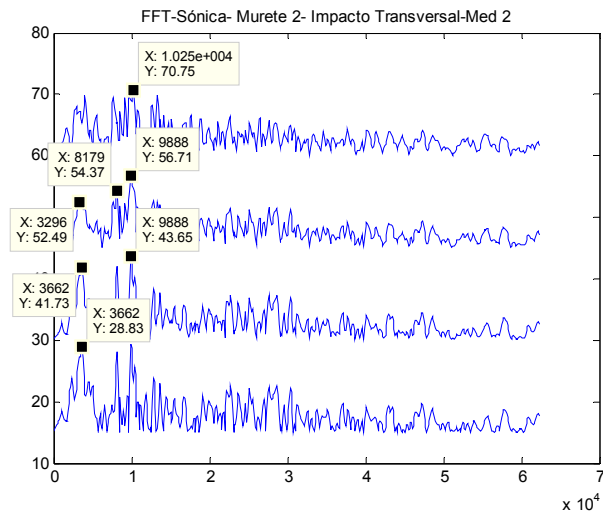
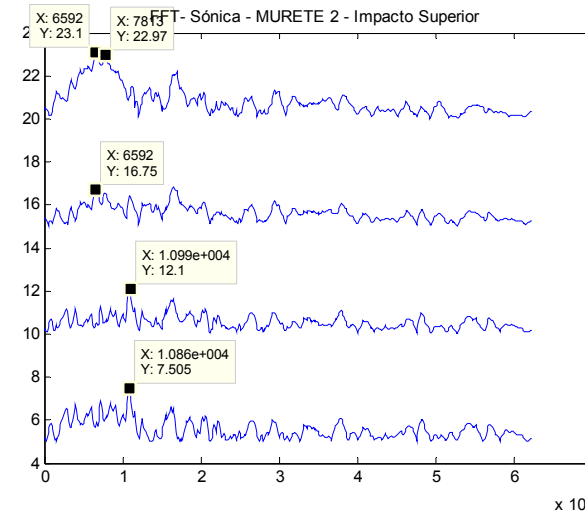
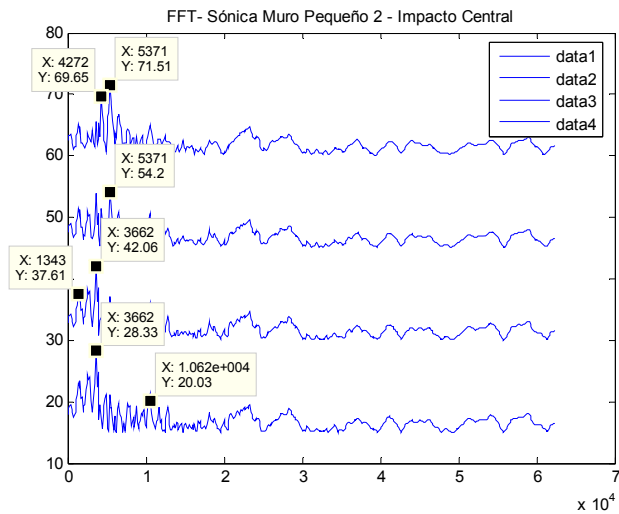
Tabla 4.3.29: Contenido espectral (Frecuencias en Hz) del murete 4

Sensor	Impacto Central	Impacto Superior	Impacto Transversal
Ch2	366	244	732
Ch3	1587	610	3052
Ch4	2808	2686	4751
Ch5	3419	-	-

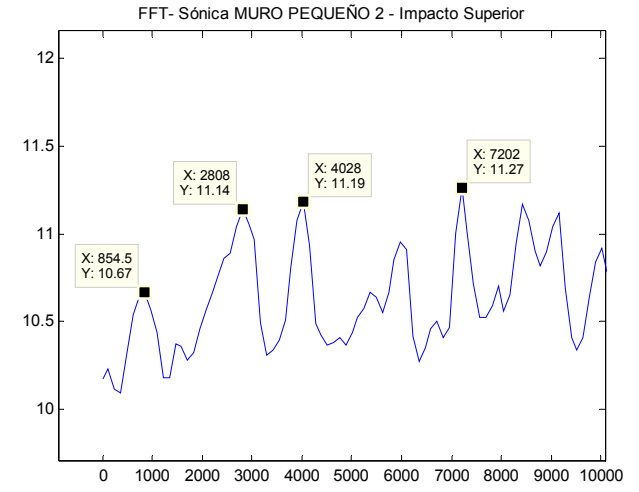
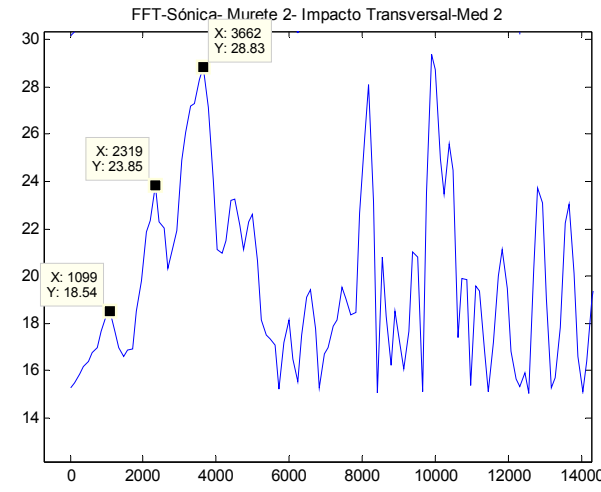
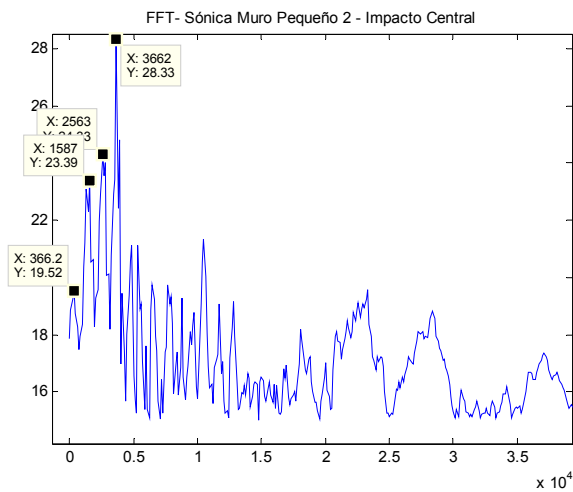
Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

MURETE 2

Señales registradas por los cuatro receptores dispuestos, en cada uno de los tres tipos de impacto realizado (Impacto Central, Superior y Transversal)



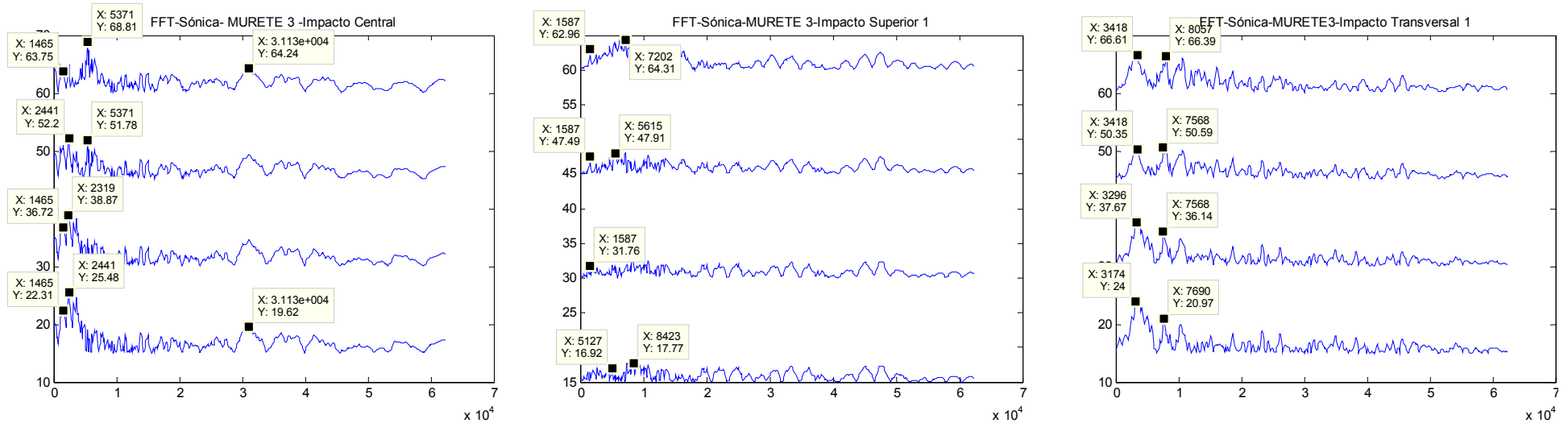
Respuesta espectral del murete de obra de fábrica de ladrillo:



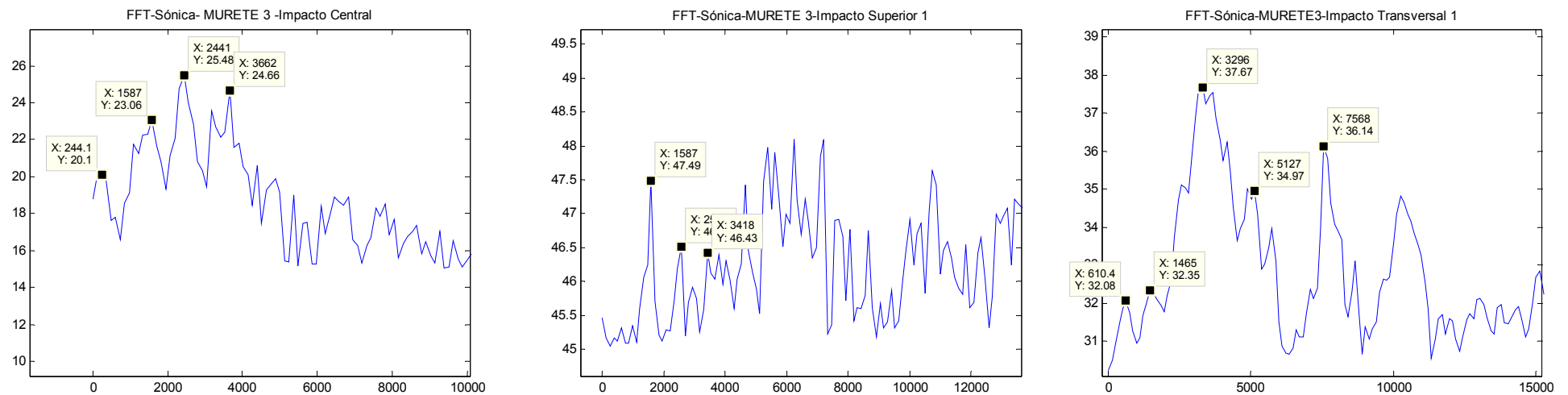
Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

MURETE 3

Señales registradas por los cuatro receptores dispuestos, en cada uno de los tres tipos de impacto realizado (Impacto Central, Superior y Transversal)



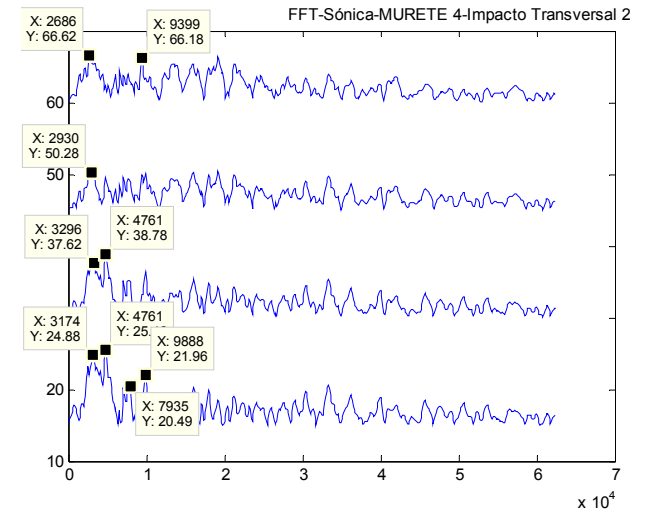
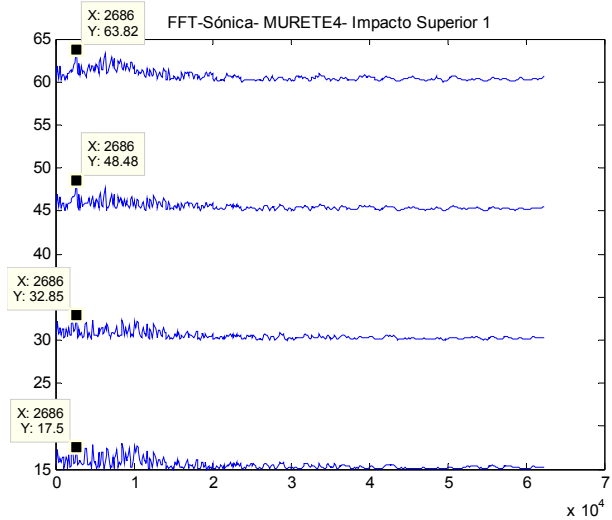
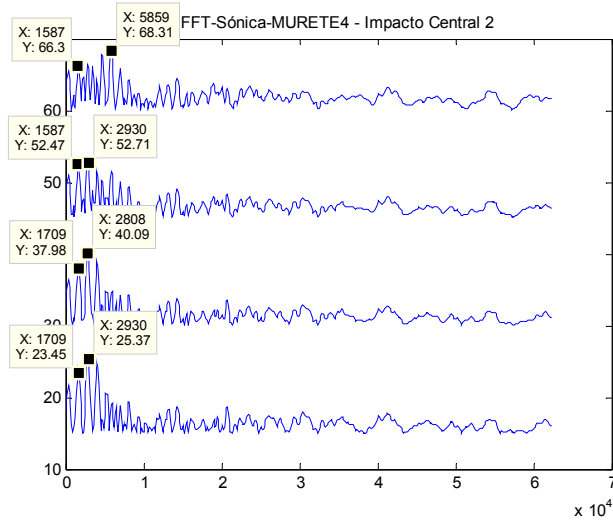
Respuesta espectral del murete de obra de fábrica de ladrillo:



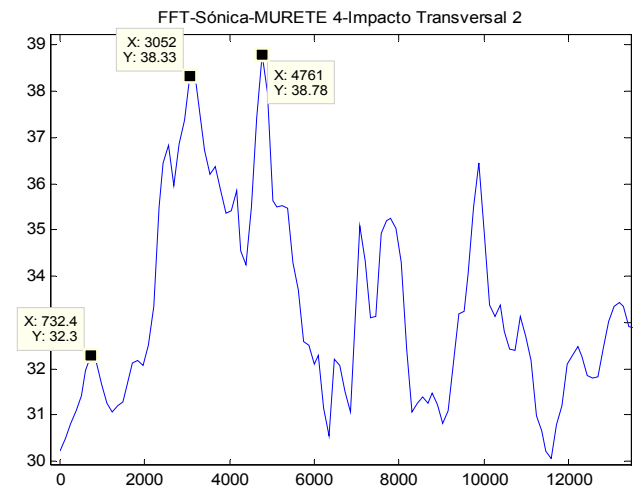
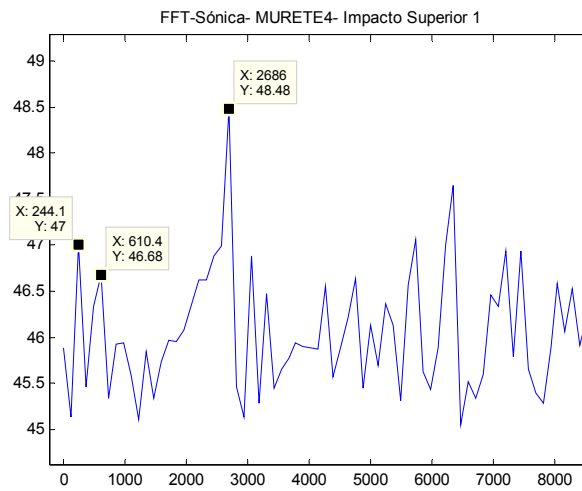
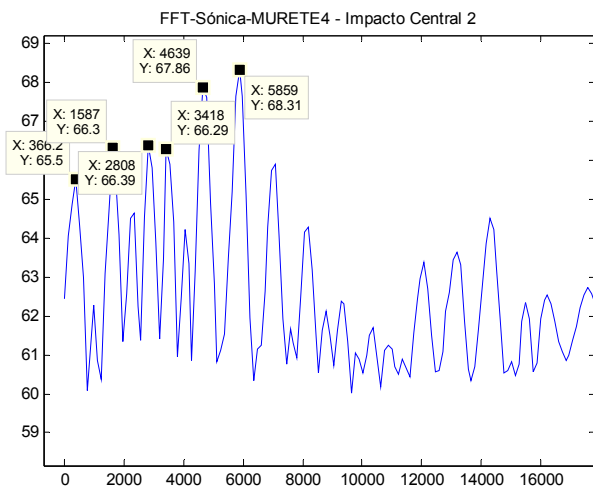
Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

MURETE 4

Señales registradas por los cuatro receptores dispuestos, en cada uno de los tres tipos de impacto realizado (Impacto Central, Superior y Transversal)



Respuesta espectral del murete de obra de fábrica de ladrillo:



4.3.8.2.2.1 Comparación con modelo simplificado de elementos finitos.

A partir del valor de ρ estimada (2.1 t/m^3) y de los valores E y ν obtenidos para los muretes, según las medidas por ultrasonidos (Apartado 4.3.8.2.1 “Auscultación ultrasónica de muretes de fábrica”), se realiza la simulación por elementos finitos de los modos propios resonantes.

En la Fig. 4.3.124 se muestra que los muros tienen un módulo E dinámico de 18 GPa y un coeficiente de Poisson, ν , de 0.31 atendiendo a las relaciones entre las velocidades de propagación encontradas (fruto de la campaña realizada mediante las medidas por ultrasonidos).

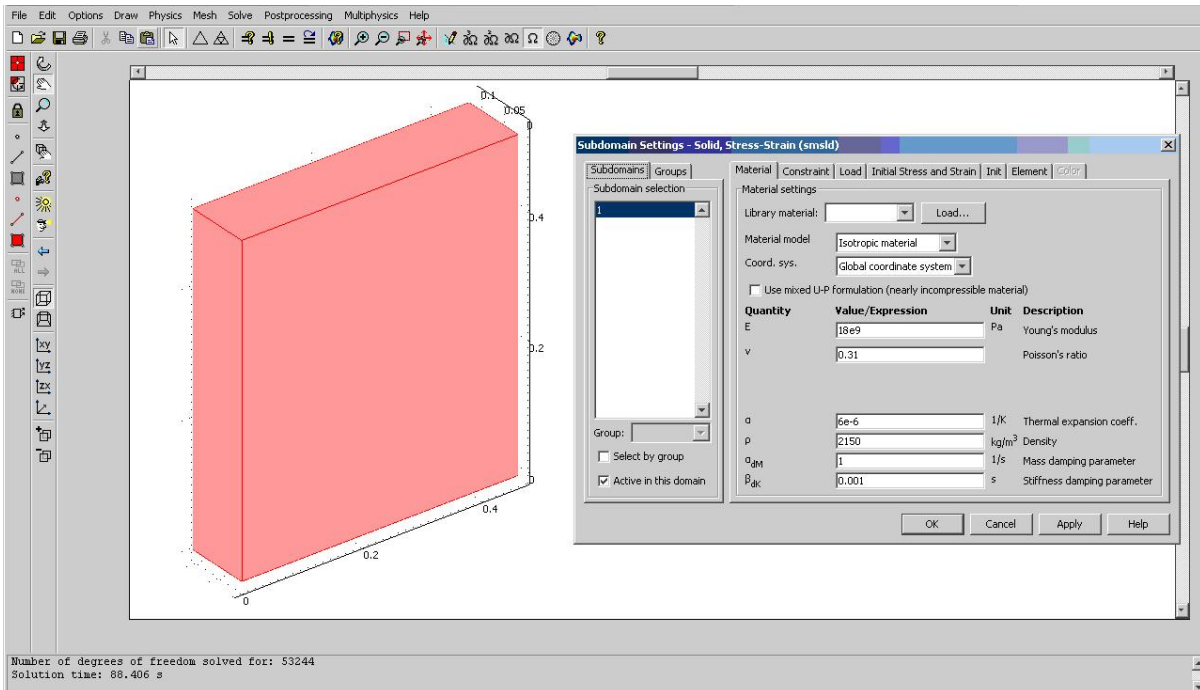


Fig. 4.3.124: Configuración del modelo simplificado de elementos finitos.

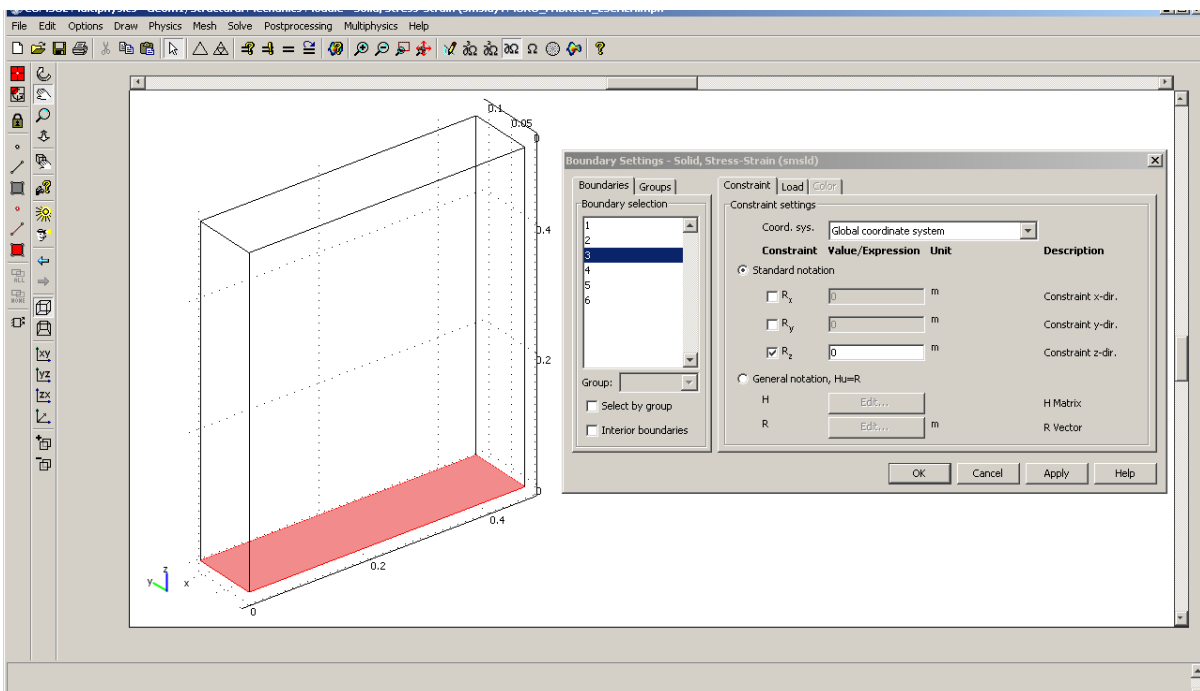


Fig. 4.3.125: Condiciones de contorno del modelo.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Las condiciones de contorno (Fig. 4.3.125) sólo se han simulado en el apoyo, donde no se ha permitido un desplazamiento x, y z (apoyo fijo perfecto). A continuación (Fig. 4.3.126) se muestran los modos encontrados con el modelo.

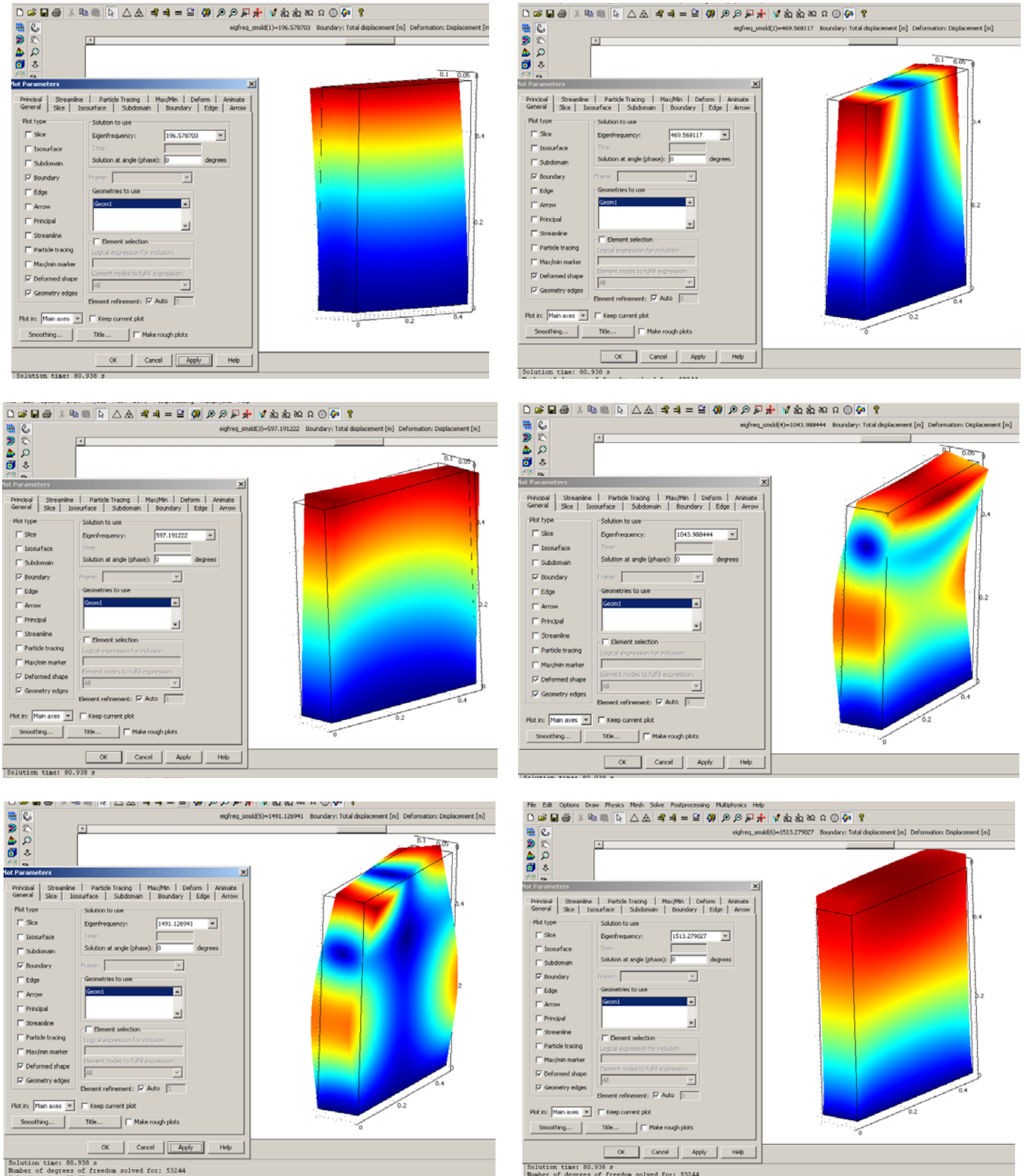


Fig. 4.3.126-a: Modos de resonancia encontrados con el modelo.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

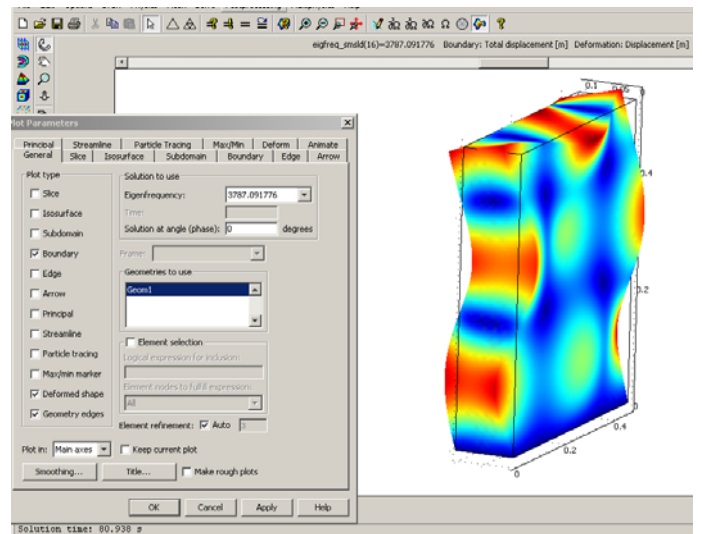
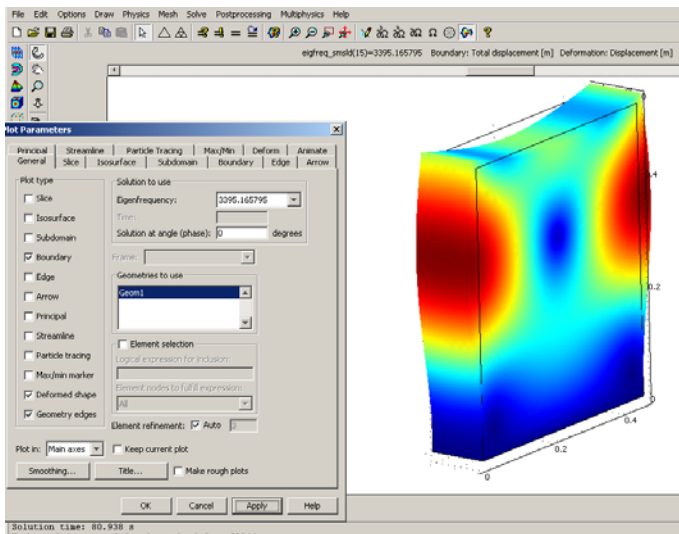
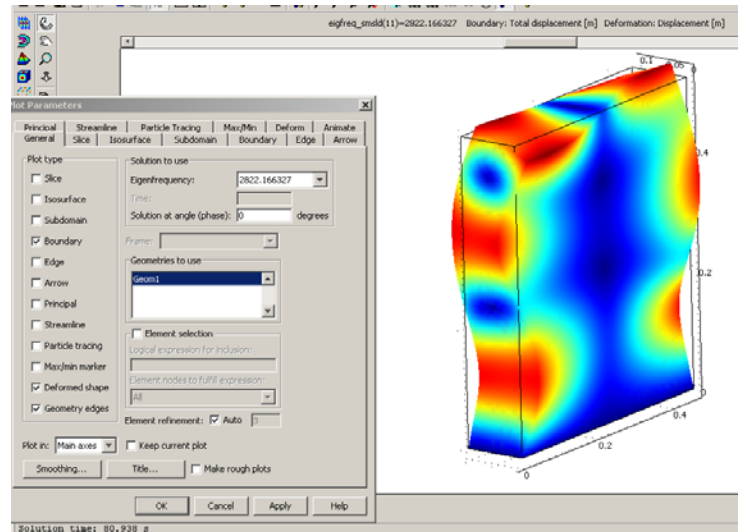
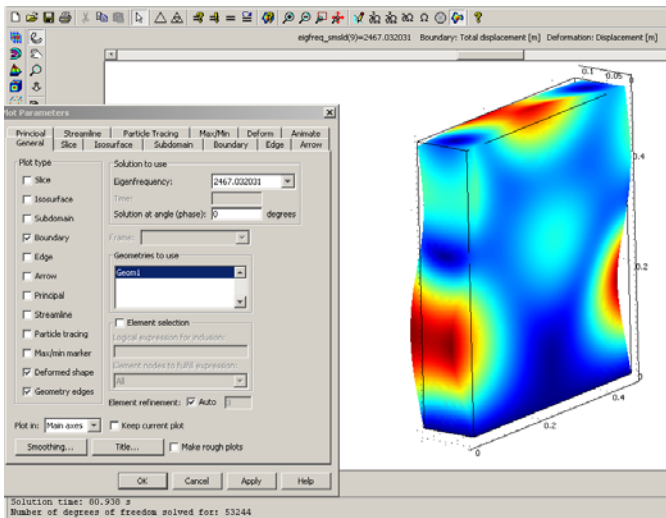
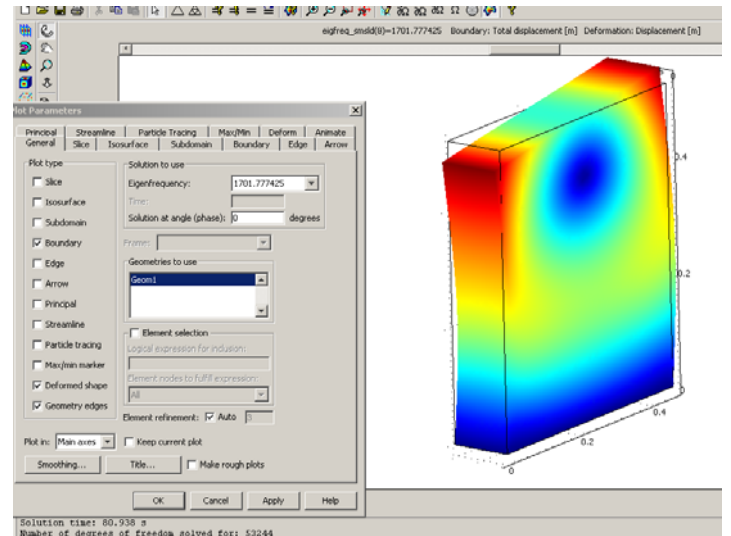
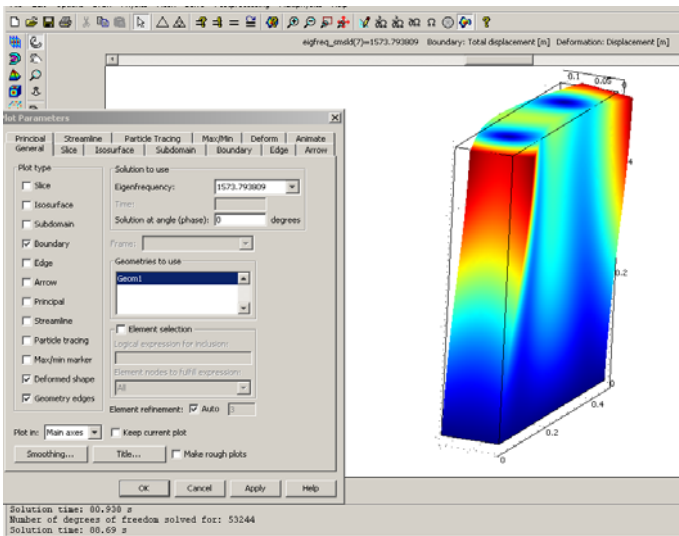


Fig. 4.3.126-b: Modos de resonancia encontrados con el modelo.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

A la vista de los resultados teóricos y experimentales (Tabla 4.3.30), se puede concluir que el primer modo de flexión no se recoge experimentalmente ya que la frecuencia más baja corresponde a 244 Hz, mientras que este corresponde a una frecuencia de 196,6 Hz. Esto puede indicar que el modelo no está del todo bien reproducido.

Las frecuencias medias 610-732 Hz tomadas experimentalmente pueden corresponderse con el modo flexural-lateral que teóricamente se sitúa en 597.2 Hz.

Las frecuencias que experimentalmente tienen más peso son las centradas en 1465 y 1587 Hz que corresponden con mezcla de modos flexurales y torsionales.

Otro modo predominante (amplitud importante en el espectro de frecuencias) encontrado experimentalmente en los muros se caracteriza por una frecuencia alrededor de 3662 Hz que corresponde con un modo de flexión-compresión a mitad de altura del muro y que suele ser excitado en los impactos laterales, aunque aparece en todos los impactos y para todos los muretes (2, 3 y 4).

Tabla 4.3.30: Frecuencias de resonancia representativas, extraídas de los espectros de frecuencia-amplitud (experimentales), o de los modos propios de vibración teóricos (mediante modelado numérico)

Correspondencia aproximada de las frecuencias (Hz) de resonancia estimadas	
Experimentales	Teóricos
-	196.6
244	-
366	-
-	469.6
610 - 732	597.2
1099	1044.0
1465	1491.1
-	1513.3
1567 - 1587	1573.8
-	1701.8
2319	-
2441	2467.0
2517 - 2563	-
2686	-
2808	2822.2
3052	-
3416-3419	3395.2
3662	3787.1
4751	-

4.3.8.3 Caracterización sónica y ultrasónica de un muro de fábrica de ladrillo.

Se trata de un muro de fábrica de ladrillo de de dimensiones aproximadas 196 x 22 x 151.2 cm (largo x ancho x alto).

4.3.8.3.1 Auscultación ultrasónica del muro de fábrica de ladrillo.

Las medidas ultrasónicas han consistido en la estimación de la velocidad de ondas longitudinales y transversales, V_p y V_s , a un lado y otro del muro, con transductores V151 de Panametrics (Fig. 4.3.127 y 4.3.128).



Fig. 4.3.127 y 4.3.128: Instantes captados durante la inspección ultrasónica.

Fig. 4.3.129: Ubicación en el muro de los 3 acelerómetros dispuestos para recepción de los fenómenos resonantes.

Los valores obtenidos experimentalmente según la inspección ultrasónica fueron un módulo dinámico, E , de 23 GPa y un coeficiente de Poisson, ν , de 0.20. Para ello se estimó que la densidad promedio era de 2.1 t/m^3 .

4.3.8.3.2 Auscultación sónica del muro de fábrica

La auscultación sónica consistió en la excitación por impacto del muro. Las medidas experimentales mediante el método de impacto se han realizado utilizando 3 puntos de recepción de las ondas mecánicas sónicas generadas y en 3 puntos de impacto diferentes.

Los 3 acelerómetros PCB 353B17 para recepción de los fenómenos resonantes se situaron (Fig. 4.3.129): en un lateral (ch2), cercano a la zona de aplicación de la carga (ch3) en la parte alta del muro, y centrado en el muro (ch4).

Los puntos de impacto fueron:

1. Impacto centrado en cara vista (cara instrumentada).
2. Impacto en parte superior izquierda.
3. Impacto lateral a media altura ($z = 0.8$ metros).

El contenido espectral del muro, tras realizar un análisis de Fourier equivalente al expuesto al referir la auscultación sónica de muretes de fábrica (apartado 4.3.8.2.2), muestra como frecuencias relevantes las indicadas en la Tabla 4.3.31.

Tabla 4.3.31: Contenido espectral (Frecuencias en Hz) del muro de fábrica de ladrillo.

Sensor	Impacto centrado	Impacto superior	Impacto lateral
Ch2			Frecuencias muy altas, no corresponden a modos propios
Ch3	976-1465-1758-	390-3320-5859	
Ch4	3906-6836		

4.3.8.3.2.1 Comparación con modelo simplificado de elementos finitos.

En la simulación por elementos finitos se ha introducido un elemento añadido al muro, se trata de una sufridera metálica que, además de su peso propio, aplica una tensión, supuesta uniforme, generada por la reacción de dos gatos hidráulicos en una viga de reacción superior.

Los valores introducidos en el modelo (Fig. 4.3.130) fueron obtenidos experimentalmente según la inspección ultrasónica (Apartado 4.3.8.3.1 “Auscultación ultrasónica del muro de fábrica de ladrillo”): $E = 23 \text{ GPa}$ y un coeficiente de Poisson de 0.20, además de un estimación de densidad promedio de 2.2 t/m^3 .

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

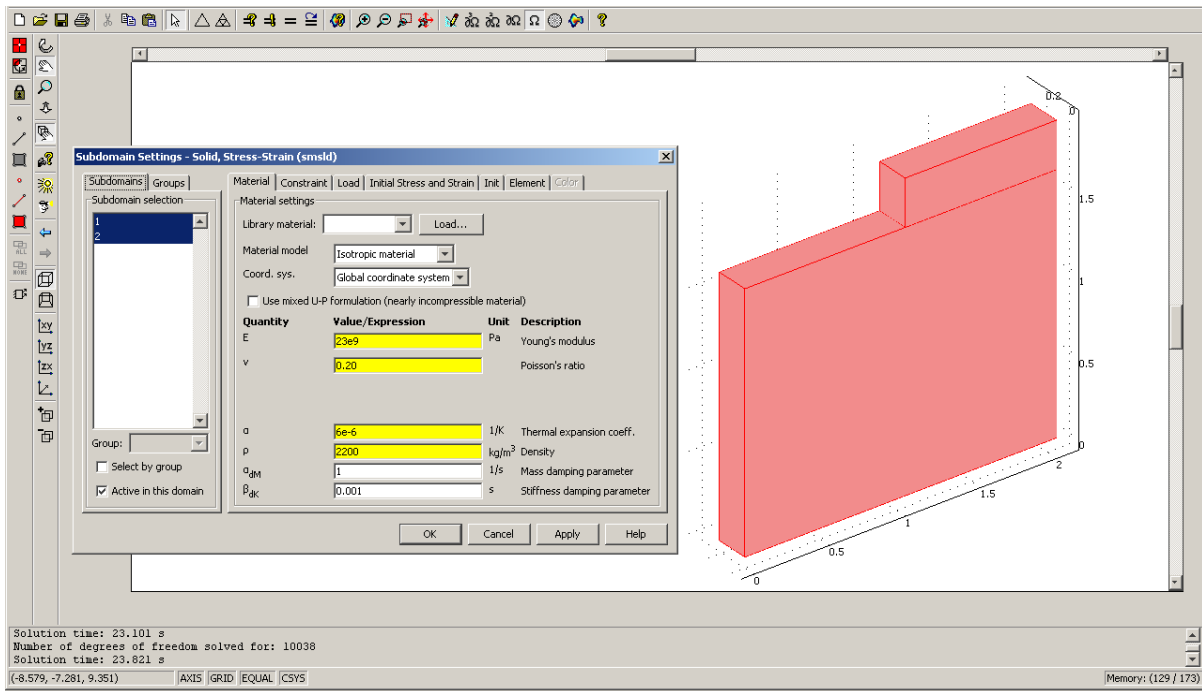


Fig. 4.3.130: Configuración del modelo numérico simplificado.

Las siguientes imágenes (Fig. 4.3.131) representan los modos resonantes para el muro de fábrica de ladrillo:

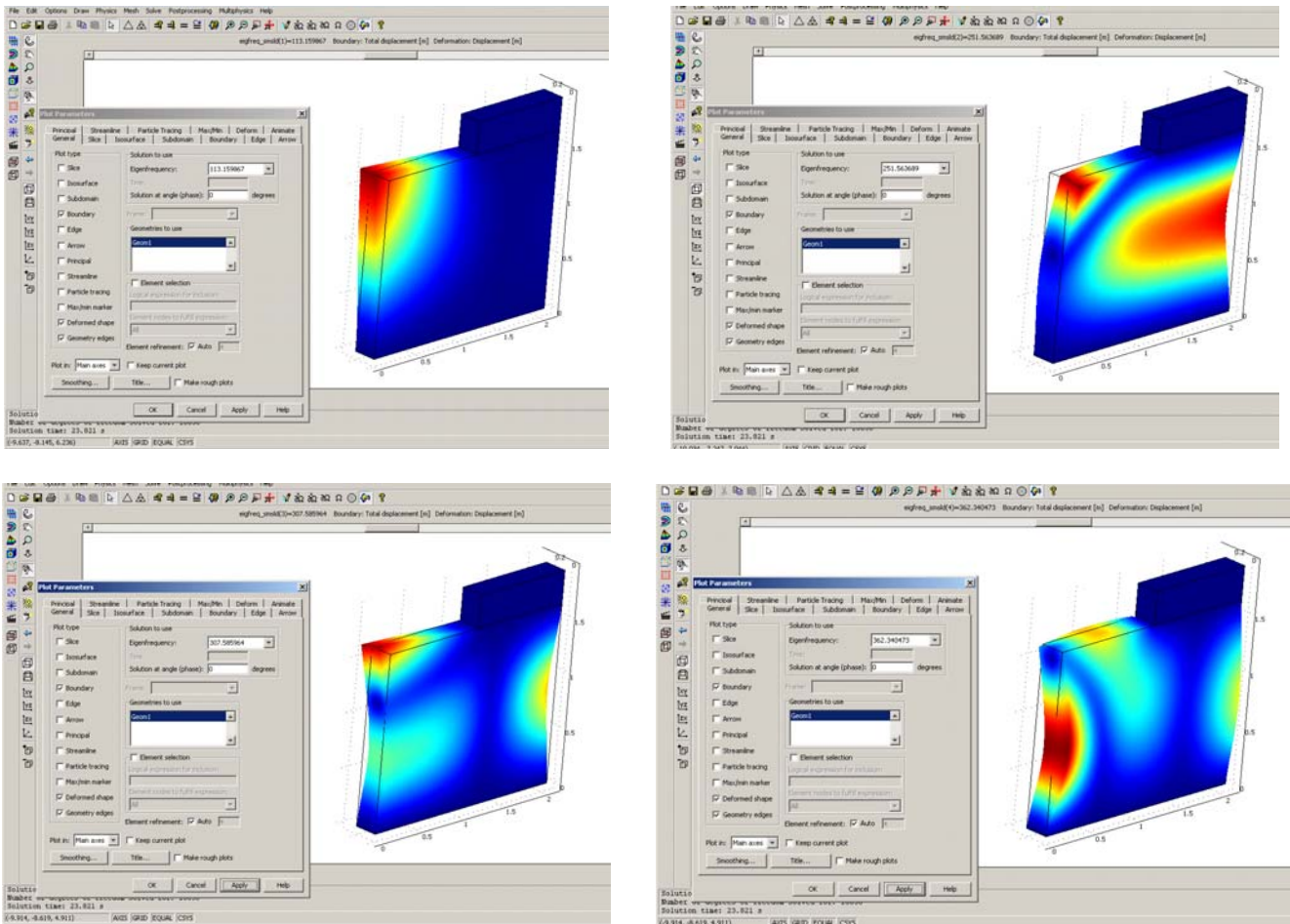


Fig. 4.3.131-a: Modos resonantes para el muro de fábrica de ladrillo

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

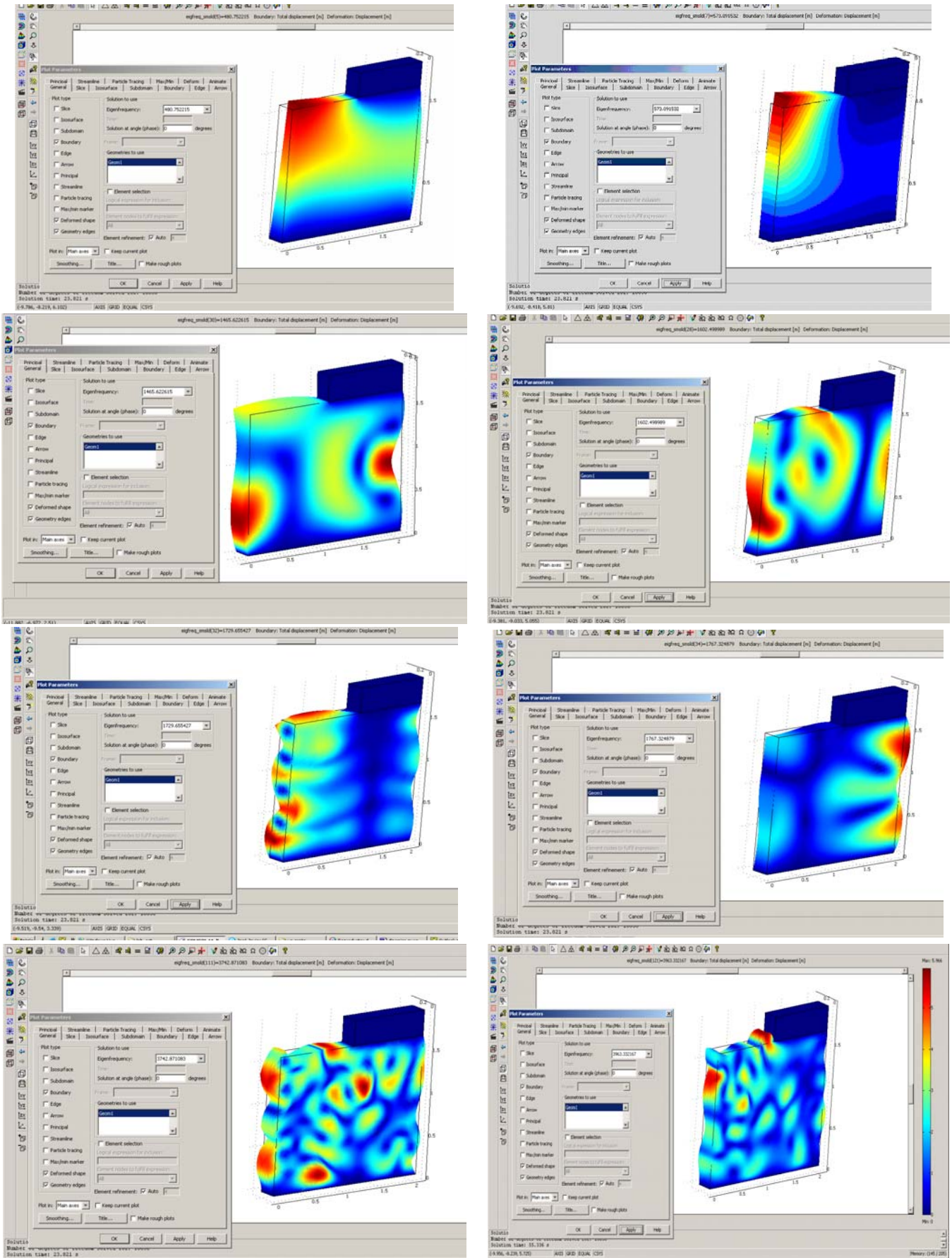


Fig. 4.3.131-b: Modos resonantes para el muro de fábrica de ladrillo

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

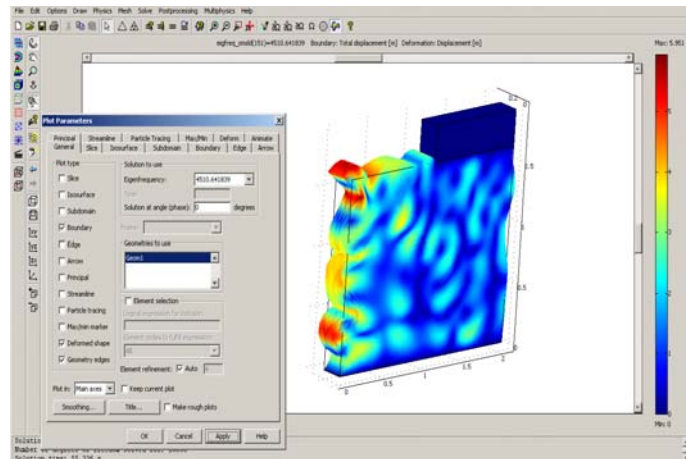


Fig. 4.3.131-c: Modos resonantes para el muro de fábrica de ladrillo

Por su parte en la Tabla 4.3.32 se enumeran las frecuencias de resonancia obtenidas teóricamente (mediante modelado numérico) para el muro de fábrica de ladrillo.

Tabla 4.3.32: Contenido espectral teórico (Frecuencias en Hz) del muro de fábrica de ladrillo.

Frecuencias (Hz) de resonancia representativas teóricas (mediante modelado numérico)

113.2	251.6	307.6	362.3	480.7	573.1	1465.6	1602.5	1729.6	1767.3	3742.9	3963.3	4510.6
-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

La correspondencia (experimental – teórica) entre los modos fue muy limitada.

Las frecuencias entorno a 1465 y 1729 Hz experimentales pueden corresponder a modos flexurales en el lado donde no se aplica la carga.

En ningún caso se observan experimentalmente los modos torsionales y flexurales primarios.

4.3.8.4 Variación de módulos de elasticidad, E, frente a cargas crecientes.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las medidas por inspección ultrasónica según la carga aplicada y su estimación del módulo elástico dinámico.

Para el control de la puesta en carga durante la ejecución de los ensayos se empleó un transductor de presión de 400 Ba (5 voltios) y dos gatos hidráulicos de 126.70 cm² de área cada uno. Debido a lo referido una señal de presión registrada de 1 voltio equivale a una carga de 20,272.0 kp. Igualmente, también hay que considerar que el peso muerto que representa la viga de reparto empleada en el ensayo es de 220 kp.

En base a las velocidades de propagación registradas experimentalmente para cada nivel de carga, y las ecuaciones 4.3.1, 4.3.2 y 4.3.3 expuestas con anterioridad, pueden obtenerse las características mecánicas que se sintetizan en la Tabla 4.3.33.

Tabla 4.3.33: Características mecánicas dinámicas obtenidas a diferentes niveles de carga en el muro de fábrica de ladrillo.

Carga (voltios)	Carga (kp)	Carga (kN)	Dimensiones (mm)	t _p (μs)	V _p (m/s)	t _s (μs)	V _s (m/s)	p (kg/m ³)	v	G (GPa)	E (GPa)
0.5	10,356	101.49	206	59.4	3,468	96.8	2,128	2,100	0.198	9.51	22.79
1.0	20,492	200.82	206	58.4	3,527	96.4	2,137	2,100	0.210	9.59	23.21
1.5	30,628	300.15	206	57.6	3,576	96.2	2,141	2,100	0.221	9.63	23.50
2.0	40,764	399.49	206	57.2	3,601	96	2,146	2,100	0.225	9.67	23.69
2.5	50,900	498.82	206	57.4	3,589	96	2,146	2,100	0.222	9.67	23.63
3.0	61,036	598.15	206	57.1	3,608	96	2,146	2,100	0.226	9.67	23.72

Finalmente, en la Fig. 4.3.132 se muestra cómo el módulo elástico dinámico obtenido mediante inspección por ultrasonidos, sigue un tendencia creciente y relativamente logarítmica con la carga incremental aplicada. La tendencia encontrada muestra como a medida que incrementamos el nivel de carga en coronación, los aumentos de E dinámico son menores.

Variación de módulos de elasticidad, E, frente a cargas crecientes

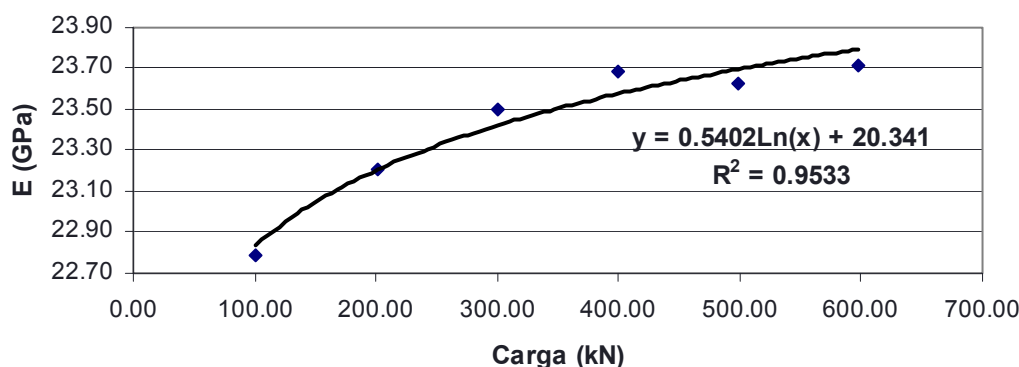


Fig. 4.3.132: Correlación entre el módulo de elasticidad dinámico y la carga en el muro.

4.3.9 Contraste de los resultados obtenidos en el muro de ladrillo.

4.3.9.1 Bondad de los niveles tensionales obtenidos mediante la técnica hole drilling.

En la Tabla 4.3.34 se resumen los resultados obtenidos en los ensayos de hole drilling realizados en la fábrica de ladrillo. Como ya se ha referido los ensayos HDL2 y HDL3 fueron realizados de forma simultánea bajo el mismo nivel de carga. Puede apreciarse que la tensión obtenida a partir de ambos ensayos difiere bastante, circunstancia que puede deberse a que, como es sabido, la distribución tensional no es uniforme, por ello que el punto de ensayo HDL2, debido a su posición, aparezca sobretensionado en relación al HDL3 (Fig. 4.3.31).

Tabla 4.3.34: Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos hole drilling realizados sobre la sillería arenisca. Comparación de los niveles tensionales obtenidos experimentalmente con los estimados de forma teórica (Resultados de esta Tesis).

Ensayo	Código	Fecha	E (Mpa)	v	$\sigma_{\text{experimental}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{teórica, media } 18^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{teór, media } 18^\circ}$
HDL1	Lab0810	16/06/2008	8,602.30	0.04	2.07	3.42	0.61
HDL2	Lab0811	18/06/2008	8,602.30	0.04	2.18	3.07	0.71
HDL3	Lab0812	20/06/2008	8,602.30	0.04	1.57	3.07	0.51
						$(\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{est}})_{\text{Promedio}}$	0.61
						$(\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{est}})_{\text{Desvest}}$	0.10
						$(\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{est}})_{\text{Coef. Var.}}$	16.39%

Como puede apreciarse, **la relación promedio entre la tensión experimental obtenida y la estimada teóricamente, como valor medio en el plano horizontal de ejecución de los ensayos suponiendo un ángulo de apertura de cargas de 18°, es de 0.61**, presentando un coeficiente de variación del 16.39% (desviación típica de 0.10).

En los tres ensayos se ha minusvalorado el nivel tensional respecto del medio obtenido suponiendo un ángulo de apertura de carga de 18°, circunstancia que puede deberse, en parte, a que el ángulo de apertura de carga podría ser incluso menor que el considerado.

Cabe relacionar que para obtener las tensiones principales y, por ende, el nivel tensional vertical se han empleado las características mecánicas obtenidas en el apartado 4.3.4, si bien en función de la proporción de ladrillo y de mortero movilizadas en la perforación dichos parámetros mecánicos fluctuarán en consecuencia, además su estimación es tarea compleja. Igualmente, el no disponer de dichas características en la zona local del ensayo da lugar a que el nivel tensional deducido no sea exactamente el existente, si bien puede comprobarse como el ensayo da una aproximación relativamente aceptable.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

A modo de contraste, cabe referir que en la experimentación desarrollada por el Prof. Sánchez Beitia sobre un muro de fábrica de ladrillo, en el marco del proyecto SICEXPAR (Tabla 4.3.35), la relación promedio entre la tensión experimental, obtenida a partir de los parámetros A_t y B_t (previo conocimiento de las características mecánicas, misma metodología que la empleada en la presente tesis doctoral), y la tensión teórica, alcanzó un valor promedio de 0.62, presentando un coeficiente de variación del 18.57% (desviación típica de 0.11).

Tabla 4.3.35: Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos hole drilling realizados sobre la un muro de ladrillo. Comparación de los niveles tensionales obtenidos experimentalmente con los estimados de forma teórica (Sánchez Beitia, proyecto SICEXPAR).

Ensayo	$\sigma_{\text{experimental}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{teórica}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{teor}}$
HD-1	0.56	0.80	0.70
HD-2	Fallido	0.80	-
HD-3	0.43	0.80	0.54
$(\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{est}})_{\text{Promedio}}$			0.62
$(\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{est}})_{\text{Desvest}}$			0.11
$(\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{est}})_{\text{Coef. Var.}}$			18.57%

Puede comprobarse que los resultados obtenidos en esta tesis doctoral en base a la comparación respecto de la tensión media en el plano horizontal de ejecución de los ensayos suponiendo un ángulo de apertura de cargas de 18° , son equivalentes a los alcanzados en experiencias previas.

4.3.9.2 Bondad de los niveles tensionales obtenidos mediante gato plano simple.

En relación con los ensayos de gato plano simple, en la Tabla 4.3.36 se compara el nivel tensional registrado experimentalmente con la tensión media estimada empleando un ángulo de apertura de carga de 18° , para el coeficiente de corrección geométrico propuesto por la normativa, que relaciona el área del gato plano y el área de la ($K_{\text{gato-roza}}$).

Tabla 4.3.36: Ensayos de gato plano simple en el muro de ladrillo: Relación entre el nivel tensional obtenido experimentalmente, empleando como coeficiente geométrico el que relaciona el área del gato con la de la roza ejecutada ($K_{\text{gato-roza}}$), y el estimado de forma teórica.

	K_m	K_a	$\sigma_{\text{experimental}}$ (MPa)	σ_{media} (MPa)	$\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{media}}$
GPL-A Simple	0.95	0.866	3.85	3.34	1.15
GPL-B Simple	0.95	0.866	2.77	2.08	1.33

La tensión vertical media de compresión, obtenida para un ángulo de apertura de carga de 18° , en el plano de cada ensayo de gato plano simple realizado es respectivamente de 3.34 MPa, en el GPL-A Simple (apartado 4.3.6.1), y de 2.08, en el GPL-B Simple (apartado 4.3.6.2).

A modo de contraste, en base a los ensayos de gato plano simple aplicados a fábricas de ladrillo, consultados en el estado del arte de esta tesis doctoral y presentados en la Tabla 2.42, la relación entre la tensión medida experimentalmente y la estimada de forma teórica para fábricas de ladrillo presenta un coeficiente de variación del 19%, tomando un valor de 1.00 ± 0.19 (Tabla 2.45). Por ello que la relación obtenida en el ensayo de calibración GPLA-Simple realizado en laboratorio se ajuste a los resultados encontrados en el estudio bibliográfico previo, mientras que la relación obtenida en el ensayo GPLB-Simple sea superior a lo que hubiese sido esperado.

4.3.9.3 Bondad de las características mecánicas obtenidas mediante gato plano doble.

La bondad de los resultados se ha tratado de estimar mediante la comparación de los módulos de elasticidad obtenidos mediante gato plano doble y el obtenido mediante un ensayo a compresión al uso, empleando para el registro de desplazamientos transductores potenciométricos.

En este caso la comparación de los módulos de elasticidad estimados mediante los dos ensayos de gato plano doble realizados en laboratorio, respecto de los valores habituales encontrados

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

mediante otros ensayos de gato plano doble realizados en fábricas de ladrillo (Tabla 2.78) no es adecuada, en tanto que el muro de ladrillo construido en laboratorio, con una resistencia a compresión de los ladrillos de 50 N/mm² y un mortero de resistencia a compresión promedio de 13.6 N/mm², no es comparable con las fábricas históricas de ladrillo macizo y mortero de cal a las que se refieren los resultados referidos en dicha Tabla 2.78.

En la Tabla 4.3.37 se presenta la comparación entre el módulo de elasticidad obtenido mediante los ensayos de gato plano doble y el estimado mediante transductores potenciométricos. La tensión introducida a la fábrica, en cada ciclo de presión, ha sido obtenida empleando como coeficiente geométrico el propuesto por la normativa de referencia, que relaciona el área del gato con la de la roza ejecutada ($K_{\text{gato-roza}}$). Igualmente, se recuerda que el módulo de elasticidad teórico (8,430.25 N/mm²) fue obtenido en el apartado 4.3.4.

Tabla 4.3.37: Comparación entre las características mecánicas obtenidas mediante transductores y las obtenidas experimentalmente en los ensayos de gato plano doble ejecutados en un muro de ladrillo en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

	K_a	K_m	v_{exp}	$E_{\text{exp}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$E_{\text{teorico}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$E_{\text{exp}}/ E_{\text{teorico}}$
GPL-A Doble	0.866	0.95	0.14	7,058.30	8,430.25	0.84
GPL-B Doble	0.854	0.95	0.05	9,236.3	8,430.25	1.10

Puede apreciarse como la variabilidad del módulo de elasticidad obtenido está dentro de la incertidumbre referida en la normativa de referencia (RILEM LUM.D.3 1990; ASTM C 1197-91).

Igualmente, la relación entre el valor experimental y el teórico guarda buena relación con las obtenidas por otros autores, en otros ensayos de calibración realizados (Tabla 2.47), en los que la relación entre el módulo de deformación estimado experimentalmente mediante gato plano doble y el igualmente estimado experimentalmente sobre el conjunto del componente estructural, en un ensayo de compresión simple, arroja un valor promedio de 1.10, con un coeficiente de variación del 13%.

Como resumen de los trabajos realizados, puede sintetizarse la información en la Tabla 4.3.38:

Tabla 4.3.38: Resultados de los ensayos de gato plano realizados en un muro de ladrillo ensayado en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

Fecha	Cód.	Comentarios	$E_{\text{sec, prom}} \text{ (MPa)}$	v_{prom}	$\sigma_{\text{servicio}} \text{ (MPa)}$
27-11-07	GPL-A Simple	Fábrica de ladrillo	-	-	3.85
27-11-07	GPL-A Doble	Fábrica de ladrillo	7,058.30	0.14	-
14-02-08	GPL-B Simple	Fábrica de ladrillo	-	-	2.77
15-02-08	GPL-B Doble	Fábrica de ladrillo	9,236.3	0.05	-

En estos ensayos no se ha estimado la tensión a rotura dado que la estimación en base a una regresión eminentemente lineal ofrecería una tensión de rotura, supuestamente determinada para una deformación del 3‰, superior a la real.

A modo de ejemplo, la tensión de rotura estimada el ensayo GPL-B Doble a partir de la regresión lineal ilustrada en la Fig. 4.3.89, para una deformación en rotura del 3‰, asciende a 29.8 MPa, equivalente a una tensión característica en rotura de 20.9 MPa ($0.7 \cdot \sigma_{\text{rotura}}$), valor bastante elevado. Aplicando la expresión del EC-6, para piezas de tipo 2a, con una resistencia a compresión garantizada por el fabricante de 50 N/mm² y un mortero de cemento tipo M-80a 1:4 (cemento:arena, proporciones en volumen) de resistencia a compresión promedio 13.6 N/mm² (Anexo 2), obtendríamos una resistencia a compresión de 13.4 MPa.

$$f_k = 0.55 \cdot f_b^{0.65} \cdot f_m^{0.25} = 13.4 \text{ MPa}$$

Por su parte, en relación con el ensayo de corte in situ referir que se ha mostrado una metodología para obtener las características que gobiernan el comportamiento frente a corte de

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

una fábrica, basada en la técnica de gato plano doble, la cuál puede resultar útil para conocer de forma experimental la adhesión y el coeficiente de fricción de fábricas in situ.

4.3.9.4 Bondad de los ensayos mini-presurométricos desarrollados en el muro de ladrillo

Como ya se ha justificado, durante el ensayo fue alcanzada la máxima capacidad del dispositivo mini-presurométrico con el que se realizaron los ensayos (24 Ba de presión), no alcanzándose la plastificación del área de ensayo y, por ende, no pudo estimarse el modulo presurométrico (E_{PMT}) de la fábrica.

4.3.9.5 Bondad de la auscultación sónica del muro de fábrica de ladrillo.

La correspondencia entre los modos resonantes obtenidos experimentalmente y los deducidos a partir de un modelo simplificado de elementos finitos, configurado a partir de las características mecánicas obtenidas experimentalmente según la inspección ultrasónica llevada a cabo previamente, fue muy limitada.

En lo que respecta a la variación del módulo de elasticidad dinámico frente a cargas crecientes, cabe relacionar que el módulo elástico dinámico obtenido mediante inspección por ultrasonidos, sigue un tendencia creciente y relativamente logarítmica con la carga incremental aplicada.

4.4 Campaña experimental sobre muretes de ladrillo hueco.

4.4.1 Construcción de los muretes.

Con fecha 19 de junio de 2009 fueron construidos en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria cuatro muretes de ladrillo hueco. En la Fig. 4.4.1 se presenta la geometría de los mismos.

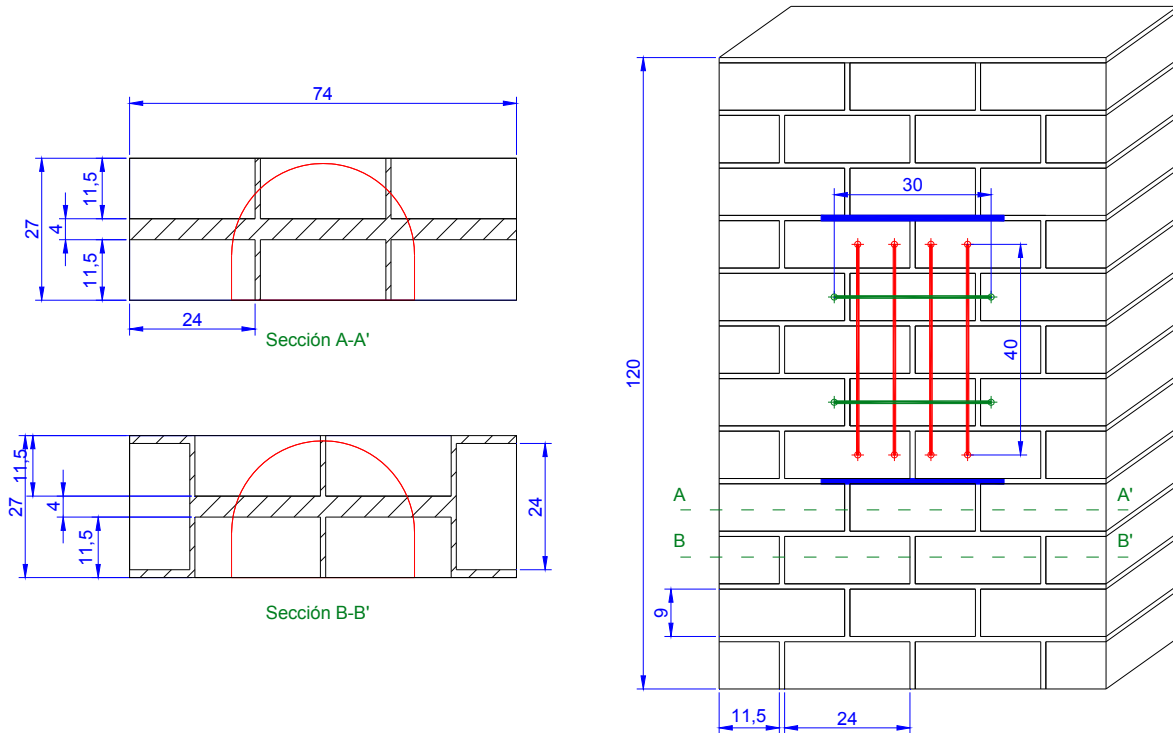


Fig. 4.4.1: Geometría general de los muretes de ladrillo hueco. Las cotas referidas son en cm.

La sección transversal fue diseñada en base a dos criterios: por un lado que en el espesor de los muretes encajaría la geometría del gato plano semioval ($350 \times 260 \times 3.5 \text{ mm}^3$) susceptible de emplear, y por otro que el área de la sección transversal sería el mínimo valor necesario de cara a poder colapsar los elementos estructurales frente a mecanismos de compresión, teniendo en cuenta la infraestructura disponible.

Para su confección se empleó ladrillo hueco y mortero bastardo tipo M-20b (según la NBE-FL 90) 1:2:10 (cemento:cal:arena, proporciones en volumen), Fig. 4.4.2-4.4.3. El espesor aproximado de los tendeles de mortero fue de 10 mm.



Fig. 4.4.2 y 4.4.3: Instantes tomados durante la construcción de los muretes de ladrillo hueco y mortero bastardo tipo M-20b, 1:2:10 (cemento:cal:arena, proporciones en volumen).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En cada uno de los muretes fueron dispuestos un total de 7 transductores, 4 verticales por la cara frontal (la indicada en la Fig. 4.4.1) y otro vertical centrado en la cara opuesta, todos ellos de 40 cm de longitud, y dos horizontales en la cara frontal de 30 cm de longitud.

Fueron realizados un total de cuatro ensayos, con dos objetivos diferenciados:

- Ensayos 1 y 2: La finalidad de los mismos era comprobar la similitud de las curvas σ - ϵ obtenidas, por un lado, en el caso de un ensayo a compresión frente a carga monotónica creciente hasta rotura y, por otro, la envolvente de las curvas σ - ϵ obtenidas en un ensayo de gato plano doble, ejecutado también hasta rotura del muro.
- Ensayos 3 y 4: Comparar las leyes σ - ϵ obtenidas frente a cargas pseudo-dinámicas compresivas introducidas de forma convencional y mediante la técnica de gato plano doble. La finalidad era tratar de pulsar la posible aplicación de la técnica de gato plano doble para ejecutar ensayos in situ frente a cargas pseudo-dinámicas compresivas, con el objetivo de estimar, para fábricas in situ, la envolvente de rotura (envelope curve), la curva de los “puntos comunes” (common point curve) y la curva de estabilidad (“stability point curve”).

Estos ensayos son útiles dado que la “stability point curve” tiene en cuenta la reducción de la resistencia a compresión del componente de fábrica, respecto de la curva envolvente, debido al efecto de cargas alternativas que puedan incidir en el mismo a lo largo de su vida útil. Existen varias campañas experimentales en las que se han llevado a cabo ensayos de laboratorio frente a cargas cíclicas tanto uniaxiales (Senthivel y Sinha 2003), como biaxiales (Senthivel y Uzoegbo 2004). Pese al interés de estos estudios, lo realmente interesante sería disponer de técnicas para ejecutarlos en fábricas reales in situ, de cara a determinar la idoneidad de su comportamiento frente a cargas de servicio alternativas, por ello que se ha tratado de estudiar la viabilidad de realizar estos ensayos mediante la técnica de gato plano doble.

Cabe llamar la atención en relación a que pese a que los cuatro muretes fueron construidos el mismo día, por los mismos operarios y empleando los mismos materiales, se presentan dispersiones en los resultados fruto de la naturaleza intrínseca de las estructuras de fábrica. Concretamente, de los cuatro muretes construidos el empleado en el ensayo nº 3 presentaba cierto desplome, circunstancia que se manifestó en las relaciones σ - ϵ obtenidas que mostraron peores prestaciones mecánicas que el resto.



Fig. 4.4.4: Murete nº 1. Instantes previos a la ejecución del ensayo a compresión frente a carga monotónica creciente hasta rotura.

Fig. 4.4.5 y 4.4.6: Modo de fallo del murete una vez finalizado el ensayo.

En lo que sigue se pasa a describir los cuatro ensayos, realizando una comparación de las gráficas σ - ϵ obtenidas dos a dos (por un lado ensayos 1 y 2, y por otro los 3 y 4).

4.4.2 Ensayos nº 1 y nº 2

4.4.2.1 Ensayo nº 1

El ensayo nº 1 consistió en una prueba en laboratorio frente a carga de compresión, monotónicamente creciente, hasta rotura. En la Fig. 4.4.4 se ilustra el murete objeto de ensayo. Por su parte las Fig. 4.4.5 y 4.4.6 presentan el modo de fallo manifestado una vez finalizado.

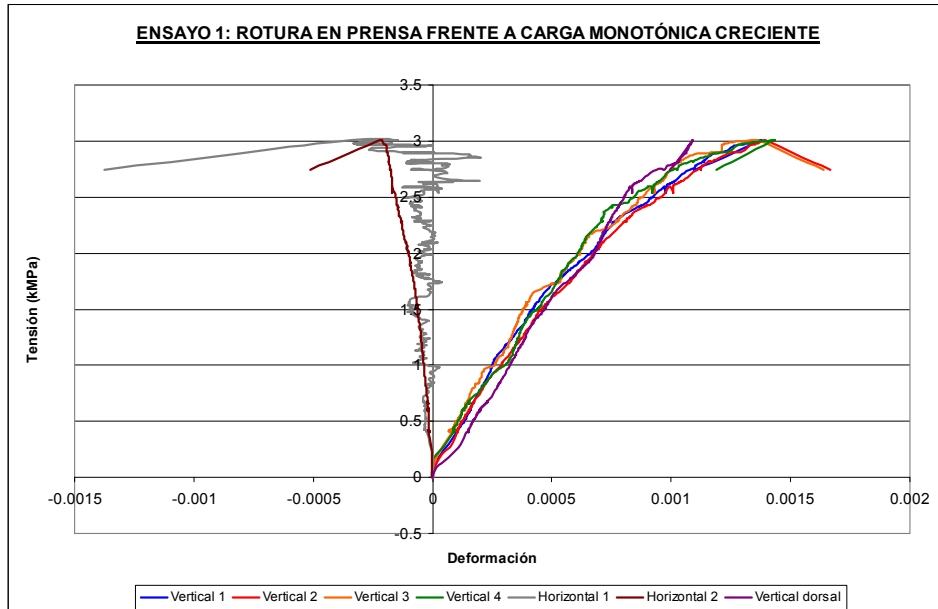


Fig. 4.4.7: Leyes σ - ϵ registradas por los cuatro transductores verticales dispuestos en la cara frontal del muro (Vertical 1 a 4), por los horizontales de la misma cara (Horizontal 1 y 2), y por el transductor vertical dispuesto en la cara opuesta (Vertical dorsal).

Por su parte, en la Fig. 4.4.7 se presentan las leyes σ - ϵ registradas por los cuatro transductores verticales que se ilustran en la Fig. 4.4.4 (denotados en el gráfico como Vertical 1 a 4), por los dos transductores horizontales (denotados como Horizontal 1 y 2), y por el transductor vertical dispuesto, centrado en el muro, por la cara opuesta a la presentada en la Fig. 4.4.4 (denotado como Vertical dorsal).

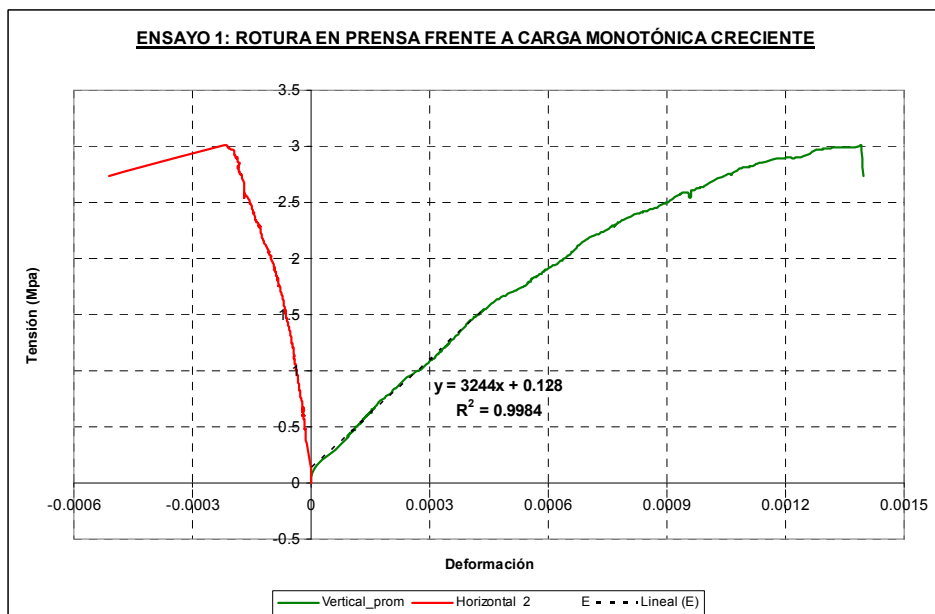


Fig. 4.4.8: Leyes σ - ϵ promedio y estimación del módulo de elasticidad mediante regresión lineal en la zona de comportamiento elástico.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Puede apreciarse como la carga introducida generó una distribución tensional bastante uniforme en la sección del muro, dado que las deformaciones registradas por los transductores verticales dispuestos en ambas caras fueron bastante aproximadas. De la misma forma, también se aprecia como la señal deformacional registrada por el transductor “Horizontal 2” no fue del todo adecuada, posiblemente debido a una incorrecta fijación del mismo al sustrato cerámico.

Igualmente, en la Fig. 4.4.8 se presentan las leyes σ - $\epsilon_{\text{vertical}}$ y σ - $\epsilon_{\text{horizontal}}$, promedio, una vez discriminado dicho transductor “Horizontal 2”. La **tensión de rotura fue de 3.01 MPa**, y las características mecánicas, obtenidas para la zona de comportamiento lineal del murete, alcanzaron un valor de **3,244.0 MPa para el módulo de elasticidad y 0.14 para el coeficiente de Poisson**.

4.4.2.2 Ensayo n° 2

El ensayo n° 2 consistió en una prueba mediante gato plano doble, de forma que para el área de fábrica movilizada entre los dos gatos planos se realizaron una serie de ciclos de carga descarga hasta rotura.

En la Fig. 4.4.9 se presenta una perspectiva general del emplazamiento del ensayo, previamente a su ejecución. Por su parte en la Fig. 4.4.10 se ilustra un instante captado durante la ejecución de las rozas, mediante sierra de disco orbital, para la inserción de los dos gatos planos. Finalmente, la Fig. 4.4.11 recoge una perspectiva del área de ensayo una vez introducidos los dos gatos planos y dispuestos los transductores de desplazamiento, verticales y horizontales, y el transductor para registro de la presión introducida mediante los gatos planos en la porción de fábrica aislada entre ellos, con el apoyo de una bomba manual.



Fig. 4.4.9: Perspectiva del emplazamiento del ensayo previamente a su ejecución.

Fig. 4.4.10: Instante captado durante la ejecución de la roza para la inserción del gato plano inferior.

Fig. 4.4.11: Detalle del área de ensayo una vez introducidos los gatos planos y dispuestos los transductores de desplazamiento y el transductor de presión.

Una vez introducido un nivel tensional vertical reducido mediante los gatos hidráulicos que reaccionan contra el pórtico de carga, con la finalidad de que el murete haga tope con la viga de reacción para evitar el desgarro de la porción de fábrica existente sobre el gato plano superior, se comenzó a introducir ciclos de presurizado – despresurizado mediante los gatos planos, actuando con la bomba manual.

Como se aprecia en las Fig. 4.4.12-4.4.14 se alcanzó la rotura de la porción de fábrica aislada entre los dos gatos planos.

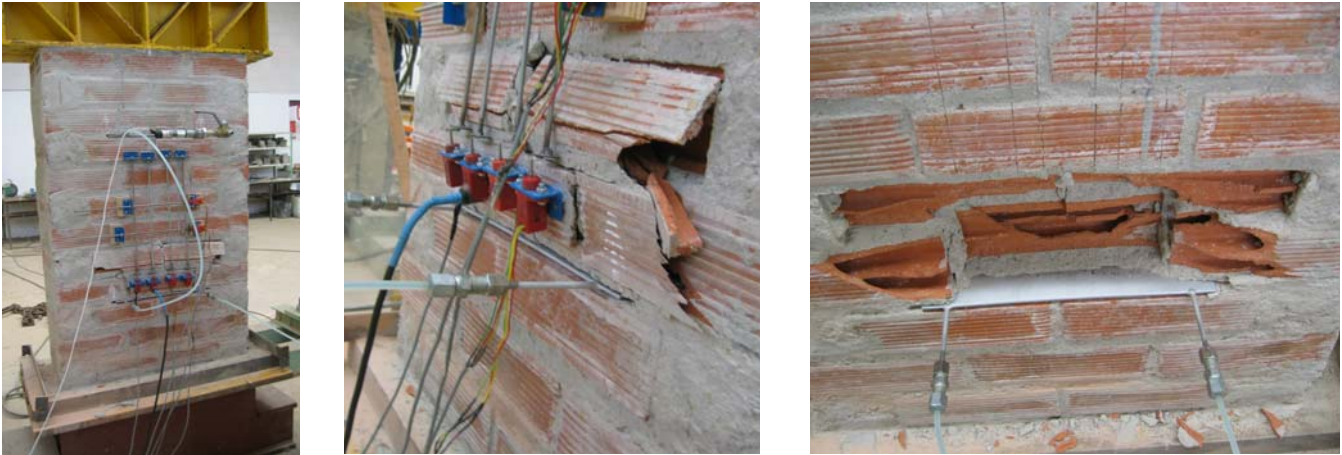


Fig. 4.4.12-4.4.14: Detalle de la rotura generada en la porción de fábrica aislada entre los dos gatos planos.

En la Fig. 4.4.15 se presentan las leyes σ - ϵ registradas por los cuatro transductores verticales que se ilustran en las Fig. 4.4.11 y 4.4.12 (denotados en el gráfico como Vert_1 a 4), por uno de los dos transductores horizontales (denotado como Hor_1), dado que el Hor_2 no registró la señal de forma adecuada, y por el transductor vertical dispuesto en la cara opuesta del murete (denotado como V_tras).

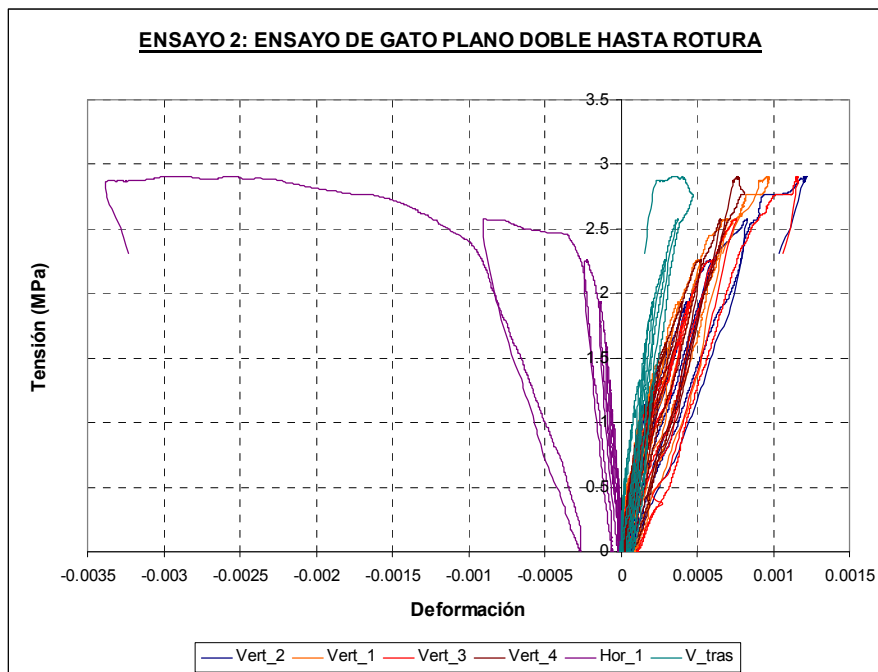


Fig. 4.4.15: Leyes σ - ϵ registradas por los cuatro transductores verticales dispuestos en la cara frontal del muro (Vert_1 a 4), por uno de los dos horizontales de la misma cara (Hor_1), y por el transductor vertical dispuesto en la cara opuesta (V_tras).

Puede apreciarse como la carga introducida generó una distribución tensional no uniforme en la sección del muro, dado que las deformaciones registradas por los transductores dispuestos en la cara frontal fueron mayores que la registrada en el dispuesto en la cara opuesta. Esta circunstancia es lógica dado que por la forma del gato plano semioval (Fig. 4.4.19) la resultante de la carga obtenida, mediante integración de la presión en el área del mismo, presenta cierta excentricidad respecto del eje del muro.

En la Fig. 4.4.16 se presentan las leyes σ - $\epsilon_{\text{vertical}}$ y σ - $\epsilon_{\text{horizontal}}$, promedio, para los cuatro transductores verticales de la cara frontal del muro (Vert_1 a 4) y el Hor_1. Por su parte, en la Fig.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

4.4.17 se ilustra el ajuste lineal realizado en la zona de comportamiento elástico del componente de fábrica (obviando los dos primeros ciclos de ensayo en los que se registró un pico extraño asociado a un reajuste del sistema); y en la Fig. 14.4.8 se presenta un ajuste logarítmico para la zona de comportamiento no lineal de la envolvente de los ciclos de carga introducidos.

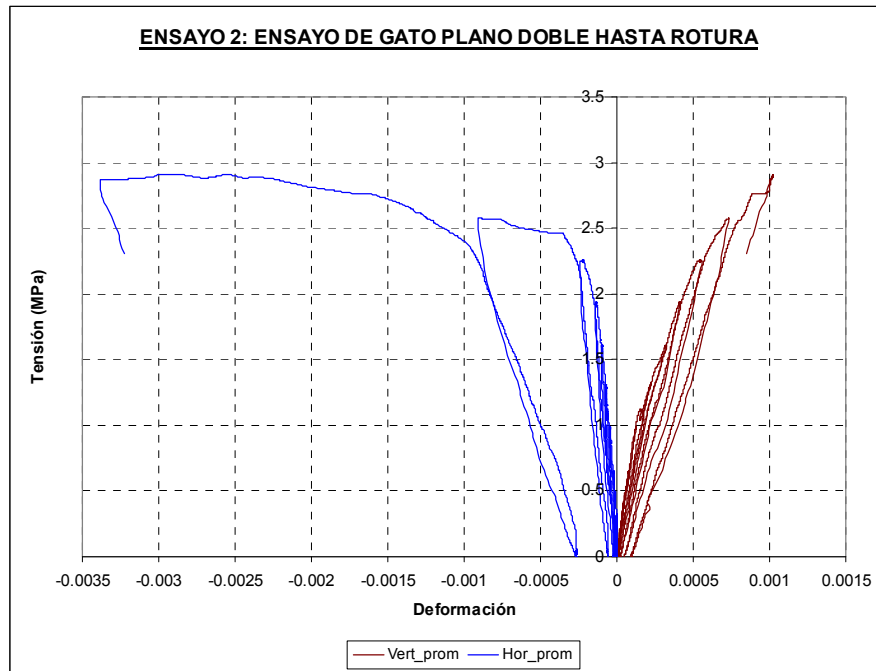


Fig. 4.4.16: Leyes σ - ϵ promedio.

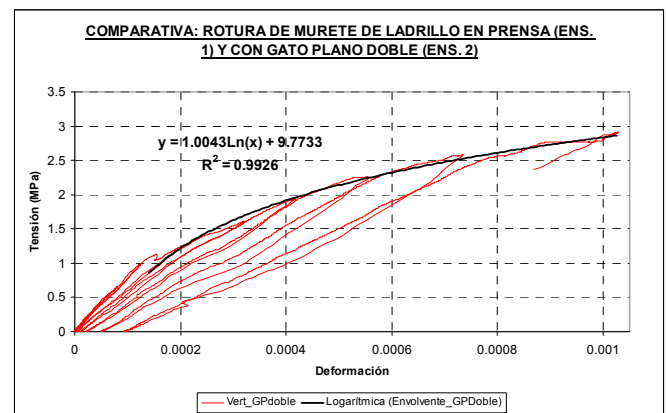
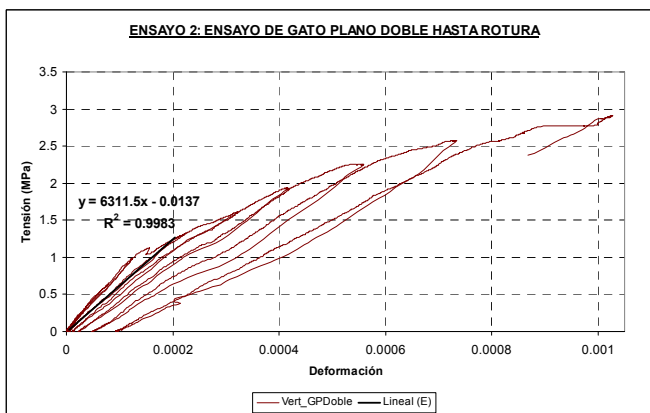


Fig. 4.4.17: Ajuste lineal en la zona de comportamiento elástico, para la estimación del módulo de deformación del componente de fábrica.

Fig. 4.4.18: Ajuste logarítmico en la zona de comportamiento no lineal, puede apreciarse la bondad del ajuste (coeficiente de correlación de 0.9926).

La **tensión de rotura alcanzada en el ensayo nº 2 fue de 2.91 MPa**, y las características mecánicas, obtenidas para la zona de comportamiento lineal del murete, alcanzaron un valor de **6,311.50 MPa para el módulo de elasticidad y 0.38 para el coeficiente de Poisson**.

Obviamente, fue necesario obtener el coeficiente geométrico, k_a , y el coeficiente asociado a la rigidez inherente de los gatos planos involucrados en el ensayo, k_m .

Con la finalidad de estimar el área neta de contacto entre los gatos planos y el muro se dispuso un calco entre dos láminas de papel, de manera que los puntos de presión quedasen reflejados en el papel por acción del calco. Igualmente, fueron obtenidas las áreas de las rozas ejecutadas en fase de demolición, si bien podían haberse estimado previamente registrando la profundidad de las mismas en diferentes puntos a lo largo de su longitud.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En la Fig. 4.4.19 se ilustra el área aproximada de la roza, así como el área efectiva de contacto del gato superior.

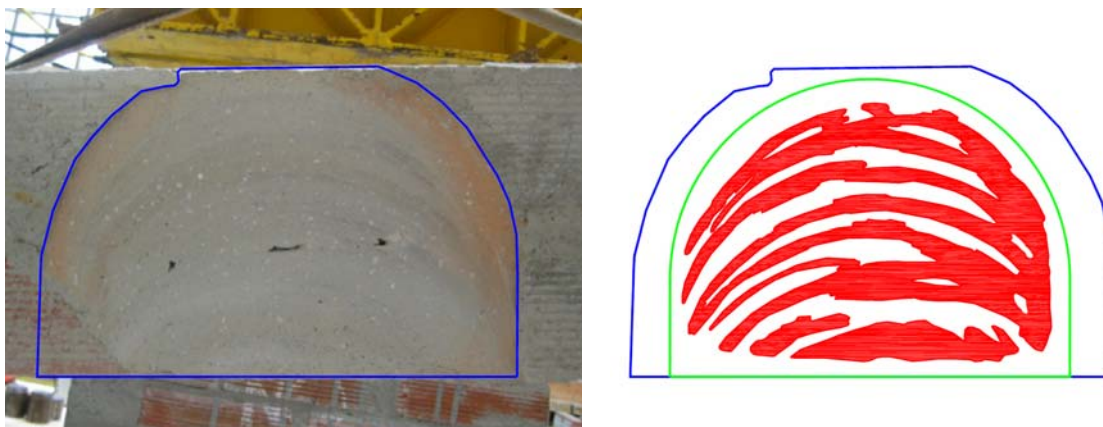


Fig. 4.4.19: Replanteo del área de la roza ($1,002.38 \text{ cm}^2$), el área del gato plano superior (778.56 cm^2) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (359.79 cm^2).

Por su parte en la Fig. 4.4.20 se ilustra el área aproximada de la roza, así como el área efectiva de contacto del gato plano inferior.



Fig. 4.4.20: Replanteo del área de la roza (851.89 cm^2), el área del gato plano inferior (778.56 cm^2) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (430.40 cm^2).

En base a las áreas obtenidas tanto para las rozas ejecutadas, como para el área efectiva de contacto, y conociendo la geometría de los gatos planos empleados en el ensayo (Semioval $350 \times 260 \times 3.5 \text{ mm}$), es posible obtener diferentes relaciones geométricas (k_a). En la Tabla 4.4.1 se resumen los factores geométricos obtenidos.

Tabla 4.4.1: Factores geométricos, k_a , obtenidos para cada uno de los dos gatos planos involucrados en el ensayo n° 2.

Factores geométricos, k_a , Ensayo n° 2			
		Áreas (cm^2)	Constantes derivadas
Gato plano superior (Fig. 4.4.19)	A_{roza}	1,002.38	$K_{\text{gato-roza}}$ 0.777
	A_{gato}	778.56	$K_{\text{contacto-gato}}$ 0.462
	A_{contacto}	359.79	$K_{\text{contacto-roza}}$ 0.359
Gato plano inferior (Fig. 4.4.20)	A_{roza}	851.89	$K_{\text{gato-roza}}$ 0.914
	A_{gato}	778.56	$K_{\text{contacto-gato}}$ 0.553
	A_{contacto}	430.40	$K_{\text{contacto-roza}}$ 0.505

A su vez, en la Tabla 4.4.2 se presentan los valores medios obtenidos para dichos factores geométricos.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.4.2: Valores medios obtenidos para los factores geométricos, k_a , involucrados en el ensayo nº 2.

Factores geométricos, k_a , Ensayo nº 2	
$K_{\text{gato-roza}}$	0.845
$K_{\text{contacto-gato}}$	0.507
$K_{\text{contacto-roza}}$	0.432

Por su parte, en relación a la constante de calibración de los gatos planos, k_m , se ha adoptado un valor de 0.95 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

4.4.2.3 Comparativa de los ensayos nº 1 y nº 2

En primer lugar, en base a la comparación directa de las leyes σ - ϵ obtenidas en los ensayos nº 1 y nº 2, en las Fig. 4.4.21 y 4.4.22 se justifica cuál de los tres factores geométricos obtenidos ($K_{\text{gato-roza}}$, $K_{\text{contacto-gato}}$ y $K_{\text{contacto-roza}}$) debe emplearse para obtener la tensión real introducida en el muro, mediante corrección de la presión manométrica comunicada por la bomba. Es obvio que el factor a introducir es el que relaciona el área de la roza ejecutada con el área del gato plano ($K_{\text{gato-roza}}$), dado que al introducir los otros dos coeficientes estimados el ajuste de las leyes σ - ϵ estimadas mediante gato plano doble (ensayo nº 2) no presentan un buen ajuste con la obtenida en el ensayo nº 1.

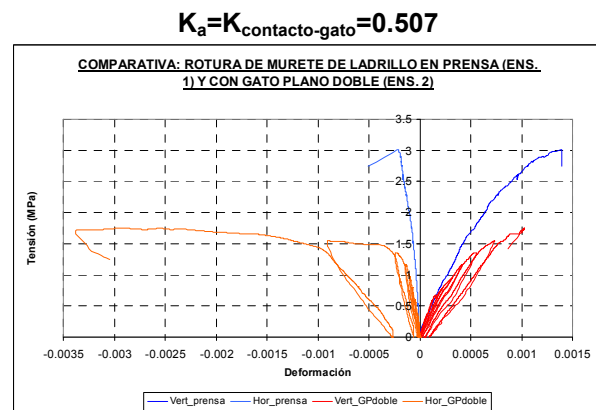
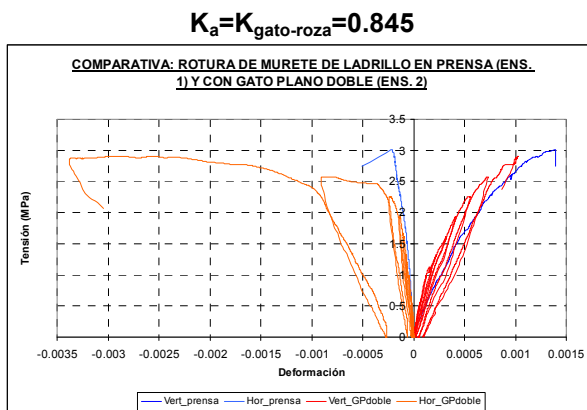


Fig. 4.4.21: Comparación de las leyes σ - ϵ obtenidas en el ensayo nº 1 y en el ensayo nº 2 empleando como factor geométrico, k_a , el que relaciona el área de la roza con el área del gato plano ($k_{\text{gato-roza}}$).

Fig. 4.4.22: Comparación de las leyes σ - ϵ obtenidas en el ensayo nº 1 y en el ensayo nº 2 empleando como factor geométrico, k_a , el que relaciona el área efectiva de contacto con el área del gato plano ($k_{\text{contacto-gato}}$).

Una vez justificada la elección del coeficiente geométrico a emplear, en la Fig. 4.4.23 se presentan las leyes σ - ϵ obtenidas en ambos ensayos, así como el ajuste logarítmico realizado sobre la envolvente de los ciclos realizados en el ensayo de gato plano doble (ensayo nº 2).

Puede apreciarse como la tensión de rotura es aproximada en ambos ensayos con bastante afinidad, si bien la rigidez asociada a la fábrica componente de cada uno de los muretes ensayados difiere. Concretamente el componente estructural involucrado en el ensayo nº 2 presenta mayor rigidez, mayor pendiente en la rama de comportamiento elástico, que el del ensayo nº 1. Esta circunstancia podría justificarse en tanto que cada uno de los ensayos se ha realizado en un murete de ladrillo diferente pues, como ya se ha referido, pese a emplear el mismo equipo de albañiles y los mismos materiales, el carácter artesanal intrínseco de la construcción de obra de fábrica genera dispersiones inevitables. Si bien, las deformaciones registradas en el área de control del ensayo nº 2 también podrían estar influenciadas por un efecto de contorno de los gatos planos existentes.

De la misma forma, la deformación horizontal desarrollada en el ensayo nº 2, obviamente, es mayor que la alcanzada en el ensayo nº 1, dado que en cada uno de los ciclos de carga realizados se produce cierta amplificación de la red de microfisuras generadas a partir de cierto nivel de carga, dicho efecto es acumulativo y, por ende, se manifiesta en una mayor deformación transversal al sentido de la carga.

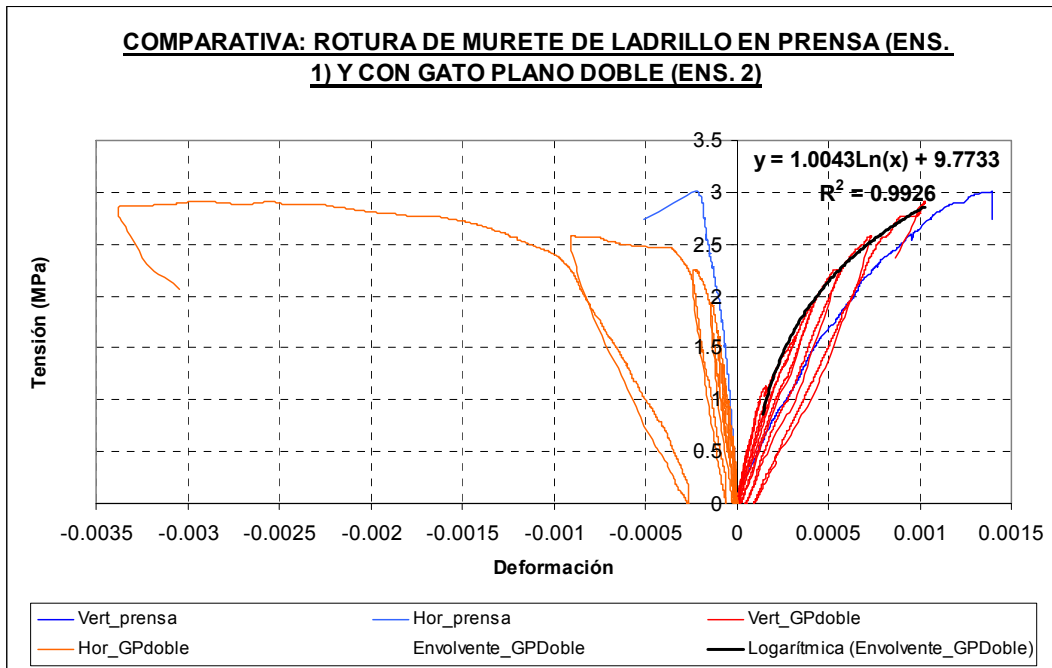


Fig. 4.4.23: Comparación de las leyes σ - ϵ obtenidas en los ensayos n° 1 (ensayo a compresión frente a carga monotónica creciente hasta rotura) y el ensayo n° 2 (ensayo de gato plano doble).

En la Tabla 4.4.3 se indican, para cada uno de los dos ensayos realizados, la tensión de rotura, el módulo de deformación y el coeficiente de Poisson obtenido.

Tabla 4.4.3: Tensión de rotura, el módulo de deformación y el coeficiente de Poisson obtenidos en los ensayos n° 1 y n° 2 ejecutados sobre muretes de ladrillo hueco.

Ensayo	σ_r (MPa)	E (MPa)	ν
N° 1	3.01	3,244.00	0.14
N° 2	2.91	6,311.50	0.38

Como conclusiones más significativas de los dos ensayos realizados cabe referir:

- La tensión de rotura estimada mediante ambos ensayos fue del mismo orden. La relación entre las mismas es $\frac{\sigma_{r,gato-plano}}{\sigma_{r,compresión}} = 0.97$.
- El módulo de deformación fue significativamente distinto, circunstancia que puede justificarse en base a que los ensayos fueron realizados en componentes de fábrica diferentes.
- La deformación horizontal, transversal al sentido de aplicación de la carga, lógicamente, es mayor en el caso del ensayo de gato plano doble que en el ensayo a compresión mediante carga monotónica creciente hasta rotura.
- La fase no lineal del ensayo mediante gato plano doble puede ajustarse con bastante aproximación mediante una curva logarítmica.

4.4.3 Ensayos n° 3 y n° 4

Como ya se ha referido con anterioridad existen experiencias de laboratorio sobre el comportamiento de las estructuras de fábrica frente a cargas cíclicas o pseudo-dinámicas (Senthivel et al. 2007; Senthivel et al. 2006; Senthivel y Uzoegbo 2004; Senthivel y Sinha 2003).

En lo que sigue se trata de hacer una breve descripción de la finalidad de dichos ensayos. Con posterioridad se exponen los resultados obtenidos en dos pruebas, una de los cuáles versó sobre la posible aplicación in situ de dicha metodología experimental mediante la técnica de gato plano doble, aspecto novedoso en tanto que, por la experiencia obtenida de la consulta de abundantes referencias a lo largo de la tesis doctoral, nunca antes se ha llevado a la práctica. Aquí se

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

presenta, a modo de tanteo, si bien se ofrece como una posible continuación de los trabajos desarrollados en esta investigación.

La curva envolvente (“envelope curve”, Fig. 4.4.24) bajo carga pseudo-dinámica coincide con la curva tensión – deformación de un ensayo de carga monotónica. Esta curva gobernaría el comportamiento frente a compresión uniaxial de la fábrica pudiendo estimar su resistencia, en general, perpendicular a la junta de mortero de la fábrica.

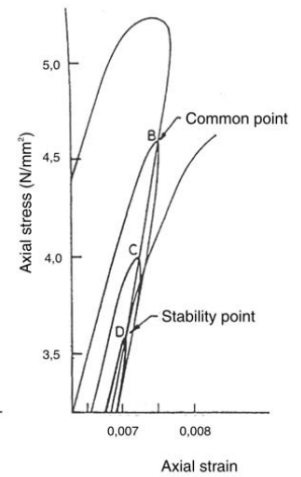
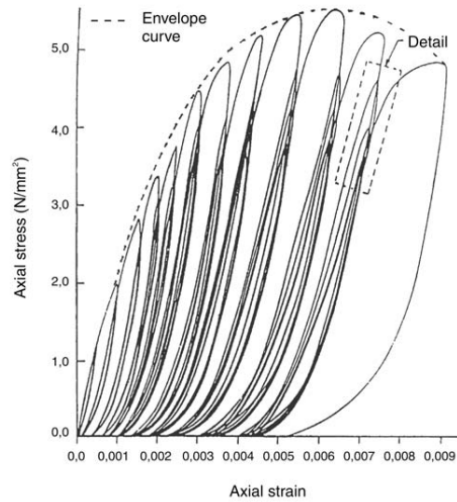
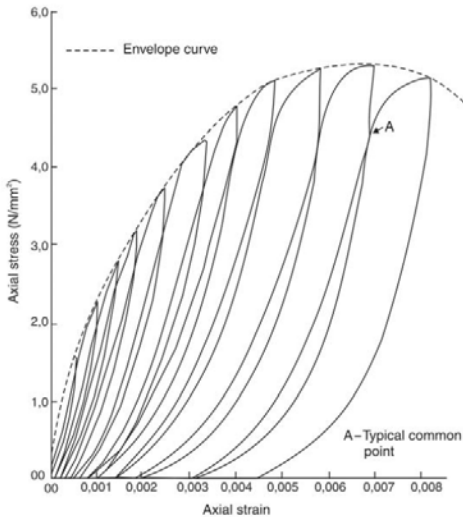


Fig. 4.4.24: Aspecto de la curva envolvente (Senthivel y Sinha 2003).

Fig. 4.4.25: Definición del punto común (“common point”) y del punto de estabilidad (“stability point”), Senthivel y Uzoegbo (2004).

El punto de intersección entre la rama de descarga de un ciclo y la siguiente rama de carga se denomina punto común (“common point”, Fig. 4.4.25 y 4.4.26). Tensiones superiores a la del “common point” producen deformación adicional remanente, mientras que niveles tensionales inferiores resultarán en que la ley tensión-deformación genere un bucle donde el punto de intersección de la curva de recarga y la curva de descarga inicial descenderá, acabando de estabilizarse en un límite inferior denominado punto de estabilidad (“stability point”, Fig. 4.4.25 y 4.4.27).

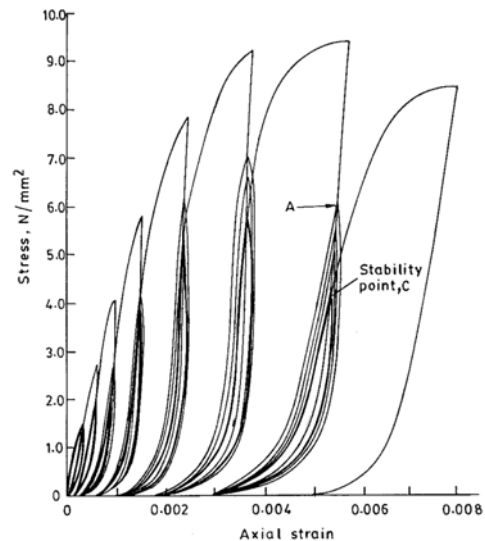
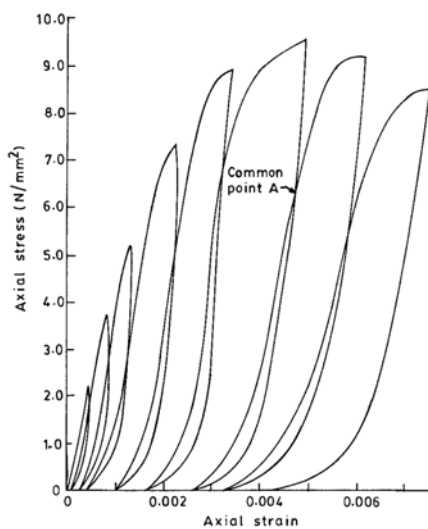


Fig. 4.4.26: Curva de histéresis típica tensión-deformación bajo carga cíclica compresiva (ensayo para la determinación del punto común), Senthivel y Sinha (2003).

Fig. 4.4.27: Curva de histéresis típica tensión-deformación bajo carga cíclica compresiva (ensayo para la determinación del punto de estabilidad), Senthivel y Sinha (2003).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Definiendo un conjunto de puntos de estabilidad puede identificarse la curva tensión – deformación que gobierna el comportamiento pseudo-dinámico de la estructura de fábrica, lo cuál constituye una contribución interesante desde el punto de vista del diseño de estructuras de fábrica dado que se conocería la reducción de la resistencia a compresión (dada por la curva envolvente) debido al efecto alternativo de las cargas de servicio, que deben tenerse en cuenta (Fig. 4.4.28).

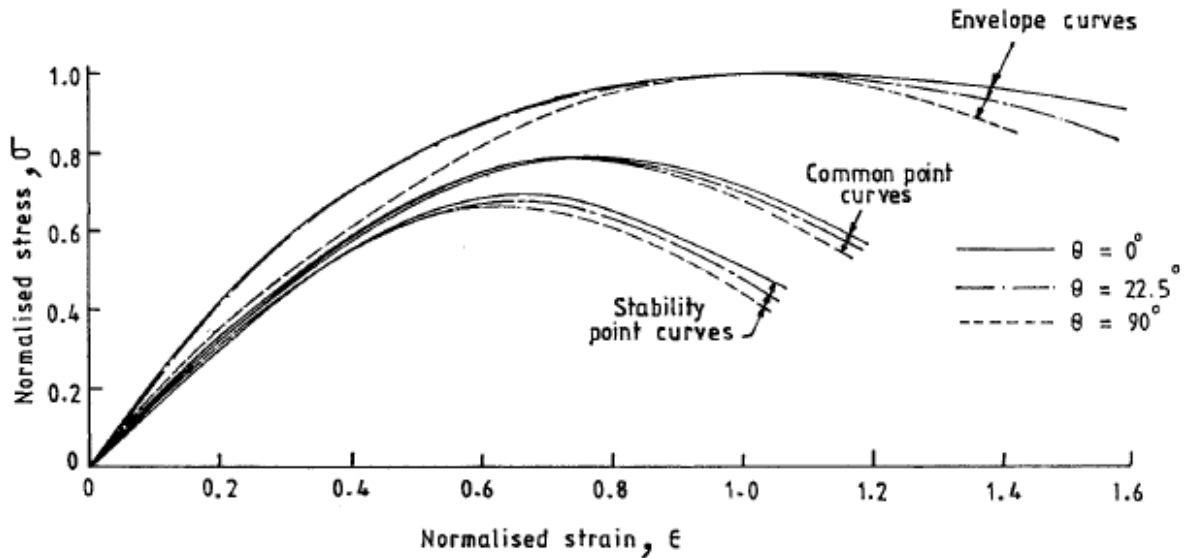


Fig. 4.4.28: Curvas normalizadas tensión-deformación (Senthivel y Sinha 2003).

El coeficiente de energía de disipación (“energy dissipation ratio”), R_n , se define como la proporción de la energía disipada por ciclo sobre el total de energía introducida (Fig. 4.4.29). La energía disipada por ciclo es estimada midiendo el área encerrada por el bucle de recarga y descarga en cada ciclo. La energía total introducida por ciclo es el total del área encerrada por el ciclo de recarga, el eje de abscisas y una vertical por la máxima deformación registrada durante la recarga.

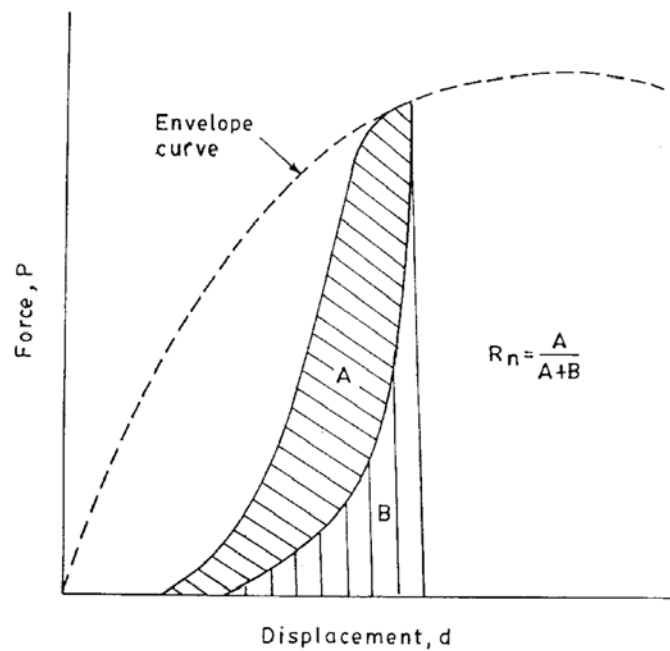


Fig. 4.4.29: Determinación del coeficiente de energía de disipación, R_n .

La relación entre R_n y ϵ_p (proporción de deformación plástica) puede emplearse para identificar el punto de la historia de cargas en que comienza la degradación resistente del componente estructural.

Aplicación de la teoría expuesta a fábricas in situ, mediante la ejecución de un ensayo pseudo-dinámico mediante gato plano doble.

Si se aplican estas consideraciones en un ensayo de gato plano doble podrían obtenerse las curvas referidas (Fig. 4.4.30): la envolvente (“envelope curve”), la curva definida por los puntos comunes (“common point curve”) y, finalmente, obteniendo para cada ciclo de carga el límite para el que se estabiliza la intersección entre las ramas de recarga y la de descarga inicial, denominado en la bibliografía consultada como punto de estabilidad, podría definirse la curva de estabilidad (“stability curve”).

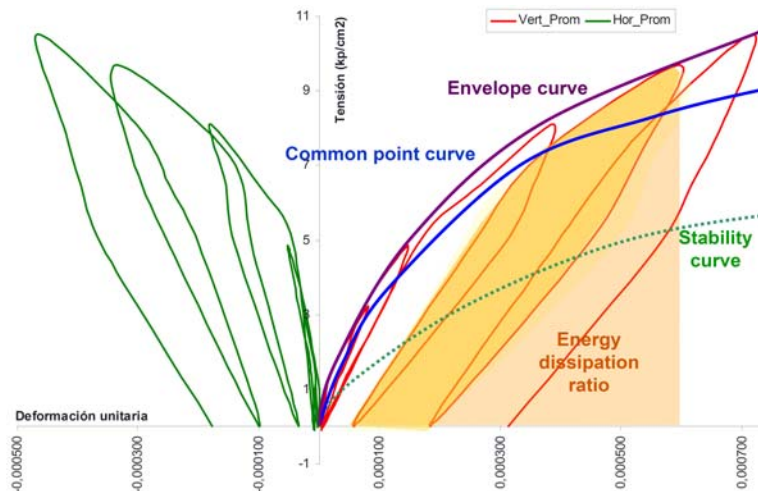


Fig. 4.4.30: Ejemplo de curva obtenida mediante un ensayo de gato plano doble en una mampostería de arenisca ensayada en Zarratón (La Rioja).

De esta forma el ensayo de gato plano adquiere un especial interés dado que mediante su empleo puede obtenerse una cantidad apreciable de información de una determinada fábrica y lo que es más importante, in situ. De esta forma podría estimarse:

- El nivel tensional en servicio, σ , en un área de la estructura de fábrica, mediante el empleo de gato plano simple.
- El módulo de elasticidad, E .
- El coeficiente de Poisson, ν .
- La curva envolvente, de la que podrá estimarse la resistencia de la fábrica frente a compresión uniaxial, σ_r , perpendicular al plano de inserción de los gatos planos.
- El coeficiente de seguridad de la fábrica: σ/σ_r (frente a carga estática).
- La curva de puntos comunes, que proporciona información sobre el comportamiento elástico de la fábrica.
- La curva de estabilidad, que indica la reducción de la resistencia a compresión por efecto de las cargas de servicio alternativas o cíclicas.
- Coeficiente de disipación de energía, que proporciona información complementaria sobre la rigidez de la fábrica.

En lo que sigue se trata de comparar las curvas σ - ϵ obtenidas mediante un ensayo pseudo-dinámico realizado de forma convencional, con las obtenidas mediante la técnica de gato plano doble, de cara a sacar conclusiones sobre la posible aplicación de esta metodología para la caracterización pseudo-dinámica in situ de componentes de fábrica.

4.4.3.1 Ensayo nº 3

El ensayo nº 3 consistió en una prueba pseudo-dinámica mediante gato plano doble, de forma que para el área de fábrica movilizada entre los dos gatos planos se realizaron una serie de ciclos de carga descarga hasta rotura.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En la Fig. 4.4.31 se presenta un instante durante el corte de las rozas, mediante sierra de disco orbital, para la inserción de los dos gatos planos. Por su parte, la Fig. 4.4.32 recoge una perspectiva general del emplazamiento del ensayo una vez introducidos los dos gatos planos y dispuestos los transductores de desplazamiento, y el transductor para registro de la presión introducida. La Fig. 4.4.33 ilustra un detalle del área de ensayo.

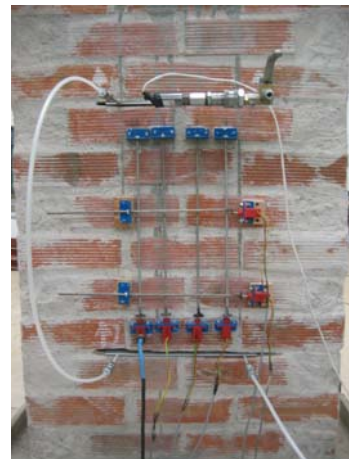


Fig. 4.4.31: Instante captado durante la ejecución de la rozas para la inserción del gato plano superior del ensayo nº 3.

Fig. 4.4.32 y 4.4.33: Detalle del emplazamiento y del área de ensayo una vez introducidos los gatos planos y dispuestos los transductores de desplazamiento y el transductor de presión.

Una vez introducido un nivel tensional vertical reducido mediante los gatos hidráulicos que reaccionan contra el pórtico de carga, con la finalidad de que el murete haga tope con la viga de reacción para evitar el desgarro de la porción de fábrica existente sobre el gato plano superior, se comenzó a introducir ciclos de presurizado – despresurizado mediante los gatos planos, actuando con la bomba manual.

Como se aprecia en las Fig. 4.4.34-4.4.36 se alcanzó la rotura de la porción de fábrica aislada entre el gato plano superior y la viga de reparto.



Fig. 4.4.34-4.4.36: Detalle de la rotura generada en la porción de fábrica aislada entre el gato plano superior y la viga de reacción.

En las Fig. 4.4.35 y 4.4.36 puede apreciarse el agrietamiento “pseudo-radial” generado internamente en la fábrica de ladrillo. Debido a que el gato plano se materializa mediante la soldadura de dos chapas a lo largo de sus bordes, dicha unión genera una rigidez importante en el

perímetro del dispositivo, el cuál tiene su dilatación parcialmente coartada en relación a la parte central del gato. Esto supone que la deformación del mismo no sea uniforme, expandiéndose con mayor amplitud en su parte central, circunstancia que desemboca en que el nivel tensional introducido en la fábrica tampoco sea uniforme, desencadenando el desarrollo de los agrietamientos pseudo-radiales ilustrados.

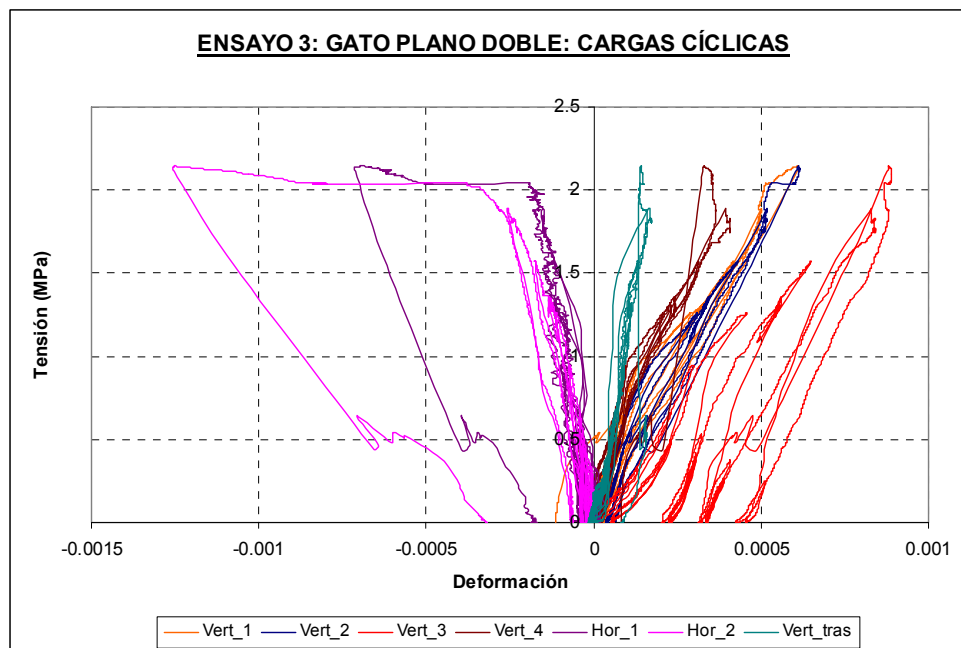


Fig. 4.4.37: Leyes σ - ϵ registradas por los cuatro transductores verticales dispuestos en la cara frontal del muro (Vert_1 a 4), por los dos horizontales de la misma cara (Hor_1 y 2), y por el transductor vertical dispuesto en la cara opuesta (Vert_tras).

En la Fig. 4.4.37 se presentan las leyes σ - ϵ registradas por los cuatro transductores verticales que se ilustran en las Fig. 4.4.33 y 4.4.34 (denotados en el gráfico como Vert_1 a 4), por los dos transductores horizontales (denotado como Hor_1 y 2), y por el transductor vertical dispuesto, centrado en el muro, por la cara opuesta a la presentada en las figuras referidas (denotado como Vert_tras).

Al igual que ocurrió en el ensayo nº 2, puede apreciarse como la carga introducida generó una distribución tensional no uniforme en la sección del muro, dado que las deformaciones registradas por los transductores dispuestos en la cara frontal fueron mayores que la registrada por el dispuesto en la cara opuesta.

Por su parte, para la obtención de las curvas promedio que van a regir el comportamiento mecánico en el área de ensayo no se tuvo en cuenta el Hor_1, dado que la señal registrada por el mismo, aunque con una tendencia similar a la registrada por el Hor_2, presenta una contaminación por ruido apreciable, probablemente asociado a una incorrecta fijación del elemento al sustrato cerámico.

En la Fig. 4.4.38 se presentan las leyes σ - $\epsilon_{\text{vertical}}$ y σ - $\epsilon_{\text{horizontal}}$, promedio, para los cuatro transductores verticales de la cara frontal del muro (Vert_1 a 4) y el Hor_2. **La tensión de rotura alcanzada en el ensayo nº 3 fue de 2.14 MPa.**

Obviamente, fue necesario obtener el coeficiente geométrico, k_a , y el coeficiente asociado a la rigidez inherente de los gatos planos involucrados en el ensayo, k_m .

Con la finalidad de estimar el área neta de contacto entre los gatos planos y el muro se dispuso un calco entre dos láminas de papel, de manera que los puntos de presión quedasen reflejados en el papel por acción del calco. Igualmente, fueron obtenidas las áreas de las rozas ejecutadas en fase de demolición, si bien podían haberse estimado previamente registrando la profundidad de las mismas en diferentes puntos a lo largo de su longitud.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

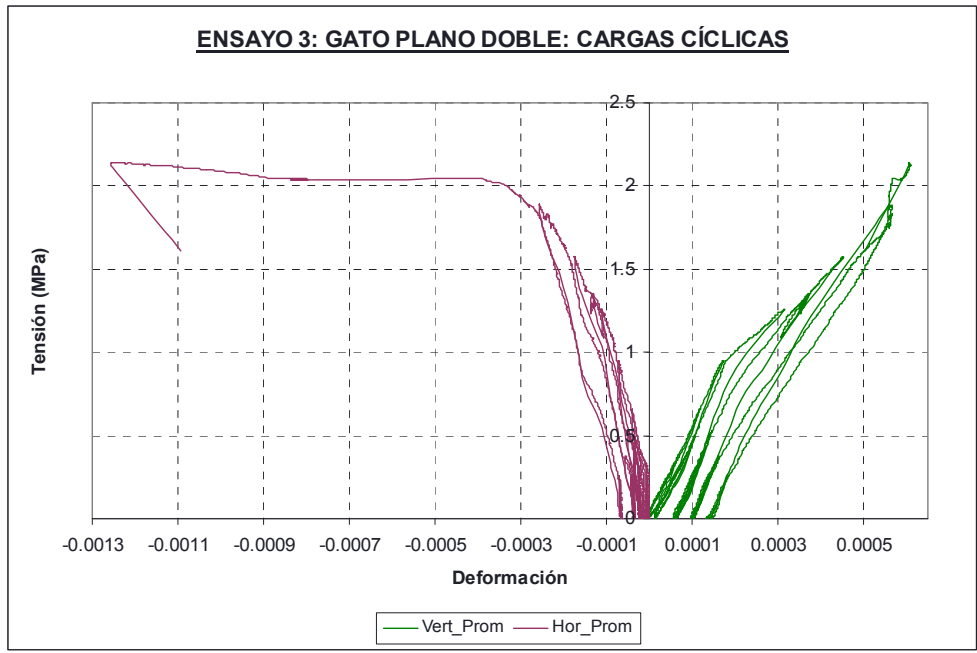


Fig. 4.4.38: Leyes σ - ϵ promedio.

En la Fig. 4.4.39 se ilustra el área aproximada de la roza, así como el área efectiva de contacto del gato superior.

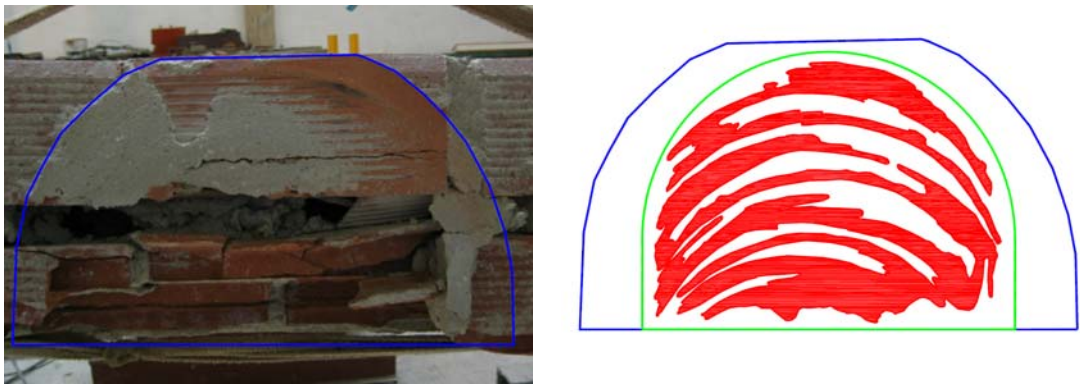


Fig. 4.4.39: Replanteo del área de la roza ($1,087.89 \text{ cm}^2$), el área del gato plano superior (778.56 cm^2) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (373.18 cm^2).

Por su parte en la Fig. 4.4.40 se ilustra el área aproximada de la roza, así como el área efectiva de contacto del gato plano inferior.

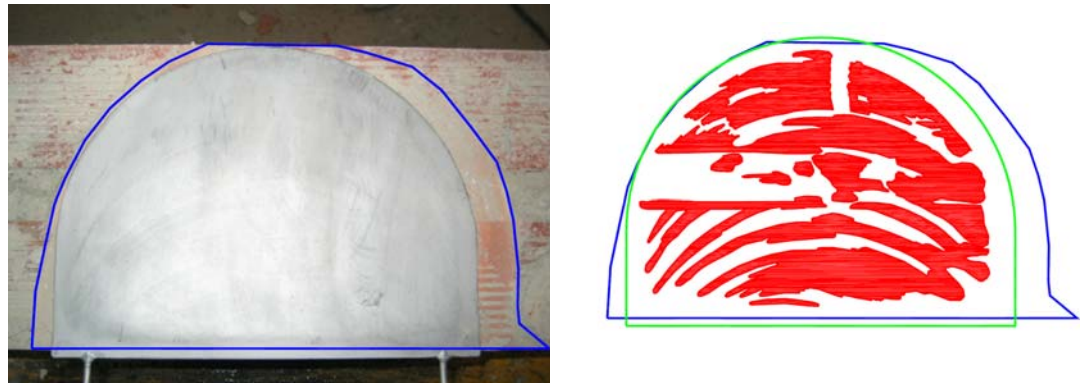


Fig. 4.4.40: Replanteo del área de la roza (836.06 cm^2), el área del gato plano inferior (778.56 cm^2) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (340.90 cm^2).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En base a las áreas obtenidas tanto para las rozas ejecutadas, como para el área efectiva de contacto, y conociendo la geometría de los gatos planos empleados en el ensayo (Semioval 350x260x3.5mm), es posible obtener diferentes relaciones geométricas (k_a). En la Tabla 4.4.4 se resumen los factores geométricos obtenidos.

Tabla 4.4.4: Factores geométricos, k_a , obtenidos para cada uno de los dos gatos planos involucrados en el ensayo nº 3.

	Factores geométricos, k_a , Ensayo nº 3			
	Áreas (cm ²)		Constantes derivadas	
Gato plano superior (Fig. 4.4.39)	A_{roza}	1,087.89	$K_{gato-roza}$	0.716
	A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$	0.479
	$A_{contacto}$	373.18	$K_{contacto-roza}$	0.343
Gato plano inferior (Fig. 4.4.40)	A_{roza}	836.06	$K_{gato-roza}$	0.931
	A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$	0.438
	$A_{contacto}$	340.90	$K_{contacto-roza}$	0.408

A su vez, en la Tabla 4.4.5 se presentan los valores medios obtenidos para dichos factores geométricos.

Tabla 4.4.5: Valores medios obtenidos para los factores geométricos, k_a , involucrados en el ensayo nº 3.

Factores geométricos, k_a , Ensayo nº 3	
$K_{gato-roza}$	0.823
$K_{contacto-gato}$	0.459
$K_{contacto-roza}$	0.375

Por su parte, en relación a la constante de calibración de los gatos planos, k_m , se ha adoptado un valor de 0.95 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

4.4.3.2 Ensayo nº 4

El ensayo nº 4 consistió en una prueba en laboratorio frente a cargas de compresión pseudo-dinámicas hasta rotura. En la Fig. 4.4.41 se ilustra el murete objeto de ensayo. Por su parte las Fig. 4.4.42 y 4.4.43 presentan el modo de fallo movilizado una vez finalizada la prueba.



Fig. 4.4.41: Murete nº 4 instantes previos a la ejecución del ensayo a compresión frente a cargas pseudo-dinámicas hasta rotura (ensayo nº 4).

Fig. 4.4.42 y 4.4.43: Modo de fallo del murete una vez finalizado el ensayo.

Por su parte en la Fig. 4.4.44 se presentan las leyes σ - ϵ registradas por los cuatro transductores verticales que se ilustran en la Fig. 4.4.41 (denotados en el gráfico como Vert_1 a 4), por los dos transductores horizontales (denotados como Hor_1 y 2), y por el transductor vertical dispuesto, centrado en el muro, por la cara opuesta (denotado como Vert_tras). Las leyes representadas no incluyen el instante de la rotura del espécimen.

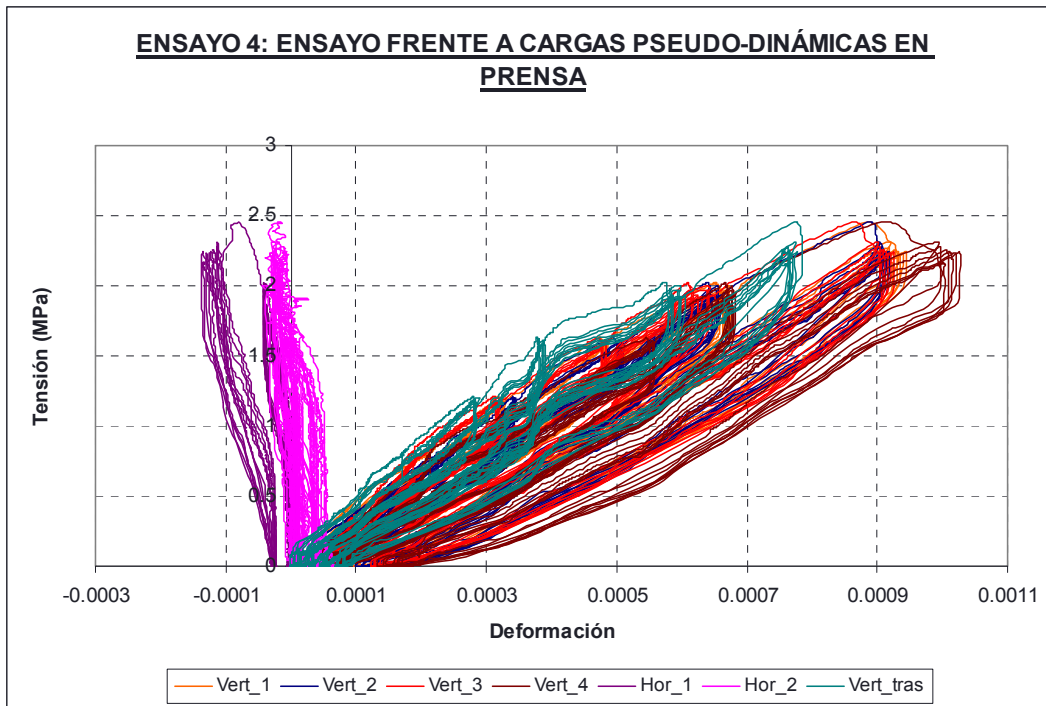


Fig. 4.4.44: Leyes σ - ϵ registradas por los cuatro transductores verticales dispuestos en la cara frontal del muro (Vert_1 a 4), por los horizontales de la misma cara (Hor_1 y 2), y por el transductor vertical dispuesto en la cara opuesta (Vert_tras). Representan la evolución hasta un instante previo a la rotura.

Puede apreciarse como la carga introducida en cabeza del muro presentó cierta excentricidad, dado que la deformación registrada por el transductor aislado dispuesto en la cara opuesta (Fig. 4.4.43) fue levemente inferior que las registradas por los cuatro dispositivos de la cara frontal (Fig. 4.4.41). Esta circunstancia desemboca en que la distribución de tensiones no sea del todo uniforme. Por su parte, también se aprecia como la señal deformacional registrada por el transductor Hor_2 no fue del todo adecuada, posiblemente debido a una incorrecta fijación del mismo al sustrato cerámico.

En la Fig. 4.4.45 y 4.4.46 se presentan las leyes σ - $\epsilon_{vertical}$ y σ - $\epsilon_{horizontal}$, promedio, una vez discriminado dicho transductor Hor_2. La Fig. 4.4.45 recoge la evolución tenso-deformacional hasta el instante de la **rotura**, la cuál alcanzó un valor de **2.75 MPa**. Por su parte la Fig. 4.4.46 recoge parte de los ciclos de carga realizados, los obtenidos mediante el promediado de los presentados en la Fig. 4.4.44, previamente a que alguno de los transductores registrasen lecturas incongruentes relacionadas con la propagación de las fisuras, a mayores niveles de tensión.

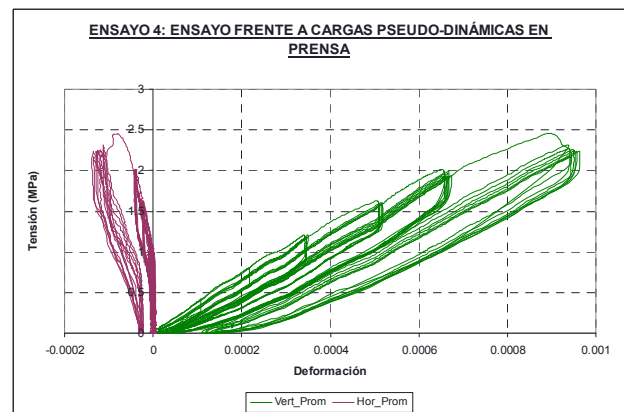
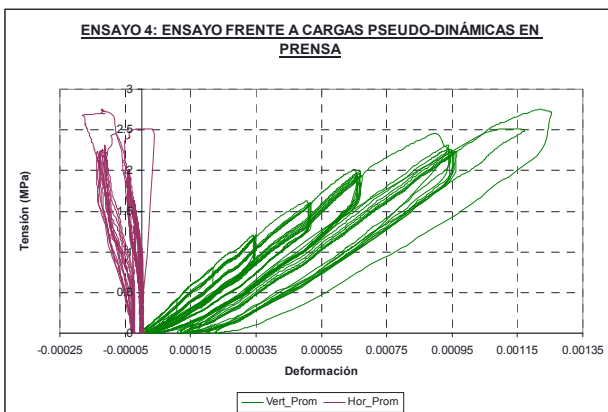


Fig. 4.4.45: Leyes σ - ϵ promedio obtenidas en el ensayo n° 4 frente a cargas pseudo-dinámicas, hasta rotura.

Fig. 4.4.46: Leyes σ - ϵ obtenidas mediante el promediado de las presentadas por los transductores de la Fig. 44 (representan la evolución hasta un instante previo a la rotura).

4.4.3.3 Comparativa de los ensayos nº 3 y nº 4

En primer lugar, en base a la comparación directa de las leyes σ - ϵ obtenidas en los ensayos nº 3 y nº 4, en las Fig. 4.4.47 y 4.4.48 se justifica cuál de los tres factores geométricos obtenidos ($K_{\text{gato-roza}}$, $K_{\text{contacto-gato}}$ y $K_{\text{contacto-roza}}$) debe emplearse para obtener la tensión real introducida en el muro, mediante corrección de la presión manométrica comunicada por la bomba. Es obvio que el factor a introducir es el que relaciona el área de la roza ejecutada con el área del gato plano ($K_{\text{gato-roza}}$), dado que al introducir los otros dos coeficientes estimados, el ajuste de las leyes σ - ϵ obtenidas mediante gato plano doble (ensayo nº 3) no presentan un buen ajuste con la obtenida en el ensayo nº 4.

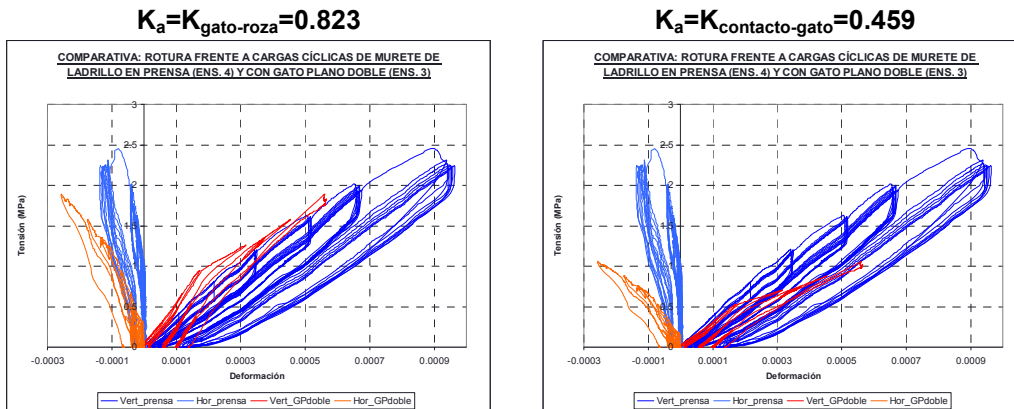


Fig. 4.4.47: Comparación de las leyes σ - ϵ obtenidas en el ensayo nº 3 y en el ensayo nº 4 empleando como factor geométrico, k_a , el que relaciona el área de la roza con el área del gato plano ($k_{\text{gato-roza}}$).

Fig. 4.4.48: Comparación de las leyes σ - ϵ obtenidas en el ensayo nº 3 y en el ensayo nº 4 empleando como factor geométrico, k_a , el que relaciona el área efectiva de contacto con el área del gato plano ($k_{\text{contacto-gato}}$).

Una vez justificada la elección del coeficiente geométrico a emplear, en la Fig. 4.4.49 se presentan las leyes σ - ϵ obtenidas en ambos ensayos.

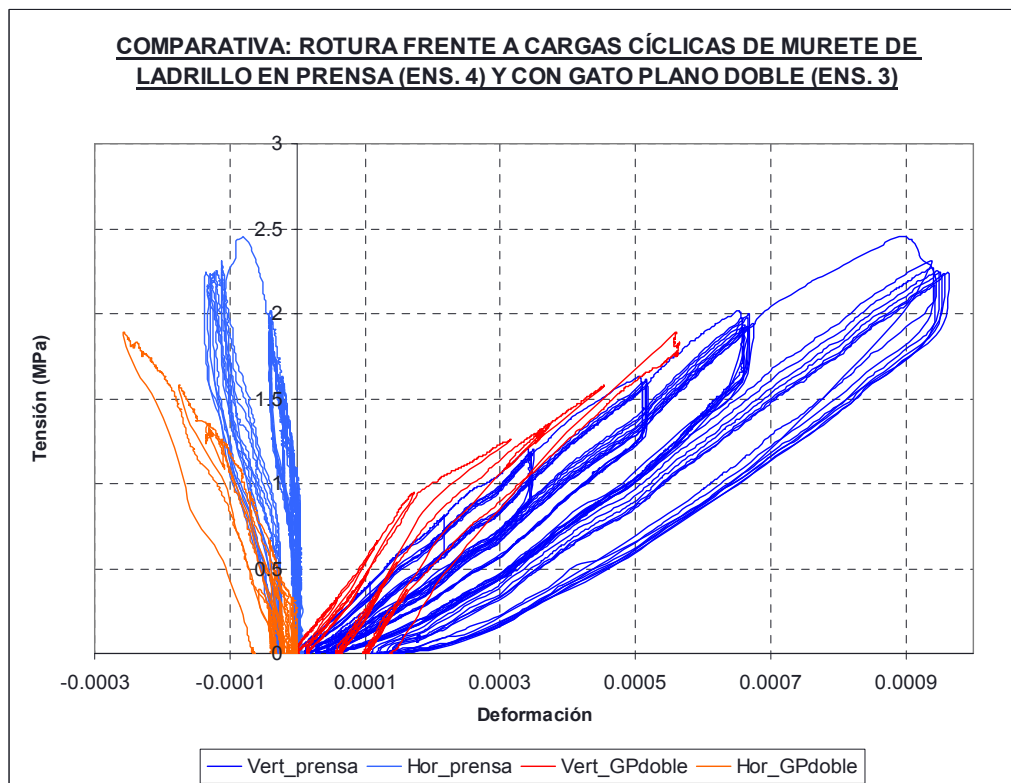


Fig. 4.4.49: Leyes σ - ϵ promedio obtenidas en los ensayos cíclicos (nº 3 y nº 4).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Puede comprobarse, como ya se ha referido con anterioridad, las peores prestaciones mecánicas frente a cargas estáticas, ofrecidas por el murete de fábrica de ladrillo hueco ensayado en tercer lugar, circunstancia que se relaciona con una peor ejecución del componente estructural, pues éste presentaba cierto desplome.

Por su parte en la Fig. 4.4.50 se presentan, para los ensayo nº 3 y 4 referidos, la “envelope curve”, la “common point curve” y la “stability curve”. Por su parte en la Tabla 4.4.6 se relacionan las coordenadas obtenidas para diversos puntos de dichas curvas.

Puede comprobarse que el susodicho murete nº 3, igualmente, manifiesta peor comportamiento frente a cargas pseudo-dinámicas que las mostradas por el componente de fábrica nº 4.

Los máximos presentados por la “common point curve” y la “stability curve” obtenidas para el murete nº 3, alcanzan niveles muy bajos (del orden de los 0.5 MPa) circunstancia que pone de manifiesto la afirmación realizada con anterioridad.

Por su parte, en el murete nº 4 puede apreciarse un comportamiento pseudo-elástico hasta el entorno de los 1.4 MPa. Con anterioridad a dicho umbral el comportamiento frente a cargas estáticas (“envelope curve”) y pseudo-dinámicas (“stability curve”) presentan bastante aproximación; si bien, para niveles de tensión mayores, se comienza a acusar un distanciamiento de las curvas referidas.

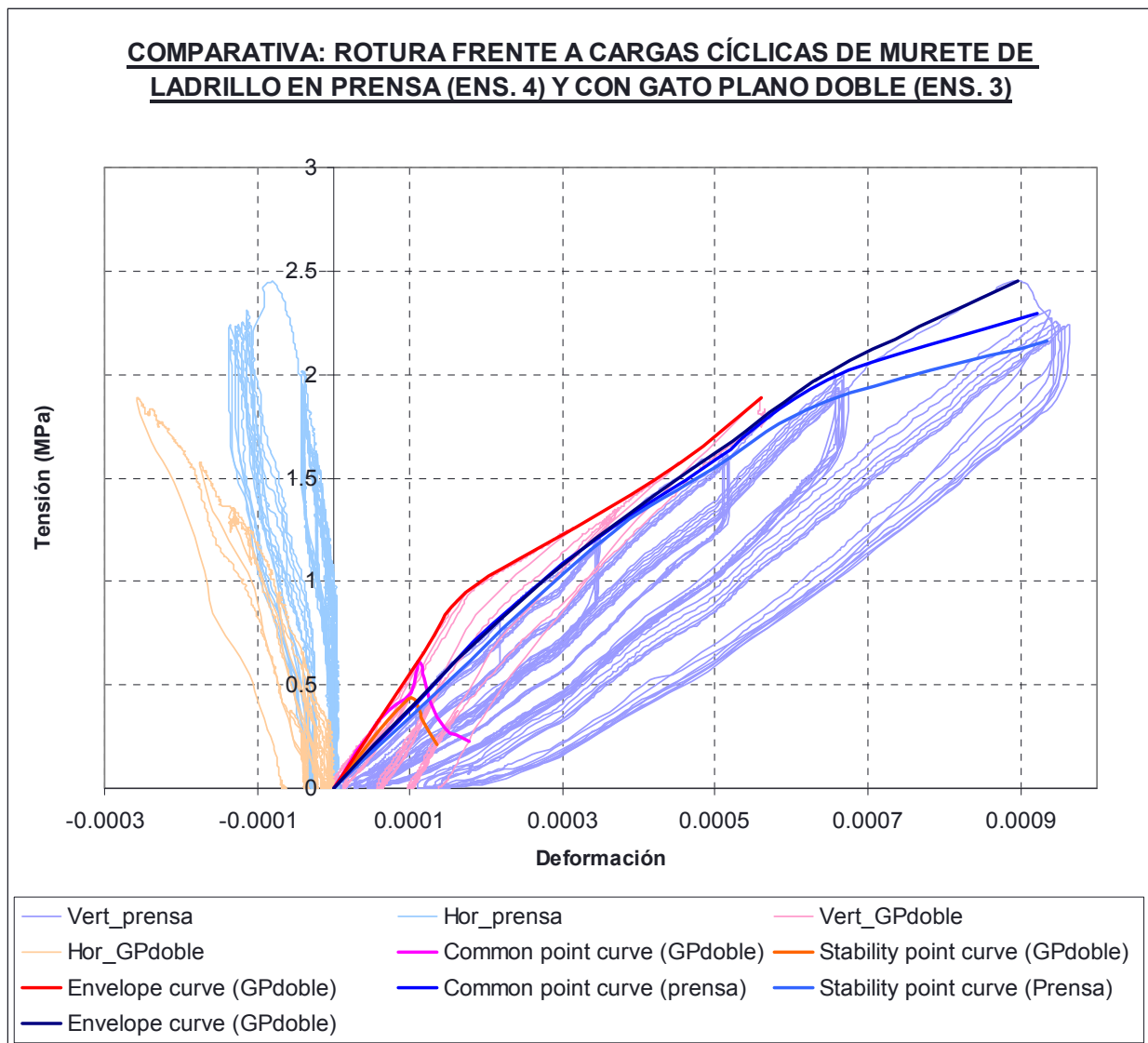


Fig. 4.4.50: Comparativa entre la envolvente, la curva de puntos comunes y curva de estabilidad obtenidas para los ensayos nº 3 y nº 4.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.4.6: Coordenadas obtenidas, para los ensayos nº 3 y nº 4, de los puntos de la envolvente, de los puntos comunes y de los puntos de estabilidad.

	ENSAYO Nº 3 (GP _{doble})		ENSAYO Nº 4 (Prensa)	
	σ (MPa)	ϵ_{vert}	σ (MPa)	ϵ_{vert}
Envelope points	0.000	0.000000	0.000	0.000000
	0.329	0.000059	0.413	0.000110
	0.463	0.000101	0.801	0.000209
	0.611	0.000112	1.180	0.000335
	0.414	0.000127	1.590	0.000501
	0.291	0.000145	1.971	0.000646
	0.223	0.000177	2.299	0.000921
Common points	0.000	0.000000	0.000	0.000000
	0.432	0.000097	1.149	0.000335
	0.331	0.000117	1.558	0.000503
	0.214	0.000135	1.871	0.000647
			2.165	0.000935
Stability points	0.000	0.000000	0.000	0.000000
	0.331	0.000059	0.416	0.000108
	0.660	0.000118	0.811	0.000218
	0.949	0.000173	1.208	0.000342
	1.263	0.000317	1.630	0.000504
	1.576	0.000454	2.017	0.000652
	1.891	0.000560	2.453	0.000896
	2.144	0.000608		

El hecho de que el murete nº 3 haya registrado peores prestaciones mecánicas que el nº 4, tanto frente a cargas estáticas, como frente a cargas pseudo-dinámicas, provoca que fruto de la comparación de ambos ensayos no pueda pronunciarse, con rigor alguno, sobre la adecuación o no de la técnica de gato plano doble para analizar el comportamiento in situ de fábricas reales frente a mecanismos pseudo-dinámicos, es por ello que sea necesario profundizar en esta propuesta en futuras campañas experimentales más intensas, focalizadas a estudiar esta problemática.

Por otro lado, se ha demostrado que es posible la obtención de las curvas envolvente, de puntos comunes y de estabilidad mediante la técnica del gato plano doble.

4.5 Campaña experimental sobre componentes de tierra compactada: Tapial.

4.5.1 Introducción

De los 563 bienes culturales que el Comité del Patrimonio Mundial ha inscrito en la Lista del Patrimonio Mundial, 96 (17 %) están, parcial o totalmente contruidos en tierra (UNESCO Patrimonio arquitectónico en tierra).

En este sentido los siguientes países cuentan con bienes culturales catalogados por la UNESCO como parcial o totalmente contruidos en tierra: Argelia, Azerbaiyán, Benin, Bolivia, Brasil, China (Fig. 4.5.1 y 4.5.2), Costa Rica, Cuba, Ecuador, El Salvador, España, Estados Unidos de América, Francia, Ghana, Guatemala, Irán (Fig. 4.5.3), Japón, Libia, Madagascar, Malí, Marruecos, Mauritania, Méjico, Nepal, Omán, Pakistán (Fig. 4.5.4), Perú, Portugal, Reino Unido, Republica de Corea, Siria, Túnez, Turkmenistán, Uganda, Uruguay, Uzbekistán, Venezuela y Yemen.



Fig. 4.5.1 y 4.5.2: Ruinas de Jiaohe. Xinjiang, China.



Fig. 4.5.3: Detalle de la arquitectura en tierra de la bimilenaria ciudadela de Arg-é-Bam, Irán.

Fig. 4.5.4: Ruinas arqueológicas de Mohenjo Daro, Pakistán.

Se denomina tapial, en España y la cuenca Mediterránea, o tapia, en Iberoamérica, a la técnica consistente en construir muros con tierra arcillosa, compactada a golpes mediante un “pisón”, empleando un encofrado deslizante, primitivamente de madera (Fig. 4.5.5 y 4.5.6), para contenerla.

El proceso consiste en ir colocando, entre los bordes laterales del encofrado, varias tongadas de tierra de aproximadamente 10 cm, e ir compactándolas mediante apisonado. Una vez alcanzado el límite superior del encofrado, se levanta el mismo para seguir con el muro.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

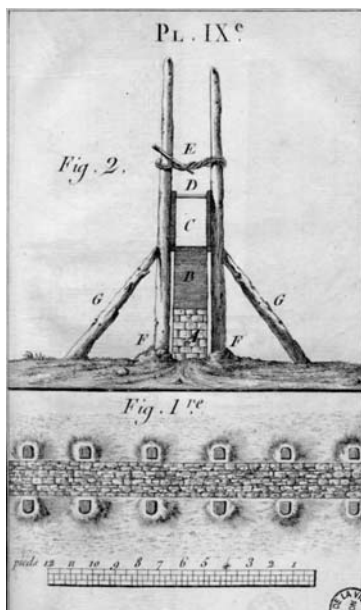


Fig. 4.5.5: Sección vertical y horizontal del encofrado de un muro de tapial.

Fig. 4.5.6: Modo de ejecución del tapial.

Muchas de las antiguas civilizaciones han desarrollado las edificaciones de tierra, bien por falta de piedra, o porque los materiales necesarios para construir con tierra apisonada y/o adobe se encontraban más a mano de forma natural. Estos materiales son básicamente arcilla y agua, y ocasionalmente paja y madera, con el calor del sol como única fuente de energía.

La época y el lugar exactos en que se comienza a utilizar el tapial o tierra compactada in situ es desconocido, aunque casi con toda certeza ocurre en el neolítico tal cual se evidencia en los sitios arqueológicos de las culturas Yangshao y de la Longshan en la región China recorrida por el Huang Ho (río Amarillo), esto es hace 5,000 años. El uso arquitectónico de técnicas basadas en el tapial fue común en China, circunstancia que puede comprobarse en la construcción de murallas, Fig. 4.5.7 y 4.5.8 (por ejemplo, gran parte de la Gran Muralla está realizada con tal sistema).



Fig. 4.5.7: Muralla parcialmente construida con tapial (el nivel superior está rematado con ladrillo) ubicada en Jiayuguan, China, edificada durante la dinastía Ming (1368–1644).

Fig. 4.5.8: Porción de la muralla china construida con tapial.

El tapial fue una técnica muy utilizada antiguamente en toda la cuenca del mar Mediterráneo. Dicho sistema constructivo, también llamado pise en italiano o en francés, fue un método de construcción muy utilizado por los antiguos romanos. Lo mismo que todo tapial moderno, la práctica romana se basaba en la realización de paredes con barro arcilloso húmedo mezclado con paja y crines (para evitar fisuraciones en la fase de desecado), compactado por estratos con instrumentos apropiados (pisones y paletas) dentro de encofrados desmontables para permitir su desplazamiento.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En **España** esta tipología constructiva adquirió especial notoriedad en las actuales comunidades de Castilla y León (Fig. 4.5.9), Aragón (Fig. 4.5.16), Cataluña, Comunidad Valenciana, Comunidad de Madrid, Castilla la Mancha, Andalucía (Fig. 4.5.10, 4.5.12 y 4.5.13) y Extremadura. Los pobladores del norte de África, cuando ocuparon parte de la península ibérica hicieron innumerables construcciones con esta técnica (Fig. 4.5.11), verdaderos monumentos de la arquitectura popular.

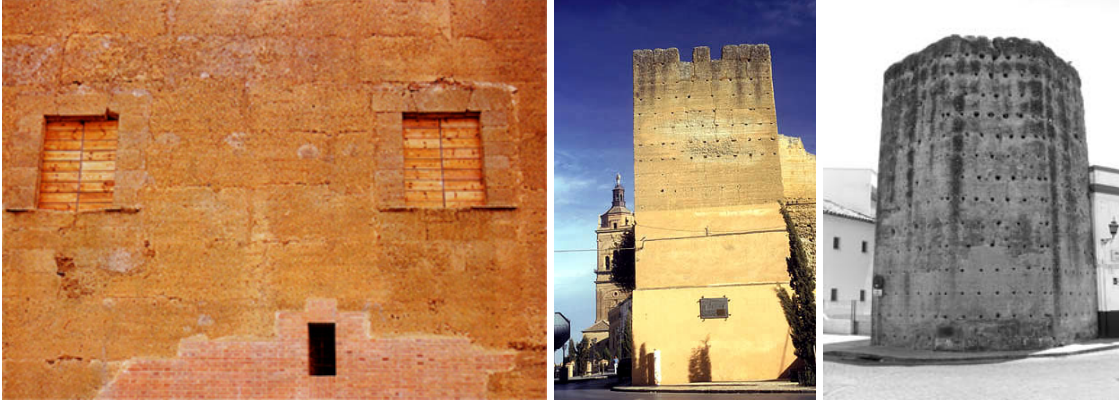


Fig. 4.5.9: Rehabilitación del Palacio de Toral de los Guzmanes (León).

Fig. 4.5.10: Alcazaba de Guadix (Granada): torreones del siglo XI.

Fig. 4.5.11: La torre en Écija (Sevilla) corresponde al período almohade, concretamente al S XII. La tipología de esta muralla es la característica de las construcciones defensivas de los imperios norteafricanos: lienzos de tapial construidos con encofrados de madera.



Fig. 4.5.12 y 4.5.13: Buena parte del castillo Califal de Burgalimar, en Baños de la Encina (Jaén), está materializado por tapial compuesto a base de arcilla, arena, cal y piedras pequeñas colocadas en cajas superpuestas.



Fig. 4.5.14: Construcción en tierra de la Alambra de Granada.

Fig. 4.5.15: Detalle de tapial en la Alambra de Granada.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En nuestro país, dentro de la lista del Patrimonio Arquitectónico Mundial de la UNESCO, parcial o totalmente construido en tierra, contamos, desde 1984, con el Centro Histórico de Córdoba; la Alambra (Fig. 4.5.14 y 4.5.15), el Generalife y el Albaicín, en Granada; y el Parque Güell, Palacio Güell y la Casa Milà, en Barcelona. Igualmente, en 1986 se sumaron muestras de Arquitectura en Aragón, y en 1987 la Catedral, el Alcázar y el Archivo de Indias de Sevilla.



Fig. 4.5.16: Muestras de construcciones en tapial en la localidad aragonesa de Daroca.

Un buen ejemplo de construcción en tapial se encuentra en la localidad aragonesa de Daroca, donde muchas de las casas tienen elementos combinados de tapial y adobe o ladrillo; además, en la parte alta de la población se pueden visitar las ruinas del Castillo Mayor (Fig. 4.5.16) y varias torres, así como la muralla que circunda todo el pueblo, construidos con esta técnica, aunque en bastante mal estado de conservación.

En **Sudamérica**, aunque el apogeo de las construcciones con tapias se da a partir de la llegada de los españoles, el uso de esta técnica es muy antiguo (Fig. 4.5.17), y estuvo especialmente difundida en zonas secas. Durante el siglo XVII, y en muchos pueblos aún durante el siglo XVIII, las construcciones eran realizadas en tierra.



Fig. 4.5.17: Aldea de 2,000 años de antigüedad, formada por tapias de barro (Palo Blanco, Tinogasta, provincia argentina de Catamarca).

En este sentido, cabe referir que la mayoría de las reducciones jesuíticas eran construcciones en tierra. El empleo de la piedra en estas reducciones (ruinas de San Ignacio Miní, San Miguel, Jesús o Trinidad, en la actual provincia de Misiones en Argentina, o los departamentos del sureste del Paraguay) constituye el punto culminante de una evolución edilicia que no todas las reducciones alcanzaron.

Igualmente, en el actual estado de Minas Gerais, Brasil, la ciudad de Ouro Preto fue construida, casi totalmente, con tapial, siendo Patrimonio de la Humanidad declarado por la Unesco.

Finalmente, como otra referencia, la ciudad de Buenos Aires, originalmente, se encontraba construida en tierra, sea tapia o adobe. De esta forma, una parte de la tradicional Iglesia de Montserrat se encuentra construida con tapial. De la misma forma, resisten al paso del tiempo construcciones en las provincias de Córdoba, Santa Fe, Salta y Tucumán.

Muchos países del **norte y este africano**, así como del **oriente próximo**, utilizaron y todavía emplean, profusamente, el sistema de tapia o tapial, por ser un método que exige muy poca

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

tecnología. En este sentido son famosas las arquitecturas de adobe y tapial de Irán (Fig. 4.5.18 y 4.5.19), Malí (Fig. 4.5.20), Turquía (Fig. 4.5.21), Yemen (Fig. 4.5.22 y 4.5.23), Marruecos (Fig. 4.5.24) u Omán (Fig. 4.5.25), entre otras.



Fig. 4.5.18: La bimilenaria ciudadela de Arg-é-Bam (en Irán) la mayor estructura en tierra del mundo.



Fig. 4.5.19: Vista panorámica de Dur Untash Napirisha, el zigurat de Tchogha Zanbil, provincia de Khuzestan, Irán.



Fig. 4.5.20: Mezquita Kani Combole, Malí.



Fig. 4.5.21: Çatalhöyük, Turquía.



Fig. 4.5.22: Shibam. Yemen.



Fig. 4.5.23: Centro de la ciudad de Sanaa, Yemen.



Fig. 4.5.24: Ksar de Ait BenHaddou, Marruecos.

Fig. 4.5.25: Forte de Bahla, Omán.

4.5.1.1 Características físico-mecánicas del tapial

En la referencia Aymat (Patología y rehabilitación de cajones de tapial, recurso informático) se relacionan algunas de las características físico-mecánicas del tapial.

Entre sus características físicas cabe destacar una baja dilatación térmica, $0.012 \text{ mm/m } ^\circ\text{C}$, y una densidad media en el entorno de 2 t/m^3 , en función de la mezcla adoptada, variando generalmente entre 1.8 y 2.1 t/m^3 .

Mecánicamente, el tapial tiene una resistencia a compresión aproximada de 1.5 MPa (15 kg/cm^2), pudiendo variar entre 10 y 22 kp/cm^2 . En tanto la resistencia a la tracción es muy baja, entre 2 y 4 kg/cm^2 . Igualmente, tiene muy baja resistencia frente a esfuerzos cortantes y, por ello, mal comportamiento ante situaciones de posible cizallamiento, lo que propicia la aparición de fisuras y grietas verticales, especialmente en la proximidad de las esquinas o contrafuertes. Por esto mismo, un de los grandes problemas de las construcciones de tierra es su comportamiento frente a sismo (Fig. 4.5.26 y 4.5.27).



Fig. 4.5.26 y 4.5.27: Perspectivas de la histórica ciudadela de Bam (Irán) antes y después de sufrir el devastador terremoto (6.6 grados en la escala abierta de Richter) que sacudió esta ciudad meridional iraní el 26 de diciembre de 2003.

Cuando el material está endurecido, presenta buen comportamiento frente al desgaste y al punzonamiento.

4.5.1.2 Otros comentarios

Las construcciones llevadas a cabo con esta técnica tienen propiedades bioclimáticas ya que mantienen una temperatura relativamente estable en su interior durante todo el año, tanto en verano con calor extremo, como en invierno con un frío intenso.

Por el reducido coste energético dedicado a su fabricación, en la actualidad (Viñuales 1994 y 1981; Warren 1993) se vislumbra como una técnica constructiva sostenible, dado que minimiza el impacto ambiental y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En España, desde el punto de vista de la investigación cabe aludir a la que se desarrolla en el Centro Navapalos por la fundación Inter-Acción bajo la coordinación de Erhard Rohmer. Otra investigación desarrollada fue la tesis doctoral “La arquitectura de tierra: Su consolidación a través de la utilización de productos hidrofugantes” (Nava Hung Melin, 1995), desarrollada en la E.T.S. de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid, en la que se investigaron las posibilidades de consolidación de los muros de edificios históricos construidos con tapial desde el punto de vista de su sensibilidad a la humedad, para lo cuál se experimentó con diferentes tipos de hidrofugantes comprobándose el comportamiento mecánico e higroscópico de las probetas aditivadas (la conclusión general fue que a pesar de las relativas mejoras a corto plazo, los hidrofugantes empleados planteaban algunos problemas que podían desaconsejar su empleo, especialmente en trabajos de conservación de monumentos). Finalmente, en lo que respecta a la aportación de soluciones constructivas, focalizadas fundamentalmente a la rehabilitación de construcciones, se enmarcan, entre otros trabajos, los desarrollados por el equipo dirigido por Pilar de Luxán en Sillasa (Murcia), la restauración de Eloy Algorri y Mariano Vázquez en el Palacio de Toral de los Guzmanes (León), o la rehabilitación-reconstrucción del castillo de Bétera, que ha culminado Francisco Jurado.

En lo relacionado con la normativa existente en nuestro país, se cuenta con la norma UNE 41410 “Bloques de tierra compactada para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo” (Diciembre del 2008) y con la Orden FOM 891/2004 en la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a firmes y pavimentos, entre los que se tratan los suelos estabilizados in situ.

Por tanto, el importante patrimonio catalogado por la UNESCO construido total o parcialmente en tierra, sus relativamente reducidas prestaciones mecánicas, en función de otros materiales de construcción, sumado a que una buena parte de la población mundial habita este tipo de construcciones, **justifica el incluir dentro de las tipologías de muros estudiadas en esta tesis doctoral las relacionadas con componentes de tierra.**

Finalmente, cabe referir que recientemente, en Febrero de 2010 uno de los edificios catalogados por la UNESCO, el minarete de la mezquita Lalla Khenata de Bab el Bardiyine (Meknes, Marruecos), parcialmente construida con componentes de tierra, fundada con fines militares en el siglo XI por los almorávides, se derrumbó, causando más de 40 muertos (Fig. 4.5.28 y 4.5.29). Sirva este ejemplo para llamar la atención sobre la importancia de la conservación del Patrimonio construido en tierra, muchas veces olvidado por los técnicos.

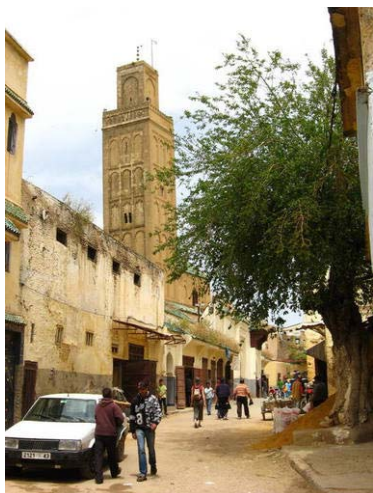


Fig. 4.5.28: Minarete de la mezquita de Bab el Berdiyine, en la medina de Meknes (Marruecos).

Fig. 4.5.29: Vista parcial tras el derrumbamiento en Febrero de 2010.

4.5.2 Construcción del muro

Con fecha 11 y 12 de junio de 2009 fue construido en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria un muro de tierra compactada in situ, lo que comúnmente viene denominándose tapial, con la geometría ilustrada en la Fig. 4.5.30.

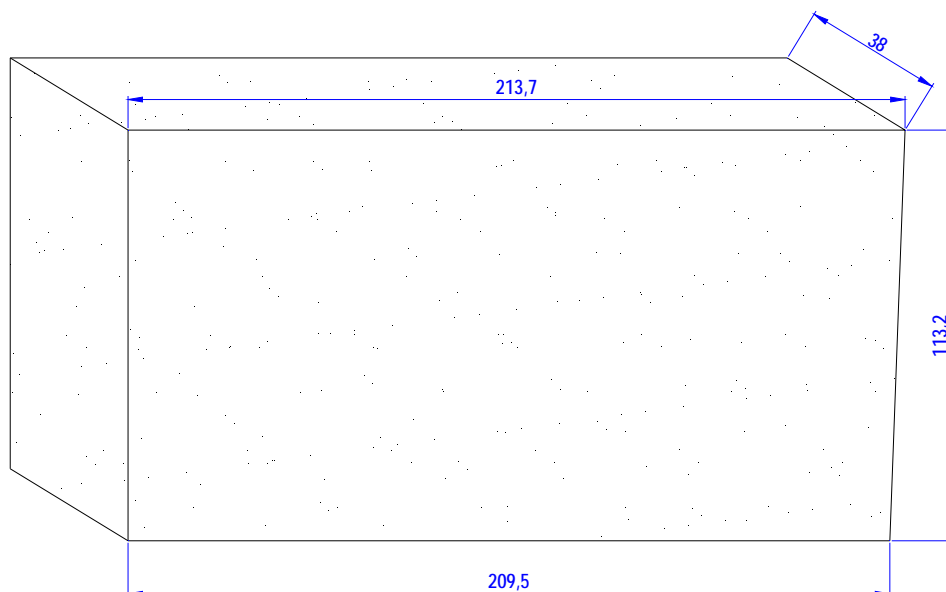


Fig. 4.5.30: Geometría del muro de tapial construido en laboratorio (cotas en cm.)

Para su confección se empleó un suelo arcillo-arenoso con la siguiente distribución porcentual granulométrica: Arena (64.48%), Limo (9.28%), Arcilla (26.24% > 10%, UNE 41410) y Materia orgánica oxidable (0.59% < 2%, UNE 41410). Se remite al Anexo 12 para una justificación de los porcentajes relacionados.

Con posterioridad y siguiendo el método empleado por la empresa Adobera del Norte C.B. a la hora de realizar trabajos reales ex-novo o rehabilitaciones de tapias antiguos, el suelo referido, fue mezclado con gravilla con la intención de aumentar la resistencia a compresión y mejorar la maleabilidad de la tierra. El aspecto definitivo del mismo puede apreciarse en la Fig. 4.5.31.



Fig. 4.5.31: Aspecto de la tierra empleada en la construcción del tapial.

Igualmente, del tapial, se tomaron muestras de la tierra empleada para su ejecución, las cuáles fueron mezcladas y ensayadas en el Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales de la Universidad de Cantabria (LADICIM-UC) arrojando una humedad de 5.32 %:

- Peso original: 2,295.5 g
- Peso seco: 2,179.5

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

$$w(\%) = \frac{W - W_s}{W_s} \cdot 100 = \frac{2,295.5 - 2,179.5}{2,179.5} \cdot 100 = 5.32\%$$

Dicha humedad, por otra parte, alcanza un valor óptimo para la construcción del tapial, tal y como puede desprenderse de Aymat (Patología y rehabilitación de cajones de tapial), en la que se alude a que el agua de amasado debe ser la suficiente, pero nunca excesiva, con una humedad óptima por debajo del 10%.

La construcción del tapial comienza con la disposición del encofrado (Fig. 4.5.32, 4.5.33 y 4.5.34), el cuál, como ya se ha referido debe ser móvil (debe permitir el desmoldeo y posterior elevación para seguir con el muro).



Fig. 4.5.32, 4.5.33 y 4.5.34: Proceso de montaje del encofrado sobre el perfil UPN rigidizado, soporte del tapial. Dicho elemento metálico permitirá, con posterioridad, el transporte del muro bajo el pórtico de ensayo. De la misma forma, puede apreciarse la disposición de los tapes laterales de madera.

Una vez dispuesto el encofrado es momento de comenzar la construcción en si misma. El proceso consiste en ir colocando, entre los bordes laterales del encofrado, varias tongadas de tierra de aproximadamente 10 cm cada una (Fig. 4.5.35 y 4.5.36), e ir compactándolas mediante apisonado (Fig. 4.5.37 y 4.5.38).



Fig. 4.5.35 y 4.5.36: Vertido de tierra dentro del encofrado (Junio 2009).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido



Fig. 4.5.37 y 4.5.38: Compactación de la tierra vertida mediante apisonado.

Una vez compactada una tongada de 10 cm se vierte nuevamente tierra (Fig. 4.5.39, 4.5.40 y 4.5.41) y se continúa con la compactación (Fig. 4.5.42 y 4.5.43). De esta manera el tapial va ganando altura (Fig. 4.5.44).



Fig. 4.5.39 y 4.5.40: Vertido progresivo de tierra.

Fig. 4.5.41: Puede apreciarse la guía indicativa marcada en la paleta para controlar el espesor de cada una de las tongadas.



Fig. 4.5.42, 4.5.43 y 4.5.44: Instantes tomados durante la ejecución del tapial.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Una vez alcanzado el límite superior del encofrado, se levanta el mismo para seguir con el muro (Fig. 4.5.45 y 4.5.46).



Fig. 4.5.45 y 4.5.46: Proceso de desmontaje del encofrado y disposición del mismo en la parte superior para continuar con el alzado del muro.

Finalmente, una vez dispuesto el encofrado en un nivel superior, se continúa con el vertido de tierra, por tongadas, y con la compactación de la misma (Fig. 4.5.47), hasta alcanzar la altura requerida (Fig. 4.5.48).



Fig. 4.5.47: Continuación del proceso de compactación.

Fig. 4.5.48: Aspecto del tapial una vez alcanzada la altura requerida.

En ese momento se desmonta el encofrado quedando el tapial finalizado (Fig. 4.5.49 y 4.5.50).



Fig. 4.5.49 y 4.5.50: Perspectivas del tapial una vez finalizado.

4.5.3 Transporte y refrentado del tapial.

Al igual que se realizó con los muros expuestos con anterioridad, en relación con facilitar el adecuado transporte del muro bajo los pórticos de carga, y con la finalidad de no causarle ningún tipo de sollicitación que podría desembocar en el debilitamiento estructural o colapso del elemento constructivo, se idearon unos dispositivos de transporte denominados “maletas” constituidos por dos perfiles UPN, uno inferior con 5 planos de rigidizadores de cara a evitar su abollamiento durante los procesos posteriores de carga, sobre el que se construye el muro en si mismo, y otro superior a modo de capucha, el cuál contaba de dispositivos que permitían realizar el izado y colocación de dicha pieza, los cuáles se pretensaban mediante un total de ocho barras verticales, roscadas, para motivar una leve compresión en el muro y evitar la aparición de tracciones durante el transporte del mismo que podría desembocar daño.



Fig. 4.5.51: Tapial dispuesto bajo el pórtico de carga (emplazamiento definitivo de los ensayos).

Fig. 4.5.52: Detalle del encofrado perimetral del borde libre superior.

Una vez dispuesto el tapial bajo el pórtico de carga (Fig. 4.5.51), se procedió al refrentado del mismo, en el emplazamiento definitivo de los ensayos a realizar, con el objetivo de obtener un plano superior, sobre el que apoyará la viga de reparto de carga, lo más horizontal posible. Para ello, tras realizar el encofrado perimetral de su borde superior (Fig. 4.5.52) se procedió al vertido de una capa de hormigón autonivelante (Fig. 4.5.53 y 4.5.54) de dos a tres centímetros.



Fig. 4.5.53 y 4.5.54: Vertido de la capa de hormigón autonivelante y detalle del refrentado junto con el apoyo de la viga de reparto de carga.

4.5.4 Determinación del ángulo de apertura de cargas en el tapial.

Dada la extensión del muro realizado y teniendo en cuenta que el elemento de reparto de cargas que se disponía era de 1.20 metros de longitud, trató de obtenerse el ángulo de apertura de cargas en el seno del muro.

En este sentido se dispusieron un total de 3 transductores potenciométricos, en la forma que indican las Fig. 4.5.55 y 4.5.56, para registrar los movimientos registrados por cada uno de ellos durante el proceso de carga y poder estimar las deformaciones relacionadas.

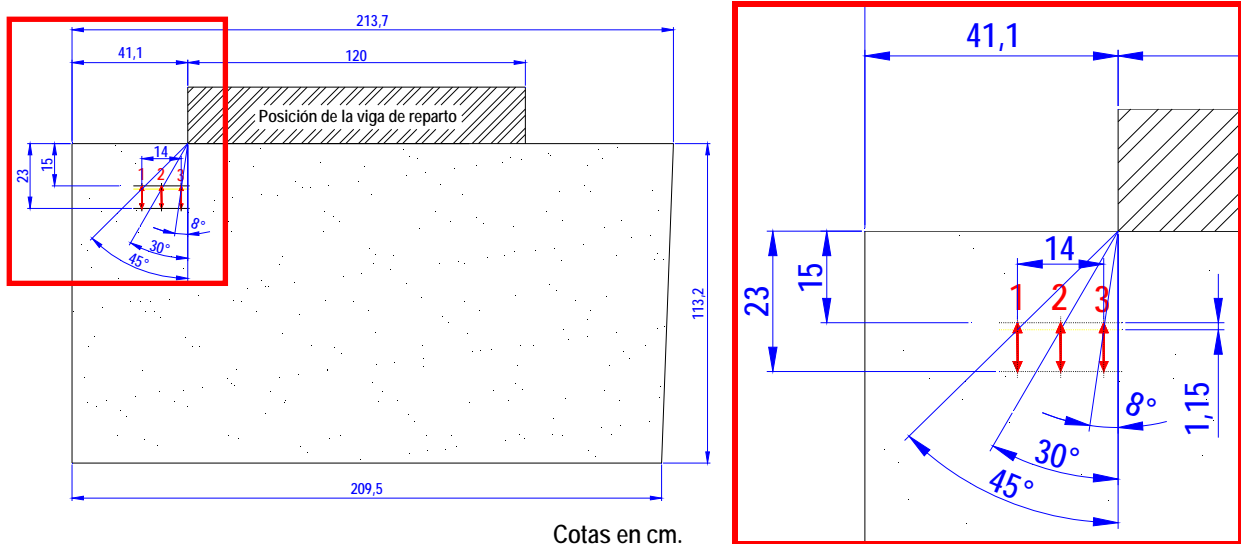


Fig. 4.5.55: Detalle de la disposición de los transductores potenciométricos en el conjunto del muro.

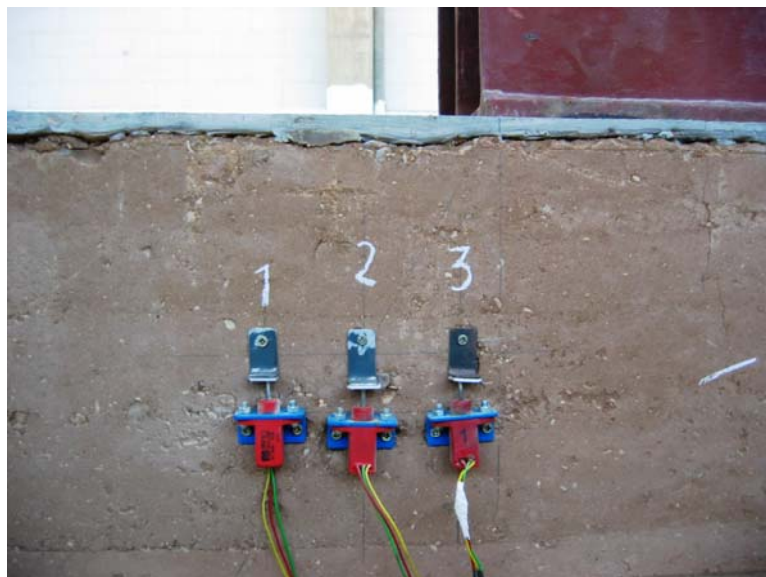


Fig. 4.5.56: Fotografía que muestra la posición relativa de los transductores entre sí y respecto de la viga de reparto.

Cada uno de dichos transductores registraba el movimiento experimentado en una alineación vertical, con longitud inicial de 8 cm (dado que cada transductor se fijó al muro mediante tres tornillos: uno superior a una distancia de 15 cm de la coronación del muro, y dos inferiores a 23 cm respecto de la misma referencia).

Los transductores estaban separados entre ellos una magnitud, en horizontal, de 7 cm, de forma que un punto de la alineación de control central (ubicado a 1.15 cm de la fijación superior), definiría con el punto extremo de la viga de reparto de la carga un ángulo de 30°.

Con la viga de reparto en la posición indicada (a 41.1 cm del borde izquierdo del muro) se realizó un primer proceso de carga (hasta aproximadamente 65 toneladas) y descarga, para generar un

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

reacomodo del sistema (muro, viga de reacción y gatos hidráulicos); seguido de un proceso final de carga, en un único escalón, hasta nuevamente unas 65 toneladas (Fig. 4.5.57).

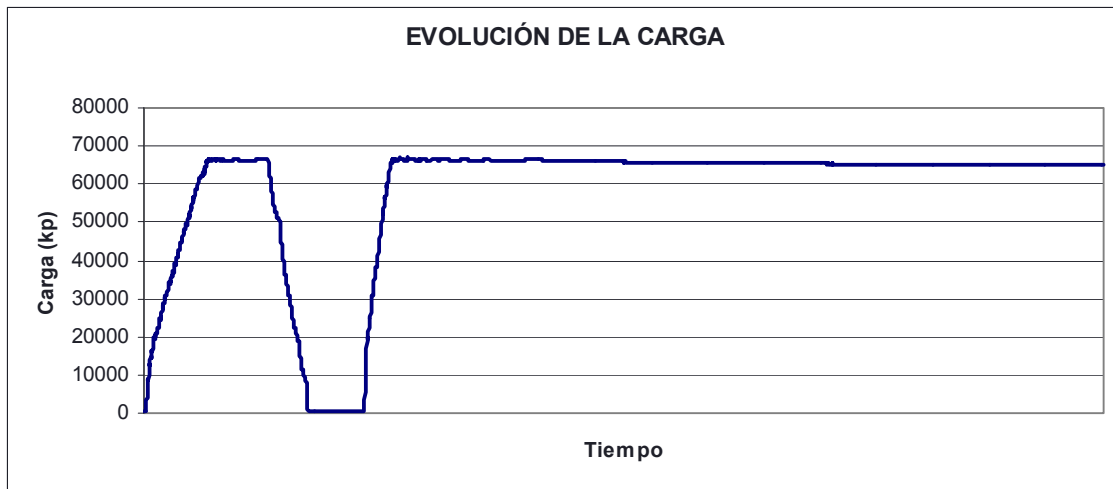


Fig. 4.5.57: Evolución de la carga durante el ensayo desarrollado para obtener el ángulo de apertura de cargas.

Mientras se realizó el proceso descrito se registró la evolución de los movimientos registrados en los tres puntos referidos, estimando, igualmente, las deformaciones experimentadas. Como puede comprobarse en la Fig. 4.5.58, se verificó un salto importante en las deformaciones registradas entre los transductores denominados 2 y 3, circunstancia que se interpretó como que la línea definida por la apertura de la carga, aún afectando al transductor nº2, tenía una camino preferencial entre dichos transductores, de forma que, a falta de más densidad de puntos de control, se creyó adecuado tomar la posición definida por el punto medio entre ambos, que define un ángulo de apertura de cargas de 20°.

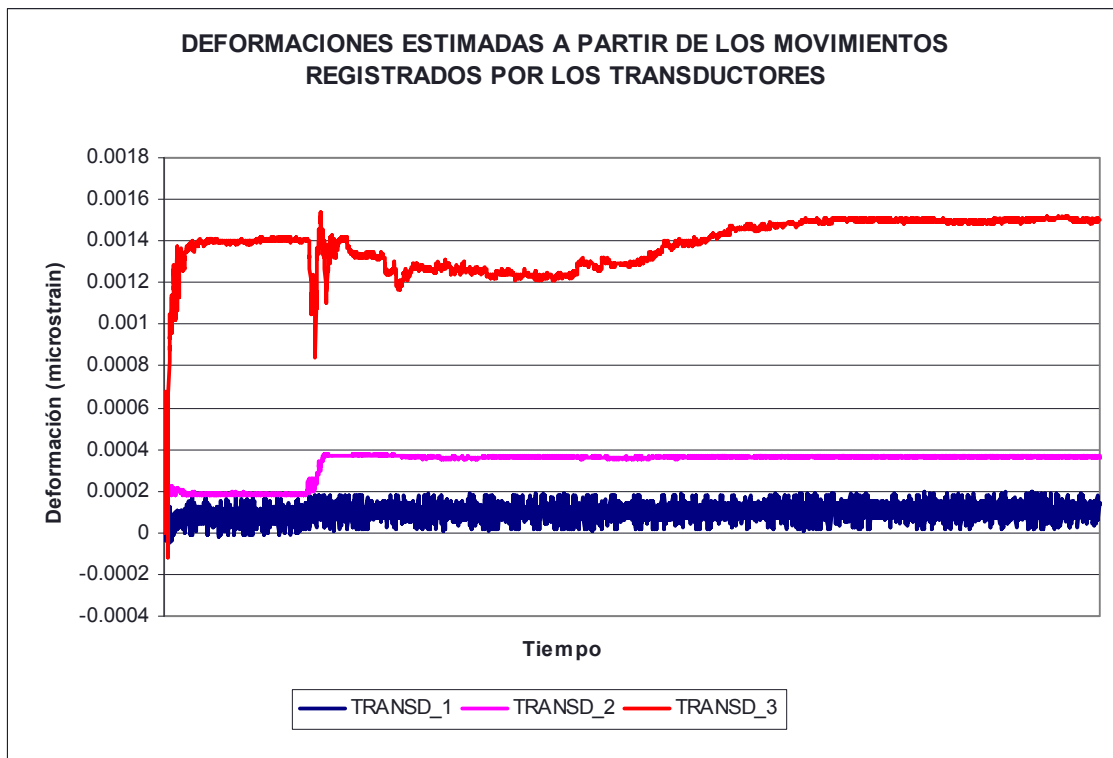


Fig. 4.5.58: Deformaciones estimadas (signo + indica compresión) a partir de los movimientos registrados por los transductores.

4.5.5 Determinación de las características mecánicas de probetas construidas con el mismo material que conforma el muro.

Con la finalidad de caracterizar el material que conforma el tapial, se construyeron un total de 11 probetas cilíndricas (Fig. 4.5.59), las cuáles también se emplearon para estimar la resistencia a compresión de la tapia; así como 3 probetas prismáticas (Fig. 4.5.60) para la determinación de la retracción de dicho material. Una vista de parte de las probetas elaboradas se muestra en la Fig. 4.5.61.



Fig. 4.5.59: Construcción de las probetas cilíndricas en moldes para la determinación del CBR.

Fig. 4.5.60: Construcción de las probetas prismáticas.



Fig. 4.5.61: Detalle de parte de las probetas cilíndricas y prismáticas elaboradas.

Los **ensayos de retracción** fueron ejecutados en el Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales de la Universidad de Cantabria (LADICIM-UC), Fig. 4.5.62 y 4.5.63. Para ello fue seguido el proyecto de norma prEN 1015-13. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 13: Estabilidad dimensional (retracción y expansión).



Fig. 4.5.62: Desmoldeo de las probetas.

Fig. 4.5.63: Instante captado durante el ensayo el día 12-06-09.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Para ello se registraron los acortamientos registrados por las probetas de 300 mm de longitud en condiciones de humedad constante y temperatura (20° C) controlada (Tabla 4.5.1). Como puede comprobarse la retracción fue apreciable.

Tabla 4.5.1: Retracción de las probetas de tapial en mm.

Fecha/hora	Retracción en probetas de tapial (mm)			Retracción en probetas de tapial (%)		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
12-06-09 (19:15h)	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%
15-06-09 (9:00h), Fig. 4.5.64 y 4.5.65	0.74	0.54	0.63	0.25%	0.18%	0.21%
21-07-09 (11:00h)	1.14	0.8	1.54	0.38%	0.27%	0.51%



Fig. 4.5.64 y 4.5.65: Acortamientos registrados por las tres muestras el día 15-06-09 a las 9:00h.

Previamente a la realización de los **ensayos a compresión**, referir que las probetas fueron refrentadas bien empleando azufre, bien mediante hormigón autonivelante, usando en este segundo caso una mesa de planeidad para apoyo de las probetas (Fig. 4.5.66 y 4.5.67), de forma que se garantizase una superficie refrentada lo más horizontal posible.



Fig. 4.5.66 y 4.5.67: Mesa de planeidad empleada en el proceso de refrentado de las probetas mediante hormigón autonivelante.

Los ensayos realizados para obtener la resistencia a compresión del tapial, fueron realizados en un total de 9 probetas y en dos fechas distintas, empleando una prensa servohidráulica universal de 150 t de carga máxima. En las Fig. 4.5.68 - 4.5.76 se recogen una serie de imágenes, una para cada probeta, tomadas durante la ejecución de los ensayos. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 4.5.2.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido



Fig. 4.5.68, 4.5.69 y 4.5.70: Fotografías de detalle de los ensayos realizados en las probetas T3, T4 y T5 para estimar la resistencia a compresión del tapial.

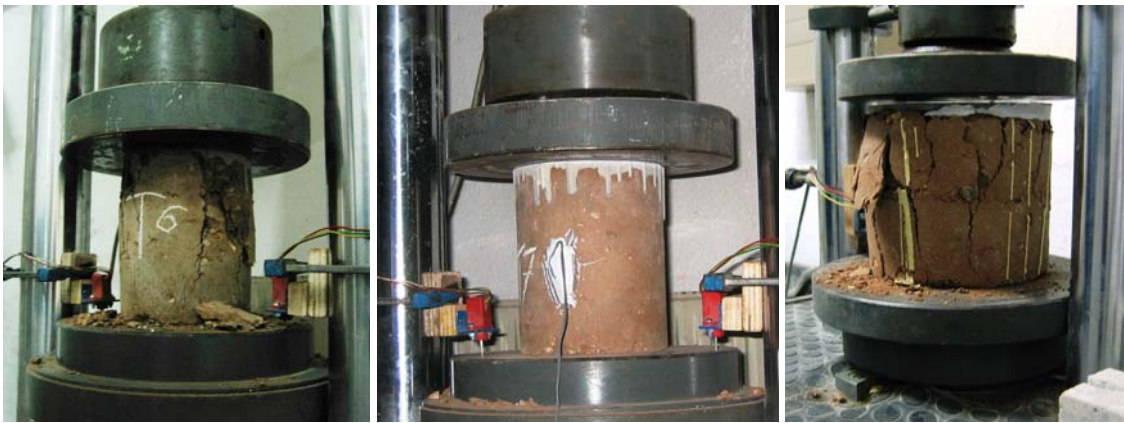


Fig. 4.5.71, 4.5.72 y 4.5.73: Fotografías de detalle de los ensayos realizados en las probetas T6, T7 y TAP1 para estimar la resistencia a compresión del tapial.

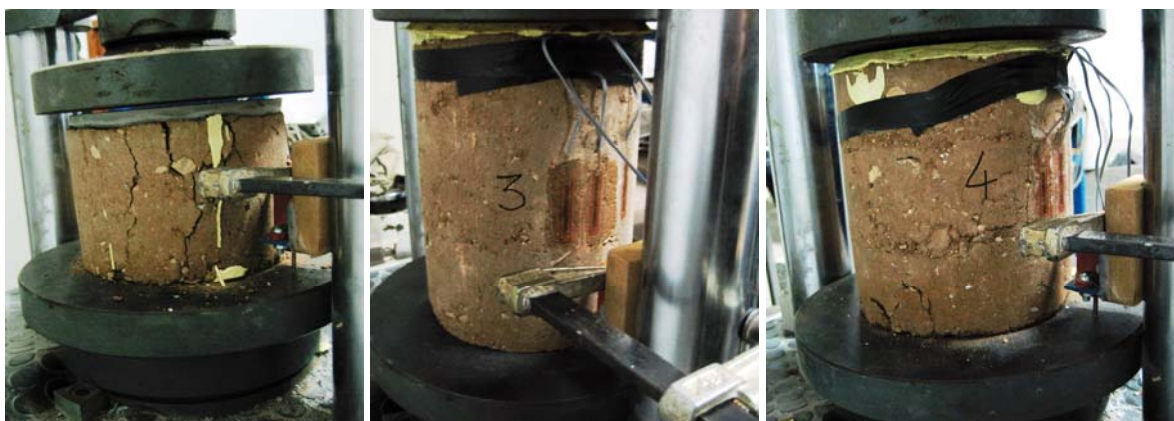


Fig. 4.5.74, 4.5.75 y 4.5.76: Fotografías de detalle de los ensayos realizados en las probetas TAP2, TAP3 y TAP4 para estimar la resistencia a compresión del tapial.

La resistencia a compresión promedio obtenida fue de 3.1 N/mm^2 , presentando un coeficiente de variación del 24.96%.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.5.2: Resistencia a compresión de las probetas de tapial.

Probeta	Fecha construcción	Fecha ensayo	Φ (cm)	H (cm)	P (t)	σ_c (kp/cm ²)	σ_c (N/mm ²)
T1	11/06/2009	26/06/2009	15	20.4	-	-	-
T2	11/06/2009	26/06/2009	15	20.4	-	-	-
T3	11/06/2009	23/09/2009	15	20	4.3	24.3	2.5
T4	11/06/2009	23/09/2009	15	15.8	5.9	33.1	3.4
T5	11/06/2009	23/09/2009	15	19.3	6.9	38.8	4.0
T6	11/06/2009	23/09/2009	15	19.5	4.7	26.6	2.7
T7	11/06/2009	23/09/2009	15	19	6.3	35.8	3.7
TAP-1	11/06/2009	25/11/2009	15	14.6	3.5	20.0	2.0
TAP-2	11/06/2009	25/11/2009	15	11.5	7.5	42.7	4.4
TAP-3	11/06/2009	25/11/2009	15	28.5	4.8	26.9	2.7
TAP-4	11/06/2009	25/11/2009	15	17.5	4.4	24.9	2.5

En lo que respecta a la estimación del **módulo de elasticidad**, durante cada uno de los ensayos se obtuvo tanto los acortamientos registrados por los transductores potenciométricos fijados a los vástagos verticales de la prensa, como la evolución de la carga. Como se conoce la magnitud inicial de la altura de la probeta (H_0), previamente a la introducción de la carga, pudieron obtenerse los acortamientos (ΔH) a partir del instante concreto en que comenzaba a introducirse la carga y, por ende, la deformación ($\epsilon = \Delta H / H_0$). A continuación, se representó, para cada una de las probetas (T4-T7¹ y TAP1-TAP4), la ley σ - ϵ (Fig. 4.5.77 – 4.5.84).

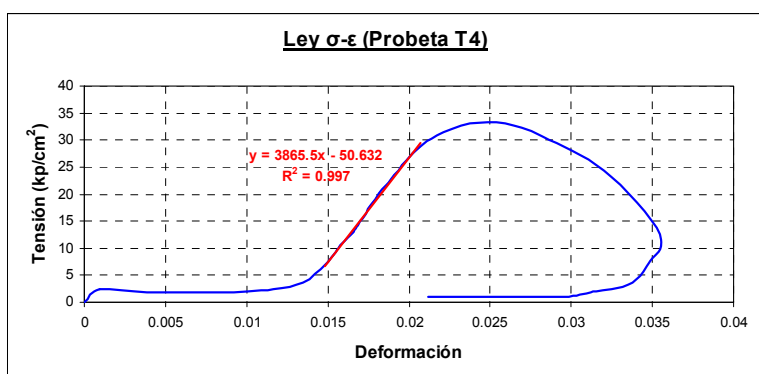


Fig. 4.5.77: Ley σ - ϵ de la probeta T4 e instante tomado durante el ensayo.

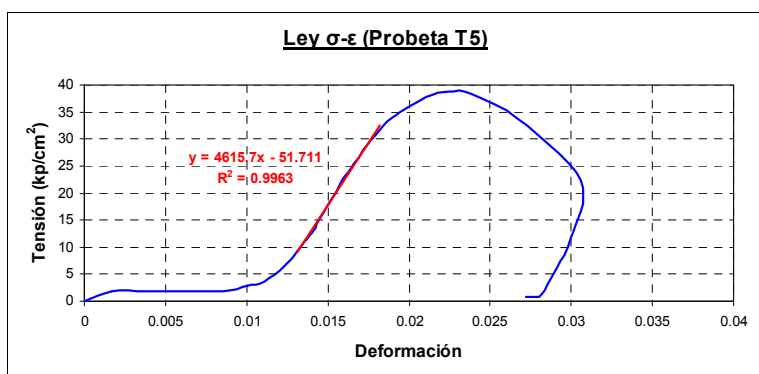


Fig. 4.5.78: Ley σ - ϵ de la probeta T5 e instante tomado durante el ensayo.

¹ Como en el caso de las probetas T4, T5, T6 y T7 se dispusieron dos transductores para registro de los acortamientos, la ley σ - ϵ responde en ese caso al promedio de las deformaciones registradas por ambos transductores.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

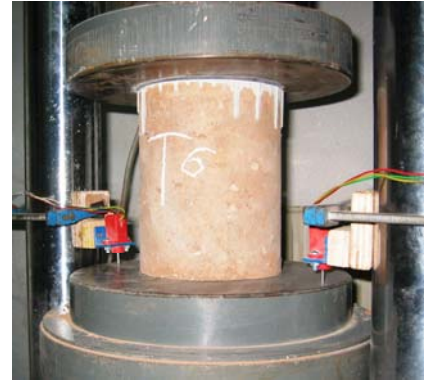
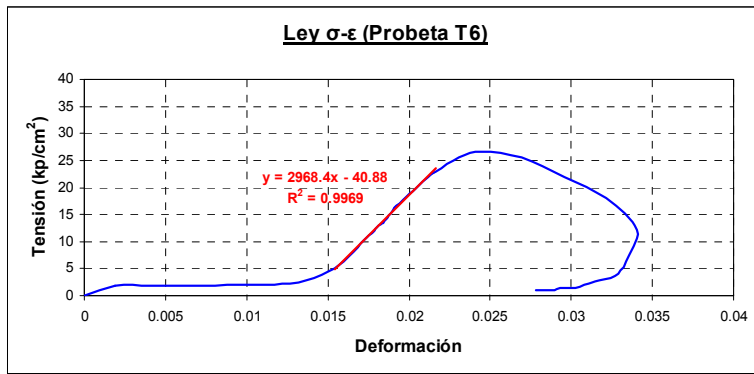


Fig. 4.5.79: Ley σ - ϵ de la probeta T6 e instante tomado durante el ensayo.

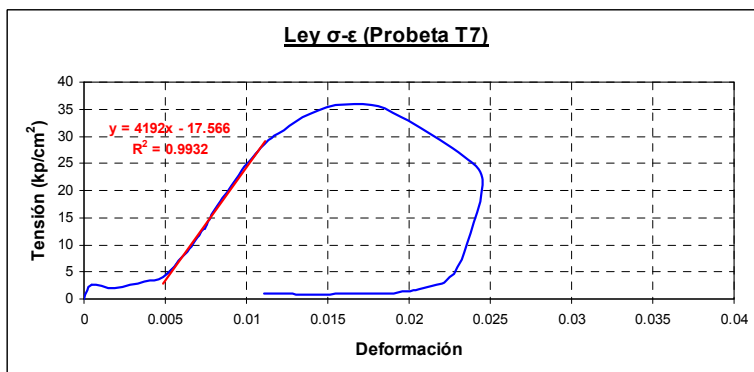


Fig. 4.5.80: Ley σ - ϵ de la probeta T7 e instante tomado durante el ensayo.

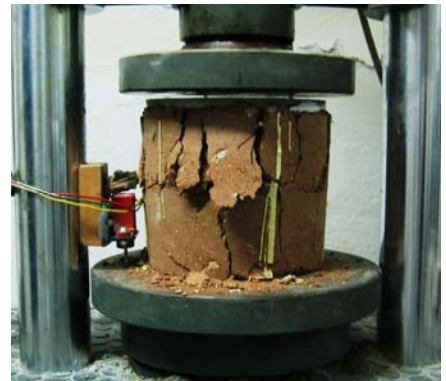
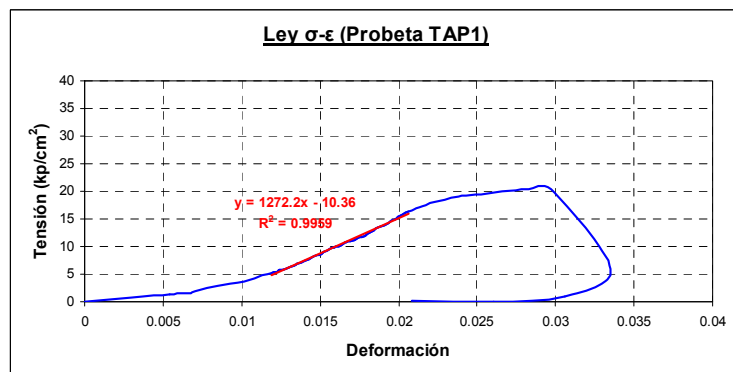


Fig. 4.5.81: Ley σ - ϵ de la probeta TAP1 e instante tomado durante el ensayo.

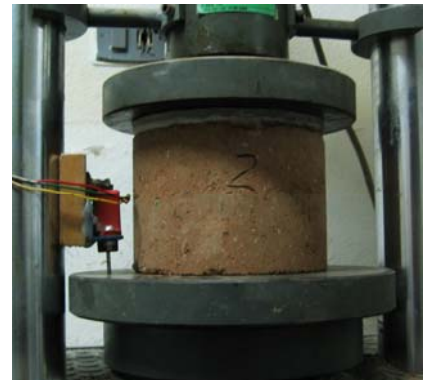
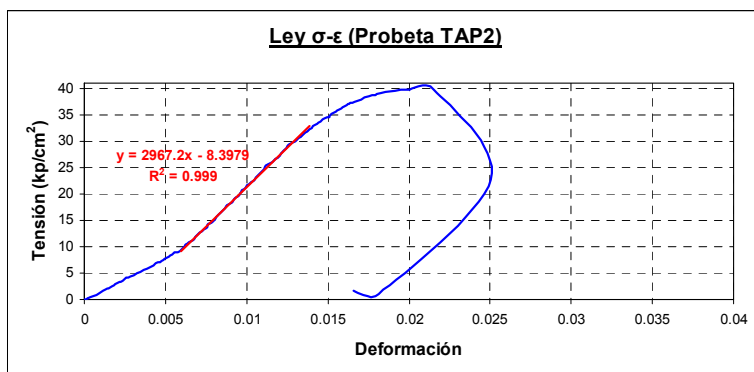


Fig. 4.5.82: Ley σ - ϵ de la probeta TAP2 e instante tomado durante el ensayo.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

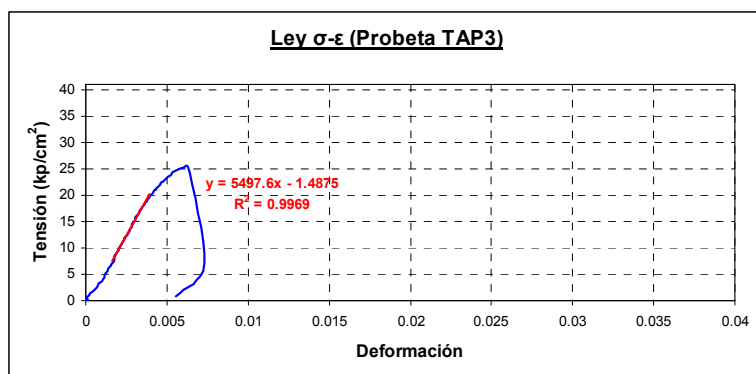


Fig. 4.5.83: Ley σ - ϵ de la probeta TAP3 e instante tomado durante el ensayo.

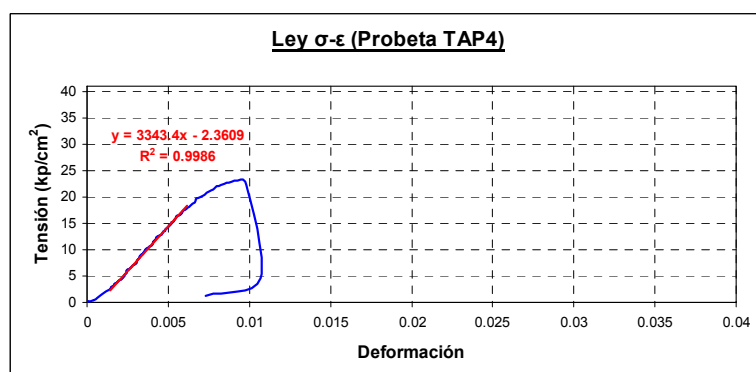


Fig. 4.5.84: Ley σ - ϵ de la probeta TAP4 e instante tomado durante el ensayo.

Finalmente, a partir de las relaciones gráficas obtenidas, pudo obtenerse el módulo de elasticidad, mediante ajuste de una regresión lineal en la rama elástica, para cada una de las probetas (Tabla 4.5.3). El módulo de elasticidad promedio obtenido fue de 359.0 MPa, presentando un coeficiente de variación del 35.4%.

Tabla 4.5.3: Módulo de elasticidad de las probetas de tapial.

Probeta	Fecha construcción	Fecha ensayo	E (Kp/cm^2)	E (N/mm^2)	ϵ_r (%)
T1	11/06/2009	26/06/2009	-	-	-
T2	11/06/2009	26/06/2009	-	-	-
T3	11/06/2009	23/09/2009	-	-	-
T4	11/06/2009	23/09/2009	3865.5	386.55	2.59
T5	11/06/2009	23/09/2009	4615.7	461.57	2.38
T6	11/06/2009	23/09/2009	2968.4	296.84	2.45
T7	11/06/2009	23/09/2009	4192.0	419.2	1.77
TAP-1	11/06/2009	25/11/2009	1272.2	127.22	2.97
TAP-2	11/06/2009	25/11/2009	2967.2	296.72	2.15
TAP-3	11/06/2009	25/11/2009	5497.6	549.76	0.63
TAP-4	11/06/2009	25/11/2009	3343.4	334.34	0.97
Promedio			3590.3	359.0	2.0
Desvest			1272.6	127.3	0.8
Coef. Var. (%)			35.4%	35.4%	41.0%

Por otro lado, en este apartado, se cree adecuado referir otra campaña experimental desarrollada, pensando en la ejecución de los ensayos Hole Drilling en tapial. La problemática giraba en torno a **qué adhesivo emplear para fijar las bandas extensométricas al sustrato terroso compactado**, dado que los adhesivos que normalmente se emplean para otro tipo de soportes no son válidos (fundamentalmente debido a su rigidez). Dicho adhesivo objetivo debía verificar los siguientes aspectos:

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

- Que el adhesivo adhiriera perfectamente sobre la superficie terrosa.
- Que tenga estabilidad dimensional, después de un lapso de tiempo, tras el pegado.
- Que tenga poca rigidez (menor que la tierra compactada) para no falsear la medida de deformación, caso contrario en vez de registrar mediante la galga la deformación del soporte de tierra, registraríamos la del adhesivo.

En este sentido se hicieron pruebas con cuatros adhesivos diferentes.

Inicialmente se experimentó con la fijación de las galgas extensométricas mediante **silicona**. Para ello se empleo una silicona marca “Sella Ceys”, de la casa comercial Ceys. En las Fig. 4.5.85, 4.5.86 y 4.5.87 puede apreciarse el proceso de pegado de la galga en una probeta de tierra compactada.



Fig. 4.5.85, 4.5.86 y 4.5.87: Adhesión y protección de una galga extensométrica a una probeta de tierra mediante silicona.

Una vez curado el adhesivo, se realizó un ensayo a compresión simple de la probeta en cuestión (Fig. 4.5.88), con el objetivo de comparar la ley σ - ϵ promedio entre las obtenidas mediante los transductores potenciométricos fijados a los vástagos metálicos de la prensa, y la ley σ - ϵ obtenida mediante las deformaciones registradas con la galga. De esta forma se comprobaría la adecuación, o no, de dicho adhesivo.

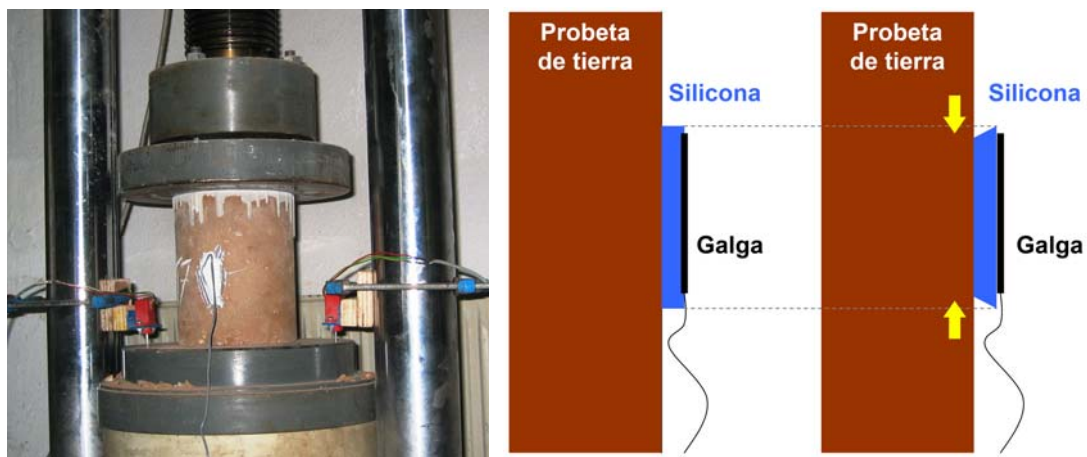


Fig. 4.5.88: Ensayo a compresión simple de una probeta de tierra compactada. La finalidad era verificar, o no, la adecuación de la silicona como adhesivo para fijar galgas extensométricas en superficies de tapial.

Fig. 4.5.89: Posible causa de la no transmisión de deformaciones, a través de la silicona, entre la probeta de tierra compactada y la galga extensométrica.

Como puede comprobarse en la Fig. 4.5.90, las leyes σ - ϵ obtenidas distan mucho de ser parecidas, circunstancia que pone de manifiesto que la silicona empleada como adhesivo no era adecuada para la finalidad estudiada.

A modo de reflexión, y dado que la galga apenas registró deformación, cabe manifestar que la silicona, pese a ser un medio de menor rigidez que la probeta de tierra compactada (una de los aspectos necesarios en el adhesivo) y pese a que en otras pruebas anteriores se verificó un pegado efectivo respecto al sustrato terroso, no transmitía las deformaciones de la superficie de la probeta a la galga (pese a que la película de adhesivo dispuesta fue muy, muy delgada). La posible causa de dicho fenómeno puede deberse a una excesiva deformabilidad de la silicona, que imposibilitaría la transmisión de las deformaciones del soporte a la galga (Fig. 4.5.89).

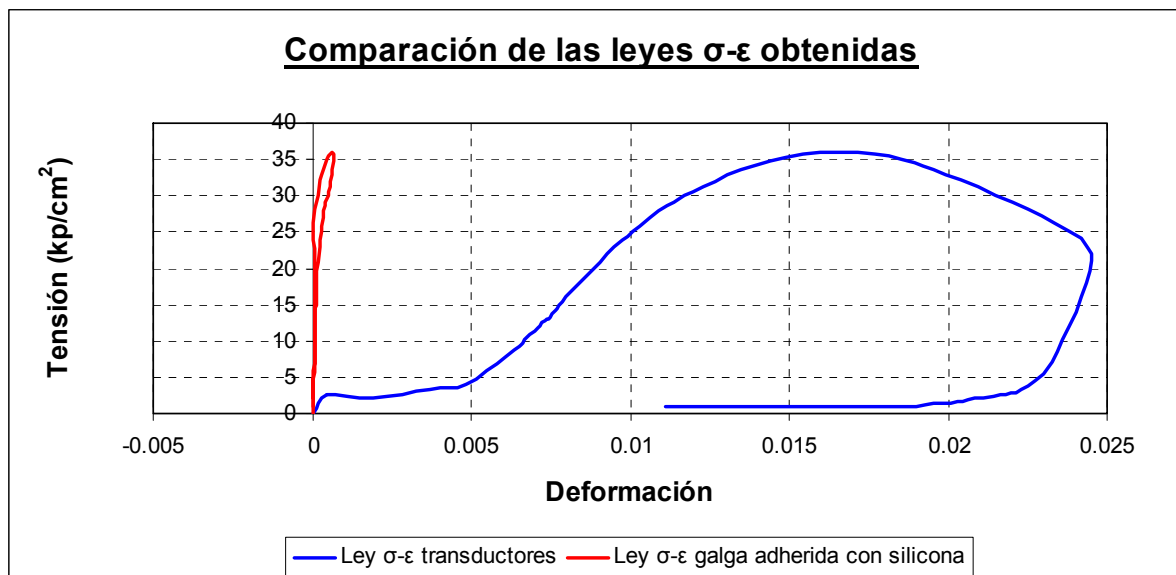


Fig. 4.5.90: Comparación de las leyes σ - ϵ obtenidas mediante transductores y mediante una galga extensométrica adherida al sustrato terroso con silicona.

Con posterioridad, y dado el pobre resultado obtenido mediante silicona, se contacto con el Profesor José Miguel Martín (Universidad de Alicante), reconocido experto en materia de Adhesión y Adhesivos, para ahondar en una consulta sobre la probable naturaleza del adhesivo a emplear. Dicho Profesor propuso llevar a cabo una experimentación con **adhesivos de poliuretano termoplástico**, bien en base disolvente orgánico o en base acuosa. Siguiendo sus indicaciones, se contacto con la empresa gallega Forbo, especialista en este tipo de adhesivos, la cuál, tras intercambiar opiniones en varias ocasiones, envió, gratuitamente, muestras de tres adhesivos, los cuáles se describen brevemente en lo que sigue (se remite al lector al Anexo 13 “Fichas técnicas de los adhesivos de poliuretano termoplástico empleados para la fijación de bandas extensométricas en el sustrato terroso” para una consulta más pormenorizada):

- **Adhesivo de poliuretano de dos componentes en disolución orgánica C-3494.** Para pegar, hay que aplicar el adhesivo a los dos sustratos a unir, dejar secar (10-15 minutos al aire) y con calor (necesita calentar la junta de cola a 60°C para que haya pegado) y presando se unen por contacto.
- **Adhesivo de poliuretano de dos componentes en disolución orgánica C-3580.** Para pegar, hay que aplicar el adhesivo a los dos sustratos a unir, dejar secar (10-20 minutos al aire) y presando se unen por contacto. Aunque este adhesivo está pensado para pegar sin necesidad de calentar, calentando un poco, durante su tiempo abierto, se optimiza la adhesión.
- **Adhesivo de dos componentes basado en resinas sintéticas acuosas y dispersiones de poliuretano THERMONEX 063-05 A.** Parecido al adhesivo de disolvente tradicional pero el secado es más lento y la elasticidad una vez seco es distinta. También necesita aplicación a dos caras, dejar secar (a temperatura ambiente, 20°C, de 20-60 minutos) y calentar a aprox. 55°C para que haya pegado.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Los adhesivos fueron aplicados con pincel, empleando una lámina film adhesiva para ejercer presión y que toda la película de adhesivo tuviera el mismo grosor.

En las figuras siguientes se aprecia el proceso de pegado de las galgas. De esta forma en la Fig. 4.5.91 se presenta un momento captado durante el proceso de limpieza de las superficies de las probetas de tierra para liberarles de polvo y suciedad. En la Fig. 4.5.92 se muestra un instante durante el secado al aire de los adhesivos C-3494 y C-3580, una vez aplicados tanto en la probeta como en las galgas (puede apreciarse como la galga adherida mediante THERMONEX 063-05 A ya se encuentra pegada tras haber dejado secar al aire el adhesivo aplicado, previamente, en la probeta y en la galga).



Fig. 4.5.91: Limpieza de las superficies de las probetas de tierra para liberarles de polvo y suciedad.

Fig. 4.5.92: Instante durante el secado al aire de los adhesivos C-3494 y C-3580, una vez aplicados tanto en la probeta como en las galgas. Puede apreciarse como la galga adherida mediante THERMONEX 063-05 A ya se encuentra pegada tras haber dejado secar al aire el adhesivo aplicado previamente, en la probeta y en la galga.

Por su parte la Fig. 4.5.93 se relaciona con un instante durante la unión por contacto de la galga adherida mediante C-3580, y la Fig. 4.5.94 muestra un detalle de la aplicación de calor mediante emisión de aire caliente.



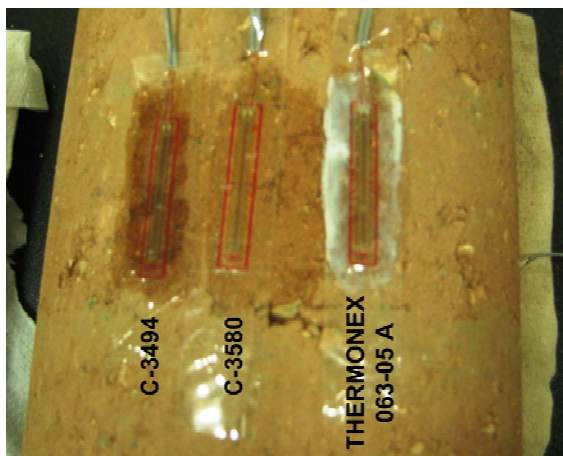
Fig. 4.5.93: Instante durante la unión por contacto de la galga adherida mediante C-3580 (previamente se adhirió la fijada con C-3580).

Fig. 4.5.94: Aplicación de calor mediante emisión de aire caliente.

Finalmente, la Fig. 4.5.95 recoge un detalle de una de las dos probetas de tierra con tres galgas adheridas mediante los tres tipos de adhesivo referidos, previamente al proceso de curado.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Fig. 4.5.95: Detalle de una probeta de tierra con las tres galgas adheridas mediante los tres tipos de adhesivo referidos, previamente al proceso de curado.



Con posterioridad, al igual que se realizó con la probeta a la que se le había adherido una galga mediante silicona, una vez curados los adhesivos, se realizaron sendos ensayos a compresión simple sobre las dos probetas (TAP3 y TAP4) a las que se habían adherido las galgas con los adhesivos de poliuretano (Fig. 4.5.96 y 4.5.97).



Fig. 4.5.96 y 4.5.97: Detalle de las dos probetas ensayadas a compresión simple para verificar la posible idoneidad de los adhesivos empleados para fijar las galgas a su superficie.

Fig. 4.5.98: Detalle de la posición relativa de las galgas extensométricas y el transductor potenciométrico dispuesto.

El objetivo, nuevamente, fue obtener la ley σ - ϵ registrada por el transductor fijado a un vástago metálico de la prensa, y las leyes σ - ϵ compuestas a través de las deformaciones registradas con las tres galgas. En la Fig. 4.5.98 puede apreciarse la disposición enfrentada entre el transductor y las galgas referidas. Finalmente, por comparación de las curvas obtenidas se juzgaría la adecuación, o no, de dichos adhesivos.

Como puede comprobarse en las Fig. 4.5.99 - 4.5.102, en ambas probetas las leyes σ - ϵ obtenidas mediante las galgas extensométricas se ajustan mucho mejor, que en el caso de la silicona, a la obtenida mediante el transductor.

A su vez, tanto en la probeta TAP3 como en el espécimen TAP4, la galga adherida mediante el adhesivo de dos componentes basado en resinas sintéticas acuosas y dispersiones de poliuretano, denominado THERMONEX 063-05 A, es la que presenta una curva con mayor similitud a la compuesta mediante las deformaciones obtenidas con el transductor.

La mayor pendiente de las curvas relacionadas con los adhesivos de poliuretano de dos componentes en disolución orgánica, denominados C-3494 y C-3580, indican que dichos adhesivos presentan, una vez curados, una rigidez mayor que la presente en el adhesivo

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

THERMONEX 063-05 A, circunstancia que desaconseja su empleo para el propósito del estudio, en comparación con éste último.

Centrándonos en el adhesivo THERMONEX 063-05 A, cabe referir que, en el caso de la probeta TAP4, la curva obtenida se ajusta mejor a la relacionada con el transductor, por otro lado se comprobó una mejor adhesión de la galga al soporte en la referida probeta TAP4 que en la TAP3.

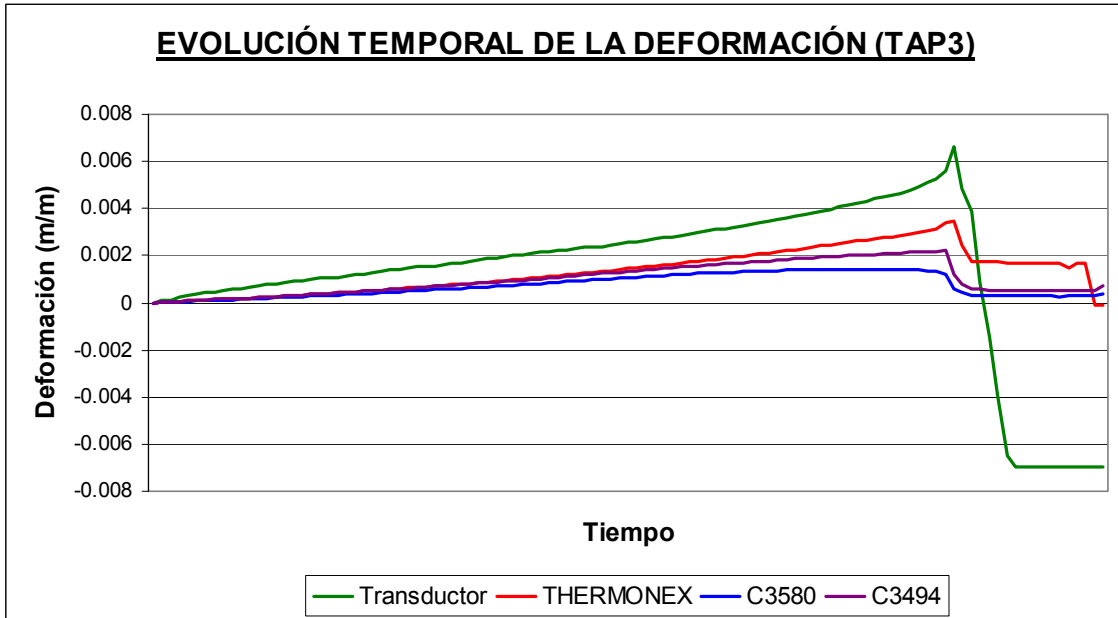


Fig. 4.5.99: Evolución temporal de la deformación registrada en la probeta TAP3 mediante el transductor y mediante las tres probetas adheridas mediante los adhesivos de poliuretano C-3494, C-3580 y THERMONEX 063-05 A.

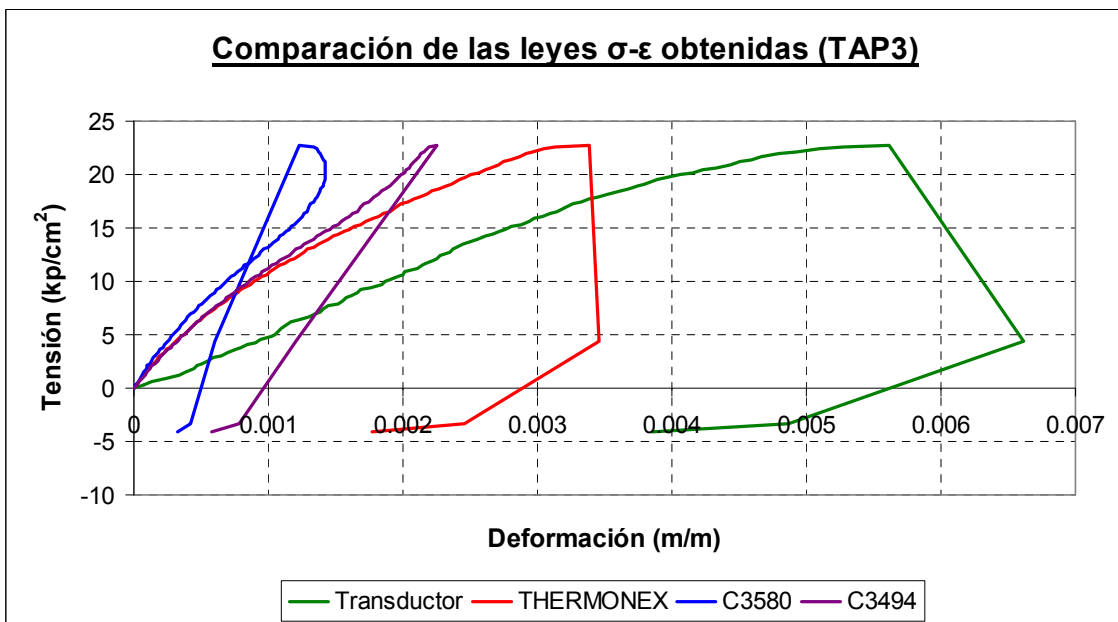


Fig. 4.5.100: Leyes σ - ϵ obtenidas en la probeta TAP3 mediante el transductor y mediante las tres probetas adheridas mediante los adhesivos de poliuretano C-3494, C-3580 y THERMONEX 063-05 A.

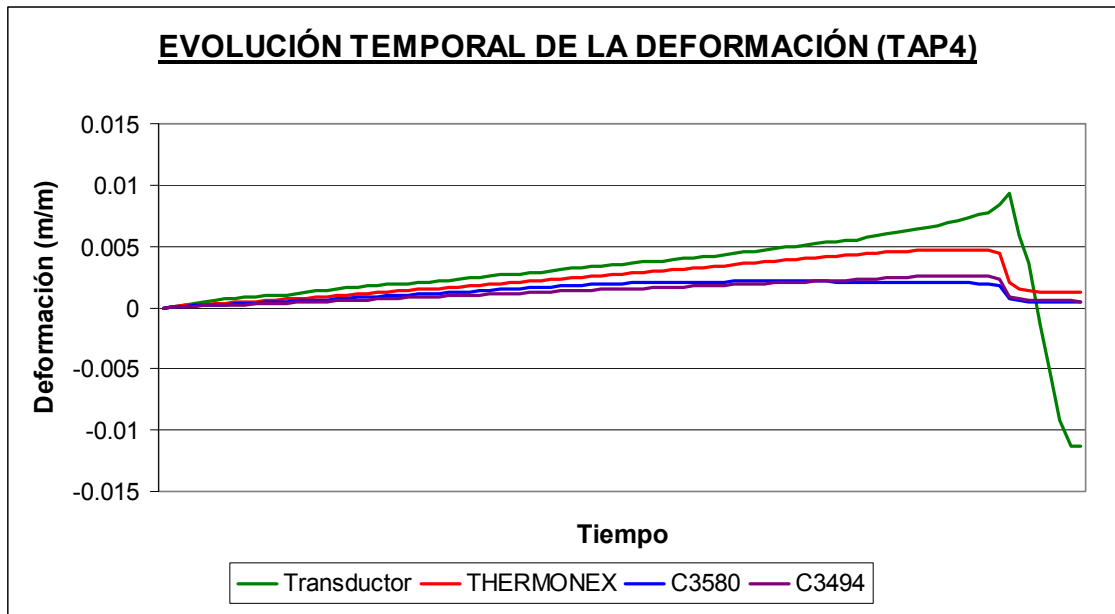


Fig. 4.5.101: Evolución temporal de la deformación registrada en la probeta TAP4 mediante el transductor y mediante las tres probetas adheridas mediante los adhesivos de poliuretano C-3494, C-3580 y THERMONEX 063-05 A.

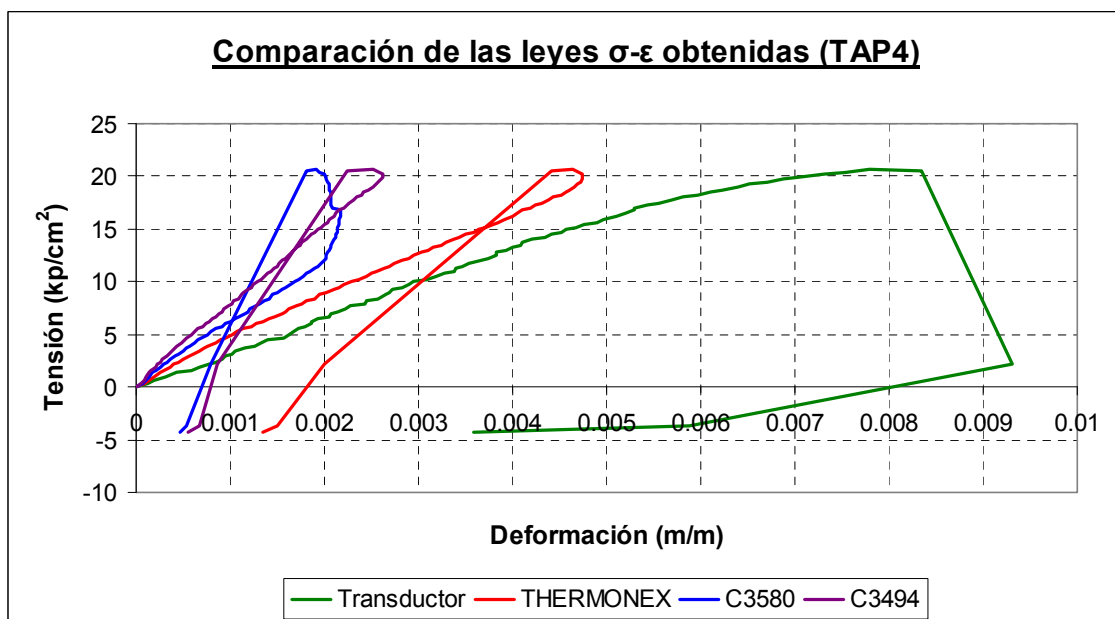


Fig. 4.5.102: Leyes σ - ϵ obtenidas en la probeta TAP3 mediante el transductor y mediante las tres probetas adheridas mediante los adhesivos de poliuretano C-3494, C-3580 y THERMONEX 063-05 A.

Igualmente, conviene referir que mientras que la ley σ - ϵ obtenida mediante el transductor potenciométrico hace referencia a un comportamiento “medio” representativo del conjunto de toda la probeta (dado que el transductor controla el acortamiento experimentado, una vez iniciado el proceso de carga, entre las placas superior e inferior que confinan verticalmente el espécimen), las leyes obtenidas mediante las galgas y, por ende, la obtenida mediante la adherida con THERMONEX 063-05 A, hacen referencia a una zona muy local de la probeta (concretamente a la zona en que la galga estaba adherida). Es por ello que el ajuste entre la ley σ - ϵ obtenida mediante el transductor y la referente a la galga fijada con THERMONEX 063-05 A no tienen por que ser idénticas. En consecuencia, por todo lo referido, se considera dicho adhesivo como adecuado

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

para el pegado de las galgas extensométricas en el tapial, de cara a ejecutar ensayos de hole drilling.

4.5.6 Ensayos de Gato plano

En el muro de tapial objeto de análisis fueron desarrollados dos ensayos de gato plano simple y uno de gato plano doble. La finalidad de estos ensayos fue el contrastar experimentalmente los niveles tensionales obtenidos con la técnica de gato plano simple, dado que el nivel tensional medio en la zona de ejecución del gato plano era conocido a priori, así como el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson obtenidos mediante el ensayo de gato plano doble, en tanto que dichas características mecánicas fueron estimadas en el muro mediante transductores (apartado 4.5.7).

Para la ejecución de los ensayos se empleó un transductor de presión de 1000 Ba (4 voltios) y dos gatos hidráulicos de 126.70 cm^2 de área cada uno. Debido a lo referido una señal de presión registrada de 1 voltio equivale a una carga de 63,350.0 kp.

$$1000 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \approx 4 \text{ voltios} \rightarrow 1 \text{ voltio} \approx 250 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$$

$$1 \text{ voltio} \approx 250 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \cdot 126.70 \text{ cm}^2 \cdot 2 = 63,350 \text{ kp}$$

Igualmente, también hay que considerar que el peso muerto que representa la viga de reparto empleada en el ensayo es de 488 kp.

Por ello, una señal registrada por el transductor de presión de 1.00 voltios, nivel de carga que se introdujo en la cabeza del muro en los dos ensayos de gato plano simple realizados, equivale a 63,838.0 kp.

$$P_{\text{vertical}} = 63,350 \frac{\text{kp}}{\text{voltio}} \cdot 1.00 \text{ voltios} + 488 \text{ kp} = 63,838.0 \text{ kp}$$

4.5.6.1 Ensayo de gato plano GPTap-Simple 1.

En la Fig. 4.5.103 se esquematiza la distribución del gato plano dentro del tapial, así como las magnitudes necesarias para obtener el nivel tensional medio en el plano donde se ejecutó el ensayo de gato plano simple, considerando un ángulo de apertura de cargas de 20° (ver apartado 4.5.4).

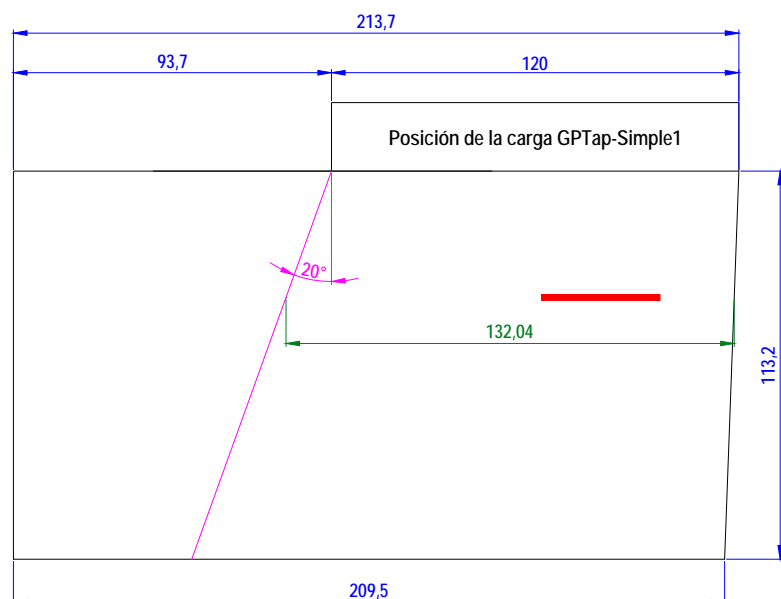


Fig. 4.5.103: Ubicación del ensayo GPTap-Simple1 en el alzado del tapial. Las cotas relacionadas están en cm. El espesor del muro es de 38 cm.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tras la preparación de la zona de ensayo (pegado de los puntos de control), se procedió a la ejecución del ensayo, con la finalidad de obtener el nivel tensional vertical de compresión en servicio. Para ello, previamente fue necesario registrar la distancia existente entre los puntos de control antes del corte (Fig. 4.5.104). A continuación, se procedió a llevar a cabo una hendidura, mediante el empleo de una sierra de disco manual, Fig. 4.5.105, para posterior guiado de la sierra de disco orbital que proporcionará el corte definitivo para la inserción del gato plano (Fig. 4.5.106). Como consecuencia del corte y de la carga vertical existente, se producirá una relajación del elemento estructural en la zona de ensayo.



Fig. 4.5.104: Medida de las distancias iniciales existentes entre los puntos de control, previamente a la inserción del gato plano.

Fig. 4.5.105: Ejecución de una hendidura mediante sierra de disco, para posterior guiado de la sierra orbital.

Fig. 4.5.106: Ejecución de la roza para insertar el gato plano simple.

Con la finalidad de estimar el área neta de contacto entre el gato plano y el muro se dispuso un calco entre dos láminas de papel, de manera que los puntos de presión quedasen reflejados en el papel por acción del calco. Igualmente, fue estimada el área de la roza ejecutada (apartado 4.5.9). En las Fig. 4.5.107 y 4.5.108 se ilustran el área aproximada de la roza, así como el área efectiva de contacto del gato en el muro.

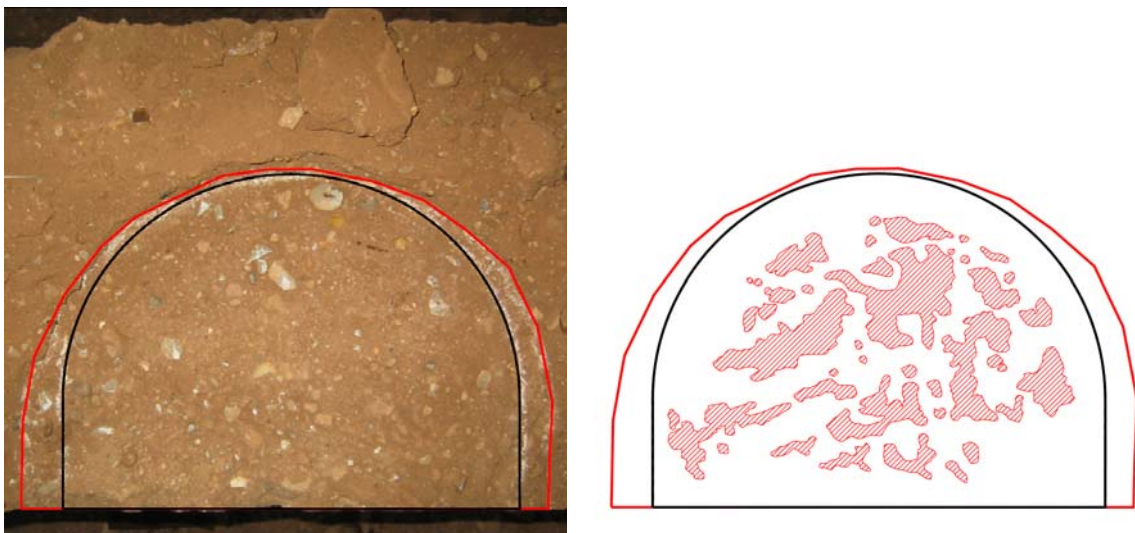


Fig. 4.5.107 y 4.5.108: Replanteo del área de la roza (896.58 cm^2), el área del gato plano GPS-A Simple (778.56 cm^2) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (186.81 cm^2).

En base a las áreas obtenidas para la roza ejecutada y para el contacto gato-muro, y conociendo la geometría del gato plano empleado en el ensayo (Semioval $350 \times 260 \times 3.5 \text{ mm}$), es posible

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

obtener las diferentes relaciones geométricas (k_a). En la Tabla 4.5.4 se resumen los factores geométricos obtenidos.

Tabla 4.5.4: Factores geométricos, k_a , obtenidos para el ensayo GPTap-Simple1 llevado a cabo en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

	Factores geométricos, k_a , GPTap-Simple1			
	Áreas (cm ²)		Constantes derivadas	
Gato plano GPTap-Simple1 (Fig. 4.5.108)	A_{roza}	896.58	$K_{gato-roza}$	0.868
	A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$	0.240
	$A_{contacto}$	186.81	$K_{contacto-roza}$	0.208

Por su parte, en relación a la constante de calibración de los gatos planos, k_m , se ha adoptado un valor de 0.855 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

En las Fig. 4.5.109 y 4.5.110 se han representado el área de ensayo con la finalidad de ubicar la posición de los puntos de control en el conjunto del muro.

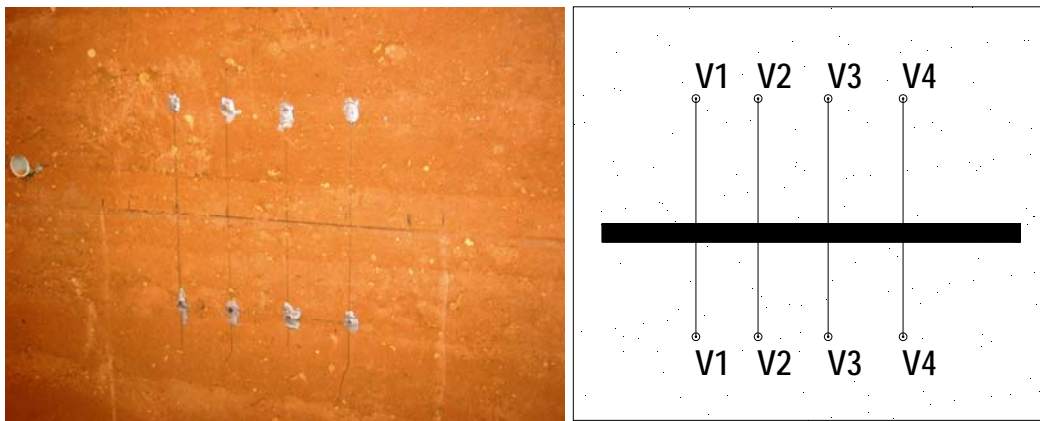


Fig. 4.5.109 y 4.5.110: Croquis del área de ensayo de gato plano simple realizado.

Una vez introducido el gato se procederá a aumentar su presión interna mediante bombeo hidráulico hasta que la distancia medida inicialmente, antes de la ejecución de la roza, se recupere. En ese momento, dicha presión interna ($P_{cancelación}$), corregida con unos coeficientes relacionados con la rigidez inherente del gato, K_m y, según la literatura, con la relación de áreas existente entre el gato y la roza practicada, K_a , permitiría obtener el nivel tensional en servicio del elemento estructural analizado (σ).

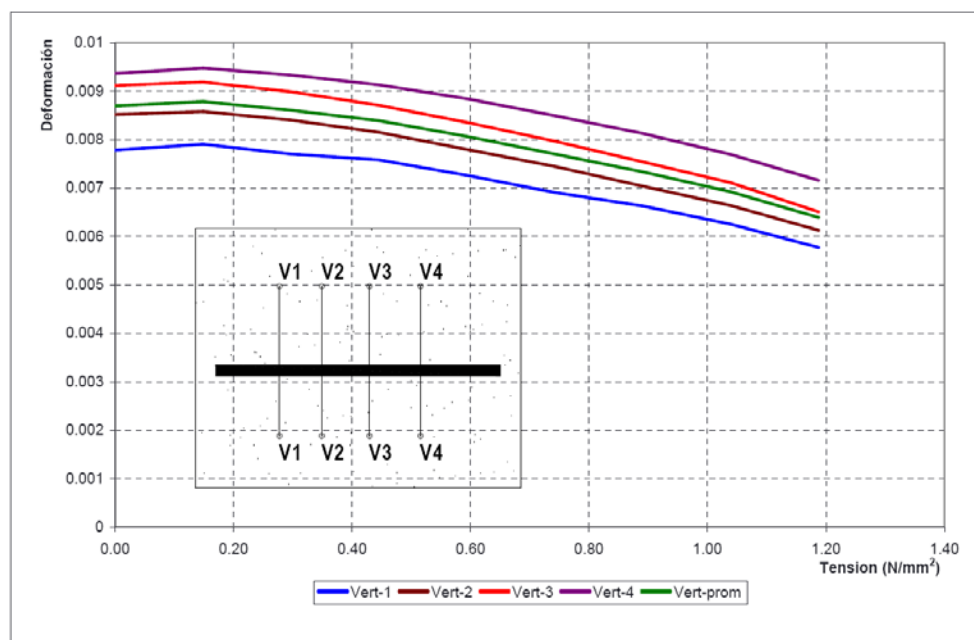
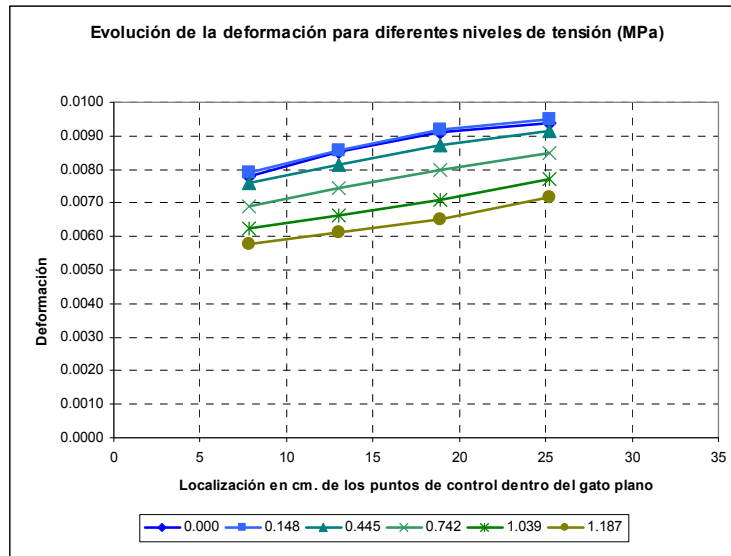


Fig. 4.5.111: Evolución de la deformación unitaria con la tensión comunicada a la fábrica.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Los resultados del ensayo se recogen en el registro Lab0925, el cuál se adjunta en el Anexo 14. No obstante, de dicho registro, se recoge a continuación la gráfica que refleja la evolución de la deformación unitaria con la tensión comunicada a la fábrica (Fig. 4.5.111). Igualmente en la Fig. 4.5.112 se representa para varios niveles de tensión proporcionados por el gato plano, la evolución de las deformaciones experimentadas por cada par de puntos de control.

Fig. 4.5.112: Evolución de las deformaciones experimentadas por cada par de puntos de control, para varios niveles de tensión proporcionados por el gato plano.



Por otra parte, la tensión vertical media comunicada en el plano del gato plano, mediante la introducción de carga en la cabeza del muro, es de 1.272 MPa.

$$\sigma_{media} = \frac{63,838.0kp}{132.0438cm^2} = 12.72 \frac{kp}{cm^2} = 1.27MPa \text{ (compresión)}$$

En vista de que dicho nivel tensional “teórico” difícilmente iba a ser alcanzado a un nivel de tensión “experimental” (ver la tendencia de la Fig. 4.5.111) y en un tiempo razonable (dado que bajo cada nivel tensional constante comunicado al muro los alargamientos registrados entre los puntos de control evolucionaban), se registró la evolución de las deformaciones experimentadas por la tapia a un nivel de presión instalado en el gato plano de 16 bar (equivalente a un nivel tensional comunicado al elemento portante de 1.19 MPa).

Puede comprobarse (Fig. 4.5.113) como la deformación registrada por los cuatro puntos de control, para un nivel constante de presión de 16 bar, evolucionaba en el tiempo, de forma que en poco menos de una hora se había registrado un valor de 0.017% de alargamiento, respecto al valor registrado inmediatamente después de introducir la presión referida. Además, dicha evolución no parece converger, en el lapso de tiempo en el que se tomaron las mediadas, a ningún valor.

Esta circunstancia invita a pensar que el tapial ensayado, pese a estar construido empleando técnicas de compactación, como ocurriría con un suelo normalmente consolidado (razón de sobreconsolidación unidad), sufriría bajo carga mantenida unos movimientos que, además de tener una componente instantánea, registrarán amplificaciones a lo largo del tiempo. Obviamente, esta problemática no afectará a los elementos portantes in situ, debido a que dichos movimientos asociados a un fenómeno de consolidación del material (suelo) componente del tapial, ya se habrían desarrollado a lo largo del tiempo.

Debido a esta circunstancia se producen evoluciones temporales importantes de las deformaciones registradas en la tapia. Por el motivo referido, en los ensayos de hole drilling y en el otro ensayo de gato plano simple realizado (GPTap-Simple2), previamente a la ejecución del ensayo, se introdujo un nivel tensional, aplicando una carga en la cabeza del muro, mayor que el actuante durante el posterior ensayo (“precarga”), llevando a cabo un control de la deformación en el tiempo (durante varios días) para ser conscientes de cuando se habría desarrollado una parte

importante de la deformación diferida de la tapia y, por ende, poder realizar el ensayo con mayores garantías de éxito.

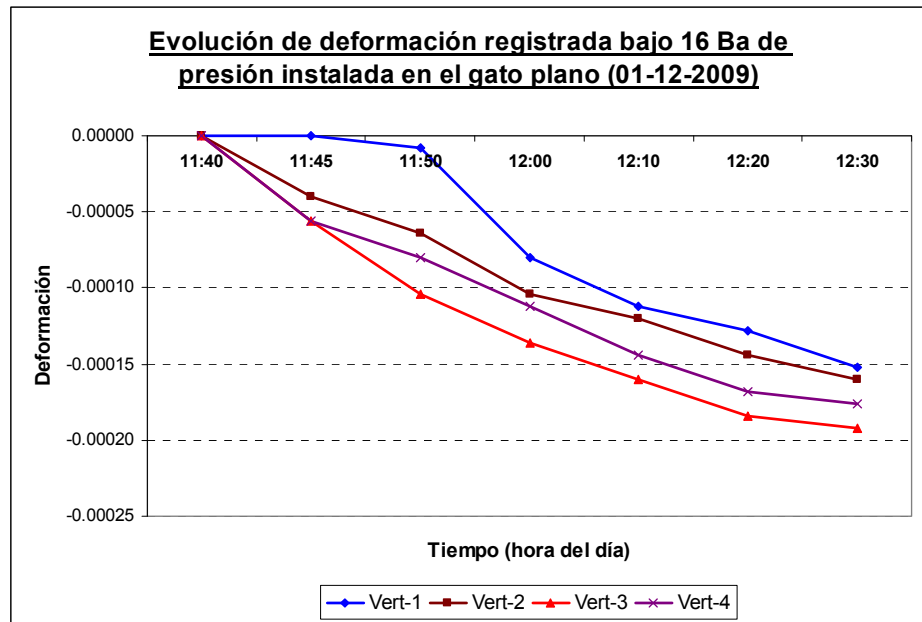


Fig. 4.5.113: Evolución de la deformación unitaria experimentada en el área de ensayo para una presión instalada en el gato plano, constante, de 16 bar (ensayo GPTap-Simple1).

4.5.6.2 Ensayo de gato plano GPTap-Simple2

En la Fig. 4.5.114 se esquematiza la distribución del gato plano dentro de la tapia, así como las magnitudes necesarias para obtener el nivel tensional medio en el plano donde se ejecutó el ensayo de gato plano simple, considerando un ángulo de apertura de cargas de 20°.

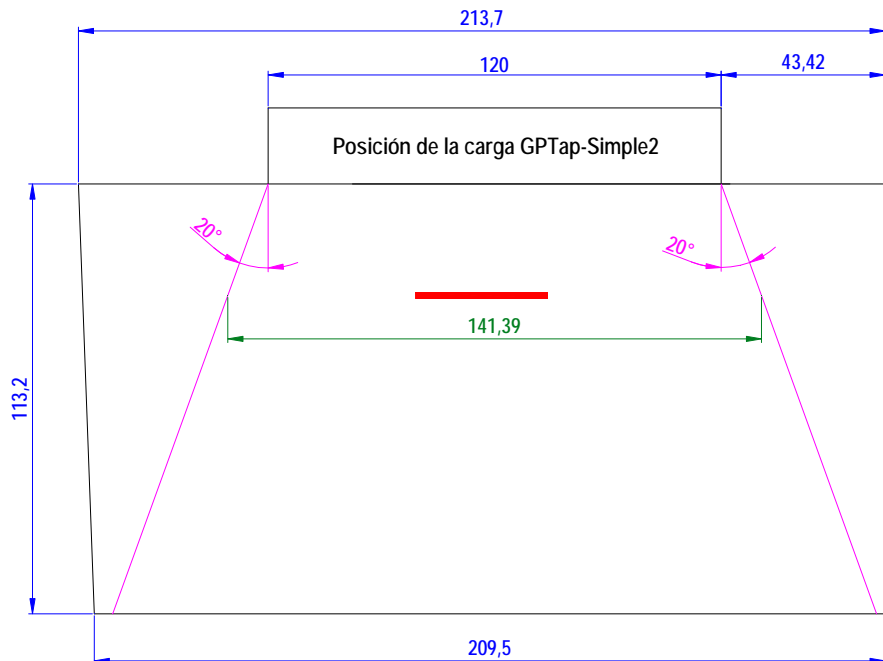


Fig. 4.5.114: Ubicación del ensayo GPTap-Simple2 en el alzado del tapial. Las cotas relacionadas están en cm. El espesor del muro es de 38 cm.

Tras la preparación de la zona de ensayo (pegado de los puntos de control, Fig. 4.5.115 y 4.5.116), se procedió, como ya se ha referido, a introducir un nivel tensional en la zona de ensayo, mediante la aplicación de una carga en la cabeza del muro, mayor que la actuante durante el ensayo posterior (“precarga”), y a registrar el control de la deformación experimentada por los puntos de control a lo largo del tiempo (durante varios días) para ser conscientes de cuando se habría desarrollado una parte importante de la deformación diferida.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

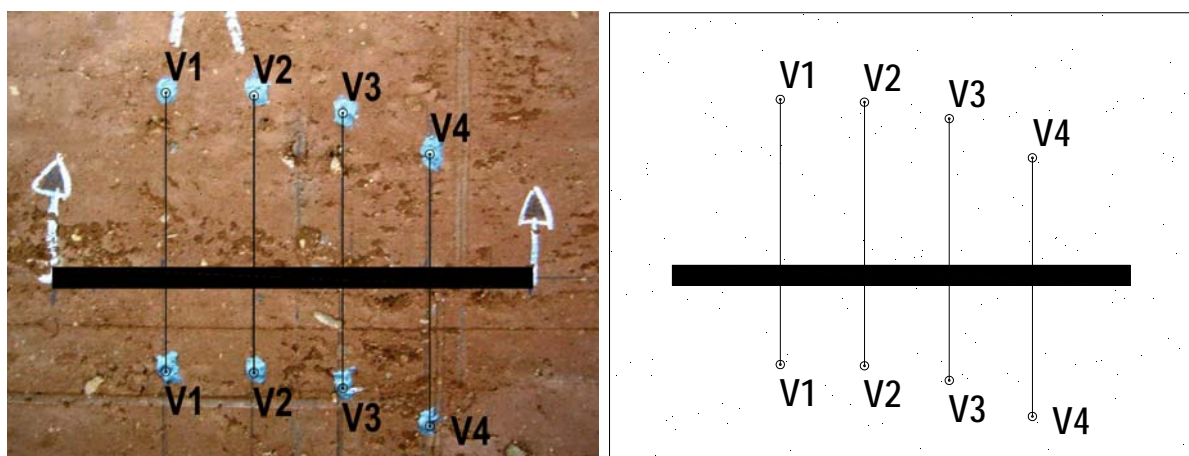


Fig. 4.5.115 y 4.5.116: Croquis de la disposición de los puntos de control fijados para la realización del ensayo de gato plano simple GPTap-Simple2.

Concretamente, se movilizó una carga total en cabeza del muro de unas 75 t, con los elementos de reparto ubicados según figuran en la Fig. 4.5.114. En la Tabla 4.5.5 se compendia, para cada uno de los puntos de control vertical involucrados en el ensayo de gato plano simple, la evolución de la deformación registrada por los mismos (en este caso de compresión) bajo la acción referida mantenida a lo largo del tiempo. Igualmente, en la Fig. 4.5.117 se ilustra dicha evolución de forma gráfica.

Tabla 4.5.5: Evolución de la deformación en cada uno de los cuatro puntos de control vertical a lo largo del tiempo, bajo una carga de 75 t, mantenida sensiblemente constante.

	Día	Hora	L_i (mm)	ΔL_i (mm)	ϵ_i	ϵ_i (%)
Punto de Control V1	11/01/2010	11:25	3.3680	0.0000	0.00000	0.0000
	11/01/2010	18:00	3.3648	-0.0032	0.00002	0.0016
	12/01/2010	11:30	3.3632	-0.0048	0.00002	0.0024
	13/01/2010	17:45	3.3600	-0.0080	0.00004	0.0040
	14/01/2010	11:40	3.3584	-0.0096	0.00005	0.0048
15/01/2010	11:20	3.3584	-0.0096	0.00005	0.0048	
Punto de Control V2	11/01/2010	11:25	3.9536	0.0000	0.00000	0.0000
	11/01/2010	18:00	3.9520	-0.0016	0.00001	0.0008
	12/01/2010	11:30	3.9504	-0.0032	0.00002	0.0016
	13/01/2010	17:45	3.9488	-0.0048	0.00002	0.0024
	14/01/2010	11:40	3.9472	-0.0064	0.00003	0.0032
15/01/2010	11:20	3.9472	-0.0064	0.00003	0.0032	
Punto de Control V3	11/01/2010	11:25	3.4736	0.0000	0.00000	0.0000
	11/01/2010	18:00	3.4720	-0.0016	0.00001	0.0008
	12/01/2010	11:30	3.4704	-0.0032	0.00002	0.0016
	13/01/2010	17:45	3.4704	-0.0032	0.00002	0.0016
	14/01/2010	11:40	3.4704	-0.0032	0.00002	0.0016
15/01/2010	11:20	3.4704	-0.0032	0.00002	0.0016	
Punto de Control V4	11/01/2010	11:25	3.4976	0.0000	0.00000	0.0000
	11/01/2010	18:00	3.4976	0.0000	0.00000	0.0000
	12/01/2010	11:30	3.4960	-0.0016	0.00001	0.0008
	13/01/2010	17:45	3.4944	-0.0032	0.00002	0.0016
	14/01/2010	11:40	3.4944	-0.0032	0.00002	0.0016
15/01/2010	11:20	3.4944	-0.0032	0.00002	0.0016	

Como puede comprobarse en la gráfica siguiente, se aprecia un incremento deformacional instantáneo importante, así como una deriva gradual hasta un valor en el que las deformaciones parecen estabilizarse a partir del tercer día de registro de su evolución, presentando un acortamiento promedio del 0.0028% respecto del registrado al inicio del ensayo. Es en este momento cuando se procede a la realización propiamente dicha del ensayo de gato plano simple, para la carga, ya referida, en cabeza del muro de 63.84 ton.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

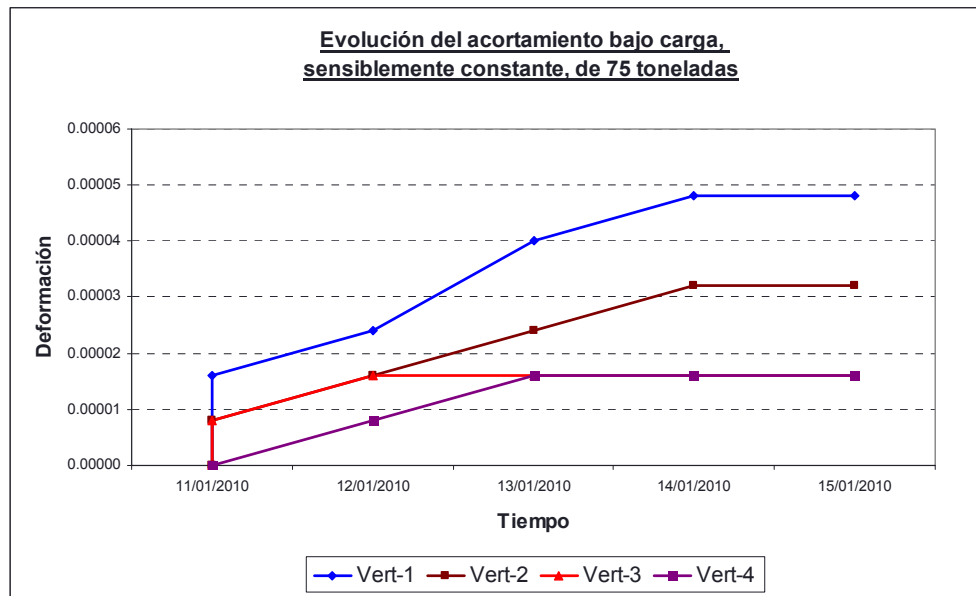


Fig. 4.5.117: Evolución de la deformación en cada uno de los cuatro puntos de control vertical a lo largo del tiempo, bajo una carga de 75 ton, mantenida sensiblemente constante. La deformación promedio registrada tras 4 días de control fue del 0.0028%.

Para ello, previamente fue necesario registrar la distancia existente entre los puntos de control antes del corte. A continuación, se procedió a llevar a cabo una hendidura, mediante el empleo de una sierra de disco manual, que guíase la sierra de disco orbital que proporcionará el corte para la posterior inserción del gato plano (Fig. 4.5.118). Como consecuencia del corte y de la carga vertical existente, se producirá una relajación del elemento estructural en la zona de ensayo.



Fig. 4.5.118: Ejecución de la roza para insertar el gato plano simple.

Fig. 4.5.119: Proceso de presurización del gato plano y control de la evolución de las deformaciones experimentas por los puntos de control.

Fue estimada el área de la roza ejecutada (apartado 4.5.9). En las Fig. 4.5.120 y 4.5.121 se ilustra el área aproximada de la roza respecto de la del gato plano.

En base al área obtenida para la roza ejecutada, y conociendo la geometría del gato plano empleado en el ensayo (Semioval 350x260x3.5mm), es posible obtener la relación geométrica k_a ($K_{\text{gato-roza}}$), que alcanza un valor de 0.848.

Por su parte, en relación a la constante de calibración de los gatos planos, k_m , se ha adoptado un valor de 0.95 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

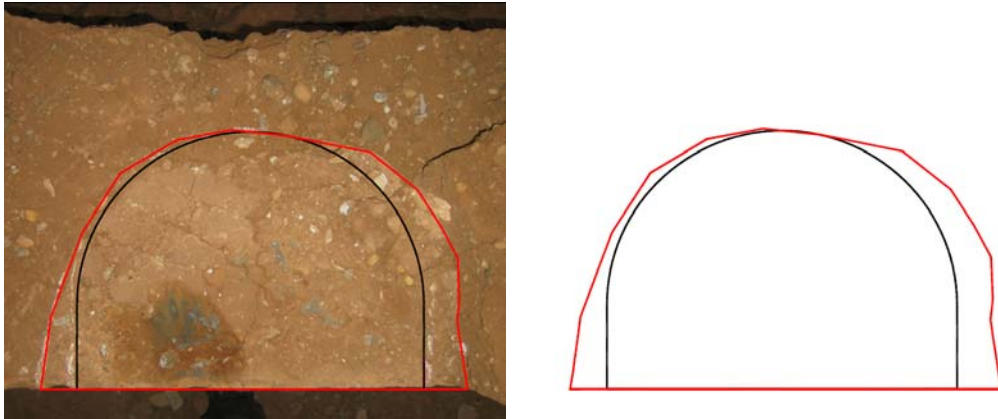


Fig. 4.5.120 y 4.5.121: Relación gráfica entre el área de la roza (918.01 cm²) y área del gato plano GPTap-Simple2 (778.56 cm²).

Una vez introducido el gato se procedió a aumentar su presión interna mediante bombeo hidráulico hasta que la distancia medida inicialmente, antes de la ejecución de la roza, se recupere (Fig. 4.5.119). En ese momento, dicha presión interna ($P_{cancelación}$), corregida con unos coeficientes relacionados con la rigidez inherente del gato, K_m y, según la literatura, con la relación de áreas existente entre el gato y la roza practicada, K_a , permitiría obtener el nivel tensional en servicio del elemento estructural analizado (σ).

Los resultados del ensayo se recogen en el registro Lab1001, el cuál se adjunta en el Anexo 14 No obstante, de dicho registro, se realizan a continuación unos comentarios. Previamente, se recoge a continuación la Fig. 4.5.122 que ilustra el nivel tensional en servicio existente en el elemento estructural caso de utilizar el coeficiente geométrico $K_a=K_{gato-roza}$, en este caso dicho valor alcanza los 1.45 MPa. Igualmente en la Fig. 4.5.123 se representa para varios niveles de tensión proporcionados por el gato plano, la evolución de las deformaciones experimentadas por cada par de puntos de control.

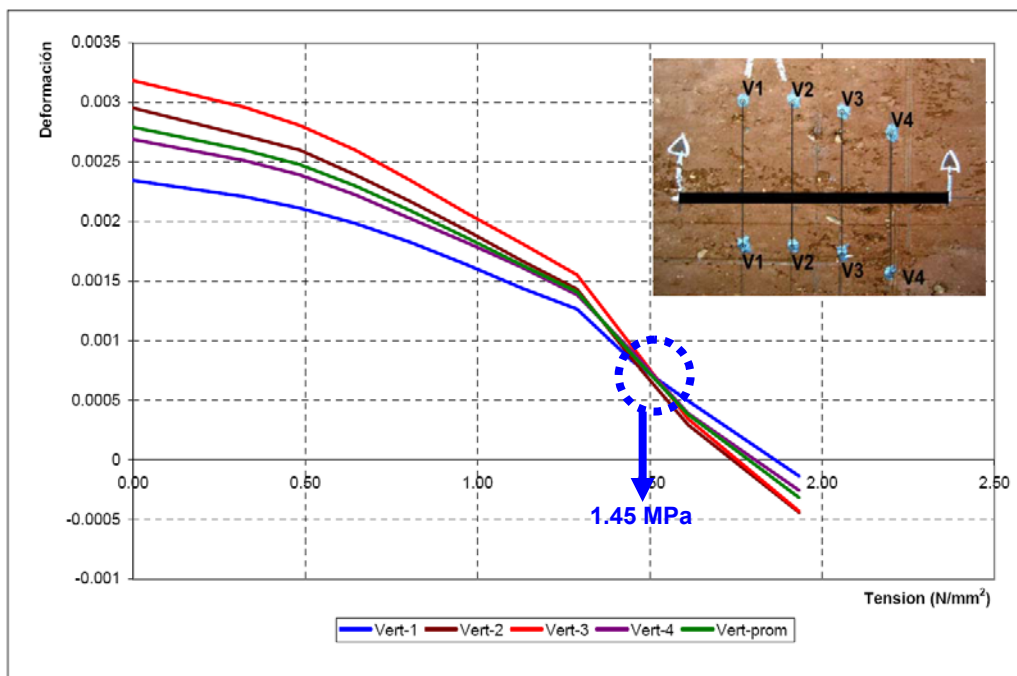


Fig. 4.5.122: Nivel tensional obtenido mediante el ensayo de gato plano simple, empleando como coeficiente corrector geométrico el que liga el área de la roza y el área del gato plano ($K_{gato-roza}$).

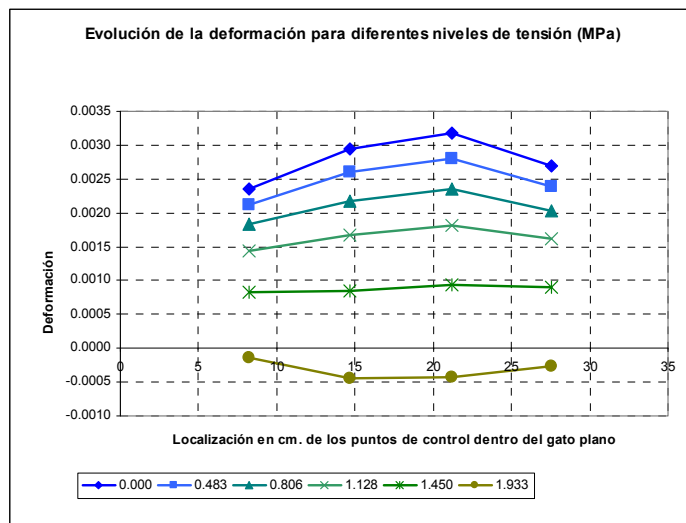
El nivel tensional, obtenido por interpolación lineal, para el cuál se recuperaron las distancias medidas previamente a la ejecución del corte fue de 1.79 MPa. Ahora bien, **Ronca et al. (1997)**, en base a campañas experimentales en laboratorio (Ronca 1996 y 1996a) e in situ en la torre de

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Monza, justificaron la incidencia del desarrollo del fenómeno inelástico durante la ejecución de los gatos planos (se remite al lector al estado del arte, apartado 2.2.1.5). Si dicho efecto se evidencia concluyeron que puede obtenerse una buena convergencia al valor correcto de la presión de cancelación, p , mediante el punto común de intersección definido por las curvas, asociado con el momento en el que se produce la recuperación de la deformación elástica componente de la deformación total. A dicho punto lo denominaron “punto de desplazamiento residual”.

En el caso presentado en la Fig. 4.5.122, se evidencia una clara convergencia de los cuatro puntos de control a un punto de intersección (el denominado punto de desplazamiento residual) que establece un nivel tensional del orden de 1.45 MPa, por ello que, en base a los comentarios descritos en las referencias aludidas, se considera como el valor real de tensión existente en el tapial en el ensayo GPTap-Simple2.

Fig. 4.5.123: Evolución de las deformaciones experimentadas por cada par de puntos de control, para varios niveles de tensión proporcionados por el gato plano.



4.5.6.3 Gato plano GPTap-Doble

En la Fig. 4.5.124 se esquematiza la distribución de los dos gatos planos dentro de la tapia, así como las magnitudes necesarias para obtener el nivel tensional medio en el plano de cada gato, considerando un ángulo de apertura de cargas de 20° .

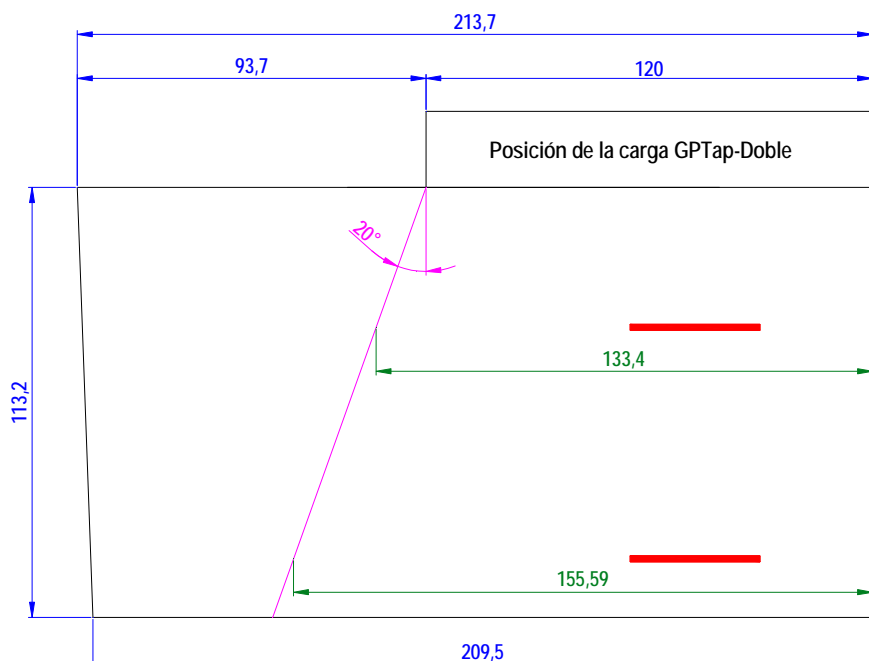


Fig. 4.5.124: Ubicación del ensayo GPTap-Doble en el alzado del tapial. Las cotas relacionadas están en cm. El espesor del muro es de 38 cm.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

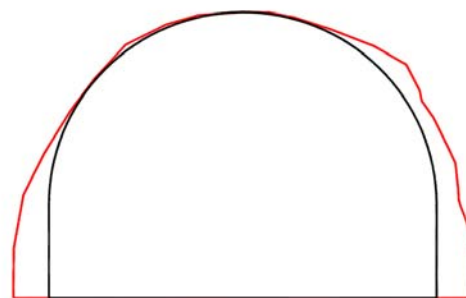
Tras disponer los puntos de control pertinentes, fue necesario ejecutar las dos rozas necesarias para insertar sendos gatos planos (Fig. 4.5.125 y 4.5.126).

Fig. 4.5.125 y 4.5.126:
Instantes captados durante la ejecución respectiva de las rozas superior e inferior movilizadas en el ensayo GPTap-Doble.



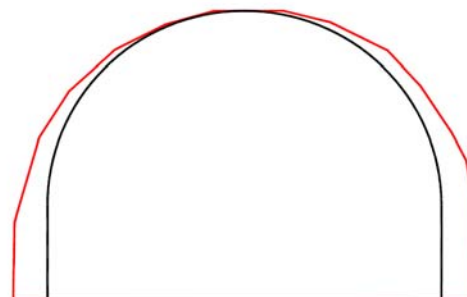
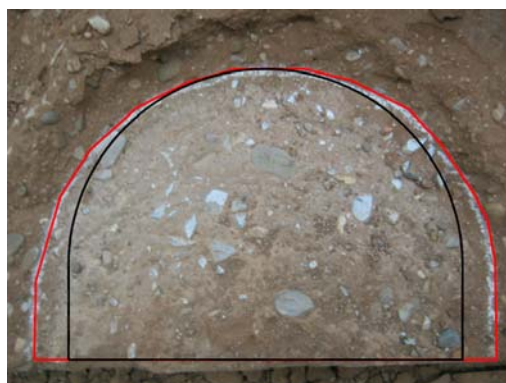
En la Fig. 4.5.127 se ilustra el área aproximada de la roza realizada para la inserción del gato plano superior del ensayo GPTap-Doble.

Fig. 4.5.127:
Relación gráfica entre el área de la roza (874.06 cm^2) y área del gato plano superior del ensayo GPTap-Doble (778.56 cm^2).



Por su parte en las Fig. 4.5.128 se ilustra el área aproximada de la roza realizada para la inserción del gato plano inferior del ensayo GPTap-Doble

Fig. 4.5.128: Relación gráfica entre el área de la roza (888.87 cm^2) y área del gato plano inferior del ensayo GPTap-Doble (778.56 cm^2).



En base a las áreas obtenidas para las rozas ejecutadas y conociendo la geometría de los gatos planos empleados en el ensayo (Semioval $350 \times 260 \times 3.5 \text{ mm}$), es posible obtener la relación geométrica k_a ($K_{\text{gato-roza}}$), que alcanza un valor de 0.883. En la Tabla 4.5.6 se resumen los factores geométricos obtenidos.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.5.6: Factores geométricos, k_a , obtenidos para cada uno de los dos gatos planos involucrados en el ensayo GPTap-Doble.

Factor geométrico, k_a ($K_{\text{gato-roza}}$), GPTap-Doble					
		Áreas (cm ²)		Constantes derivadas	
Gato plano superior (Fig. 4.5.127)	A_{roza}	874.06	$K_{\text{gato-roza}}$	0.891	$K_{\text{gato-roza}}$ 0.883
	A_{gato}	778.56			
Gato plano inferior (Fig. 4.5.128)	A_{roza}	888.87	$K_{\text{gato-roza}}$	0.876	
	A_{gato}	778.56			

Por su parte, en relación a la constante de calibración de los gatos planos, k_m , se ha adoptado un valor de 0.855 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

Una vez introducidos los dos gatos planos, y tras el purgado del aire contenido en el interior de los mismos hasta llenarlos del fluido hidráulico, se realizan ciclos de presurizado – despresurizado de los gatos, registrando para cada nivel de presión el desplazamiento de los puntos verticales (Fig. 4.5.129) y horizontales (Fig. 4.5.130) y, por ende, obteniendo las deformaciones asociadas a cada ciclo. De esta manera se grafica la ley σ - ϵ para la porción de tapial involucrado, de la cuál puede obtenerse el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.

Fig. 4.5.129: Registro de la evolución de la deformación de los puntos de control vertical a lo largo del ensayo GPTap-Doble.



Fig. 4.5.130: Registro de la evolución de la deformación de los puntos de control horizontal a lo largo del ensayo GPTap-Doble.



En este punto, cabe mencionar un aspecto peculiar que no se volvió a repetir en el resto de ensayos realizados. Concretamente, al alcanzar una presión instalada en el interior de los gatos planos de 20 Ba (equivalente a un nivel tensional comunicado a la tapia de 15.10 kp/cm²) se desarrollaron fugas en varios puntos de una de las juntas soldadas del gato plano inferior (Fig. 4.5.131 y 4.5.132). Dicha problemática, probablemente, esté asociada a una soldadura defectuosa. Debido al desarrollo de estas pérdidas de fluido, se generó la consecuente pérdida de presión que impidió comunicar al tapial niveles superiores de tensión, por lo que el ensayo hubo de finalizarse en este punto.



Fig. 4.5.131 y 4.5.132: Detalle de las pérdidas de fluido hidráulico por una de las juntas soldadas del gato plano inferior.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En la Fig. 4.5.133 se presentan los resultados obtenidos para los cuatro puntos de control vertical y los dos horizontales tras la realización de 4 ciclos de carga y descarga. El punto de control vertical nº 1 registró un comportamiento más rígido que el resto de puntos de control vertical, por ello que dicho punto nº 1 no se tuvo en cuenta en el procesado posterior de los datos.

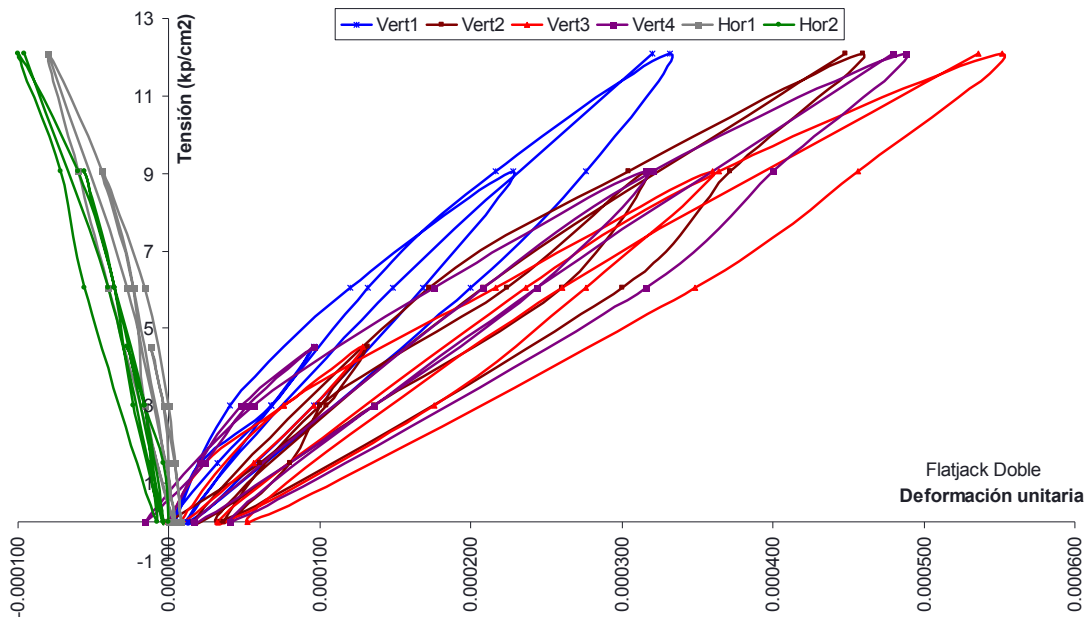


Fig. 4.5.133: Leyes σ - ϵ obtenidas para los cuatro puntos de control vertical (base de medida 400 mm) y para los dos puntos de control horizontal (base de medida 200 mm).

Por su parte, en la Fig. 4.5.134 se presentan las leyes tensión – deformación promedio, obtenidas en el área de ensayo tanto para los puntos de control vertical, a excepción del nº 1, como para los horizontales.

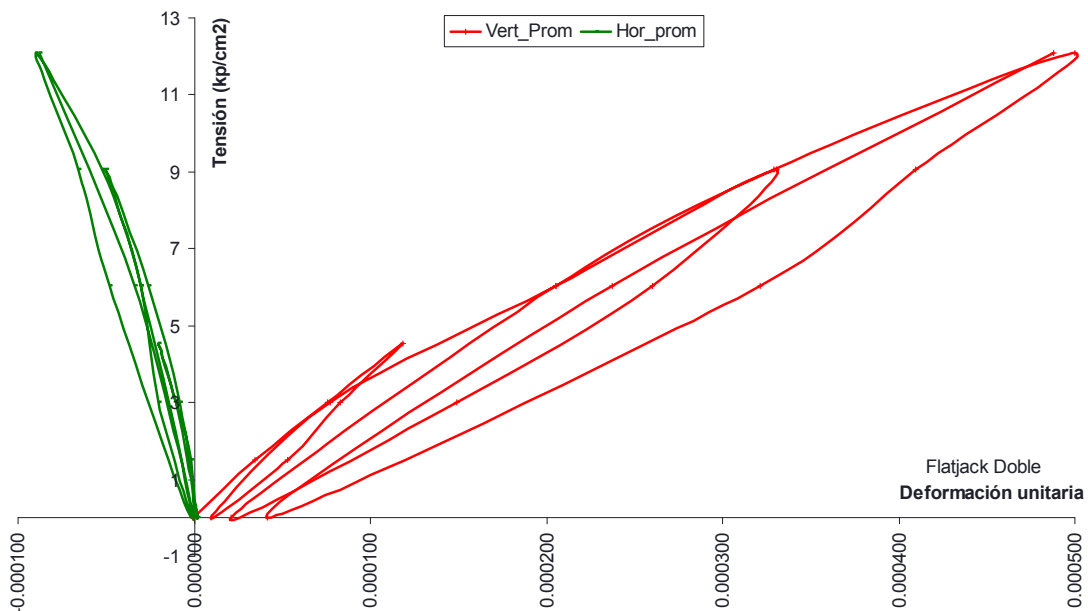


Fig. 4.5.134: Leyes σ - ϵ promedio obtenidas en el ensayo GPTap-Doble.

Por su parte en la Fig. 4.5.135 se han representado los ciclos realizados así como los puntos máximos que definen la envolvente de los mismos. A dichos puntos se ha ajustado una curva logarítmica en base a la cuál se ha estimado la tensión de rotura asociada a una deformación del 3% (Tassios 1988), obteniendo un valor de 2.10 MPa. Cabe relacionar que la deformación en rotura obtenida en las probetas cilíndricas de tapial ensayadas con anterioridad (Tabla 4.5.3) alcanzó un valor promedio del 2%, por ello que para el tapial la deformación supuesta del 3%

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

pueda parecer un umbral de deformación en rotura reducido, si bien queda del lado de la seguridad. Si se supondría una deformación del 2%, la tensión de rotura estimada mediante el ajuste logarítmico alcanzaría un valor de 3.10 MPa, cifra equivalente a la resistencia a compresión promedio obtenida en los ensayos a compresión sobre probetas cilíndricas ya referidos (Tabla 4.5.2).

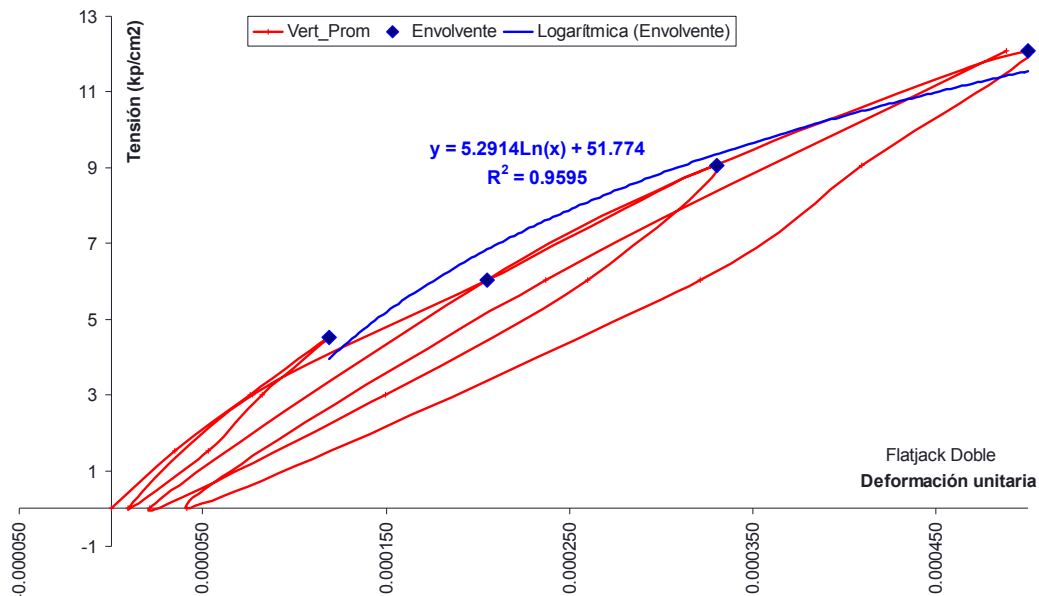


Fig. 4.5.135: Envolvente de rotura y ajuste logarítmico obtenido ($R^2 = 0.9595$).

Igualmente, a partir de las curvas obtenidas (Fig. 4.5.133 y 4.5.134) puede estimarse las características mecánicas, módulo de deformación y coeficiente de Poisson, para el área movilizada de tapial en el ensayo.

En la Tabla 4.5.7 se presentan las características mecánicas obtenidas en cada uno de los ciclos realizados, sin tener en cuenta el punto de control nº 1 dado su comportamiento discordante del resto. Cabe llamar la atención a que dichas características mecánicas se corresponden con las obtenidas para un intervalo de presiones $[p_1, p_2]$, por ello que el módulo de deformación obtenido sea un módulo secante.

Tabla 4.5.7: Características mecánicas, E y ν , obtenidas en el ensayo GPTap-Doble.

Ciclo	p_1^* (kp/cm ²)	p_2^* (kp/cm ²)	$E_{p_1-p_2}$ (kp/cm ²)				$E_{p_1-p_2_promedio}$ (kp/cm ²)	$\nu_{p_1-p_2_promedio}$
			Vert 1	Vert 2	Vert 3	Vert 4		
1	0	6	47,185	34,317	35,389	47,185	38,964	-0.13
2	0	8	52,067	32,126	29,037	31,457	30,873	-0.14
3	0	8	50,331	38,716	29,606	31,457	33,260	-0.16
4	0	8	44,410	34,317	29,037	29,606	30,987	-0.16
Valor promedio para los ciclos 1-4:							33,520.83	-0.15
Valor promedio para los ciclos 2-4:							31,706.56	-0.16

* p_1 y p_2 indican el intervalo de presiones para el cuál se ha obtenido el módulo de elasticidad secante ($E_{p_1-p_2}$) y el coeficiente de Poisson ($\nu_{p_1-p_2}$).

Puede apreciarse como el valor del módulo de elasticidad registrado en el primer ciclo de carga (38,964 kp/cm²) es del orden de un 23% mayor que el módulo de elasticidad promedio registrado para los ciclos 2, 3 y 4 (31,706.56 kp/cm²), por ello que, como conclusión, parece razonable considerar un módulo de elasticidad secante de **3,170.66 MPa** y un coeficiente de Poisson de 0.16.

Para una consulta más detallada del ensayo, se remite al lector al registro Lab1002, el cuál se adjunta en el Anexo 14.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Finalmente, en las Fig. 4.5.136 y 4.5.137 se ha representado el área de ensayo con la finalidad de ubicar la posición de los puntos de control en el conjunto de la fábrica.

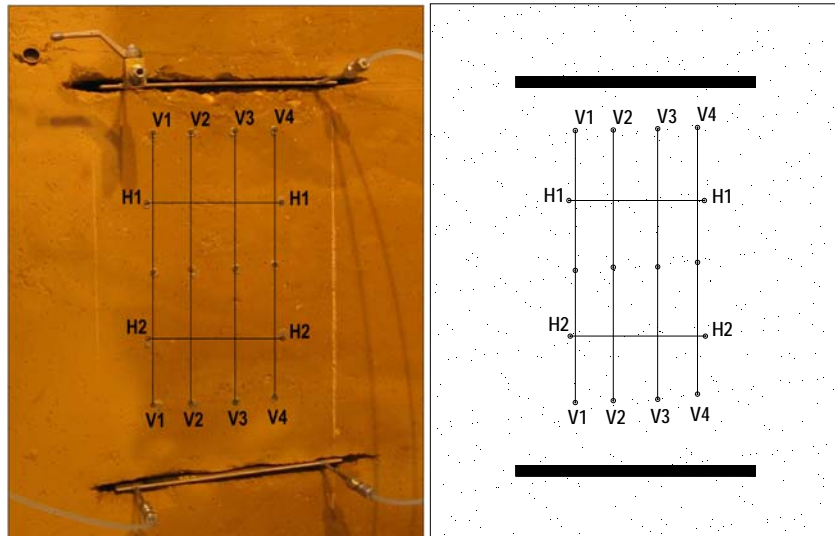


Fig. 4.5.136 y 4.5.137: Croquis del área de ensayo realizado.

4.5.7 Ensayos de Hole Drilling (HDTap1).

Se realizaron tres ensayos Hole Drilling, si bien solo el denominado HDTap1 pudo finalizarse por razones que más adelante se referirán. Dichos ensayos tenían la finalidad de estimar el nivel de tensión vertical en diferentes puntos del tapial construido.

En la Fig. 4.5.138 puede comprobarse la ubicación del ensayo HDTap1 dentro del conjunto del muro.

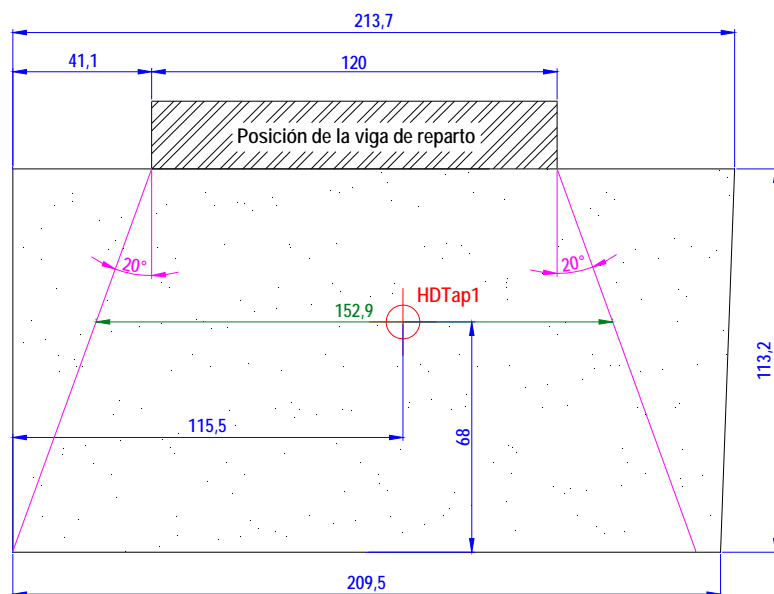


Fig. 4.5.138: Alzado del tapial con la localización del HDTap1. El espesor del muro son 38 cm. Las cotas referidas son en cm.

Para la ejecución de los ensayos se empleó un transductor de presión de 1000 Ba (4 voltios) y dos gatos hidráulicos de 126.70 cm² de área cada uno. Debido a lo referido una señal de presión registrada de 1 voltio equivale a 63350 kp. Igualmente, también hay que considerar que el peso muerto que representa la viga de reparto empleada en el ensayo es de 488 kp.

Por la razón esgrimida al exponer los trabajos relacionados con la técnica de gatos planos, se procedió, igualmente, a introducir un nivel tensional en la zona de ensayo, mediante la aplicación de una carga de 75 t., en la cabeza del muro, mayor que la actuante durante el ensayo posterior

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

de hole drilling, y a registrar la evolución en el tiempo de la deformación experimentada por un punto de control fijado al paramento (Fig. 4.5.139, el control se extendió durante siete días), para ser conscientes de cuando se habría desarrollado una parte importante de la deformación diferida en la zona de la tapia a ensayar.

En este sentido la Tabla 4.5.8 compendia la evolución de la deformación registrada por el punto de control, bajo la carga referida. Igualmente, en la Fig. 4.5.140 se ilustra dicha evolución de forma gráfica. Tras siete días de mantenimiento de la carga se verificó que la amplificación de los acortamientos era bastante más reducida que en los primeros instantes de control, por ello, y para no alargar en demasía el plazo de ejecución del ensayo, se decidió proceder a la ejecución del hole drilling.



Tabla 4.5.8: Evolución de la deformación en cada uno de los cuatro puntos de control vertical a lo largo del tiempo, bajo una carga de 75 t., mantenida sensiblemente constante.

Día	Hora	L_i (mm)	ΔL_i (mm)	ϵ_i	ϵ_i (%)
02/12/2009	11:00	1,8688	0,0000	0,00000	0,000
03/12/2009	11:47	1,8064	-0,0624	0,00031	0,031
04/12/2009	9:23	1,7920	-0,0768	0,00038	0,038
09/12/2009	9:16	1,7792	-0,0896	0,00045	0,045

Fig. 4.5.139: Instante captado durante el registro de la deformación experimentada por el punto de control fijado al tapial en el área de ensayo en la que con posterioridad se realizaría el ensayo HDTap1

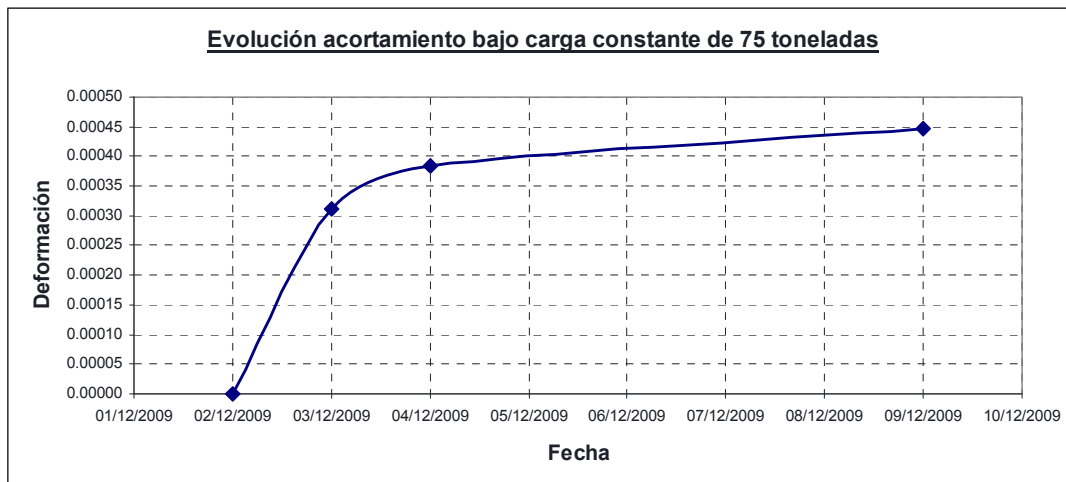


Fig. 4.5.140: Evolución de la deformación en el punto de control fijado al tapial a lo largo del tiempo, bajo una carga de 75 ton, mantenida sensiblemente constante. La deformación registrada tras 4 días de control fue del 0.045%.

En relación con las características mecánicas a tener en cuenta en el ensayo hole drilling, no se hizo uso de las obtenidas en el ensayo de las probetas de tapial, por dos motivos fundamentales:

- En primer lugar dado que debido al cierto confinamiento lateral existente en la zona del ensayo del hole drilling (el ensayo se realizó en la parte central del tapial, ver Fig. 4.5.138), la rigidez existente en el muro será mayor que la registrada en las probetas ensayadas, en las que la inexistencia de dicho confinamiento conduce a la consecuente minoración del módulo de elasticidad obtenido, en relación al del muro real.
- En segundo lugar, las características mecánicas de las probetas de tierra y del tapial construido para nada tienen porque ser similares, debido a que en su se empleó diferente energía de compactación, la cuál además es de difícil cuantificación pues depende de la

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

energía introducida en el impacto por el operario, pues lejos de dejar caer el pisón, lo acompaña en su tránsito empujándolo contra la tierra susceptible de compactación. Como información, cabe referir que los pisones empleados para compactar el muro tienen un peso de 12 a 15 kp, contando con una superficie horizontal de 20x10 cm². Por su parte el pisón empleado para la ejecución de las probetas (pisón del ensayo próctor) tiene un peso de 4.54 kp y un diámetro de 50 mm (área de 19.64 cm²). Si bien en ambos casos las alturas de caída, necesarias para poder estimar la energía que se confiere a cada impacto, es variable en cada golpe (dado lo tradicional del proceso), al igual que es variable y diferente, como ya se ha referido, la energía introducida por el operario en cada impacto.

Por todo ello, en base a la ley σ - ϵ registrada por el transductor n° 3 para el primer ciclo de carga ejecutado en el ensayo realizado para obtener el ángulo de apertura de carga (Fig. 4.5.141), se trató de estimar el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson existentes en el tapial.

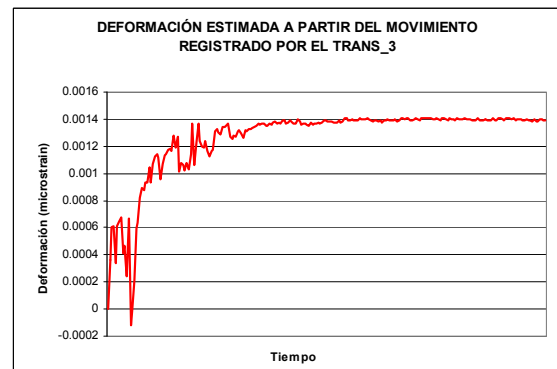
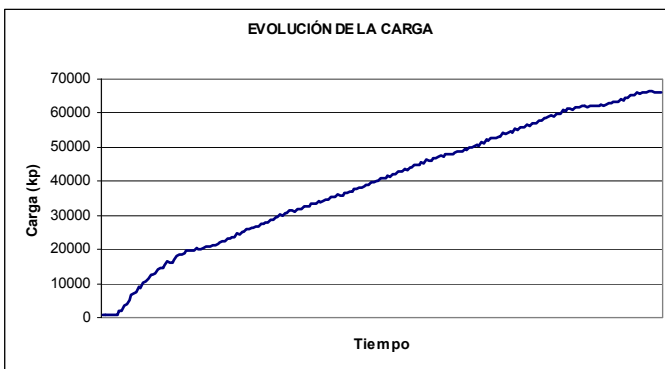
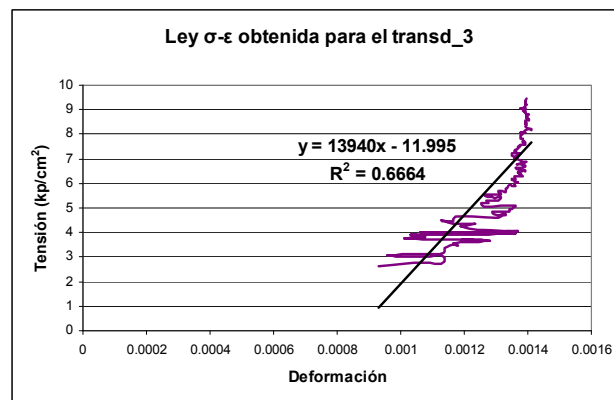


Fig. 4.5.141: Evolución temporal de la tensión media en el transductor n° 3 (1^{er} ciclo de carga).

Fig. 4.5.142: Evolución temporal de la deformación vertical registrada en el transductor n° 3.

Fig. 4.5.143: Ley σ - ϵ obtenida para el primer ciclo de carga, registrado por el transductor n° 3, realizado en relación con la determinación del ángulo de apertura de cargas.



Puede apreciarse a que la relación gráfica obtenida no fue todo lo buena que se hubiera deseado, la causa de ello podría relacionarse con la dificultad encontrada a la hora de fijar los transductores en el sustrato terroso (Fig. 4.5.142).

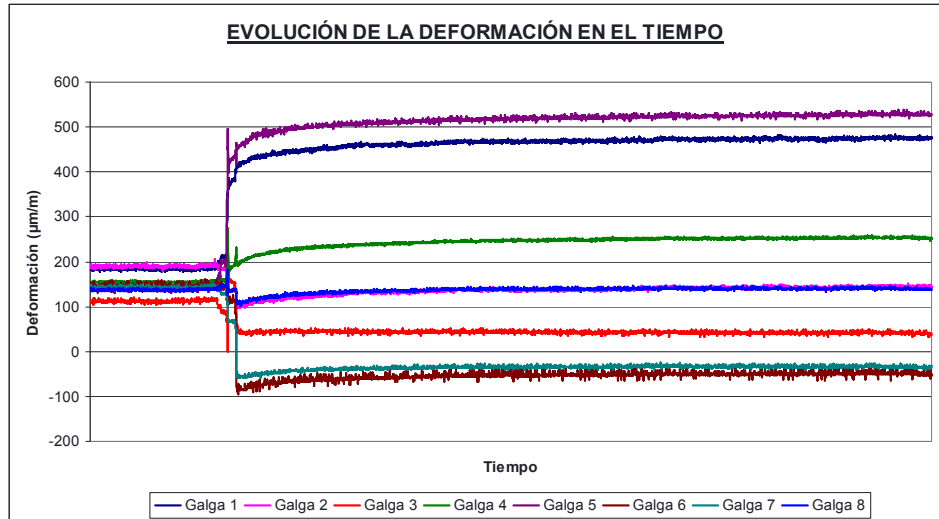
El módulo de elasticidad estimado fue de 1,394.0 MPa (Fig. 4.5.143), y el coeficiente de Poisson considerado de 0.33 (magnitud habitual en suelos, Waisnor et al. 2001).

Durante el ensayo Hole drilling, la carga en cabeza del muro se mantuvo constante en un umbral próximo a las 67 toneladas.

En la Fig. 4.5.144 se presentan los registros de la evolución de la deformación de cada galga a lo largo del ensayo. En este caso la carga no se introdujo desde cero, debido a que como para favorecer el desarrollo de los movimientos diferidos ya se había introducido una carga en cabeza del tapial de 75 t, lo que se hizo previamente a ejecutar el ensayo hole drilling fue disminuir ésta hasta 67 t y, con posterioridad, comenzar a registrar las deformaciones.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Fig. 4.5.144: Evolución registrada en la deformación de cada galga a lo largo del ensayo HDTap1.



Bajo la carga referida mantenida constante, tomando como origen relativo los valores de la deformación, previamente al taladrado (Fig. 4.5.145 y 4.5.146), una vez estabilizados (Tabla 4.5.9), la gráfica de evolución de la deformación con el tiempo toma el aspecto referido en la Fig. 4.5.147.

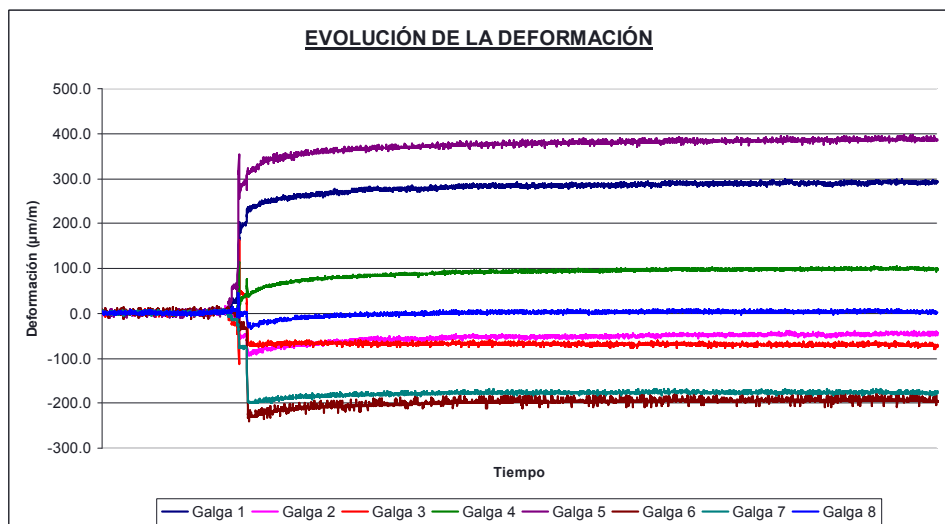
Tabla 4.5.9: Deformación una vez estabilizada la carga previamente al taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	183.6	189.6	111.7	154.0	141.0	144.4	142.2	136.4

Fig. 4.5.145 y 4.5.146: Instante durante la perforación realizada en el ensayo HDTap1. La profundidad del taladro fue de 36.69 cm.



Fig. 4.5.147: Traslación de los registros con el objetivo de tomar como origen relativo para el procesado del ensayo, el instante en que los valores presentados por las galgas se estabilizan.



Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

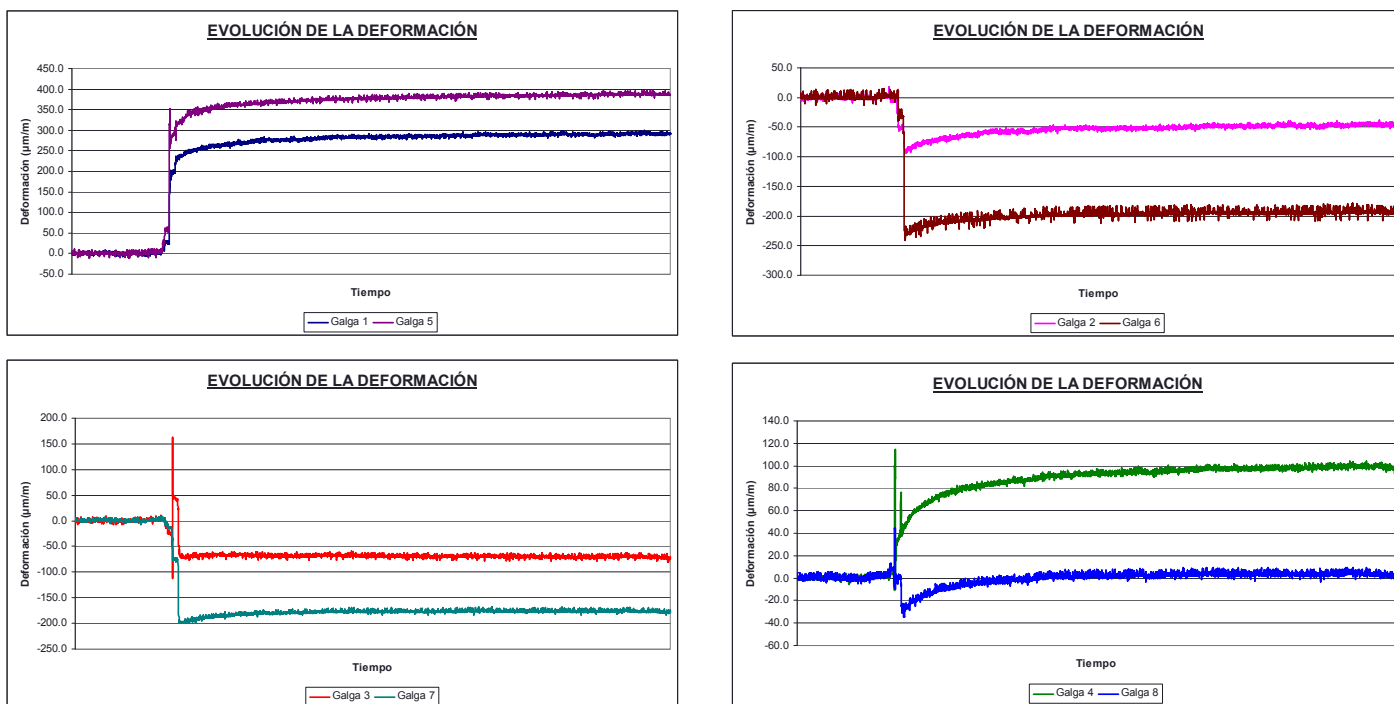


Fig. 4.5.150-4.5.151: Evolución de la deformación en el tiempo de las galgas, dos a dos (se representan conjuntamente las diametralmente opuestas).

Las ocho galgas presentan fluctuaciones medias inferiores a $\pm 5 \mu\text{m/m}$ durante los 30 últimos minutos del ensayo. En vista de lo referido, se considera como incremento deformacional de las galgas, tras el taladrado, los valores de la siguiente Tabla 4.5.10:

Tabla 4.5.10: Incremento deformacional registrado por las galgas extensométricas, manteniendo constante la carga en coronación del muro, después del taladrado

	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4	Galga 5	Galga 6	Galga 7	Galga 8
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	290.2	-47.0	-70.3	98.6	385.5	-193.9	-176.2	3.6

En base a las deformaciones referidas y procediendo con la teoría de la elasticidad, para cada una de las ocho combinaciones de galgas extensométricas existentes, pueden obtenerse (Tabla 4.5.11) las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente, medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las bandas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Tabla 4.5.11: Obtención, para cada una de las combinaciones de galgas, de las tensiones principales máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , el ángulo existente (β), medido en sentido horario, entre la tensión principal máxima con la dirección de la primera de las galgas de la combinación, y la tensión vertical existente.

Combinación	Canales	σ_{max} (N/mm²)	σ_{min} (N/mm²)	β (°)	σ_{vert} (N/mm²)
1	1, 3, 6	0,44	-1,6	60	-1,09
2**	2, 4, 7	0,48	-0,76	35	-0,72
3**	3, 5, 8	-0,04	-1,62	17	-1,48
4**	4, 6, 1	1,31	-0,81	-57	-0,72
5**	5, 7, 2	0,37	-1,47	76	-1,36
6*	6, 8, 3	0,79	0,21	-7	0,57
7	7, 1, 4	0,38	-0,98	-5	-0,97
8	8, 2, 5	1,29	-1,06	-47	-1,06
$\sigma_{\text{vert, Promedio}}$ (N/mm²)					-1,04
$\sigma_{\text{vert, Desvest}}$ (N/mm²)					0,06
Coef. de variación					6,00%

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

* La combinación 6 no se ha tenido en cuenta dado que conlleva a un nivel tensional de tracción de 0.57 MPa, siendo el mismo totalmente discordante con las otras 7 combinaciones. Con el resto se obtiene un nivel tensional promedio de 1.06 MPa (compresión), con un coeficiente de variación del 27.49%.

** Las combinaciones 2, 3, 4 y 5 no se ha tenido en cuenta desde un punto de vista estadístico con la finalidad de obtener un coeficiente de variación menor del 10%.

Teniendo en cuenta las combinaciones 1, 7 y 8 se obtiene una tensión vertical promedio de **1.04 N/mm²** (compresión), con un coeficiente de variación del 6.00%.

Se remite al lector al registro de ensayo Lab0926 adjunto en el Anexo 15, para una consulta más detallada del ensayo realizado.

Finalmente, como ya se ha referido con anterioridad, fueron realizados otros dos ensayos hole drilling, con fechas 27-11-09 (HDTap2) y 18-01-10 (HDTap3). En este sentido la Fig. 4.5.152 - 4.5.155 se muestran diferentes instantes tomados durante la realización del ensayo HDTap2, mientras que las Fig. 4.5.156 - 4.5.157 son ilustrativas del HDTap3.

En ambos casos la presencia de áridos de tamaño apreciable imposibilitó la obtención de resultados coherentes, dado que durante los procesos de perforación correspondientes se intersecaron dichos áridos con el consecuente desconchamiento de las áreas de ensayo, no pudiendo relacionar las deformaciones registradas por las bandas extensométricas con fenómenos puramente mecánicos.

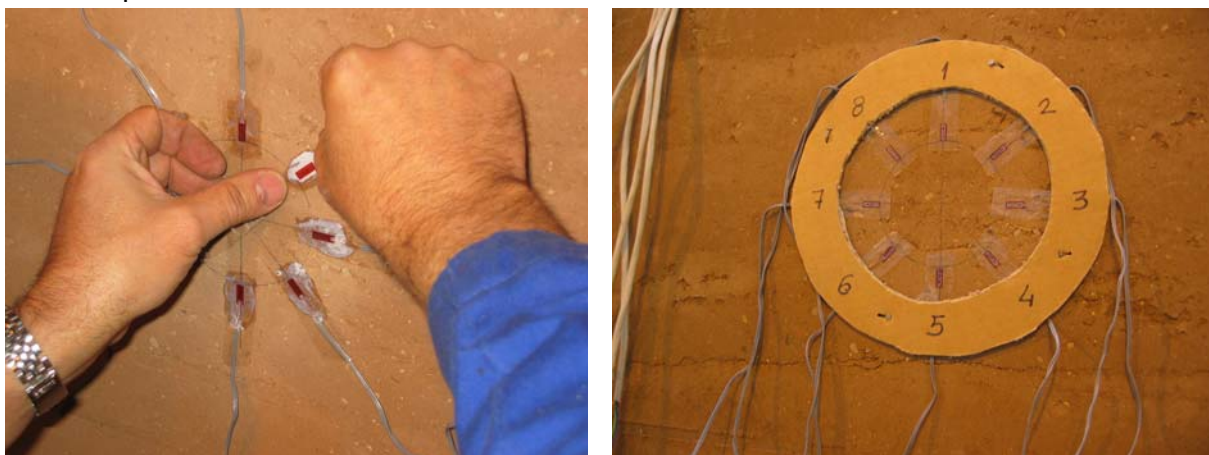


Fig. 4.5.152: Instante captado durante el fijado de las galgas extensométricas en el tapial, en relación con el ensayo HDTap2.

Fig. 4.5.153: Detalle de la zona de ensayo del HDTap2 previamente al taladrado.



Fig. 4.5.154: Detalle de la localización, dentro del tapial, del ensayo HDTap2.

Fig. 4.5.155: Instante tomado durante la perforación del HDTap2, puede apreciarse el desconchón experimentado en el tapial durante el taladrado, en la parte superior de la perforación, a consecuencia de la desagregación de los áridos componentes del muro.



Fig. 4.5.156: Detalle de la localización, dentro del tapial, del ensayo HDTap3.

Fig. 4.5.157: Detalle de la perforación parcial realizada en el ensayo HDTap3. La existencia de áridos imposibilitó el desarrollo del ensayo, dado que provocaron la desagregación del área de ensayo.

4.5.8 Ensayos mini-presurométricos desarrollados en el tapial.

La campaña experimental mediante mini-presurómetro en el tapial estuvo constituida por dos ensayos, los cuáles se ilustran en la Fig. 4.5.158.

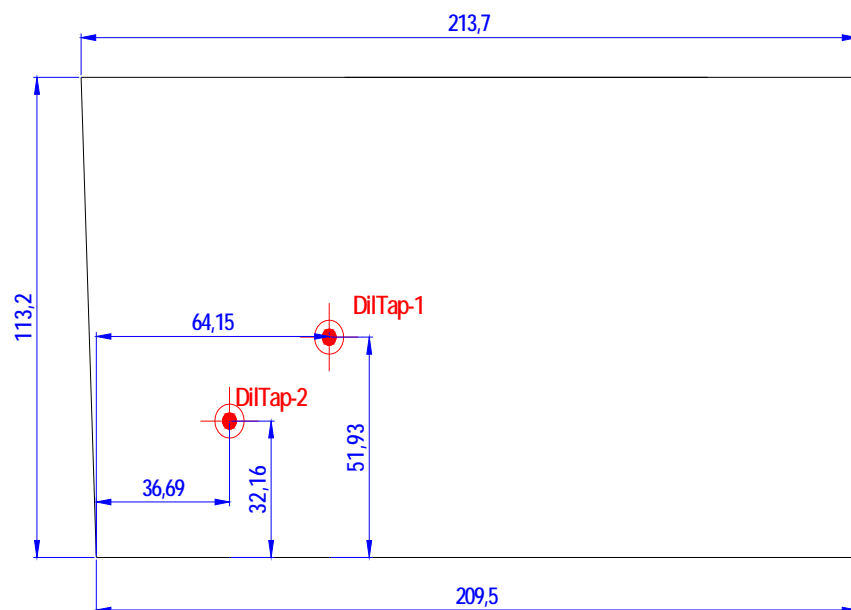


Fig. 4.5.158: Ubicación de los dos ensayos mini-presurométricos realizados en el tapial.

4.5.8.1 Ensayo mini-presurométrico DiITap1.

Una vez ejecutada la perforación y montado el dispositivo de ensayo, se paso a introducir la sonda y a realizar el ensayo, presurizando de forma creciente la sonda y registrando el volumen inyectado en la misma (Fig. 4.5.159).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido



Fig. 4.5.159: Instante captado durante la ejecución del ensayo mini-presurómetro DILTap1.

Tabla 4.5.12: Incrementos volumétricos obtenidos en el ensayo mini-presurómetro DILTap1 realizado en el tapial.

Presión (Ba)	Incrementos de volumen (cm ³)		
	15"	30"	60"
0	0	0	0
1	55	62.5	70
2	95	96	96
3	107.5	108	108
4	124	124	124
5	132	132	132.5
6	138	138	139
7	142.5	142.5	143
8	150	150	150
9	153	153	153
10	156	156	156
11	157.5	157.5	157.5
12	160	160	160
13	162	162	162
14	164	164	164
15	165	165	165
16	166	166	166
17	168	168	168
18	169	169	169
19	170	170	171
20	172	172	172
21	173	173	173
22	175	175	175
23	177.5	178	179
24	181	182.5	185
25	186	187.5	190

En la Tabla 4.5.12 se relacionan los incrementos volumétricos obtenidos durante el ensayo para cada nivel de presión introducido. Igualmente, en las Fig. 4.5.160 y 4.5.161 se representa la curva de expansión obtenida tras 15", 30" y 60" de introducir el nivel de presión correspondiente.

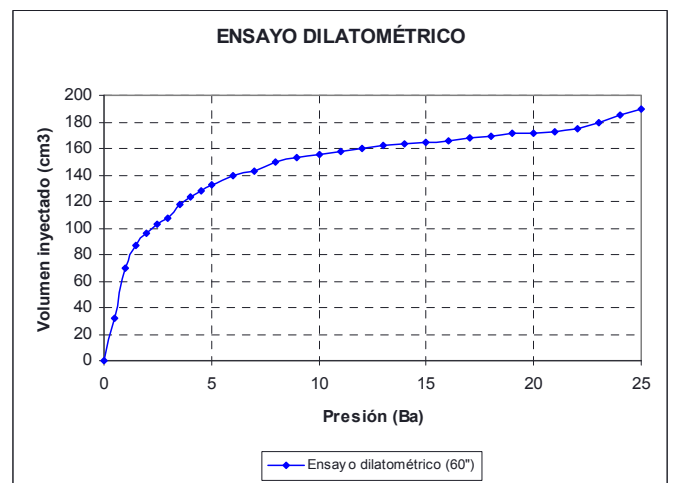
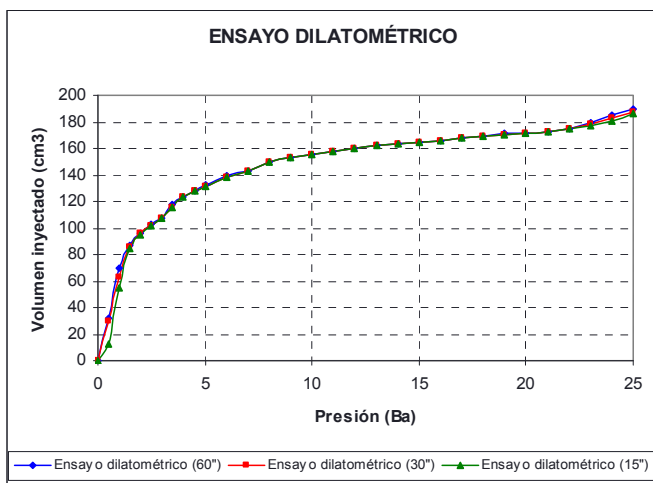


Fig. 4.5.160 y 4.5.161: Curvas de expansión de la sonda mini-presurométrica empleada en el ensayo a diferentes tiempos.

El módulo presurométrica puede obtenerse según la expresión siguiente:

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

$$E_{PMT} = 2 \cdot (1 + \mu) \cdot V \cdot \frac{\Delta p}{\Delta V} = 2 \cdot (1 + \mu) \cdot \left(V_C + \frac{V_f + V_0}{2} \right) \cdot \left(\frac{p_f}{V_f} - \frac{p_0}{V_0} \right) \quad (4.5.1)$$

En base a la estimación que se realizó en el capítulo 3.4 del parámetro V_C , volumen inicial de la célula de medición, como la ordenada en el origen de la recta que da el mejor ajuste con la segunda parte de la curva de expansión referida cuando se realiza un ensayo de calibración de la sonda en un tubo de acero, se obtuvo $V_C = 124\text{cm}^3$.

Por su parte:

- Comienzo de la fase pseudo-elástica: $V_0 = 156\text{cm}^3$; $p_0 = 10\text{bar}$
- Final de la fase pseudo-elástica: $V_f = 173\text{cm}^3$; $p_f = 21\text{bar}$

Suponiendo un **coeficiente de Poisson de 0.33**, puede obtenerse un **módulo presurométrico de 497 Ba**.

De la misma forma, en base a los datos disponibles de la fase plástica (Tabla 4.5.13) puede estimarse la tensión última del material, p_L , en base al incremento volumétrico al final del ensayo, V_L , mediante extrapolación, dado que la relación gráfica entre la presión y el logaritmo del volumen inyectado es aproximadamente lineal para la fase plástica (Fig. 4.5.162).

Tabla 4.5.13: Coordenadas (p,V) de los puntos del ensayo DILTap1, en fase plástica.

Fase plástica		
V (cm ³)	P (Ba)	log V
175	22	2.2430
179	23	2.2528
185	24	2.2672
190	25	2.2787

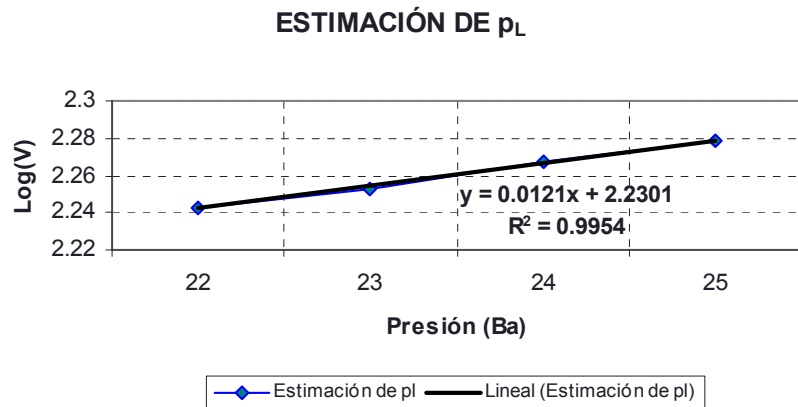


Fig. 4.5.162: Estimación de la presión última, p_L , en base a extrapolación.

El volumen final puede obtenerse en base a la expresión $V_L = 2 \cdot V_0 + V_C$, en este sentido dicho volumen alcanza un valor de 436cm^3 .

Por lo tanto, en base a la regresión lineal obtenida para la fase plástica y teniendo en cuenta el valor estimado del volumen final, se obtendría una **presión última del orden de los 34 Ba**, valor que es bastante próximo al estimado en el ensayo de gato plano doble GPTap-Doble (aparatado 4.5.6.3) para una deformación en rotura del 2%.

4.5.8.2 Ensayo mini-presurométrico DILTap2.

Una vez ejecutada la perforación y montado el dispositivo de ensayo, se paso a introducir la sonda y a realizar el ensayo, presurizando de forma creciente la sonda y registrando el volumen inyectado en la misma (Fig. 4.5.163).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido



Fig. 4.5.163: Instante captado durante la ejecución del ensayo mini-presurómetro DILTap2.

Tabla 4.5.14: Incrementos volumétricos obtenidos en el ensayo mini-presurómetro DILTap2 realizado en el tapial.

Presión (Ba)	Incrementos de volumen (cm ³)		
	15"	30"	60"
0	0	0	0
1	55	65	70
2	106	107.5	107.5
3	115	116	116
4	122	122	122
5	125	125	126
6	129	129	129
7	132	132	132
8	134	134	135
9	137	137	137
10	139	139	139
11	141	141	141
12	142.5	142.5	142.5
13	144	144	144
14	145	145	145
15	146	146	146
16	147	147	147
17	148	148	149
18	151	152	152.5
19	155	155	156

En la Tabla 4.5.14 se relacionan los incrementos volumétricos obtenidos durante el ensayo para cada nivel de presión introducido. Igualmente, en las Fig. 4.5.164 y 4.5.165 se representa la curva de expansión obtenida tras 15", 30" y 60" de introducir el nivel de presión correspondiente.

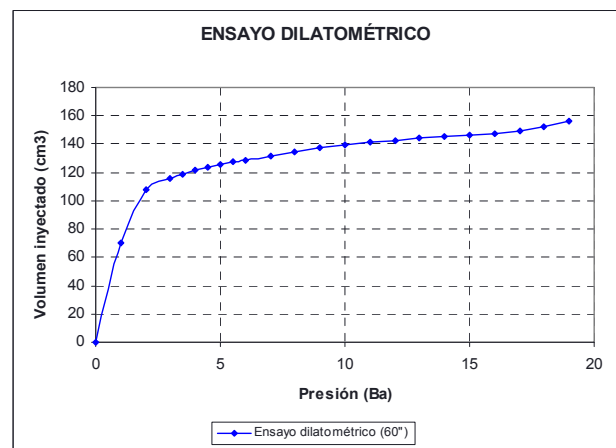
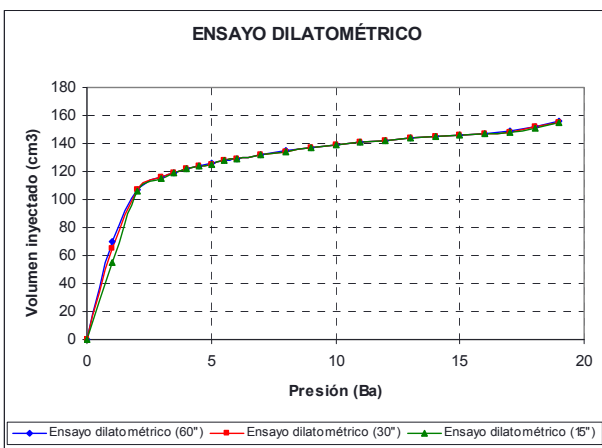


Fig. 4.5.164 y 4.5.165: Curvas de expansión de la sonda mini-presiométrica empleada en el ensayo a diferentes tiempos.

En base a la ecuación 4.5.1, puede obtenerse el módulo presurométrico, partiendo del inicio y final de la fase pseudo-elástica:

- Comienzo de la fase pseudo-elástica: $V_0 = 132\text{cm}^3$; $p_0 = 7\text{bar}$
- Final de la fase pseudo-elástica: $V_f = 147\text{cm}^3$; $p_f = 16\text{bar}$

Suponiendo un **coeficiente de Poisson de 0.33**, puede obtenerse un **módulo presurométrico de 421 Ba**.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Por su parte, en base a los datos disponibles de la fase plástica (Tabla 4.5.15) puede estimarse la tensión última del material, p_L , en base al incremento volumétrico al final del ensayo, V_L , mediante extrapolación, dado que la relación gráfica entre la presión y el logaritmo del volumen inyectado es aproximadamente lineal para la fase plástica (Fig. 4.5.166).

Tabla 4.5.15 Coordenadas (p,V) de los puntos del ensayo DILTap2, en fase plástica.

Fase plástica		
V (cm ³)	P (Ba)	log V
147	16	2.1673
149	17	2.1732
152.5	18	2.1833
156	19	2.1931

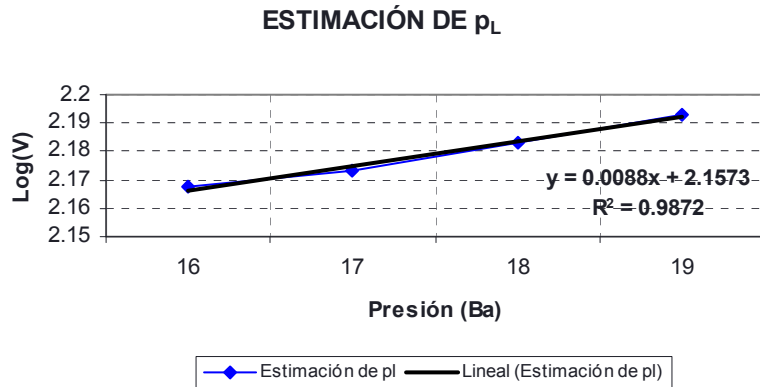


Fig. 4.5.166: Estimación de la presión última, p_L , en base a extrapolación.

El volumen final puede obtenerse en base a la expresión $V_L = 2 \cdot V_0 + V_C$, por tanto dicho volumen alcanza un valor de 388 cm³.

Por lo tanto, en base a la regresión lineal obtenida para la fase plástica y teniendo en cuenta el valor estimado del volumen final, se obtendría una **presión última del orden de los 49 Ba**.

4.5.9 Demolición controlada

Con la finalidad de obtener la mayor cantidad de datos posibles sobre la geometría de las rozas ejecutadas en los ensayos de gato plano GPTap-Simple1, GPTap-Simple2 y GPTap-Doble, y de las perforaciones realizadas a colación de los ensayos mini-presurométricos ejecutados, se realizó una demolición controlada del tapial, tomando datos y fotografías a lo largo del proceso.

4.5.9.1 GPTap-Simple1

En la Fig. 4.5.167 se ilustra el plano de situación del gato plano GPTap-Simple1 dentro del tapial. También puede apreciarse la existencia de dos láminas de papel, entre las que se dispuso una lámina de papel carbonoso, introducidas junto con el gato plano, en su cara superior, con la finalidad de estimar el área efectiva de contacto entre el gato plano y el muro.

Por su parte, en la Fig. 4.5.168 se presenta la posición relativa del gato plano respecto de la roza.



Fig. 4.5.167: Detalle de la posición del gato plano GPTap-Simple1 en fase de demolición del tapial.

Fig. 4.5.168: Instante tomado durante la remoción del gato plano.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Partiendo de la Fig. 4.5.169 en la que se ilustra la imagen obtenida tras escanear el papel marcado por el calco, en los puntos en lo que existía presión efectiva, pudo obtenerse el área de contacto entre el gato plano y el muro.



Fig. 4.5.169: Aspecto del área de contacto tras escanear el marcado realizado manualmente.

De la misma forma, a partir de la Fig. 4.5.170 pudo estimarse, con relativa precisión, el área de la roza. En dicha Fig. 4.5.170 y en la Fig. 4.5.171 se ha representado la relación gráfica existente entre el área de la roza ejecutada, el área del gato plano GPTap-Simple1 y el contacto de éste con el muro. Dichos valores de superficie han sido resumidos en la Tabla 4.5.16.

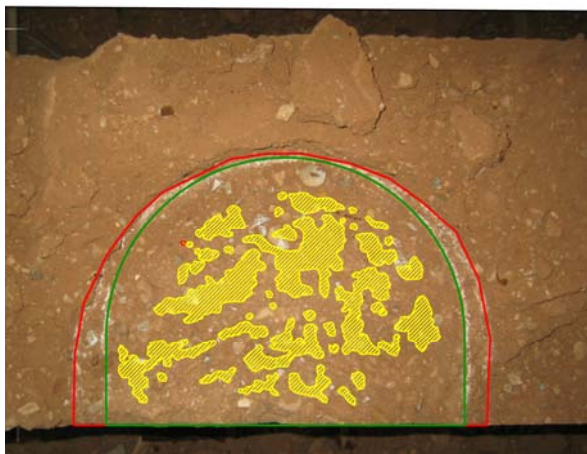


Fig. 4.5.170 y 4.5.171: Replanteo del área de la roza (896.58 cm²), el área del gato plano GPS-A Inferior (778.56 cm²) y el área de contacto entre el gato plano del ensayo y el muro (186.81 cm²).

Tabla 4.5.16: Factores geométricos, k_a , obtenidos para el gato plano GPS-A Inferior.

Factores geométricos, k_a , GPTap-Simple 1			
Áreas (cm ²)		Constantes derivadas	
A_{roza}	896.58	$K_{gato-roza}$	0.868
A_{gato}	778.56	$K_{contacto-gato}$	0.240
$A_{contacto}$	186.81	$K_{contacto-roza}$	0.208

4.5.9.2 GPTap-Simple2

En la Fig. 4.5.172 se ilustra la posición relativa del gato plano respecto de la roza realizada. En este caso dado lo ajustado de la roza ejecutada respecto del espesor gato plano fue imposible introducir el papel carbonoso, ubicado entre dos láminas de papel, para obtener el área efectiva existente entre el muro y el gato plano.

La Fig. 4.5.173 representa un instante tomado durante el marcado del contorno del gato en el plano de apoyo dentro del tapial.



Fig. 4.5.172: Planta en la que puede comprobarse la posición relativa del gato plano respecto de la roza.

Fig. 4.5.173: Instante captado durante el marcado del contorno del gato GPTap-Simple 2.

Por su parte, en la Fig. 4.5.174 se presenta nuevamente la posición relativa del contorno marcado del gato plano GPTap-Simple 2, respecto de la roza, mientras que en la Fig. 4.5.175 se ilustra una planta del área de ensayo, en la que se han indicado el área de la roza y del dispositivo hidráulico, una vez removido el gato plano.

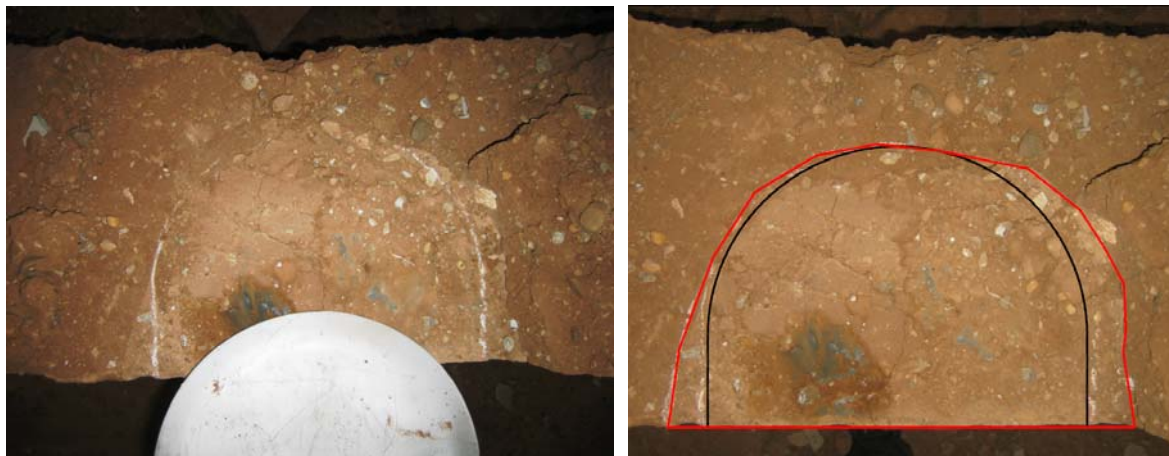


Fig. 4.5.174 y 4.5.175: Relación gráfica entre el área de la roza (918.01 cm^2) y área del gato plano GPTap-Simple2 (778.56 cm^2).

En base al área obtenida para la roza ejecutada, y conociendo la geometría del gato plano empleado en el ensayo (Semioval $350 \times 260 \times 3.5 \text{ mm}$), es posible obtener la relación geométrica k_a ($K_{\text{gato-roza}}$), que alcanza un valor de 0.848.

4.5.9.3 GPTap-Doble

4.5.9.4 GPTap-Doble-Superior

En la Fig. 4.5.176 se ilustra un detalle de la roza correspondiente al gato plano superior del ensayo GPTap-Doble, puede apreciarse la dispersión de los áridos en el área de ensayo, cuyo tamaño, en ocasiones, es significativo. En este caso dado lo ajustado de la roza ejecutada respecto del espesor gato plano fue imposible introducir el papel carbonoso, ubicado entre dos láminas de papel, para obtener el área efectiva existente entre el muro y el gato plano.

Por su parte, en la Fig. 4.5.177 se presenta la posición relativa del gato plano, respecto de la roza. En base al área obtenida para la roza ejecutada, y conociendo la geometría del gato plano empleado en el ensayo (Semioval $350 \times 260 \times 3.5 \text{ mm}$), es posible obtener la relación geométrica k_a ($K_{\text{gato-roza}}$), que alcanza un valor de 0.891.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Fig. 4.5.176: Detalle de la roza correspondiente al gato plano GPTap-Doble-Superior.

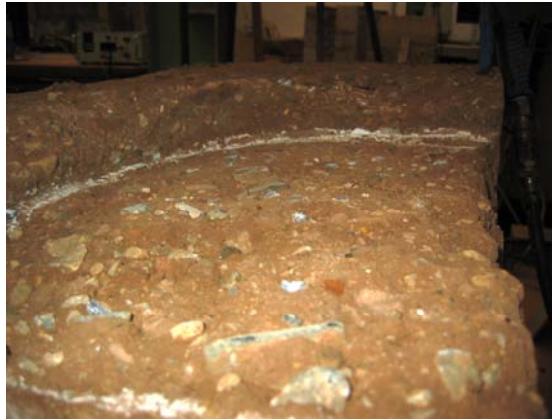


Fig. 4.5.177: Relación gráfica entre el área de la roza (874.06 cm²) y área del gato plano superior del ensayo GPTap-Doble (778.56 cm²).



4.5.9.5 GPTap-Doble-Inferior

En las Fig. 4.5.178 y 4.5.179 se ilustra el plano de situación del gato plano GPTap-Doble-Inferior dentro del tapial. Al igual que ocurrió con los dos gatos planos expuestos con anterioridad no fue posible introducir el papel carbonoso, ubicado entre dos láminas de papel, para obtener el área efectiva existente entre el muro y el gato plano.

Fig. 4.5.178 y 4.5.179: Detalles de la posición del gato plano GPTap-Doble-Inferior en fase de demolición del tapial.



Por su parte, en la Fig. 4.5.180 se presenta una planta en la que puede apreciarse la posición relativa del gato plano respecto de la roza, mientras que en la Fig. 4.5.181 se ilustra una planta del área de ensayo, en la que se han indicado el área de la roza y del gato plano, una vez removido este último. En base a los valores obtenidos se obtuvo una relación geométrica k_a ($K_{\text{gato-roza}}$) de 0.876.

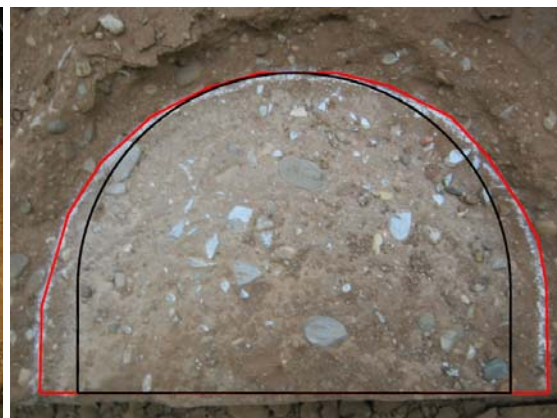


Fig. 4.5.180: Planta en la que puede comprobarse la posición relativa del gato plano GPTap-Doble-Inferior respecto de la roza.

Fig. 4.5.181: Relación gráfica entre el área de la roza (888.87 cm²) y área del gato plano inferior del ensayo GPTap-Doble (778.56 cm²).

4.5.9.6 DILTap1 y DILTap2

En la Fig. 4.5.182 se ilustra un detalle de la localización del mini-presurómetro DILTap1. Por su parte en la Fig. 4.5.183 se presenta, para el mini-presurómetro DILTap2, la huella dejada por la perforación, realizada mediante corona hueca, tanto en la parte inferior del tapial como en la inmediatamente superior.



Fig. 4.5.182: Detalle de la huella dejada por la perforación del mini-presurómetro DILTap1.

Fig. 4.5.183: Detalle de la perforación realizada en relación con el mini-presurómetro DILTap2.

4.5.10 Contraste de los resultados obtenidos en el tapial.

4.5.10.1 Bondad de los niveles tensionales obtenidos mediante la técnica hole drilling.

En la Tabla 4.5.17 se resumen los resultados obtenidos en los ensayos hole drilling realizados en la tapia de tierra compactada.

La relación entre la tensión experimental obtenida mediante los ensayos hole drilling realizados en el tapial y la estimada teóricamente, como valor medio en el plano horizontal de ejecución de los ensayos suponiendo un ángulo de apertura de cargas de 20° (apartado 4.5.4), fue de 0.91, circunstancia que parece apuntar a que la técnica podría ser aplicable a esta tipología de muros, si bien las dificultades encontradas relacionadas con la dispersión de los áridos dentro del volumen del tapial hace que la aplicabilidad práctica de la misma sea complicada. De la misma forma, se requiere realizar trabajos futuros para refrendar la idoneidad de la técnica hole drilling aplicada en tapial, o caso contrario para desaconsejar su empleo, dado que en base a un único resultado es absurdo llegar a emitir conclusiones con rigor suficiente.

Tabla 4.5.17: Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos hole drilling realizados sobre el tapial. Comparación de los niveles tensionales obtenidos experimentalmente con los estimados de forma teórica (Resultados de esta Tesis).

Ensayo	Código	Fecha	E (Mpa)	v	$\sigma_{\text{experimental}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{teórica, media 20°}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{teór, media 20°}}$
HDTap1	Lab0926	10/12/2009	1,394.0	0.33	1.06	1.16	0.91
HDTap2*	-	27/11/2009	-	-	-	-	-
HDTap3*	-	18/01/2010	-	-	-	-	-
$(\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{teór}})_{\text{Promedio}}$							0.91

* En ambos casos la presencia de áridos de tamaño apreciable imposibilitó la obtención de resultados coherentes, dado que durante los procesos de perforación correspondientes se intersectaron dichos áridos con el consecuente desconchamiento de las áreas de ensayo, no pudiendo relacionar las deformaciones registradas por las bandas extensométricas con fenómenos puramente mecánicos.

La tensión vertical media de compresión existente en el punto de ensayo era de 1.16 N/mm² (Fig. 4.5.138):

$$\sigma_{\text{teórica, media } 20^\circ} = \frac{67,581.8kp}{152.938cm^2} = 11.63 \frac{kp}{cm^2} = 1.16 \frac{N}{mm^2} \text{ (compresión)}$$

En tanto que es la primera ocasión que en la comunidad científico-técnica internacional se aplica la técnica de hole drilling a un tapial no se disponen de datos de contraste.

4.5.10.2 Bondad de los niveles tensionales obtenidos mediante gato plano simple.

Debido a que con el ensayo denominado GPTap-Simple 1 lo que se tomó fue conciencia del desarrollo de movimientos diferidos en el tiempo bajo la carga aplicada en coronación del tapial, a través de dicho ensayo no se pudo estimar el nivel tensional experimental de contraste. En consecuencia únicamente fue realizado un ensayo de gato plano simple (GPTap-Simple2) y uno de gato plano doble (GPTap-Doble2).

En relación con el ensayo de gato plano simple, en la Tabla 4.5.18 se refiere el nivel tensional en servicio para la relación geométrica existente entre el área de la roza y el área del gato plano. Por su parte, la tensión vertical media “teórica” en el plano del gato plano, suponiendo un ángulo de apertura de carga de 20°, fue de 1.19 MPa (Fig. 4.5.114).

$$\sigma_{\text{media}} = \frac{63,838.0kp}{141.3938cm^2} = 11.88 \frac{kp}{cm^2} = 1.19MPa \text{ (compresión)}$$

Tabla 4.5.18: Comparación entre el nivel tensional experimental y el estimado teóricamente en el ensayo GPTap-Simple2.

K_m	K_a	$\sigma_{\text{experimental}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{teórica, media } 20^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{teór, media } 20^\circ}$
0.95	0.848	1.45	1.19	1.22

En tanto que es la primera ocasión que en la comunidad científico-técnica internacional se aplica la técnica de gato plano simple a un tapial, en laboratorio, no se disponen de datos de contraste. Si bien puede apreciarse como el error cometido en la estimación del nivel tensional fue del 22%. Aunque la incertidumbre de la tensión estimada mediante gato plano simple pueda llegar a resultar relativamente importante, se considera de gran valor dado que aporta una vía de calibración experimental.

4.5.10.3 Bondad de las características mecánicas obtenidas mediante gato plano doble.

La bondad de los resultados se ha tratado de estimar mediante la comparación del módulo de elasticidad obtenido mediante gato plano doble y el obtenido mediante un ensayo a compresión al uso, empleando para el registro de desplazamientos transductores potenciométricos.

En la Tabla 4.5.19 se presenta la comparación entre el módulo de elasticidad obtenido mediante el ensayo de gato plano doble y el estimado mediante transductores potenciométricos. La tensión introducida a la fábrica, en cada ciclo de presión, ha sido obtenida empleando como coeficiente geométrico el propuesto por la normativa de referencia, que relaciona el área del gato con la de la roza ejecutada ($K_{\text{gato-roza}}$). Igualmente, se recuerda que el módulo de elasticidad obtenido mediante transductores (1,394.00 N/mm²) ha sido obtenido en el apartado 4.5.7.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.5.19: Comparación entre las características mecánicas obtenidas mediante transductores y las obtenidas experimentalmente en un ensayo de gato plano doble ejecutado en un tapial en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

	K_a	K_m	v_{exp}	E_{exp} (N/mm ²)	$E_{teorico}$ (N/mm ²)	$E_{exp}/E_{teorico}$
GPTap-Doble2	0.883	0.855	0.16	3,170.66	1,394.00	2.27

Puede apreciarse que la relación obtenida no se ajusta a lo que cabría esperar. A su vez, en tanto que es la primera ocasión que en la comunidad científico-técnica internacional se aplica la técnica de gato plano doble a un tapial, en laboratorio, no se disponen de datos de contraste.

El valor estimado para la tensión de rotura a compresión del tapial, obtenido ajustando una regresión logarítmica a la parte de comportamiento no lineal de la envolvente obtenida en el ensayo de gato plano doble (Fig. 4.5.135), alcanza un valor de 2.10 MPa para una deformación en rotura del 3‰. Cabe relacionar que la deformación en rotura obtenida en los ensayos de las probetas cilíndricas de tapial (Tabla 4.5.3) alcanzó un valor promedio del 2‰, por ello que para el tapial la deformación supuesta del 3‰ pueda parecer un umbral de deformación en rotura reducido, si bien queda del lado de la seguridad.

Si se supondría una deformación del 2‰, la tensión de rotura estimada mediante el ajuste logarítmico referido alcanzaría un valor de 3.10 MPa, cifra que iguala a la resistencia a compresión promedio obtenida en los ensayos a compresión de las probetas cilíndricas referidas (Tabla 4.5.2).

4.5.10.4 Bondad de los ensayos mini-presurométricos desarrollados en el tapial.

Fueron realizados dos ensayos mini-presurométricos en el seno del tapial, en ambos casos la perforación fue realizada perpendicular al plano del muro, por lo que fue preciso emplear dos tubos rígidos de acero, de diámetro ajustado con respecto al de la sonda, en los extremos de la misma para evitar cualquier posible “sobredeformación” de la sonda que induzca tanto al colapso de ésta, como a una mala interpretación de los resultados.

En la Tabla 4.5.20 se resume, para los dos ensayos mini-presurométricos realizados, la presión de rotura estimada y el módulo presurométrico obtenido.

Tabla 4.5.20: Presión última y módulo presurométrico estimado en los dos ensayos mini-presurométricos realizados en el Tapial

Fecha	Ensayo	p_L (MPa)	E_{PMT} (MPa)
12/02/2010	DILTap1	3.4	49.7
12/02/2010	DILTap2	4.9	42.1
		4.2	45.9

Finalmente en la Tabla 4.5.21 se sintetizan los resultados alcanzados por varias metodologías del módulo de elasticidad y de la resistencia a compresión.

Tabla 4.5.21: Módulos de elasticidad y resistencia a rotura estimada en el tapial por varias metodologías.

Fecha	E (MPa)	σ_{rotura} (MPa)	E/σ_k^2
Rotura a compresión de probetas	359.0 (Tabla 4.5.3)	3.1 (Tabla 4.5.2)	165.44
Transductores potenciométricos	1,394.0 (Fig. 4.5.143)	-	-
Gato plano doble (asociado a deformación en rotura del 3‰)	3,170.66	2.1	2,156.91
Gato plano doble (asociado a deformación en rotura del 2‰)	3,170.66	3.1	1,461.13
Mini-presurometros	45.9	4.2	15.61

² De acuerdo con las recomendaciones del CEN, Eurocode 8, Part 1-4, el valor de σ_k (valor característico) debe ser obtenido multiplicando el valor medio, σ_{rotura} , por un factor de 0.7.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Puede apreciarse como el valor obtenido para la resistencia a compresión, sensiblemente, es del mismo orden en todos los ensayos referidos, pudiendo establecerse en el umbral de los 2 a 3 MPa.

No ocurre lo mismo en lo referente al módulo de deformación. En primer lugar es necesario referir que el denominado módulo presuométrico (E_{PMT}) no parece corresponderse de forma directa con el módulo de elasticidad longitudinal, en tanto que el valor que alcanza es bastante inferior al obtenido mediante gato plano doble o mediante transductores.

En relación al obtenido mediante los ensayos a compresión de las probetas cilíndricas, obviamente, el módulo de elasticidad obtenido es menor que el alcanzado mediante gato plano doble o por los transductores potenciométricos, circunstancia que puede relacionarse con dos causas fundamentales:

- En primer lugar dado que debido al cierto confinamiento lateral existente en el muro, la rigidez medida en el mismo será mayor que la registrada en las probetas ensayadas, en las que la inexistencia de dicho confinamiento conduce a la consecuente minoración del módulo de elasticidad obtenido, en relación al del muro real.
- En segundo lugar, las características mecánicas de las probetas de tierra y del tapial construido para nada tienen porque ser similares, debido a que en su construcción se empleó diferente energía de compactación, la cuál además es de difícil cuantificación pues, debido a lo artesanal del proceso, depende de la energía introducida en el impacto por el operario, pues lejos de dejar caer el pisón, lo acompaña en su tránsito empujándolo contra la tierra susceptible de compactación.

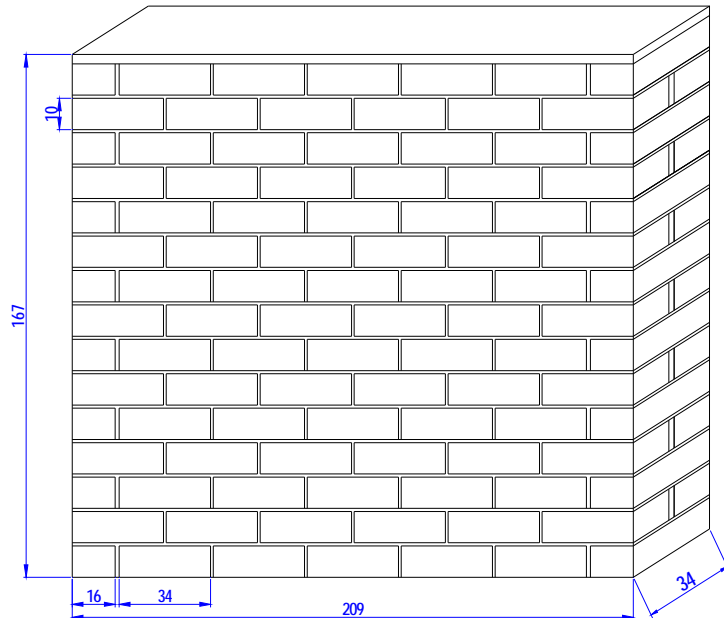
Finalmente, lo que si que sorprende es la diferencia manifestada entre el módulo de elasticidad obtenido mediante gato plano doble y el obtenido mediante transductores potenciométricos (Tabla 4.5.19). En este sentido sería necesario, además de ahondar en la problemática en trabajos experimentales futuros, el realizar una simulación numérica del tapial, considerando respectivamente los parámetros mecánicos obtenidos mediante gato plano doble y mediante transductores, para estudiar en base a que características se ajustan mejor los resultados obtenidos en los ensayos de gato plano simple y hole drilling realizados. Este aspecto será contrastado con posterioridad a la finalización de la tesis doctoral.

4.6 Campaña experimental sobre un muro de adobe.

4.6.1 Construcción del muro

Con fecha 22 de junio de 2009 fue construido en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria un muro de adobe. En la Fig. 4.6.1 se presenta la geometría de dicho elemento portante.

Fig. 4.6.1: Geometría general del muro de adobe ensayado en la presente tesis doctoral. Las cotas referidas son cm. El espesor del muro es de 34 cm.



Para su confección se emplearon adobes de dimensiones 34 x 16 x 10 cm (Largo x ancho x alto), suministrados por la empresa Adobera del Norte C.B., y un mortero, Fig. 4.6.2-4.6.4, confeccionado con la siguiente fórmula de trabajo (igualmente, recomendada por la empresa referida, experta la ejecución de construcciones de adobe ex-novo o rehabilitaciones de elementos antiguos):

- 3 partes en volumen de tierra.
- 2 partes en volumen de arena (grijillo).
- 1 parte en volumen de paja (sin compactar).
- Agua hasta dar la consistencia apropiada (no fluida), que permita crear espesores de junta del orden de 1 cm.



Fig. 4.6.2: Instante en el que se está añadiendo a la mezcla la arena de cantera (grijillo).

Fig. 4.6.3: Detalle tomado una vez añadidos las dos partes en volumen de paja sin compactar.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Una vez confeccionado el mortero de unión se comienza la construcción del elemento portante. En las Fig. 4.6.5 y 4.6.6 se presentan sendos detalles de dicho proceso.



Fig. 4.6.4: Proceso de mezclado de los componentes del mortero constituido a partir de la fórmula de trabajo proporcionada por la empresa Adobera del Norte C.B.

Fig. 4.6.5: Instante tomado durante la construcción del muro de adobe.

Finalmente, la Fig. 4.6.7 ilustra el muro de adobe una vez finalizado.



Fig. 4.6.6: Instante tomado durante el proceso de rejunteo del muro mediante la aplicación de la mezcla de trabajo en las llagas y tendeles.

Fig. 4.6.7: Detalle del muro de abobe una vez finalizado.

4.6.2 Transporte y refrentado del muro de adobe.

Con la finalidad de evitar que el muro de adobe se dañase durante el proceso de transporte bajo el pórtico de carga, se emplearon los dispositivos ya referidos con anterioridad para los otros muros presentados, compuestos a base de dos perfiles UPN, uno inferior con 5 planos de rigidizadores, sobre el que se construye el muro, y otro superior a modo de capucha. Estos elementos, mediante el empleo de un total de ocho barras verticales roscadas, introducen en el elemento portante un leve nivel de compresión que favorece que se puedan desarrollar tracciones durante el proceso de transporte y, por ende, previenen la generación de daño por ese motivo.

Una vez dispuesto el tapial bajo el pórtico de carga (Fig. 4.6.8), se procedió al refrentado del mismo, en el emplazamiento definitivo de los ensayos a realizar, con el objetivo de obtener un plano superior, sobre el que apoyar la viga de reparto de carga, lo más horizontal posible. Para ello, tras realizar el encofrado perimetral de su borde superior se procedió al vertido de una capa de hormigón autonivelante (Fig. 4.6.9) de aproximadamente tres centímetros.



Fig. 4.6.8: Muro de adobe dispuesto bajo el pórtico de carga.

Fig. 4.6.9: Detalle del refrentado del muro de adobe.

4.6.3 Determinación de la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad de los adobes empleados.

Con la finalidad de obtener la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad de los adobes que conforman el muro, se prepararon un total de 6 probetas (Fig. 4.6.10), obtenidas a partir de tres bloques de adobe cortados por mitad. En la Fig. 4.6.11 se ilustra el proceso de refrentado de las probetas, sobre superficie previamente nivelada, mediante el hormigón autonivelante empleado a lo largo de la investigación (casa comercial Weber, marca “Floor for”).

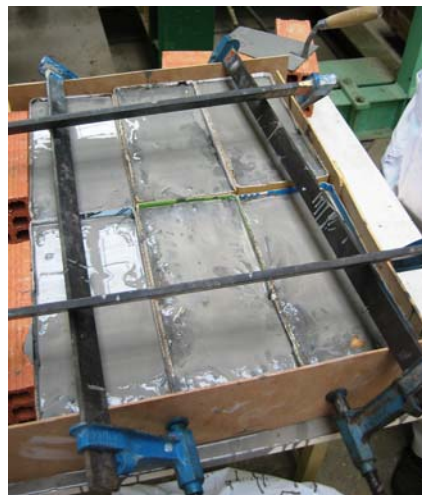


Fig. 4.6.10: Detalle de las seis probetas obtenidas de tres adobes previamente a su ensayo.

Fig. 4.6.11: Proceso de refrentado de las probetas de adobe, sobre superficie previamente nivelada, empleando un hormigón autonivelante.

Los ensayos de compresión, con registro del desplazamiento vertical, fueron realizados con fecha 25-09-2009, empleando una prensa servohidráulica universal de 150 toneladas de carga máxima. En la Fig. 4.6.12 se muestra un instante tomado durante el ensayo de compresión realizado para una de las probetas, puede apreciarse como el desplazamiento vertical fue obtenido mediante el valor promedio de dos transductores potenciométricos fijados a sendos vástagos verticales de la prensa. Como es conocida la magnitud inicial de la altura de la probeta (H_0), previamente a la introducción de la carga, pudieron obtenerse los acortamientos (ΔH) a partir del instante concreto en que ésta comenzó a introducirse y, por ende, la deformación ($\epsilon = \Delta H / H_0$). Por su parte, en la Fig. 4.6.13 se presenta el aspecto de la rotura de otra de las probetas ensayadas.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido



Fig. 4.6.12: Detalle de uno de los ensayos de compresión realizados sobre una de las probetas de adobe.

Fig. 4.6.13: Aspecto de la rotura a compresión de una de las probetas de adobe ensayadas.

En las Fig. 4.6.14 - 4.6.19 se representa, para cada una de las probetas ensayadas, la ley σ - ϵ .

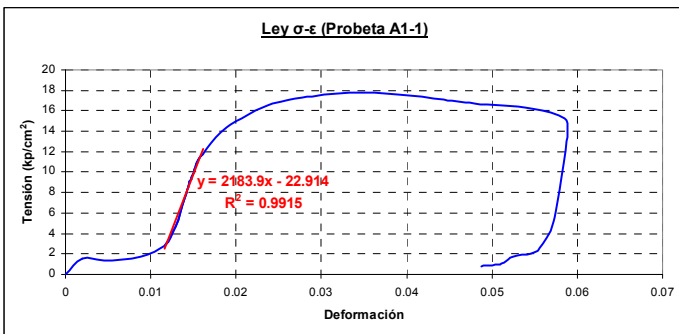


Fig. 4.6.14: Ley σ - ϵ de la probeta A1-1.

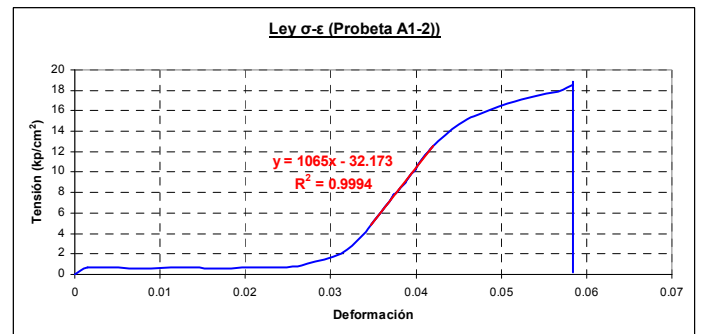


Fig. 4.6.15: Ley σ - ϵ de la probeta A1-2.

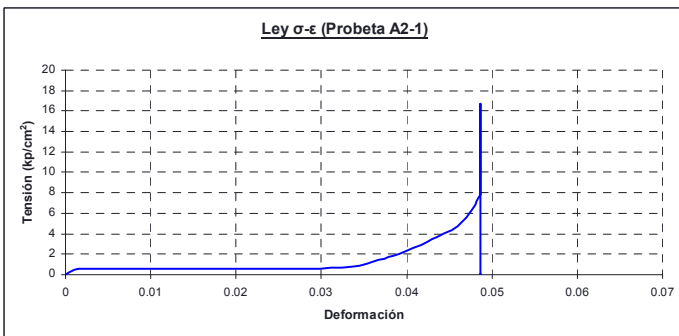


Fig. 4.6.16: Ley σ - ϵ de la probeta A2-1.

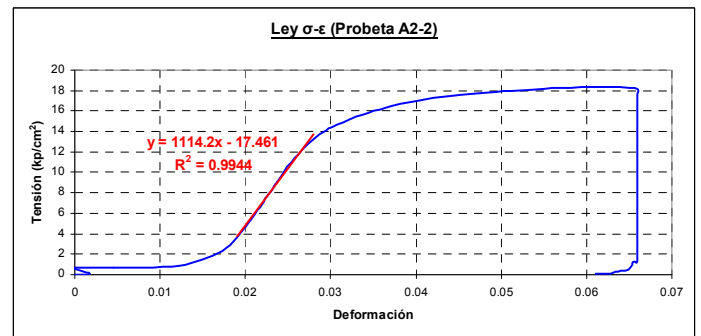


Fig. 4.6.17: Ley σ - ϵ de la probeta A2-2.

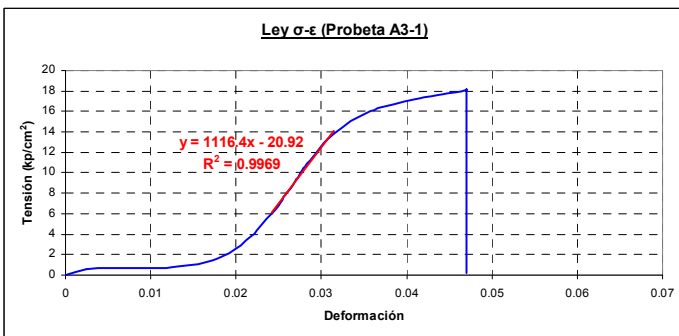


Fig. 4.6.18: Ley σ - ϵ de la probeta A3-1.

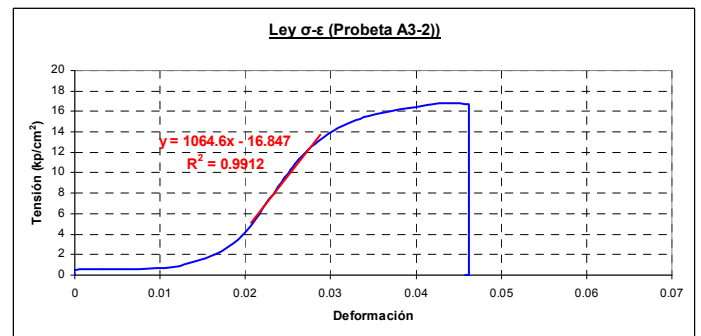


Fig. 4.6.19: Ley σ - ϵ de la probeta A3-2.

Finalmente, los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 4.6.1 siguiente.

Tabla 4.6.1: Resistencia a compresión y módulo de elasticidad de las probetas de tapial.

Probeta	Fecha ensayo	Longitud (mm)	Anchura (mm)	Altura (mm)	Carga max. (kN)	σ_c (MPa)	E (MPa)	ϵ_r (%)
A1-1	25/09/2009	164	150	112	43.8	1.78	218.39	3.90
A1-2	25/09/2009	161	150	110	45.5	1.88	106.50	5.80
A2-1	25/09/2009	162	152	113	41.1	1.67	-	-
A2-1	25/09/2009	160	151	112	44.4	1.84	111.42	6.38
A3-1	25/09/2009	159	151	115	43.6	1.81	111.64	4.70
A3-2	25/09/2009	166	150	112	41.9	1.68	106.46	4.62
Media					43.4	1.78	130.88	5.08
Desv. típica					1.6	0.09	48.98	0.99
Coef. Variación (%)					3.73%	4.84%	37.43%	19.58%

Como puede apreciarse, la resistencia a compresión promedio obtenida fue de 1.78 N/mm², presentando un coeficiente de variación del 4.84%, mientras que el módulo de elasticidad promedio, obtenido en cada ensayo como la pendiente de la recta de ajuste a la rama elástica, fue de 130.88 N/mm², presentando un coeficiente de variación del 37.43%. Finalmente, conviene referir que la deformación promedio en rotura fue del 5%.

4.6.4 Determinación del ángulo de apertura de cargas en el muro de adobe.

Dada la extensión del muro realizado y teniendo en cuenta con que el elemento de reparto de cargas que se disponía era de 1 metro de longitud, fue necesario obtener el ángulo de apertura de cargas en el seno del muro.

En este sentido se dispusieron un total de 3 transductores en la forma que indican las Fig. 4.6.20 y 4.6.21 para registrar los desplazamientos captados por cada una de ellos durante el proceso de carga.

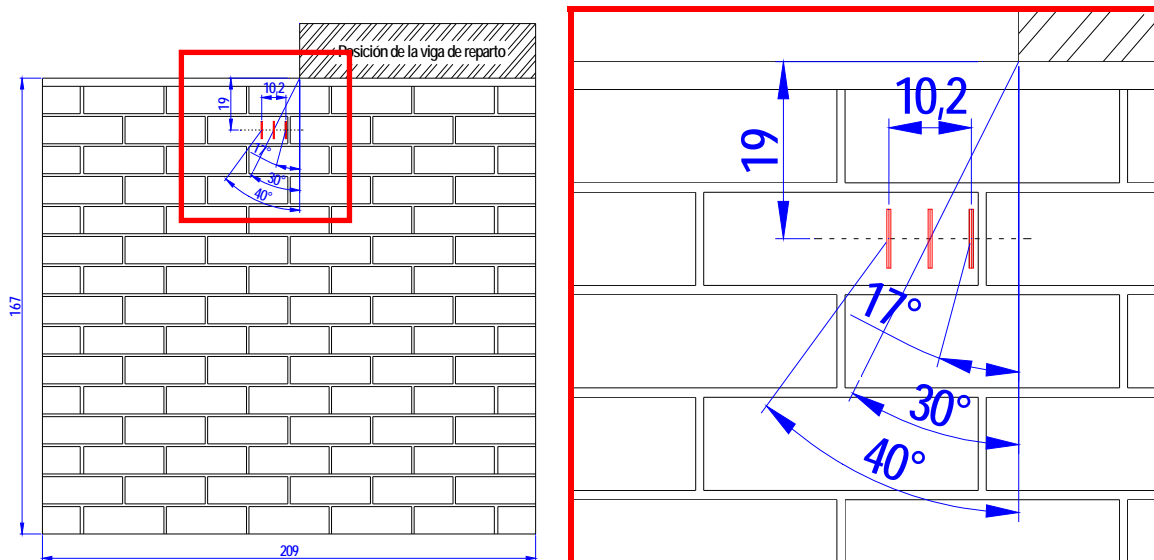


Fig. 4.6.20 y 4.6.21: Detalles de la localización de los transductores en el muro de adobe.

Como puede comprobarse dichos transductores se dispusieron a 19 cm de la coronación del muro, manteniendo una distancia entre ellos de 5.1 cm., de forma que el transductor central definiese con el punto extremo de la viga de reparto de la carga un ángulo de 30° (Fig. 4.6.22 y 4.6.23).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Fig. 4.6.22: Perspectiva general tomada durante el ensayo realizado para estimar el ángulo de apertura de carga.



Fig. 4.6.23: Detalle de la numeración de los transductores dispuestos en el muro de adobe para estimar el ángulo de apertura de carga.



Con fecha 29 de septiembre de 2009, estando la viga de reparto en la posición indicada, se realizaron, en primer lugar, dos ciclos de carga (hasta aproximadamente 14 y 33 toneladas, respectivamente) y descarga, para generar un reacomodo del sistema (muro, viga de reacción y gatos hidráulicos), seguido de un proceso final de carga, monotónico creciente, hasta un total de 33 toneladas (Fig. 4.6.24).

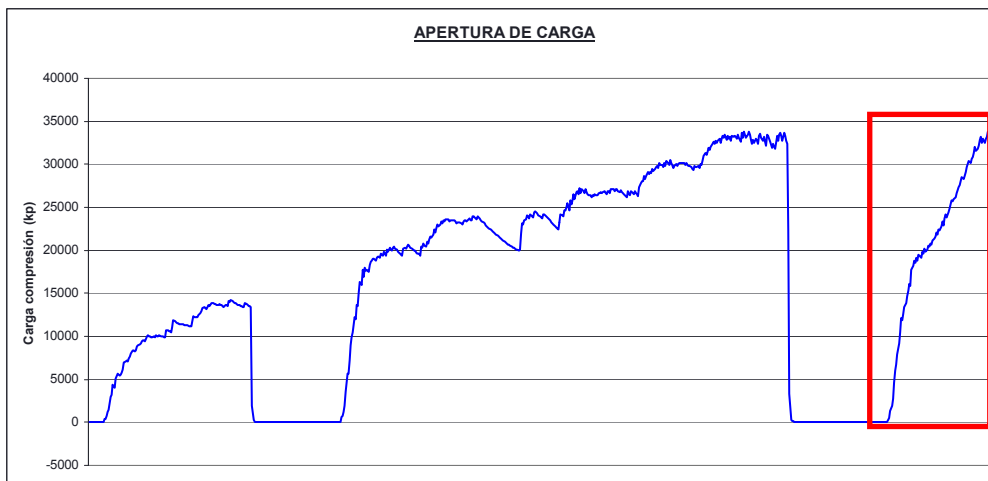


Fig. 4.6.24: Evolución de la carga introducida a lo largo del tiempo. Se realizó un proceso final de carga hasta aproximadamente 33 ton.

Mientras se realizó el proceso descrito se registró la evolución de los desplazamientos en los tres puntos de control. En la Fig. 4.6.26 se presentan los desplazamientos registrados en el último de los ciclos de carga realizados, correspondiente con la ley de cargas remarcada en rojo en la Fig. 4.6.24 y que se presenta de forma aislada en la Fig. 4.6.25.

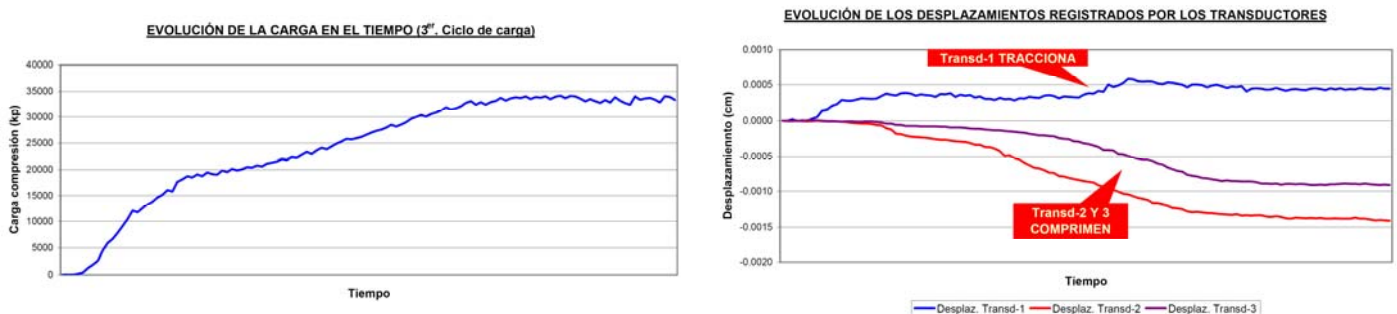


Fig. 4.6.25: Evolución de la carga en el 3^{er}. ciclo realizado.

Fig. 4.6.26: Evolución de los desplazamientos registrados a lo largo del tiempo durante el 3^{er}. ciclo de carga. Puede observarse como el transductor 1 sufrió alargamientos, mientras que los transductores 2 y 3 se acortaron.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Como puede comprobarse el transductor 1 registra alargamientos, mientras que los nº 2 y 3 sufren acortamientos. Esta circunstancia se interpreta como que el ángulo de apertura de cargas se sitúa entre los transductores 1 y 2, de forma que, a falta de más densidad de puntos de control, se tomó la posición definida por el punto medio entre ambos transductores (Fig. 4.6.27), que define un ángulo de apertura de cargas de 35°.

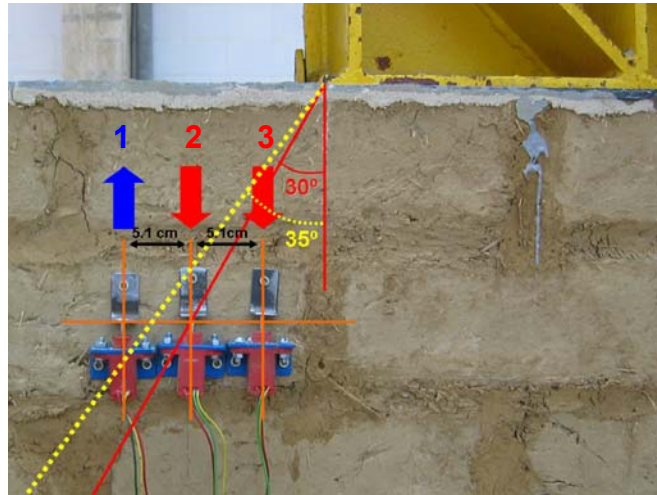


Fig. 4.6.27: El ángulo de apertura de cargas estimado para el muro de adobe fue de 35°.

4.6.5 Determinación de las características mecánicas del muro.

Con la finalidad obtener las características mecánicas (módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson) del muro para posterior contraste de los resultados alcanzados mediante técnicas no destructivas, se colocaron una serie de dos transductores potenciométricos verticales y otros tantos horizontales.

En el croquis adjunto (Fig. 4.6.28) puede comprobarse la ubicación de dichos transductores, así como la línea ideal de la apertura de cargas, una vez estimado el ángulo en el apartado anterior.

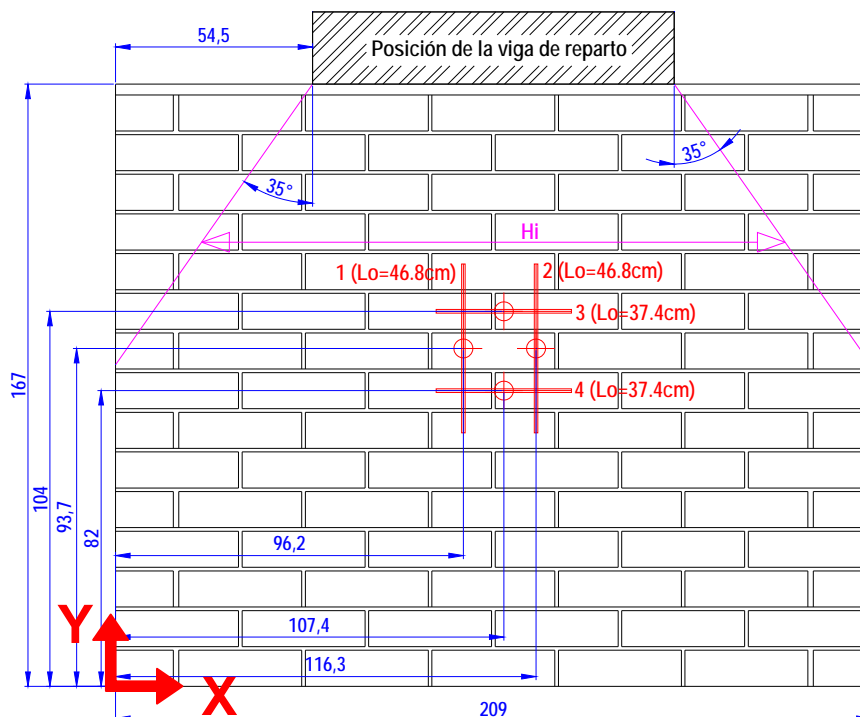


Fig. 4.6.28: Posición de los dos transductores potenciométricos, dispuestos para estimar las características mecánicas del muro. De los mismos se representa su punto central, así como la longitud inicial de medida. Todas las cotas relacionadas están en cm. El espesor del muro es de 34 cm.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En la Tabla 4.6.2 se relaciona la posición del centro de cada uno de los dos transductores en el sistema coordenado (x,y) referido, así como la anchura de muro afectada por la carga, a nivel del punto central de los transductores, haciendo la hipótesis de apertura lineal, para la obtención del nivel tensional vertical medio en cada nivel.

Tabla 4.6.2: Posición del centro de cada uno de los transductores en el sistema coordenado (x,y) referido, así como la anchura de muro afectada por la carga.

Transductor	Posición del centro de cada transductor		Anchura de carga
	X (cm)	Y (cm)	H _i (cm)
1	96.2	104	202.7
2	116.3	82.0	202.7
3	107.4	93.7	188.2
4	107.4	93.7	209.0

Para el control de la puesta en carga durante la ejecución de los ensayos se empleó un transductor de presión de 1000 Ba (4 voltios) y dos gatos hidráulicos de 126.70 cm² de área cada uno. Debido a lo referido una señal de presión registrada de 1 voltio equivale a una carga de 63,350.0 kp.

$$1000 \frac{kp}{cm^2} \approx 4 \text{ voltios} \rightarrow 1 \text{ voltio} \approx 250 \frac{kp}{cm^2}$$

$$1 \text{ voltio} \approx 250 \frac{kp}{cm^2} \cdot 126.70 cm^2 \cdot 2 = 63,350.0 kp$$

El área rayada dibujada sobre la coronación el muro, Fig. 4.6.28, corresponde a los elementos empleados para introducción de la carga en el muro de adobe. Por ello que también hay que considerar que el peso muerto que representan dichos elementos de reparto e introducción de carga asciende a un total de 220 kp.

Igualmente, en la Fig. 4.6.29 se ilustra la ubicación de los transductores dentro del alzado del muro, presentado un detalle de la colocación de los mismos en la Fig. 4.6.30.

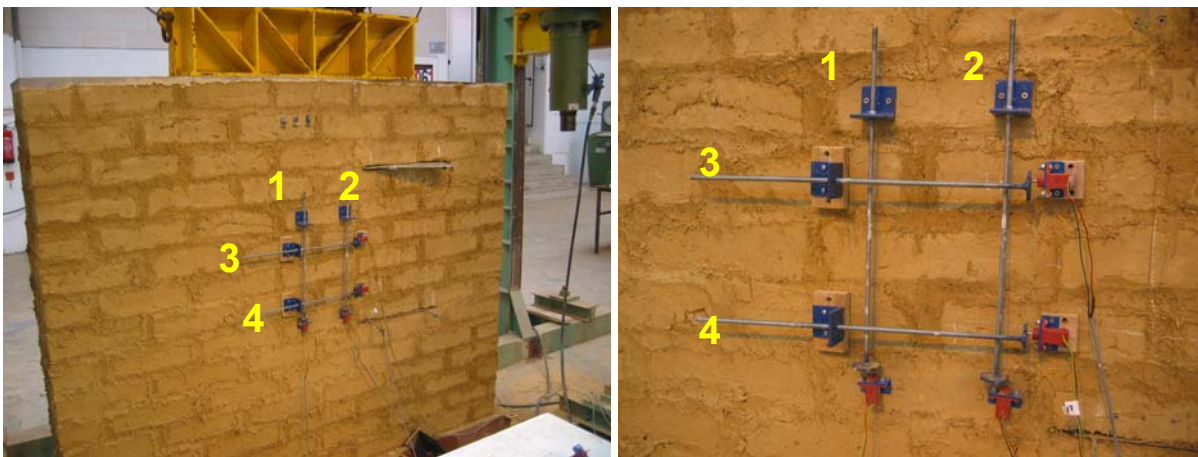


Fig. 4.6.29 Ubicación de los transductores dentro del alzado del muro.

Fig. 4.6.30: Detalle de la colocación de los transductores en el muro de adobe.

El 1 de octubre de 2009, con la viga de reparto en la posición indicada en la Fig. 4.6.29 (en el centro del muro) se realizó un proceso de carga, en escalones sucesivos. En la Fig. 4.6.31 se ilustra el proceso referido mediante la evolución del nivel tensional vertical medio a nivel del punto central de cada transductor (Fig. 4.6.30).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

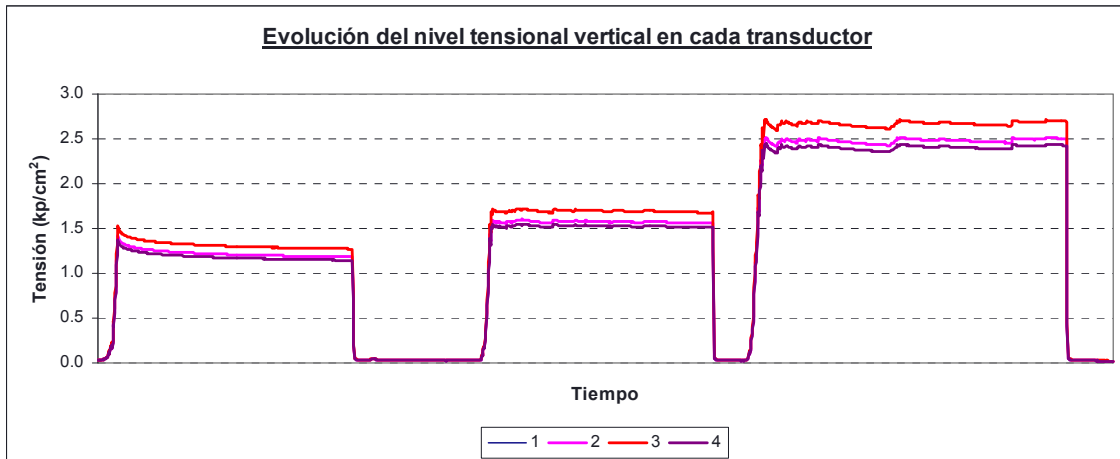


Fig. 4.6.31: Evolución temporal del nivel tensional vertical medio a nivel del punto central de cada transductor. Las gráficas de evolución del nº 1 y nº 2 son coincidentes.

De la misma forma, en la Fig. 4.6.32 se ilustra la evolución de las deformaciones registradas por los transductores bajo la acción de la ley de cargas introducida. En dicha figura puede comprobarse como el transductor nº 4 presenta, fundamentalmente en el 3^{er} ciclo de carga-descarga, un comportamiento muy irregular (posiblemente asociado con un desajuste en alguno de los elementos de anclaje del dispositivo al sustrato del muro), por ello que no se tiene en cuenta para la estimación del coeficiente de Poisson.

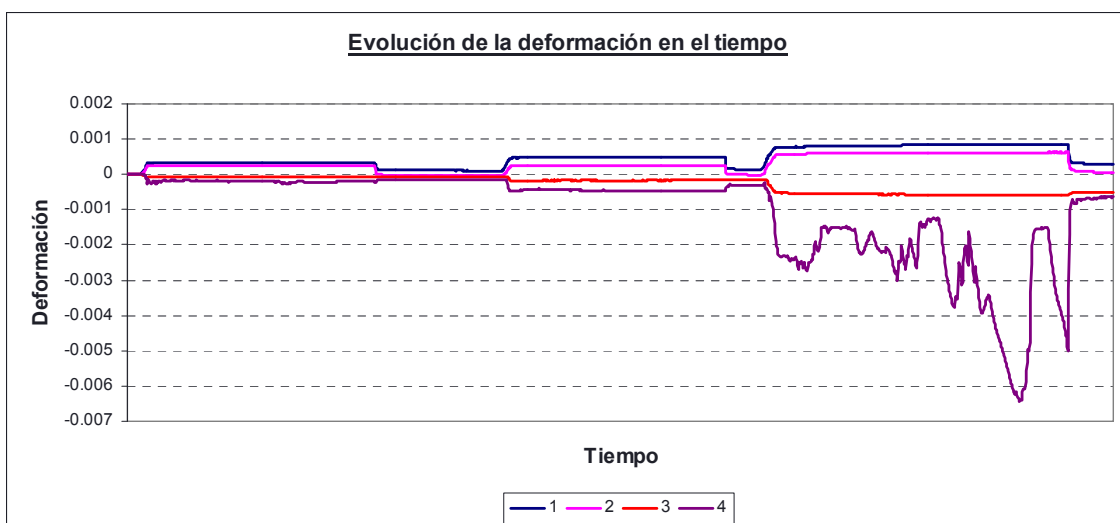


Fig. 4.6.32: Evolución temporal de la deformación vertical registrada por los cuatro transductores.

Mediante la composición de la tensión media estimada en el punto central de los transductores nº 1, 2 y 3, obtenida haciendo la hipótesis de apertura lineal de cargas, y la deformación registrada por los mismos durante el ensayo, en la Fig. 4.6.33 se presenta la ley tensión – deformación obtenida.

Puede apreciarse la ejecución de tres ciclos de carga-descarga. El primero, que no se ha tenido en cuenta para la estimación de las características mecánicas, alcanzó un nivel de 8.5 ton., teniendo como finalidad el favorecer el reajuste del sistema introductorio de carga. En la Fig. 4.6.34 se presenta la obtención, en el 2^o ciclo de carga, del módulo de deformación para sendos transductores verticales, 1 y 2, cuyo valor se corresponde con la pendiente del ajuste lineal realizado en la rama de comportamiento elástico. Igualmente, en la Fig. 4.6.35 se presenta lo equivalente para el 3^{er} ciclo.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

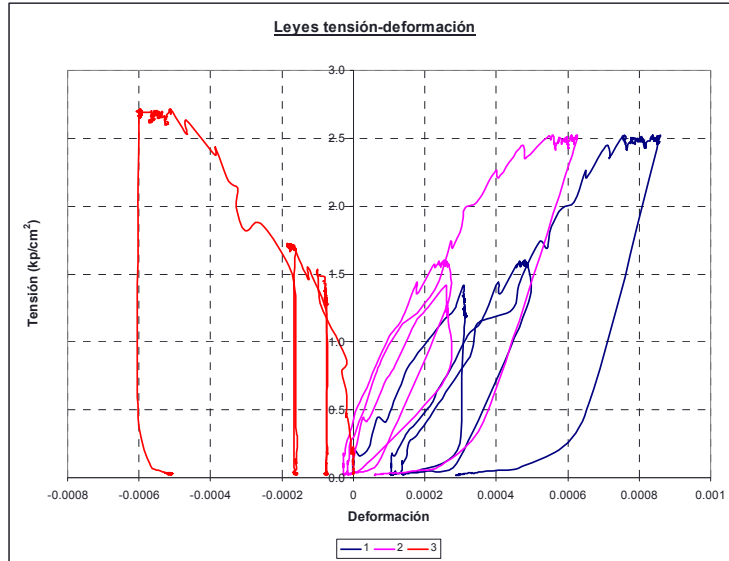


Fig. 4.6.33: Ley σ - ϵ obtenida en el área local ensayada del muro de adobe.

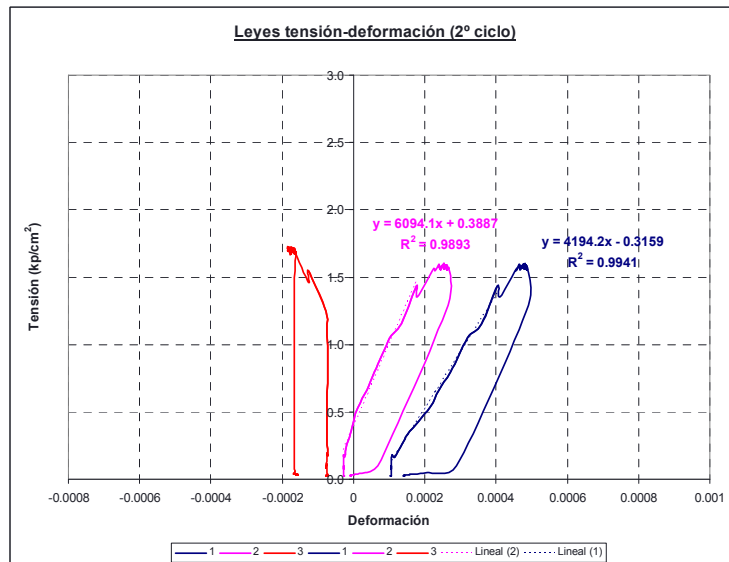


Fig. 4.6.34: Ley σ - ϵ obtenida para el 2º ciclo de carga, en el área local ensayada del muro de adobe.

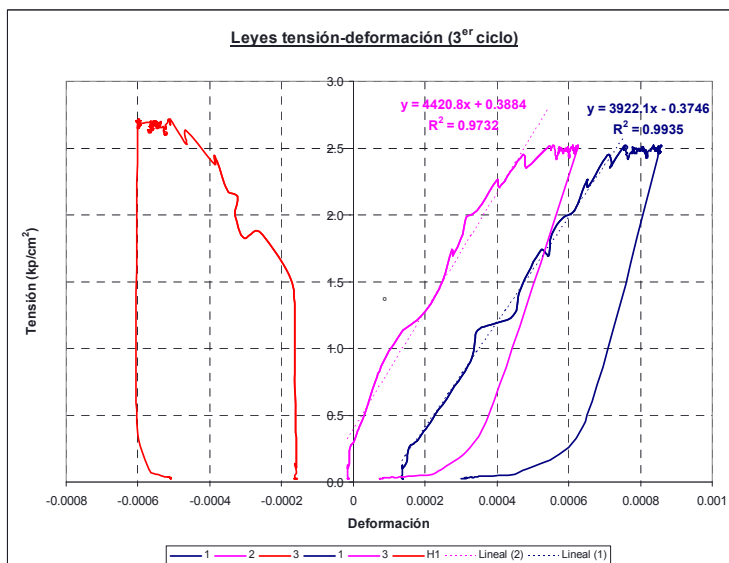


Fig. 4.6.35: Ley σ - ϵ obtenida para el 3º ciclo de carga, en el área local ensayada del muro de adobe.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En la Tabla 4.6.3 se sintetizan los valores obtenidos tanto para el módulo de elasticidad, como para el coeficiente de Poisson (como relación entre la deformación horizontal y vertical en la rama elástica).

Tabla 4.6.3: Módulo de deformación y coeficiente de Poisson del muro de adobe, obtenidos mediante el promediado de los registrados en los ciclos de carga 2 y 3.

Ciclo de carga	E (kp/cm ²)		E _{prom_T1 y T2} (kp/cm ²)	ν
	Transd. 1	Transd. 1		
2	4,194.2	6,094.1	5,144.15	-0.21
3	3,922.1	4,420.8	4,171.45	-0.48
			4,657.8	-0.35

En base a los resultados referidos se ha considerado un módulo de deformación de 465.78 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.35.

Debe referirse que el parámetro obtenido se refiere a una zona local del muro, indicando un orden de magnitud de cara a poder emitir un juicio razonado sobre la adecuación del módulo de deformación obtenido en los ensayos de gato plano doble que se presentan con posterioridad.

4.6.6 Ensayos de Gato plano

En el muro de adobe objeto de análisis fueron desarrollados un ensayo de gato plano simple y dos ensayos de gato plano doble. La finalidad de estos ensayos fue el contrastar experimentalmente los niveles tensionales existentes, así como el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson obtenidos, en tanto que previamente se habían valorado dichas características mecánicas mediante la disposición de transductores potenciométricos.

Uno de los ensayos gato plano doble fue realizado empleando transductores de desplazamiento para el registro de la deformación vertical y horizontal en el área de ensayo, y un transductor de presión para registrar el nivel de presión introducido manualmente a los gatos planos. Como podrá comprobarse la definición de dicha presión no fue todo lo adecuada que se hubiera deseado en tanto que por la posición del transductor, justo a la salida de la bomba, se registraban sobrepresiones instantáneas importantes, asociadas a cada uno de los ciclos de bombeo, que desvirtuaban la interpretación de la ley tensión – deformación obtenida.

Para la introducción de la carga en coronación del muro, en el ensayo de gato plano simple, se empleó un transductor de presión de 1000 Ba (4 voltios) y dos gatos hidráulicos de 126.70 cm² de área cada uno. Debido a lo referido una señal de presión registrada de 1 voltio equivale a una carga de 63,350.0 kp. Igualmente, también hay que considerar que el peso muerto que representa la viga de reparto empleada en el ensayo es de 220 kp (Fig. 4.6.36).



Fig. 4.6.36: Configuración general de un ensayo de gato plano doble con registro de la presión y de los desplazamientos mediante transductores.

4.6.6.1 Ensayos de gato plano GPAd-A (simple y doble)

En la Fig. 4.6.37 se esquematiza la distribución de los dos gatos planos dentro del muro de adobe, así como las magnitudes necesarias para obtener el nivel tensional medio en cada uno de los planos donde se ejecutaron los gatos planos, considerando un ángulo de apertura de cargas de 35° (ver apartado 4.6.4).

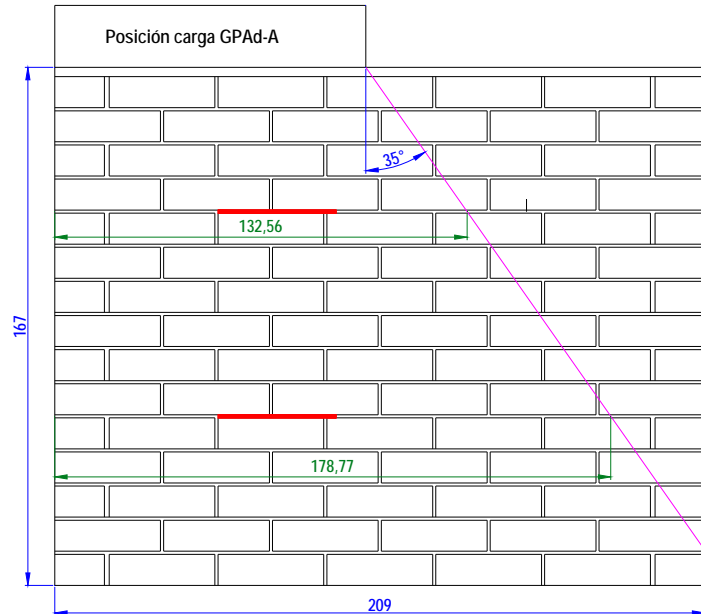


Fig. 4.6.37: Ubicación de los ensayos de gato plano simple (corresponde con el emplazado en la parte superior) y doble GPAd-A en el alzado del muro de adobe. Las cotas relacionadas están en cm.

Tras la preparación de la zona de ensayo (pegado de los puntos de control), se procedió a la ejecución del **ensayo de gato plano simple**, con la finalidad de obtener el nivel tensional vertical de compresión en servicio (para una carga, introducida en la cabeza del muro de 25.6 ton.). Para ello, previamente fue necesario registrar la distancia existente entre los puntos de control antes del corte. A continuación, se procedió a llevar a cabo una hendidura, mediante el empleo de una sierra de disco manual, Fig. 4.6.38, para guiado de la sierra de disco orbital que proporcionará el corte para la posterior inserción del gato plano (Fig. 4.6.39). Como consecuencia del corte y de la carga vertical existente, se producirá una relajación del elemento estructural en la zona de ensayo.

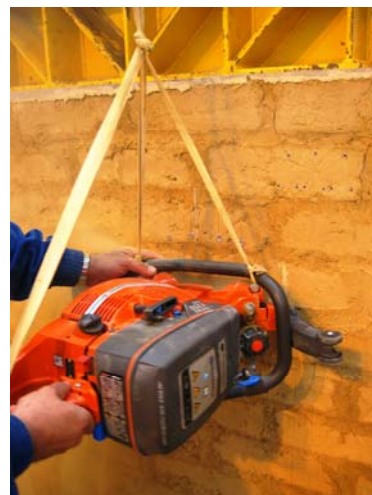


Fig. 4.6.38: Ejecución de una hendidura mediante sierra de disco, para posterior guiado de la sierra orbital.

Fig. 4.6.39: Ejecución de la roza para insertar el gato plano simple.

Fue estimada el área de la roza ejecutada (apartado 4.6.8). En las Fig. 4.6.40 y 4.6.41 se ilustra el área aproximada de la roza respecto de la del gato plano.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

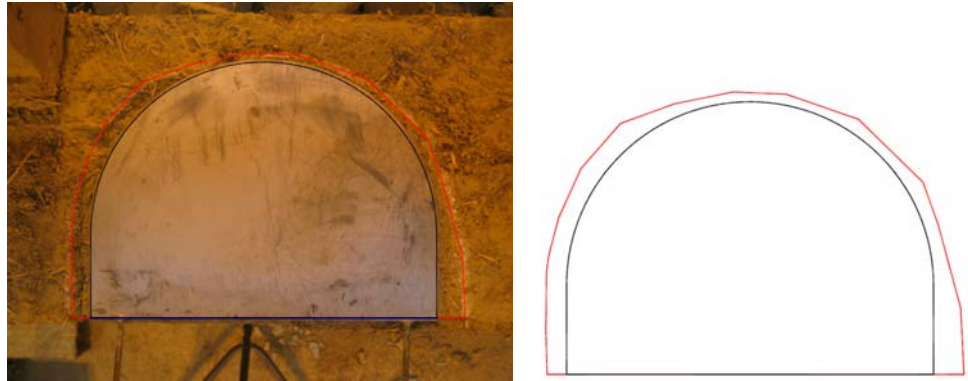


Fig. 4.6.40 y 4.6.41:
Relación gráfica entre el área de la roza (898.61 cm²) y área del gato plano GPAd-A Simple (778.56 cm²).

En base al área obtenida para la roza ejecutada, y conociendo la geometría del gato plano empleado en el ensayo (Semioval 350x260x3.5mm), es posible obtener la relación geométrica k_a ($K_{\text{gato-roza}}$), que alcanza un valor de 0.866.

Por su parte, en relación a la constante de calibración de los gatos planos, k_m , se adoptó un valor de 0.7125 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

En las Fig. 4.6.42 y 4.6.43 se han representado el área de ensayo con la finalidad de ubicar la posición de los puntos de control en el conjunto de la fábrica.

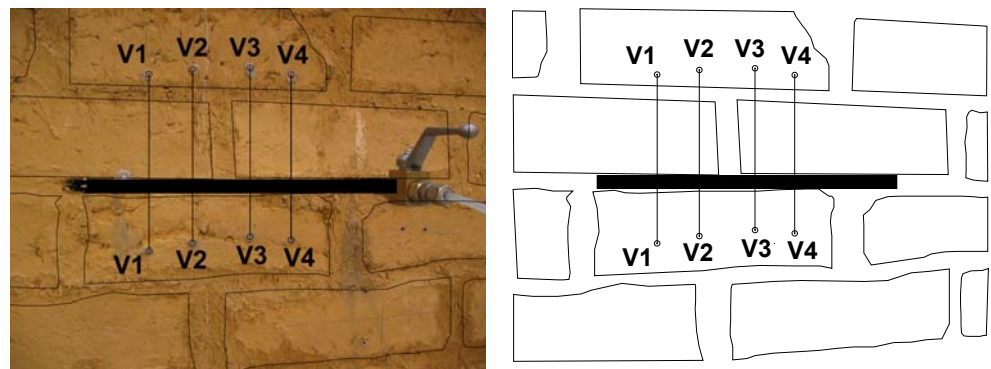


Fig. 4.6.42 y 4.6.43:
Croquis del área de ensayo de gato plano simple realizado.

Una vez introducido el gato se procederá a aumentar su presión interna mediante bombeo hidráulico hasta que la distancia medida inicialmente, antes de la ejecución de la roza, se recupere (Fig. 4.6.44 y 4.6.45). En ese momento, dicha presión interna ($P_{\text{cancelación}}$), corregida con unos coeficientes relacionados con la rigidez inherente del gato, K_m y, según la literatura, con la relación de áreas existente entre el gato y la roza practicada, K_a , permitirá obtener el nivel tensional en servicio del elemento estructural analizado (σ).



Fig. 4.6.44 y 4.6.45:
Proceso de presurización del gato plano y control de la evolución de las deformaciones experimentales por los puntos de control.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Los resultados del ensayo se recogen en el registro Lab0920, el cuál se adjunta en el Anexo 16. No obstante, de dicho registro, se recoge a continuación la Fig. 4.6.46 que ilustra el nivel tensional en servicio existente en el elemento estructural caso de utilizar el coeficiente geométrico $K_a=K_{\text{gato-roza}}$, en este caso dicho valor alcanza los **0.63 MPa**. Igualmente en la Fig. 4.6.47 se representa para varios niveles de tensión proporcionados por el gato plano, la evolución de las deformaciones experimentadas por cada par de puntos de control.

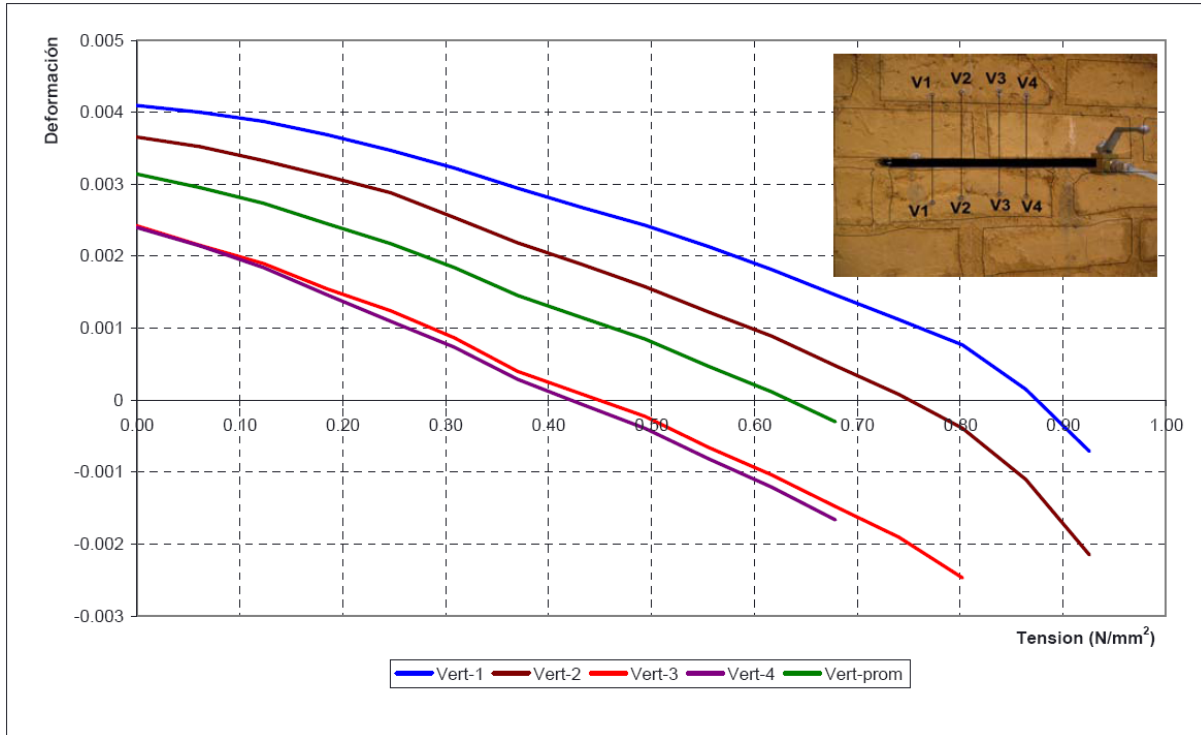
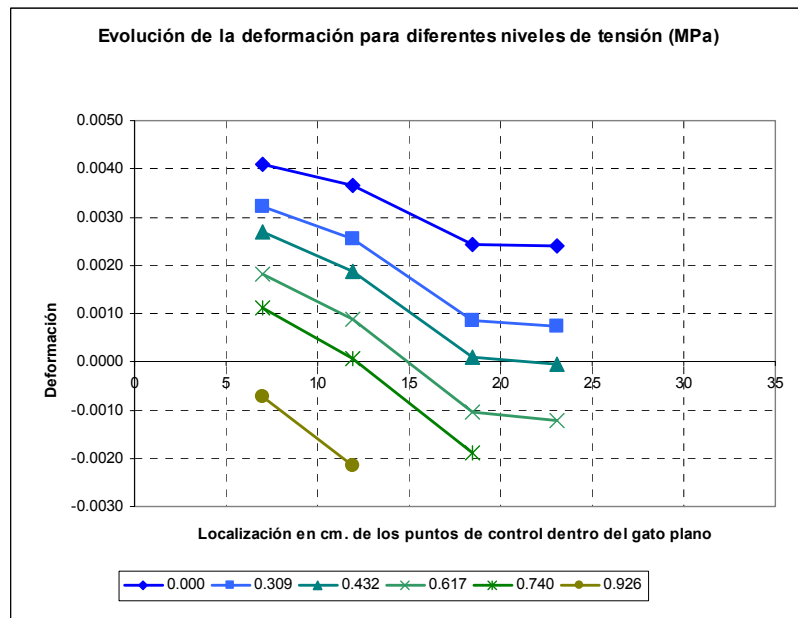


Fig. 4.6.46: Nivel tensional obtenido mediante el ensayo de gato plano simple, empleando como coeficiente corrector geométrico el que liga el área de la roza y el área del gato plano ($K_{\text{gato-roza}}$).

Fig. 4.6.47: Evolución de las deformaciones experimentadas por cada par de puntos de control, para varios niveles de tensión proporcionados por el gato plano. Los puntos de control vertical n° 3 y 4 se quedaron fuera del rango de medida del comparador para los niveles más elevados de tensión introducida en la fábrica.



En lo que respecta al **ensayo de gato plano doble**, cuyo objetivo es obtener la ley $\sigma-\epsilon$ de la porción de fábrica movilizada en el ensayo, fue necesario, tras disponer los puntos de control

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

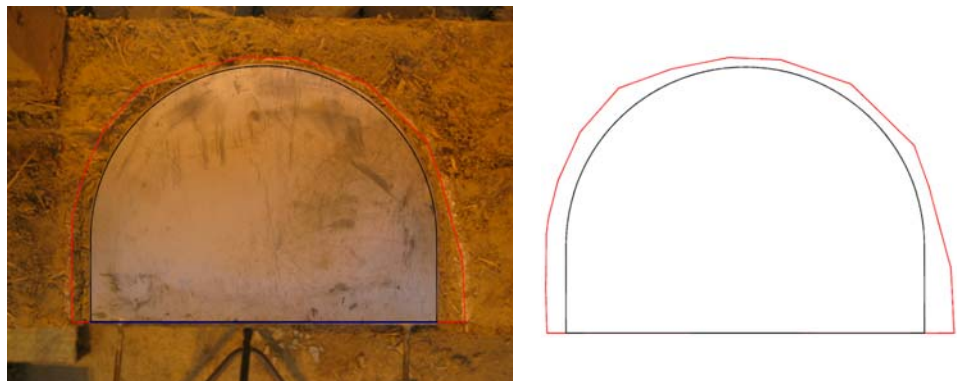
pertinentes, ejecutar una segunda roza, paralela con la realizada para el ensayo de gato plano simple (Fig. 4.6.48 y 4.6.49).



Fig. 4.6.48 y 4.6.49:
Instantes captados durante la ejecución de la roza.

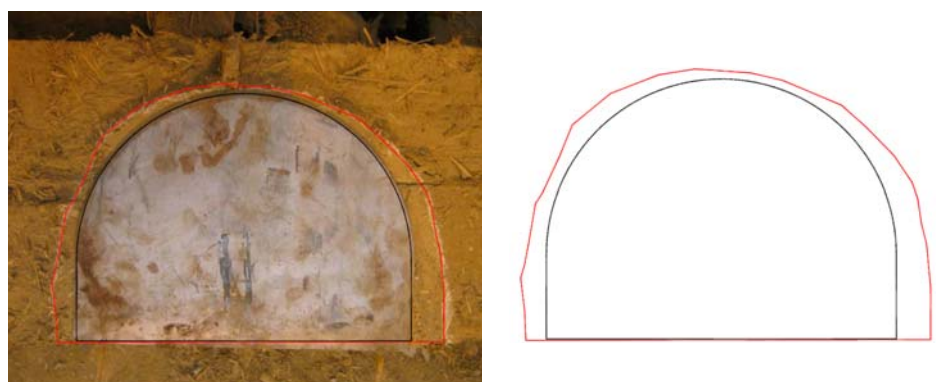
En las Fig. 4.6.50 se ilustra el área aproximada de la roza para el gato plano superior del ensayo GPAd-A Doble (es el mismo gato que el simple relacionado con anterioridad GPAd-A Simple).

Fig. 4.6.50: Relación gráfica entre el área de la roza (898.61 cm^2) y área del gato plano GPAd-A Simple (778.56 cm^2).



Por su parte en las Fig. 4.6.51 se ilustra el área aproximada de la roza para el gato plano inferior del ensayo GPAd-A Doble.

Fig. 4.6.51: Replanteo del área de la roza (927.02 cm^2) y el área del gato plano inferior GPD-A Doble (778.56 cm^2).



En base a las áreas obtenidas para las rozas ejecutadas y conociendo la geometría de los gatos planos empleados en el ensayo (Semioval $350 \times 260 \times 3.5 \text{ mm}$), es posible obtener la relación geométrica k_a ($K_{\text{gato-roza}}$), que alcanza un valor de 0.853. En la Tabla 4.6.4 se resumen los factores geométricos obtenidos.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.6.4: Factores geométricos, k_a , obtenidos para cada uno de los dos gatos planos involucrados en el ensayo GPAd-A Doble.

Factor geométrico, k_a ($K_{\text{gato-roza}}$), GPAd-A Doble					
		Áreas (cm^2)		Constantes derivadas	
Gato plano superior (Fig. 4.6.50)	A_{roza}	898.61	$K_{\text{gato-roza}}$	0.866	$K_{\text{gato-roza}}$ 0.853
	A_{gato}	778.56			
Gato plano inferior (Fig. 4.6.51)	A_{roza}	927.02	$K_{\text{gato-roza}}$	0.840	
	A_{gato}	778.56			

Por su parte, en relación a la constante de calibración de los gatos planos, k_m , se adoptó un valor de 0.855 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

Una vez introducido el segundo gato, y tras el purgado del aire contenido en el interior del mismo hasta llenarlo de fluido hidráulico, se realizan ciclos de presurizado – despresurizado de los gatos, registrando para cada nivel de presión el desplazamiento de los puntos verticales (Fig. 4.6.52) y horizontales (Fig. 4.6.53) y, por ende, obteniendo las deformaciones asociadas a cada ciclo. De esta manera se grafica la ley σ - ϵ para la porción de fábrica ensayada, de la cuál puede obtenerse el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.

Fig. 4.6.52: Registro de la evolución de la deformación de los puntos de control vertical a lo largo del ensayo GPAd-A Doble.

Fig. 4.6.53: Registro de la evolución de la deformación de los puntos de control horizontal a lo largo del ensayo GPAd-A Doble.



En la Fig. 4.6.54 se presentan los resultados obtenidos para los cuatro puntos de control vertical y los dos horizontales tras la realización de 6 ciclos de carga y descarga. El punto de control vertical nº 1 mostró un comportamiento más rígido que los otros tres puntos de control vertical, por ello que dicho punto nº 1 no se tuvo en cuenta en el procesado posterior de los datos. Igualmente, los puntos de control horizontal quedaron fuera del rango de medida del comparador en el último ciclo, por ello que su gráfica esté incompleta en el sexto ciclo del ensayo.

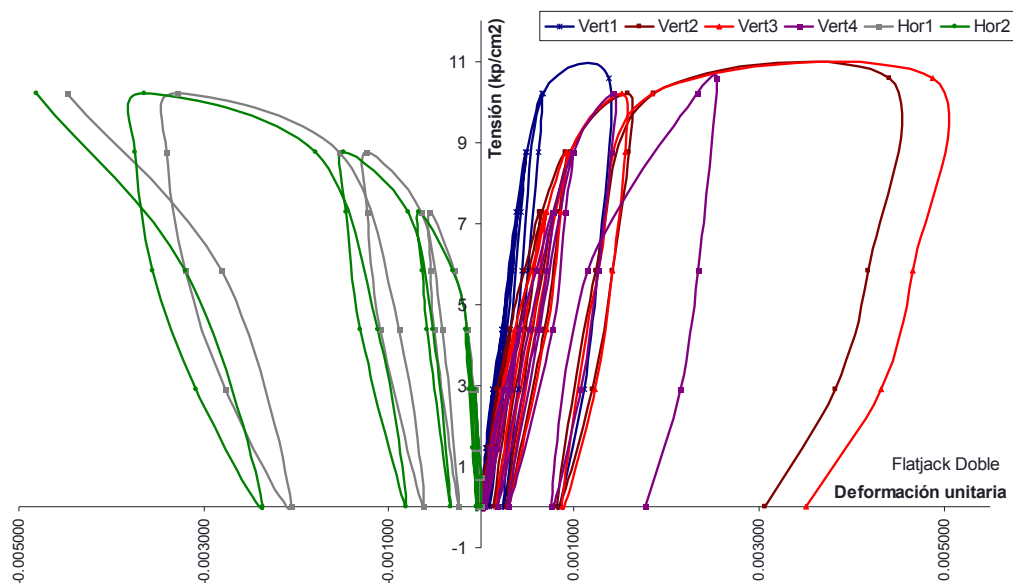


Fig. 4.6.54: Leyes σ - ϵ obtenidas para los cuatro puntos de control vertical (base de medida 400 mm) y para los dos puntos de control horizontal (base de medida 200 mm).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Por su parte, en la Fig. 4.6.55 se presentan las leyes tensión – deformación promedio, obtenidas en el área de ensayo tanto para los puntos de control verticales, a excepción del nº 1, como para los horizontales.

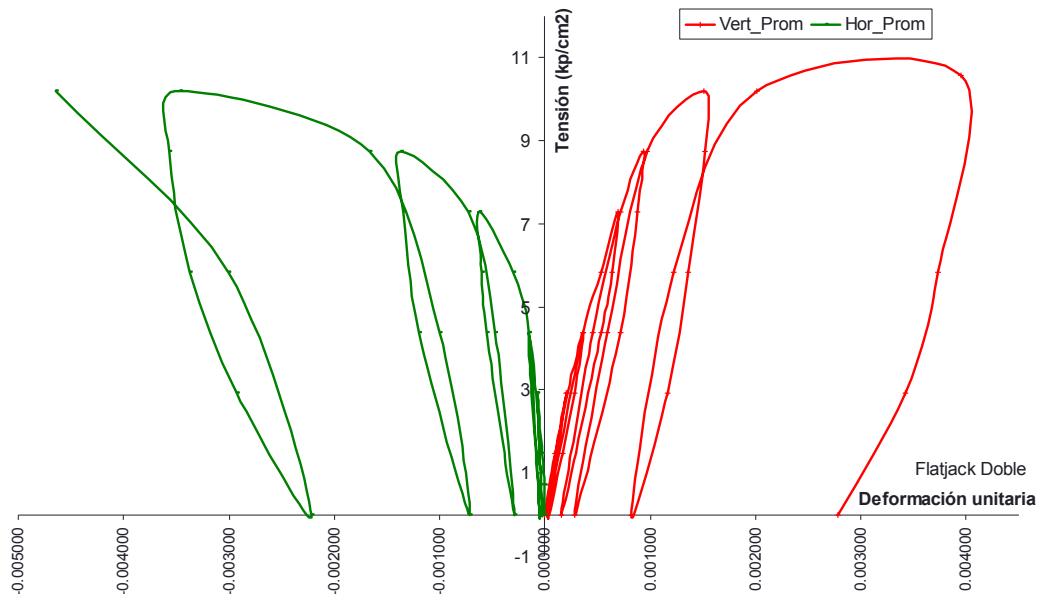


Fig. 4.6.55: Leyes σ - ϵ promedio obtenidas en el ensayo GPAd-A Doble.

Por su parte en la Fig. 4.6.56 se han representado los ciclos realizados así como los puntos máximos que definen la envolvente de los mismos. A dichos puntos se ha ajustado una curva logarítmica en base a la cuál se ha estimado la tensión de rotura asociada a una deformación del 3‰ (Tassios 1988), obteniendo un valor de 1.07 MPa. Por su parte el límite elástico se localiza en el entorno de los 0.5 MPa.

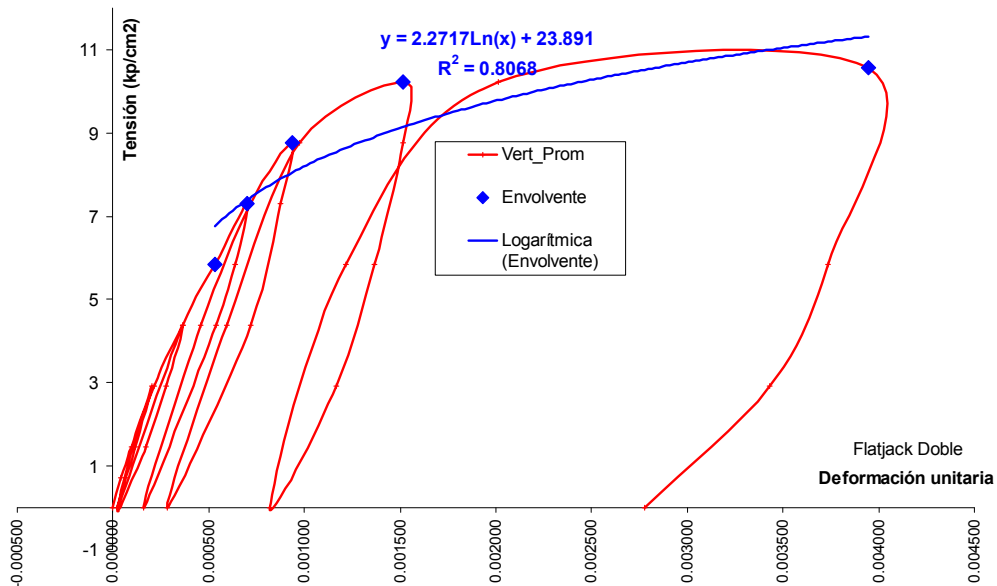


Fig. 4.6.56: Envolvente de rotura y ajuste logarítmico obtenido ($R^2 = 0.8068$).

En este sentido, para reforzar el argumento relacionado con la tensión última estimada, conviene exponer que, para una presión instalada en el gato de 14 Ba (tensión equivalente en el muro de 1.02 MPa), se produjo un agrietamiento vertical aparente (Fig. 4.6.57). Dicha tensión es del mismo orden que la tensión a rotura estimada (1.07 MPa).

De la misma forma, cabe relacionar que la deformación en rotura obtenida en los ensayos a compresión realizados sobre adobes independientes (apartado 4.6.5) alcanzó un valor promedio

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

del 5%, por ello que para el muro de adobe la deformación supuesta del 3‰ pueda parecer un umbral de deformación en rotura reducido, si bien queda del lado de la seguridad. Si se supondría una deformación del 5%, la tensión de rotura estimada mediante el ajuste logarítmico alcanzaría un valor de 1.71 MPa, cifra un poco inferior a la resistencia a compresión promedio obtenida en los ensayos a compresión realizados sobre los adobes independientes (1.78 MPa, Tabla 4.6.1), aspecto lógico si cabe dado que el material empleado para aparejar los adobes (apartado 4.6.1) contribuiría de forma negativa en la resistencia a compresión de la fábrica en relación a la de los adobes.



Fig. 4.6.57: Agrietamientos desarrollados en el área de ensayo a una presión instalada en los gatos de 14 bar (equivalente a una tensión sobre el muro de 1.02 MPa)

Igualmente, a partir de las curvas obtenidas (Fig. 4.6.54 y 4.6.55) pueden estimarse las características mecánicas, módulo de deformación y coeficiente de Poisson, para dicho muro de adobe.

En la Tabla 4.6.5 se presentan las características mecánicas obtenidas en cada uno de los ciclos realizados, sin tener en cuenta el punto de control nº 1 dado su comportamiento discordante del resto. Cabe llamar la atención a que dichas características mecánicas se corresponden con las obtenidas para un intervalo de presiones $[p_1, p_2]$, por ello que el módulo de deformación obtenido sea un módulo secante.

Tabla 4.6.5: Características mecánicas, E y ν , obtenidas en el ensayo GPAd-A Doble.

Ciclo	p_1^* (kp/cm ²)	p_2^* (kp/cm ²)	$E_{p_1-p_2}$ (kp/cm ²)				$E_{p_1-p_2_promedio}$ (kp/cm ²)	$\nu_{p_1-p_2_promedio}$
			Vert 1	Vert 2	Vert 3	Vert 4		
1	0	4	22,791.00	16,575.00	14,025.00	12,574.00	14,391.33	-0.33
2	0	4	22,791.00	17,788.00	15,194.00	12,574.00	15,185.33	-0.31
3	0	6	19,890.00	14,986.00	13,341.00	11,516.00	13,281.00	-0.33
4	0	6	23,782.00	16,575.00	14,783.00	13,180.00	14,846.00	-
5	0	6	26,682.00	15,194.00	14,783.00	12,721.00	14,232.67	-
6	0	8	29,173.00	13,892.00	15,194.00	14,734.00	14,606.67	-
			24,184.83	15,835.00	14,553.33	12,883.17	14,423.83	-0.32

* p_1 y p_2 indican el intervalo de presiones para el cuál se ha obtenido el módulo de elasticidad secante ($E_{p_1-p_2}$) y el coeficiente de Poisson ($\nu_{p_1-p_2}$).

Como conclusión, podría considerarse un módulo de elasticidad secante de 1,442.38 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.32.

Para una consulta más detallada del ensayo, se remite al lector al registro Lab0922, el cuál se adjunta en el Anexo 16.

En las Fig. 4.6.58 y 4.6.59 se ha representado el área de ensayo con la finalidad de ubicar la posición de los puntos de control en el conjunto de la fábrica.

Por su parte en la Fig. 4.6.60 se ha individualizado el área rectangular definida por dos gatos planos y sendas verticales por sus extremos, con el objetivo de cuantificar, en superficie, la

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

relación existente entre el área de mortero y el área de adobe movilizada. El fin perseguido es aportar un punto para la evaluación de la posible relación existente entre el módulo de deformación y la proporción de la fase adobe y de la fase mortero, para el caso de un muro de adobe aparejado con un mortero compuesto a base de tierra, arena y paja. En este sentido en la Tabla 4.6.6 se presentan las áreas computadas y la relación referida.

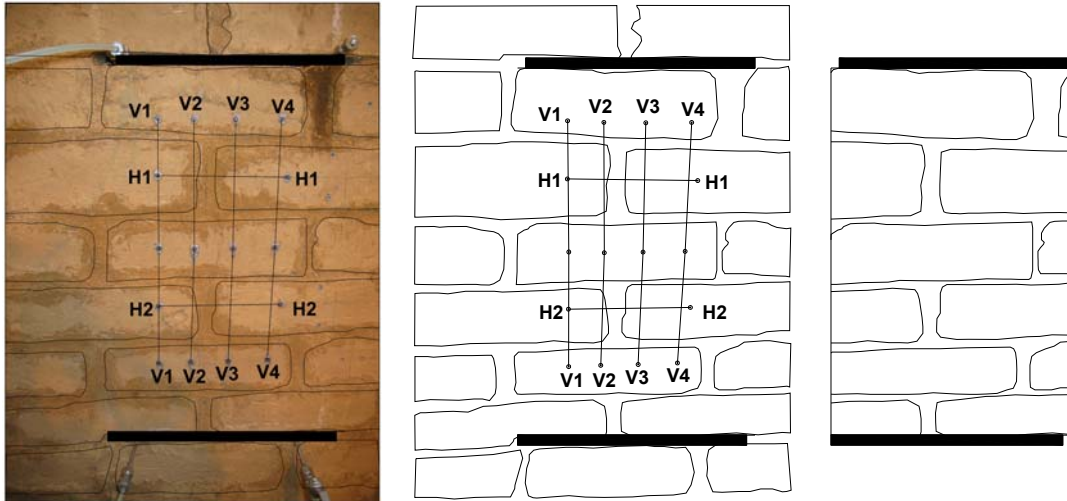


Fig. 4.6.58 y 4.6.59: Croquis del área de ensayo realizado.

Fig. 4.6.60: Detalle del área movilizada entre los dos gatos planos.

Tabla 4.6.6: Área total, de adobe y de mortero calculadas a partir de la Fig. 4.6.60. Relación entre el área de mortero y el área de los adobes.

A_{total} (cm ²)	2028.49
A_{adobes} (cm ²)	1645.41
$A_{mortero}$ (cm ²)	383.08
$A_{mortero}/A_{adobes}$	0.23
E (MPa)	1,442.38

4.6.6.2 Ensayo de gato plano GPAd-B Doble

En la Fig. 4.6.61 se esquematiza la distribución de los dos gatos planos dentro del muro de adobe.

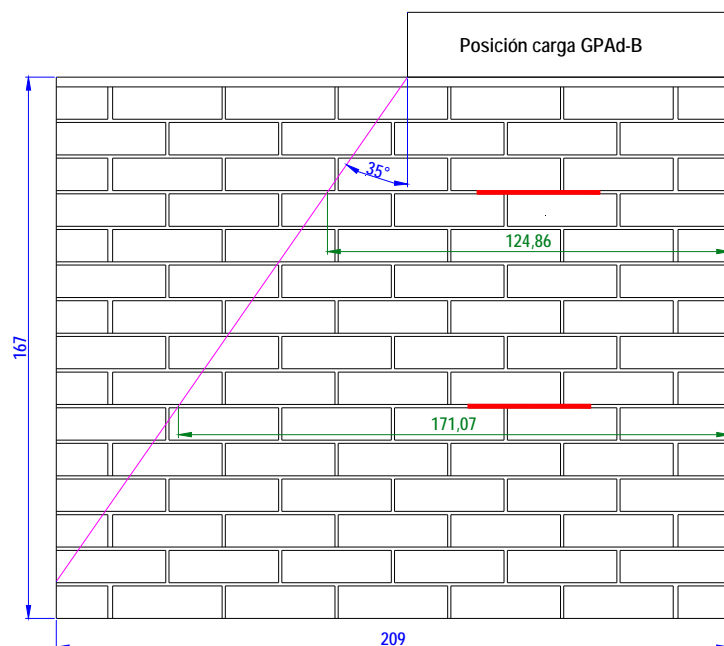


Fig. 4.6.61: Ubicación del ensayo de gato plano doble GPAd-B en el alzado del muro de adobe. Las cotas relacionadas están en cm.

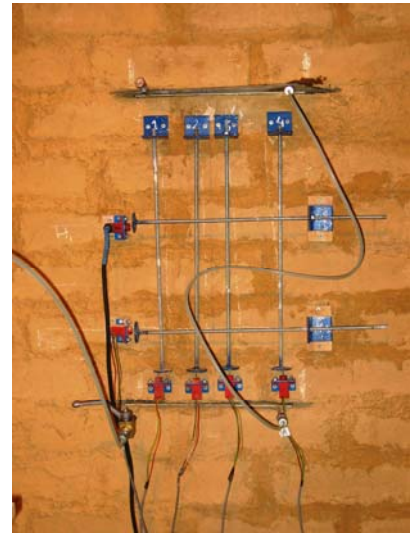
Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tras la preparación de la zona de ensayo se ejecutaron sendas rozas paralelas (Fig. 4.6.62), para la posterior inserción de los gatos planos, y la fijación de los transductores de desplazamiento (Fig. 4.6.63).

Fig. 4.6.62: Instante captado durante la ejecución de la roza mediante la sierra orbital.

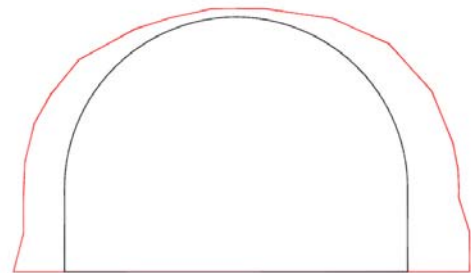


Fig. 4.6.63: Configuración del ensayo una vez introducidos los gatos planos y situados los transductores de desplazamiento.



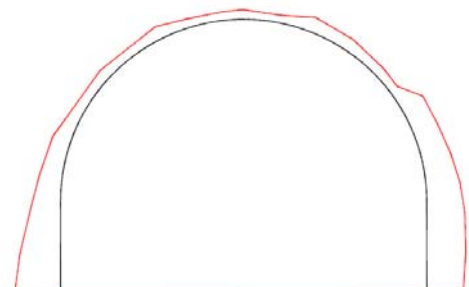
En las Fig. 4.6.64 se ilustra el área de la roza para el gato plano superior del ensayo GPAd-B Doble.

Fig. 4.6.64: Replanteo de la posición de la roza (de área 1,043.60 cm²) respecto del gato plano superior GPAd-B Doble (778.56 cm²)



Por su parte en las Fig. 4.6.65 se ilustra el área de la roza ejecutada para la inserción del gato plano inferior del ensayo GPAd-B Doble.

Fig. 4.6.65: Replanteo de la posición de la roza (de área 924.09 cm²) respecto del gato plano inferior GPAd-B Doble (778.56 cm²).



En base a las áreas obtenidas para las rozas ejecutadas y conociendo la geometría de los gatos planos empleados en el ensayo (Semioval 350x260x3.5mm), es posible obtener la relación geométrica k_a ($K_{\text{gato-roza}}$), que alcanza un valor de 0.794. En la Tabla 4.6.7 se resumen los factores geométricos obtenidos.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.6.7: Factores geométricos, k_a , obtenidos para cada uno de los dos gatos planos involucrados en el ensayo GPAd-B Doble.

Factor geométrico, k_a ($K_{\text{gato-roza}}$), GPAd-B Doble					
		Áreas (cm^2)		Constantes derivadas	
Gato plano superior (Fig. 4.6.64)	A_{roza}	1,043.60	$K_{\text{gato-roza}}$	$K_{\text{gato-roza}}$ 0.794	
	A_{gato}	778.56			0.746
Gato plano inferior (Fig. 4.6.65)	A_{roza}	924.09	$K_{\text{gato-roza}}$		$K_{\text{gato-roza}}$ 0.794
	A_{gato}	778.56			

Por su parte, en relación a la constante de calibración de los gatos planos, k_m , se adoptó un valor de 0.855 en base a la calibración y comentarios recogidos en el Anexo 4.

Una vez introducidos los gatos, y tras el purgado del aire contenido en el interior de los mismos hasta llenarlos del fluido hidráulico, se realizan ciclos de presurizado – despresurizado de los gatos, registrando para cada nivel de presión (el cuál se controla mediante un transductor de presión, Fig. 4.6.66) el desplazamiento de los puntos verticales y horizontales (Fig. 4.6.67) y, por ende, obteniendo las deformaciones asociadas a cada ciclo. De esta manera se grafica la ley σ - ϵ para la porción de fábrica ensayada.

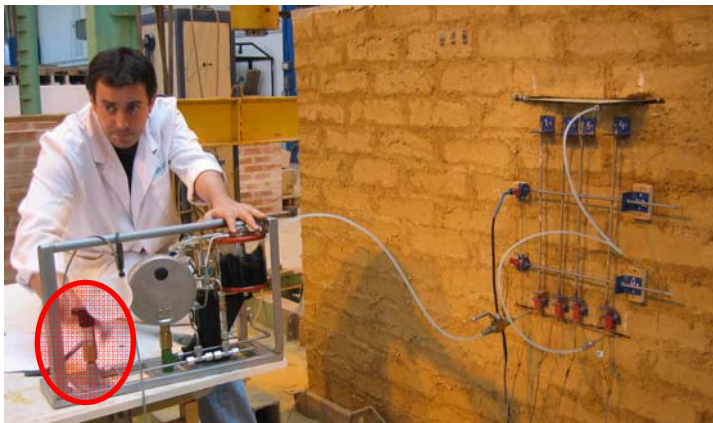


Fig. 4.6.66: Detalle de la posición del transductor (en rojo) para control de la presión introducida, manualmente, en los gatos planos.

Fig. 4.6.67: Configuración general del ensayo durante uno de los ciclos de presurizado.

En la Fig. 4.6.68 se presenta la evolución temporal de la tensión vertical introducida en el muro de adobe mediante los dos gatos planos. En este ensayo, el sensor de presión se ubicó (óvalo rojo en la Fig. 4.6.66) en la parte inicial del circuito, en la conexión habilitada para uno de los manómetros de la bomba.

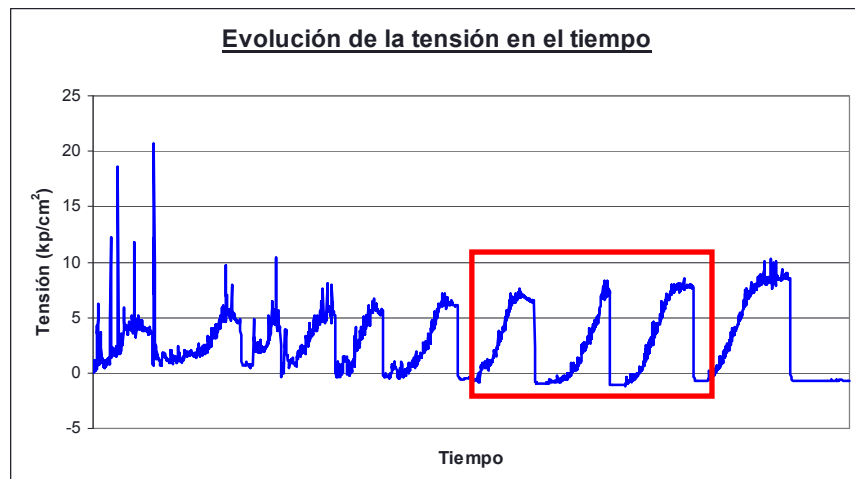


Fig. 4.6.68: Evolución temporal de la tensión vertical introducida en el muro de adobe durante el ensayo GPAd-B Doble.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Puede comprobarse que la señal registrada estaba contaminada por múltiples picos de presión, de amplitud significativa. Cada pico se corresponde con un ciclo de bombeo y se relaciona con las sobrepresiones instantáneas generadas como consecuencia del mismo.

Por su parte, en la Fig. 4.6.69 se ilustra la evolución de la deformación registrada por los transductores de desplazamiento durante el ensayo.

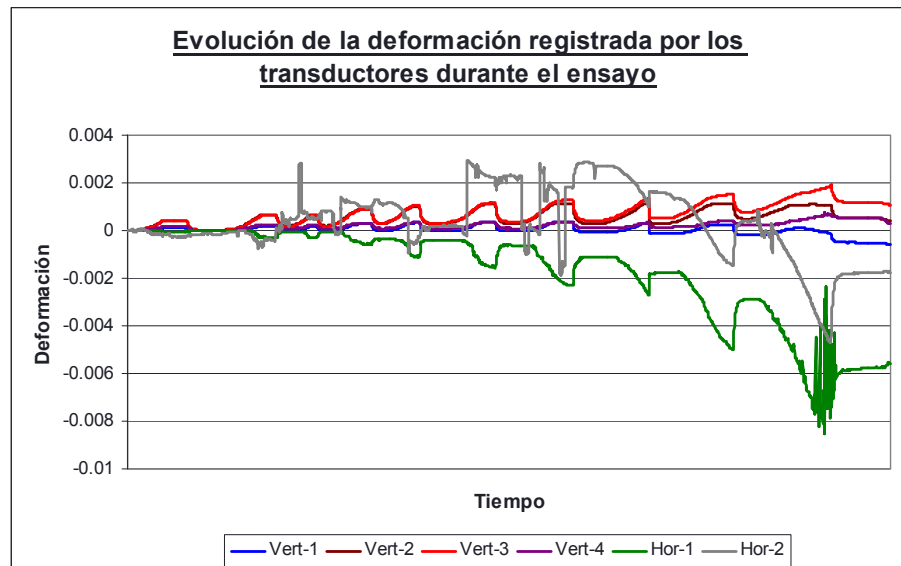


Fig. 4.6.69: Evolución temporal de la deformación registrada por los transductores de desplazamiento durante el ensayo GPaD-B Doble.

En dicha Fig. 4.6.69 puede comprobarse como el transductor horizontal nº 2 presenta un comportamiento inadecuado, posiblemente debido a una incorrecta fijación mecánica del mismo respecto del material soporte. Por ello que, en lo que respecta a la deformación horizontal promedio registrada en la zona de ensayo no se tenga en cuenta dicho transductor. Por su parte, en la Fig 4.6.70 se presenta la evolución de la deformación vertical promedio y horizontal (responde a la registrada por el transductor horizontal nº 1).

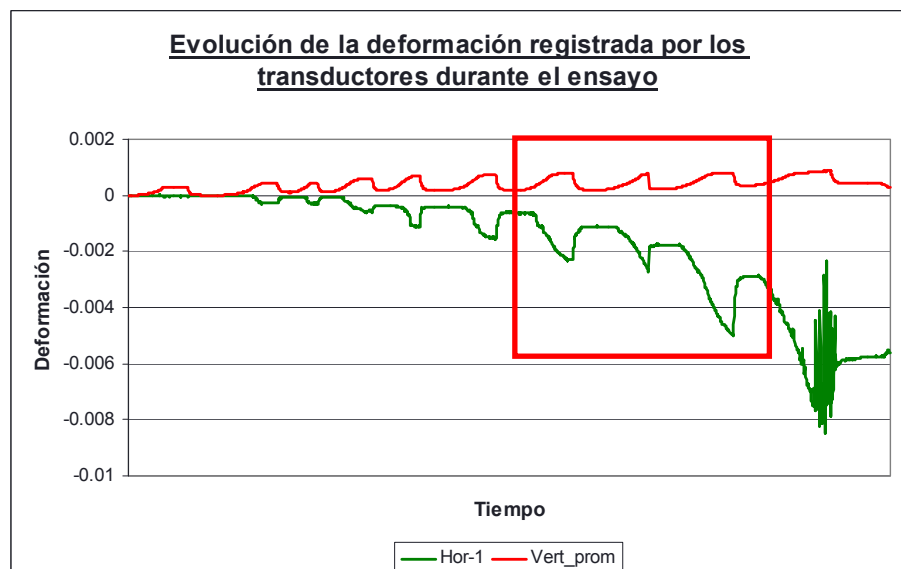


Fig. 4.6.70: Evolución temporal de la deformación vertical y horizontal promedio registrada en el área de ensayo.

Mediante la composición de la tensión (Fig. 4.6.68) y de las deformaciones promedio registradas (Fig. 4.6.70), en la Fig. 4.6.71 se presenta la ley tensión – deformación obtenida. Puede comprobarse como dicha gráfica está contaminada por la presencia de los picos relacionados por las sobrepresiones registradas por el transductor de presión en cada uno de los ciclos de bombeo.

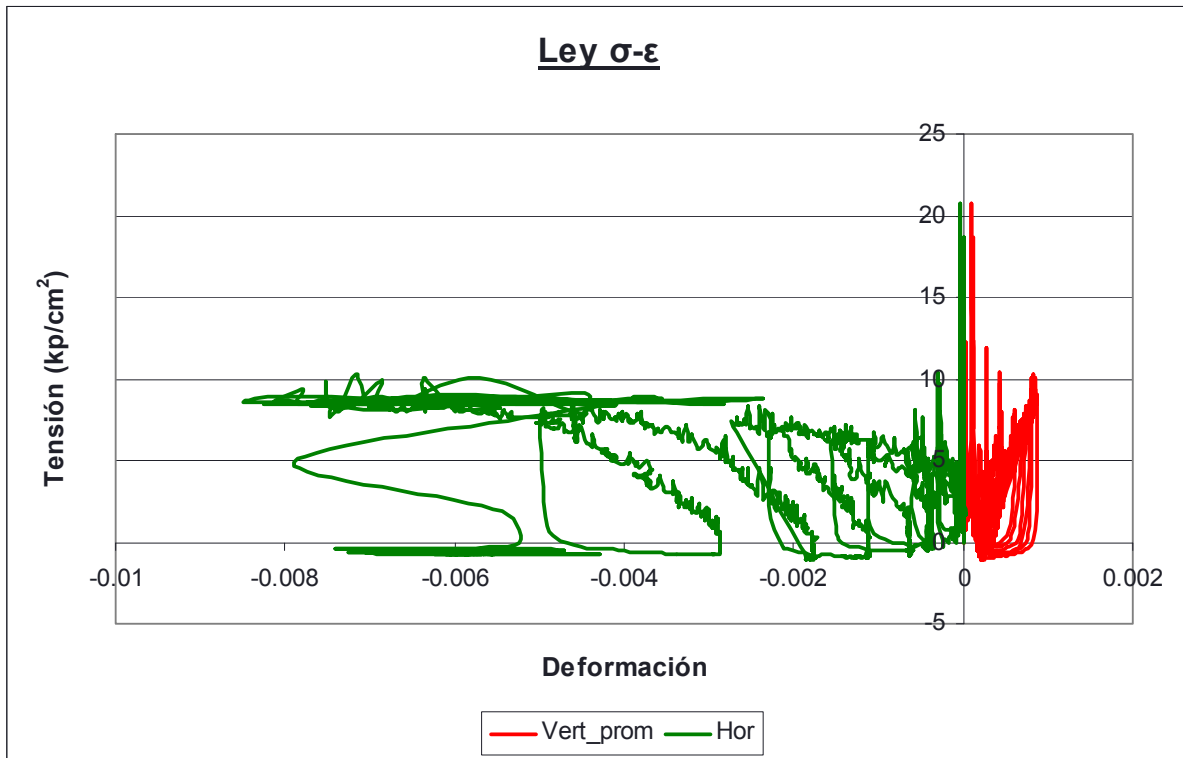


Fig. 4.6.71: Leyes σ - ϵ promedio obtenidas en el ensayo GPAd-B Doble.

Debido a la dificultad para interpretar dicha gráfica globalmente, se decidió aislar tres de los ciclos de presurizado – despresurizado (los remarcados en rojo en las Fig. 4.6.68 y 4.6.70). En la Fig. 4.6.72 se ilustra la evolución de la tensión introducida en el área de ensayo a lo largo de dichos 3 ciclos. Puede comprobarse que, pese a que sigue habiendo picos, estos están más laminados respecto de los registrados para niveles inferiores de presión.

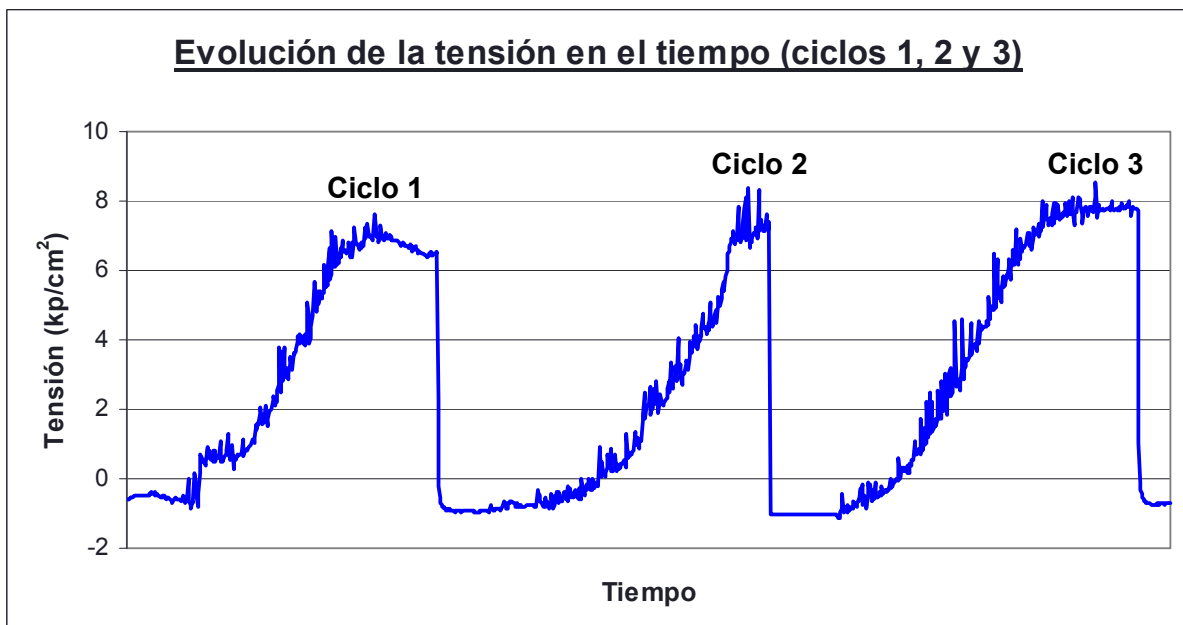


Fig. 4.6.72: Evolución temporal de la tensión vertical introducida en el muro de adobe, durante tres de los ciclos de presurizado-despresurizado realizados en el ensayo GPAd-B Doble.

En las Fig. 4.6.73-4.6.75 se han aislado las leyes tensión-deformación asociadas a cada uno de los 3 ciclos referidos. A cada caso se ha ajustado una regresión lineal en la rama elástica, cuya pendiente se corresponde con el módulo de deformación.

Fig. 4.6.73: Leyes σ - ϵ promedio obtenidas para el denominado ciclo 1 del ensayo GPaD-B Doble. El módulo de elasticidad obtenido es de 1,261.20 MPa.

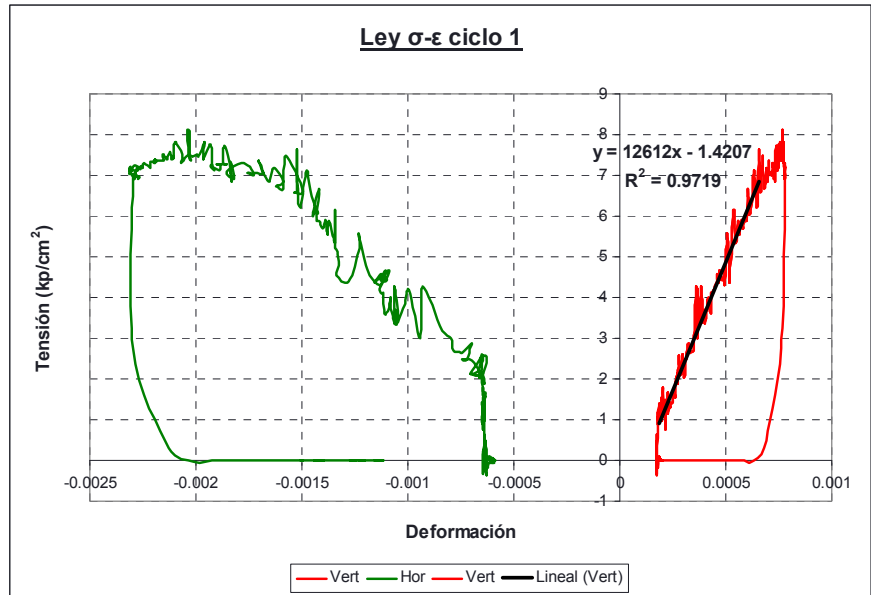


Fig. 4.6.74: Leyes σ - ϵ promedio obtenidas para el denominado ciclo 2 del ensayo GPaD-B Doble. El módulo de elasticidad obtenido es de 1,348.19 MPa.

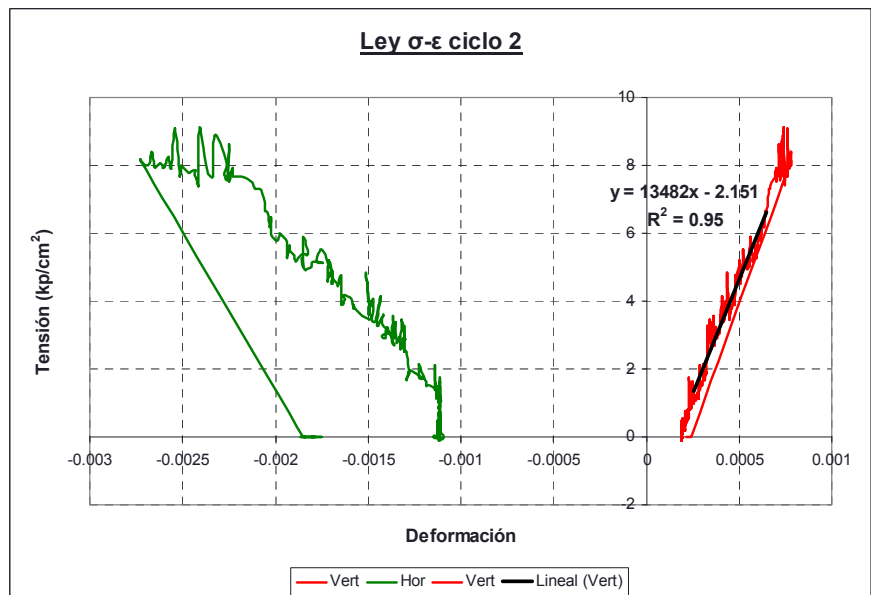
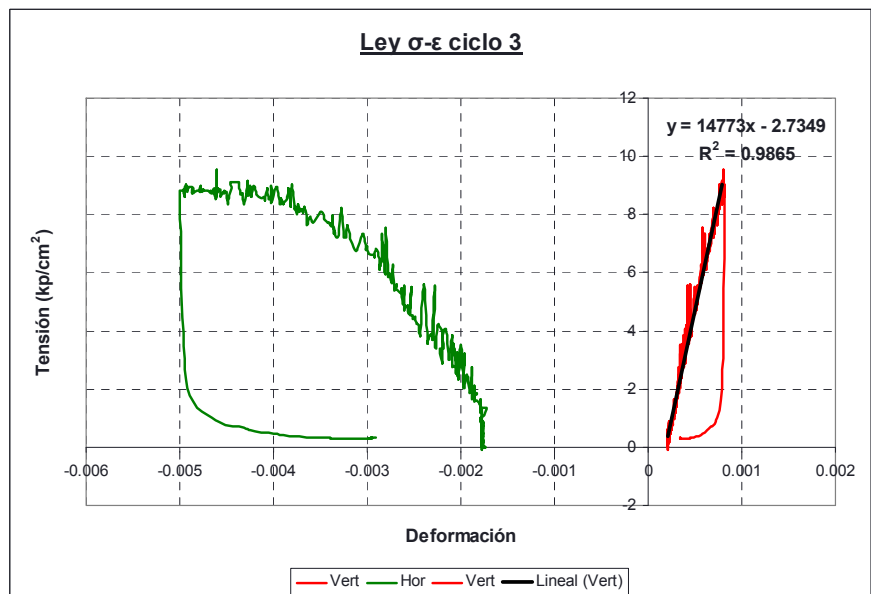


Fig. 4.6.75: Leyes σ - ϵ promedio obtenidas para el denominado ciclo 3 del ensayo GPaD-B Doble. El módulo de elasticidad obtenido es de 1,477.33 MPa.



Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Finalmente, en la Tabla 4.6.8 se sintetizan los módulos de elasticidad obtenidos en los tres ciclos comentados, alcanzando un promedio de 1,362.24 MPa.

Tabla 4.6.8: Módulo de elasticidad promedio obtenido para el área ensayada del muro de adobe.

	E (MPa)
Ciclo 1	1,261.20
Ciclo 2	1,348.19
Ciclo 3	1,477.33
	1,362.24

En las Fig. 4.6.76 y 4.6.77 se ha representado el área de ensayo con la finalidad de ubicar la posición de los puntos de control en el conjunto de la fábrica.

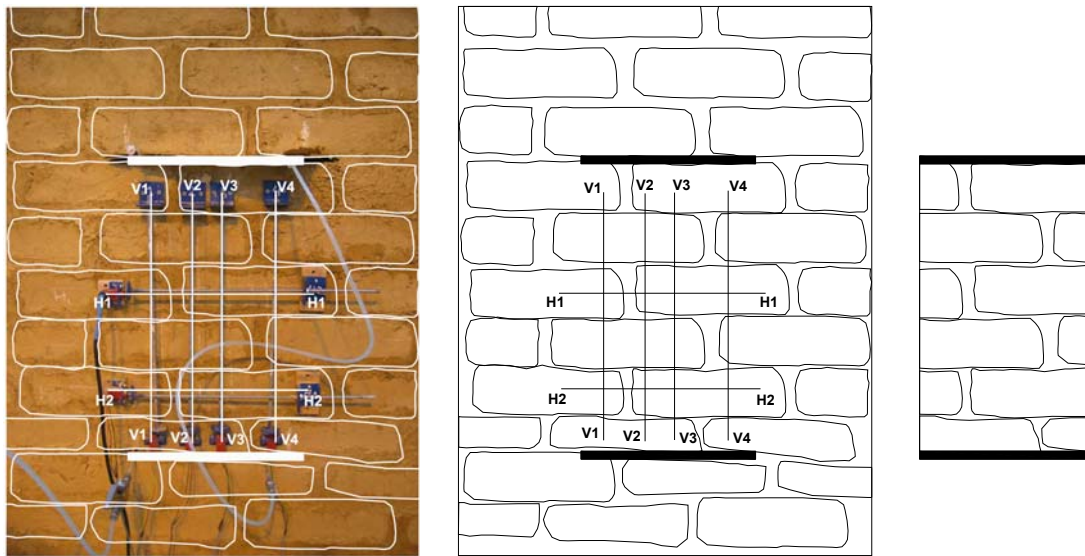


Fig. 4.6.76 y 4.6.77: Croquis del área de ensayo realizado.

Fig. 4.6.78: Detalle del área movilizada entre los dos gatos planos.

Por su parte en la Fig. 4.6.78 se ha individualizado el área rectangular definida por dos gatos planos y sendas verticales por sus extremos, con el objetivo de cuantificar, en superficie, la relación existente entre el área de mortero de adobe. En este sentido en la Tabla 4.6.9 se presentan las áreas computadas y la relación referida.

Tabla 4.6.9 Área total, de adobe y de mortero calculadas a partir de la Fig. 4.6.78. Relación entre el área de mortero y el área de adobe.

A_{total} (cm ²)	2028.02
A_{adobes} (cm ²)	1753.24
$A_{mortero}$ (cm ²)	274.78
$A_{mortero}/A_{adobes}$	0.16
E (MPa)	1,362.24

4.6.7 Ensayos mini-presurométricos desarrollados en el muro de adobe.

La campaña experimental mediante mini-presurómetro en el muro de adobe estuvo constituida por tres ensayos, los cuáles se ilustran en la Fig. 4.6.79.

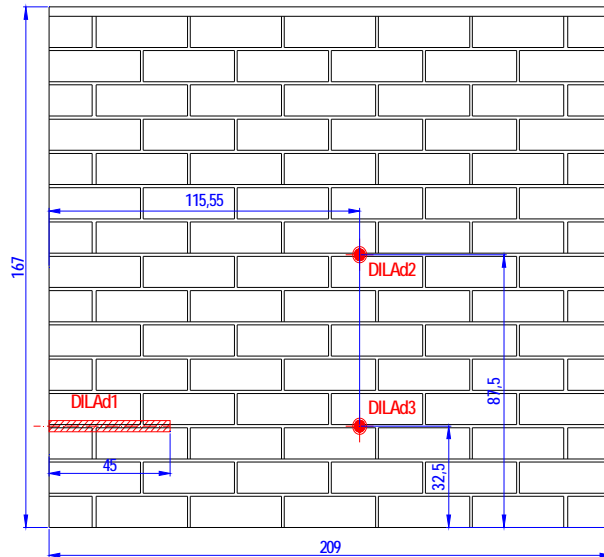


Fig. 4.6.79: Ubicación de los tres ensayos mini-presurométricos realizados en el muro de adobe.

4.6.7.1 Ensayo mini-presurométrico DILAd1.

Una vez ejecutada la perforación y montado el dispositivo de ensayo, se pasó a introducir la sonda y a realizar el ensayo, presurizando de forma creciente la sonda y registrando el volumen inyectado en la misma (Fig. 4.6.80).



Fig. 4.6.80: Detalle general de la perforación realizada, mientras se está llevando a cabo el montaje del dispositivo para la realización del mini-presurometro DILAd1.

Tabla 4.6.10: Incrementos volumétricos obtenidos en el ensayo mini-presurométrico DILAd1 realizado en el muro de adobe.

Presión (Ba)	Incrementos de volumen (cm ³)		
	15"	30"	60"
0	0	0	0
1	60	65	67.5
2	90	91	92
3	107.5	107.5	108
4	125	127.5	130
5	143	144	145
6	151	151	152
7	162	162.5	164
8	185	190	205
9	290	330	-
10	410	f/r	f/r

En la Tabla 4.6.10 se relacionan los incrementos volumétricos obtenidos durante el ensayo para cada nivel de presión introducido. Igualmente, en las Fig. 4.6.81 y 4.6.82 se representa la curva de expansión obtenida tras 15", 30" y 60" de introducir el nivel de presión correspondiente.

El módulo presurométrico puede obtenerse según la expresión siguiente:

$$E_{PMT} = 2 \cdot (1 + \mu) \cdot V \cdot \frac{\Delta p}{\Delta V} = 2 \cdot (1 + \mu) \cdot \left(V_C + \frac{V_f + V_0}{2} \right) \cdot \left(\frac{p_f}{V_f} - \frac{p_0}{V_0} \right) \quad (4.6.1)$$

En base a la estimación que se realizó en el capítulo 3.4 del parámetro V_C , volumen inicial de la célula de medición, como la ordenada en el origen de la recta que da el mejor ajuste con la segunda parte de la curva de expansión referida cuando se realiza un ensayo de calibración de la sonda en un tubo de acero, se obtuvo $V_C = 124 \text{ cm}^3$.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Por su parte:

- Comienzo de la fase pseudo-elástica: $V_0 = 143\text{cm}^3$; $p_0 = 5\text{bar}$
- Final de la fase pseudo-elástica: $V_f = 162\text{cm}^3$; $p_f = 7\text{bar}$

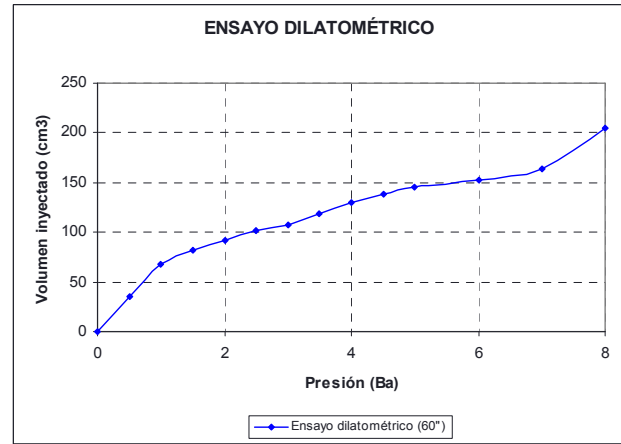
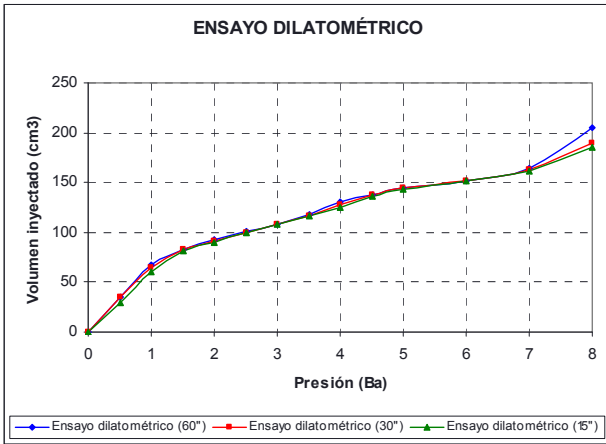


Fig. 4.6.81 y 4.6.82: Curvas de expansión de la sonda mini-presurométrica empleada en el ensayo a diferentes tiempos.

Suponiendo un **coeficiente de Poisson de 0.33**, puede obtenerse un **módulo presurométrico de 77 Ba**.

Tabla 4.6.11: Coordenadas (p,V) de los puntos del ensayo DILAd1, en fase plástica.

Fase plástica		
V (cm ³)	P (Ba)	log V
185	8	2.2672
290	9	2.4624
410	10	2.6128

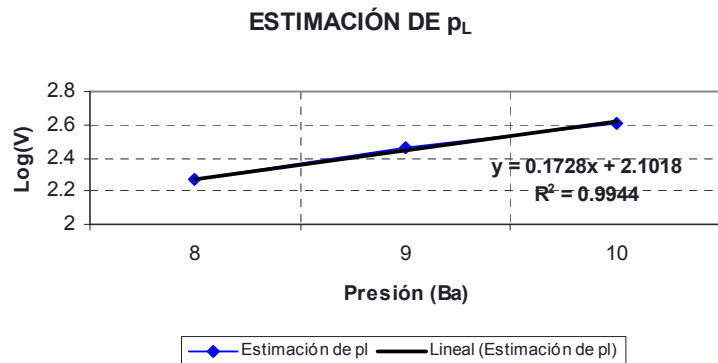


Fig. 4.6.83: Estimación de la presión última, p_L , en base a extrapolación.

Por su parte, en base a los datos disponibles de la fase plástica (Tabla 4.6.11) puede estimarse la tensión última del material, p_L , en base al incremento volumétrico al final del ensayo, V_L , mediante extrapolación, dado que la relación gráfica entre la presión y el logaritmo del volumen inyectado es aproximadamente lineal para la fase plástica (Fig. 4.6.83).

El volumen final puede obtenerse en base a la expresión $V_L = 2 \cdot V_0 + V_C$, por tanto dicho volumen alcanza un valor de 410 cm^3 .

Por lo tanto, en base a la regresión lineal obtenida para la fase plástica y teniendo en cuenta el valor estimado del volumen final, se obtendría una **presión última del orden de los 3 Ba**.

4.6.7.2 Ensayo mini-presurométrico DILAd2.

Una vez ejecutada la perforación y montado el dispositivo de ensayo, se paso a introducir la sonda y a realizar el ensayo, presurizando de forma creciente la sonda y registrando el volumen inyectado en la misma (Fig. 4.6.84).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido



Fig. 4.6.84: Detalle general de la zona de ensayo una vez finalizado, puede apreciarse el agrietamiento radial a consecuencia de la presión introducida durante el ensayo mini-presurómetro DILAd2.

Tabla 4.6.12: Incrementos volumétricos obtenidos en el ensayo mini-presurómetro DILAd2.

Presión (Ba)	Incrementos de volumen (cm ³)		
	15"	30"	60"
0	0	0	0
1	60	62	62.5
2	102.5	104	104
2.5	111	112	112.5
3	116	116	117
3.5	120	120	120
4	124	124	124
4.5	126	126	126
5	129	129	129
6	133	133	133
7	135	135	135
8	137	137.5	145
9	160	165	180
10	193	200	220
11	232	243	265

En la Tabla 4.6.12 se relacionan los incrementos volumétricos obtenidos durante el ensayo para cada nivel de presión introducido. Igualmente, en las Fig. 4.6.85 y 4.6.86 se representa la curva de expansión obtenida tras 15", 30" y 60" de introducir el nivel de presión correspondiente.

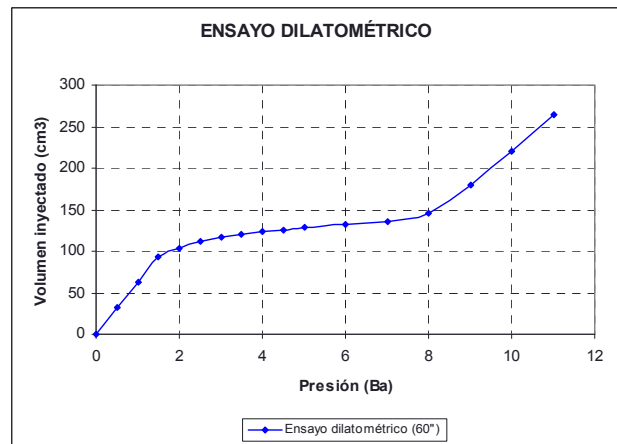
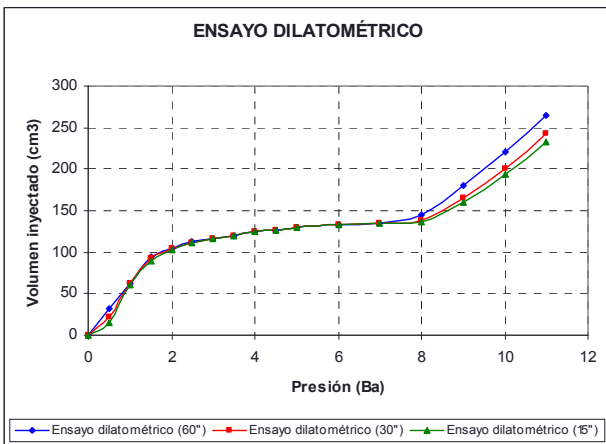


Fig. 4.6.85 y 4.6.86: Curvas de expansión de la sonda mini-presurométrica empleada en el ensayo a diferentes tiempos.

En base a la ecuación 4.6.1, puede obtenerse el módulo presurométrico, partiendo del inicio y final de la fase pseudo-elástica:

- Comienzo de la fase pseudo-elástica: $V_0 = 117\text{cm}^3$; $p_0 = 3\text{bar}$
- Final de la fase pseudo-elástica: $V_f = 135\text{cm}^3$; $p_f = 7\text{bar}$

Suponiendo un **coeficiente de Poisson de 0.33**, puede obtenerse un **módulo presurométrico de 148 Ba**.

Por su parte, en base a los datos disponibles de la fase plástica (Tabla 4.6.13) puede estimarse la tensión última del material, p_L , en base al incremento volumétrico al final del ensayo, V_L , mediante extrapolación, dado que la relación gráfica entre la presión y el logaritmo del volumen inyectado es aproximadamente lineal para la fase plástica (Fig. 4.6.87).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.6.13: Coordenadas (p,V) de los puntos del ensayo DILAd2, en fase plástica.

Fase plástica		
V (cm ³)	P (Ba)	log V
145	8	2.1614
180	9	2.2553
220	10	2.3424
265	11	2.4232

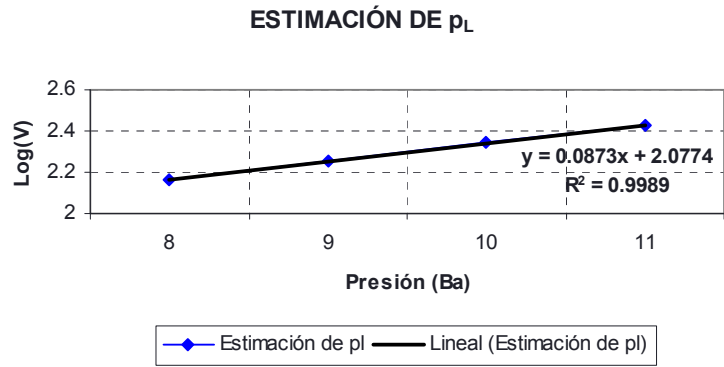


Fig. 4.6.87: Estimación de la presión última, p_L , en base a extrapolación.

El volumen final puede obtenerse en base a la expresión $V_L = 2 \cdot V_0 + V_C$, por tanto dicho volumen alcanza un valor de 358 cm³.

Por lo tanto, en base a la regresión lineal obtenida para la fase plástica y teniendo en cuenta el valor estimado del volumen final, se obtendría una **presión última del orden de los 5 Ba**.

4.6.7.3 Ensayo mini-presurométrico DILAd3.

Una vez ejecutada la perforación y montado el dispositivo de ensayo, se paso a introducir la sonda y a realizar el ensayo, presurizando de forma creciente la sonda y registrando el volumen inyectado en la misma (Fig. 4.6.88).

En la Tabla 4.6.14 se relacionan los incrementos volumétricos obtenidos durante el ensayo para cada nivel de presión introducido. Igualmente, en las Fig. 4.6.89 y 4.6.90 se representa la curva de expansión obtenida tras 15", 30" y 60" de introducir el nivel de presión correspondiente.



Fig. 4.6.88: Instante captado durante la ejecución del ensayo mini-presurométrico DILAd3.

Tabla 4.6.14: Incrementos volumétricos obtenidos en el ensayo mini-presurométrico DILAd3.

Presión (Ba)	Incrementos de volumen (cm ³)		
	15"	30"	60"
0	0	0	0
1	55	62	62.5
2	114	114	114
3	136	137	137.5
4	151	152	153
5	160	160	161
6	166	167	167
7	171	171	172
8	175	175	175
9	179	180	180
10	182.5	182.5	183
11	185	186	186
12	189	189	189
13	192	192	192.5
14	195	195	196
15	199	199	200
16	203	204	206
17	212	216	220

En base a la ecuación 4.6.1, puede obtenerse el módulo presurométrico, partiendo del inicio y final de la fase pseudo-elástica:

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

- Comienzo de la fase pseudo-elástica: $V_0 = 167\text{cm}^3$; $p_0 = 6\text{bar}$
- Final de la fase pseudo-elástica: $V_f = 200\text{cm}^3$; $p_f = 15\text{bar}$

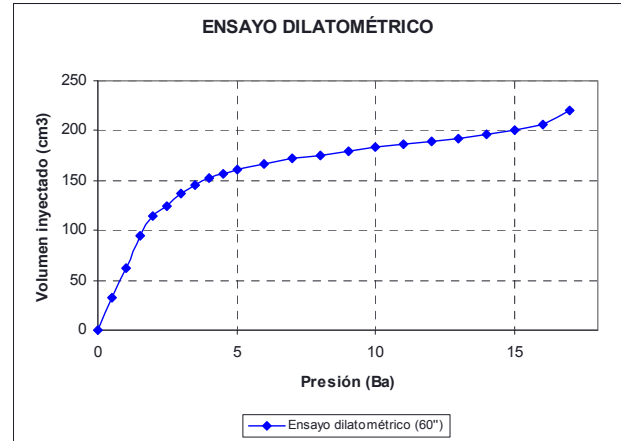
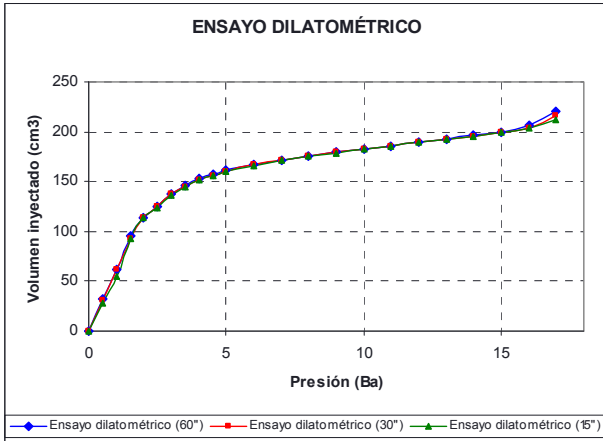


Fig. 4.6.89 y 4.6.90: Curvas de expansión de la sonda mini-presurométrica empleada en el ensayo a diferentes tiempos.

Suponiendo un **coeficiente de Poisson de 0.33**, puede obtenerse un **módulo presurométrico de 223 Ba**.

Por su parte, en base a los datos disponibles de la fase plástica (Tabla 4.6.15) puede estimarse la tensión última del material, p_L , en base al incremento volumétrico al final del ensayo, V_L , mediante extrapolación, dado que la relación gráfica entre la presión y el logaritmo del volumen inyectado es aproximadamente lineal para la fase plástica (Fig. 4.6.91).

Tabla 4.6.15: Coordenadas (p,V) de los puntos del ensayo DILAd3, en fase plástica.

Fase plástica		
V (cm ³)	P (Ba)	log V
200	15	2.3010
206	16	2.3139
220	17	2.3424

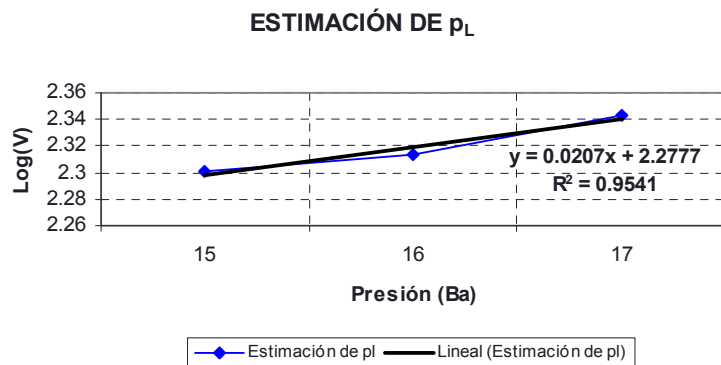


Fig. 4.6.91: Estimación de la presión última, p_L , en base a extrapolación.

El volumen final puede obtenerse en base a la expresión $V_L = 2 \cdot V_0 + V_C$, por tanto dicho volumen alcanza un valor de 458cm^3 .

Por lo tanto, en base a la regresión lineal obtenida para la fase plástica y teniendo en cuenta el valor estimado del volumen final, se obtendría una **presión última del orden de los 8 Ba**.

Finalmente, en las Fig. 4.6.92 y 4.6.93 se presenta la zona de ensayo tras la ejecución del mini-presurometro DILAd3. Puede apreciarse como el muro quedó, literalmente, seccionado a consecuencia de los daños acumulados durante los ensayos DILAd2 y DILAd3.

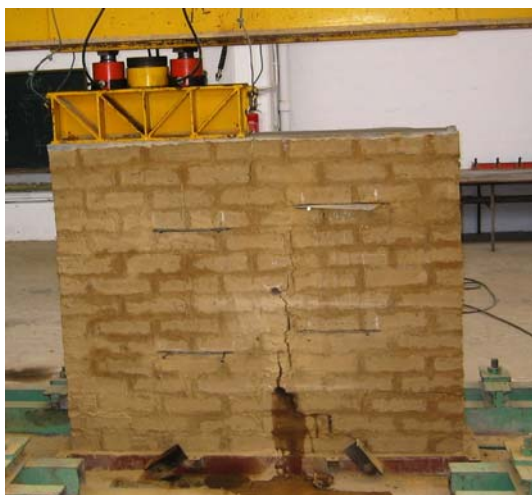


Fig. 4.6.92: Aspecto general de la zona de ensayo tras la ejecución del ensayo DILAd3.

Fig. 4.6.93: Detalle de la zona del ensayo mini-presurométrico DILAd3. Puede apreciarse el agrietamiento radial generado, de amplitud importante, así como la deformación desarrollada. A consecuencia de ésta se produjo la rotura de la sonda.

4.6.8 Demolición controlada

Con la finalidad de obtener la mayor cantidad de datos posibles sobre la geometría de las rozas ejecutadas en los ensayos de gato plano GPAd-A y GPAd-B, y de las perforaciones realizadas en relación con los ensayos mini-presurométricos ejecutados, se realizó una demolición controlada del muro de adobe, tomando datos y fotografías a lo largo del proceso.

4.6.8.1 GPAd-A

4.6.8.1.1 GPAd-A-Superior

En la Fig. 4.6.94 se ilustra la posición relativa del gato con los adobes circundantes, ya en fase de demolición controlada. Dichos adobes fueron desmontándose paulatinamente, extremando el cuidado para no alterar la huella de la roza, ni la posición del gato plano GPAd-A-Superior respecto de ésta.

En la Fig. 4.6.95 se ilustra la posición relativa del gato plano respecto de la roza realizada.

Fig. 4.6.94: Detalle de la posición del gato plano GPAd-A-Superior en fase de demolición del muro de adobe.

Fig. 4.6.95: Planta en la que puede comprobarse la posición relativa del gato plano respecto de la roza.



Por su parte, en la Fig. 4.6.96 se presenta nuevamente la posición relativa del gato plano GPAd-A-Superior, respecto de la roza, una vez marcados los contornos, en el instante de remoción del gato plano.

A partir de la Fig. 4.6.97, empleando un programa de cad, pudo estimarse con relativa precisión el área de la roza. En base a dicha magnitud, y conociendo la geometría del gato plano empleado en el ensayo (Semioval 350x260x3.5mm), se determinó la relación geométrica k_a ($K_{\text{gato-roza}}$), que alcanzó un valor de 0.866.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Fig. 4.6.96: Contornos de la roza y del gato plano GPAd-A-Superior.



Fig. 4.6.97: Relación gráfica entre el área de la roza (898.61 cm²) y área del gato plano doble GPAd-A-Superior, correspondiente en posición con el ensayo GPAd-Simple (778.56 cm²).



4.6.8.1.2 GPAd-A-Inferior

En la Fig. 4.6.98 se ilustra la posición del gato plano en relación con los adobes circundantes en una fase avanzada de la demolición. Por su parte la Fig. 4.6.99 presenta la huella impresa por la roza ejecutada y por la presión introducida en el muro por el gato GPAd-A-Inferior, durante el posterior ensayo de gato plano doble.

Fig. 4.6.98: Detalle de la posición del gato plano GPAd-A-Inferior en fase de demolición del muro de adobe.



Fig. 4.6.99: Aspecto general de la huella residual existente en el muro tras la realización del ensayo GPAd-A Doble.

Igualmente la Fig. 4.6.100 representa una planta más detallada de la huella referida, puede comprobarse como en el ensayo se movilizaron cuatro adobes diferentes con sus respectivas juntas.



Fig. 4.6.100: Detalle de la huella residual existente en el muro tras la realización del ensayo de gato plano doble, a nivel del GPAd-A-inferior.

Fig. 4.6.101: Replanteo del área de la roza (927.02 cm²) y el área del gato plano GPAd-A-Inferior (778.56 cm²).

Finalmente, a partir de la Fig. 4.6.101, empleando un programa de cad, pudo estimarse con relativa precisión el área de la roza. En base a dicha magnitud, y conociendo la geometría del gato

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

plano empleado en el ensayo (Semioval 350x260x3.5mm), se determinó la relación geométrica k_a ($K_{\text{gato-roza}}$), que alcanzó un valor de 0.840.

4.6.8.2 GPAd-B

4.6.8.2.1 GPAd-B-Superior

En las Fig. 4.6.102 y 4.6.103 se ilustra la posición relativa del gato con los adobes circundantes, al comienzo de la demolición controlada.

En la Fig. 4.6.104 se presenta nuevamente la posición relativa del gato plano GPAd-B-Superior, respecto de la roza, una vez marcados los contornos. Mientras que en la Fig. 4.6.105, empleando un programa de cad, pudo estimarse con relativa precisión el área de la roza.



Fig. 4.6.102: Detalle de la posición del gato plano GPS-B-Superior en fase de demolición del muro de adobe.

Fig. 4.6.103: Detalle de la posición relativa del gato plano respecto de los adobes circundantes.



Fig. 4.6.104: Detalle de la posición relativa del gato plano respecto de la roza.

Fig. 4.6.105: Replanteo de la posición de la roza (de área 1,043.60 cm²) respecto del gato plano doble GPAd-B-Superior (778.56 cm²).

En base al área obtenida para la roza ejecutada, y conociendo la geometría del gato plano empleado en el ensayo (Semioval 350x260x3.5mm), es posible obtener la relación geométrica k_a ($K_{\text{gato-roza}}$), que alcanza un valor de 0.746.

4.6.8.2.2 GPAd-B-Inferior

En la Fig. 4.6.106 se ilustra la posición relativa del gato con los adobes circundantes. Igualmente, en la Fig. 4.6.107 se muestra una vista lateral de la ubicación del gato plano GPAd-B-Inferior respecto de la roza ejecutada.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Fig. 4.6.106: Detalle de la posición del gato plano GPS-B-Inferior en fase de demolición del muro de adobe.



Fig. 4.6.107: Vista lateral de la posición del gato plano relacionado.



De la misma forma, en la Fig. 4.6.108 se presenta una planta de la posición relativa del gato plano GPAd-B-Inferior, respecto de la roza, una vez marcados los contornos.

Fig. 4.6.108: Contornos de la roza y del gato plano GPAd-B-Inferior.



Fig. 4.6.109: Replanteo de la posición de la roza (de área 924.09 cm²) respecto del gato plano inferior GPAd-B Doble (778.56 cm²).



A partir de la Fig. 4.6.109, empleando un programa de cad, pudo estimarse con relativa precisión el área de la roza. En base a dicha magnitud, y conociendo la geometría del gato plano empleado en el ensayo (Semioval 350x260x3.5mm), se determinó la relación geométrica k_a ($K_{\text{gato-roza}}$), que alcanzó un valor de 0.843.

4.6.8.3 DILAd1

En la Fig. 4.6.110 se ilustra una perspectiva general de la localización del dilatómetro DILAd1. Por su parte en la Fig. 4.6.111 se presenta la huella dejada por la perforación, realizada mediante corona hueca, tanto en la hilada inferior de adobe como en la inmediatamente superior.

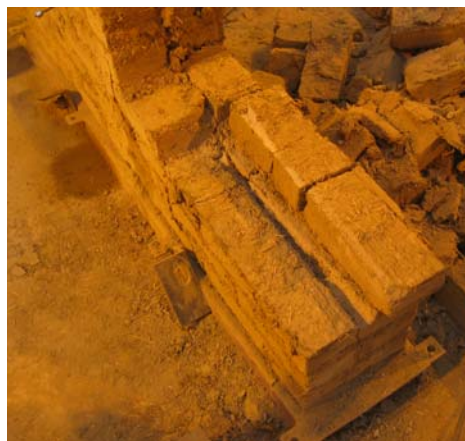


Fig. 4.6.110. Perspectiva general de la localización del dilatómetro DILAd1.

Fig. 4.6.111: Perspectiva de la huella dejada por la perforación tanto en la hilada de adobe inferior como en la superior.

Fig. 4.6.112: Detalle de la perforación involucrada en el ensayo DILAd1.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Finalmente, la Fig. 4.6.112 ilustra un detalle de la perforación involucrada en el ensayo de referencia.

4.6.8.4 DILAd2

Las Fig. 4.6.113 - 4.6.115 detallan, desde diferentes puntos de vista, la perforación realizada, transversalmente al muro, para la ejecución del ensayo DILAd2.

Conviene observar en las tres figuras las grietas existentes en los adobes circundantes, en disposición radial respecto de la perforación, a consecuencia de la presión introducida por el presurómetro durante el ensayo.



Fig. 4.6.113 y 4.6.114: Detalle de la perforación relacionada con el ensayo DILAd2. Pueden apreciarse las grietas radiales remanentes del ensayo en los adobes circundantes a dicha perforación.

Finalmente, en la Fig. 4.6.116 se muestra una vista lateral de la zona de ensayo.



Fig. 4.6.115: Vista frontal de la perforación. Pueden apreciarse las grietas radiales remanentes del ensayo en los adobes circundantes a dicha perforación y uno de los planos de colapso, en primer término.

Fig. 4.6.116: Vista lateral de la perforación relacionada con el ensayo DILAd2.

4.6.8.5 DILAd3

En lo que respecta al ensayo DILAd3 en la Fig. 4.6.117 se presenta un detalle de la perforación realizada en dirección transversal al muro de adobe, mientras que en la Fig. 4.6.118 se ilustra la posición relativa de la sonda presurométrica respecto de la misma. Puede apreciarse en esta última imagen la holgura existente entre el contorno de la perforación y la sonda, a consecuencia de la expansión radial experimentada por el área de ensayo a consecuencia de la presión introducida durante la ejecución de la prueba.



Fig. 4.6.117: Detalle de la perforación relacionada con el ensayo DILAd3.

Fig. 4.6.118: Posición relativa de la sonda respecto de la perforación dilatada radialmente a consecuencia del ensayo mini-presurométrico realizado.

4.6.9 Contraste de los resultados obtenidos en el muro de adobe.

4.6.9.1 Bondad de los niveles tensionales obtenidos mediante gato plano simple.

En relación con el ensayo de gato plano simple, en la Tabla 4.6.16 se refiere el nivel tensional experimental obtenido para la relación geométrica existente entre del gato plano y el área de la roza.

Tabla 4.6.16: Comparación entre el nivel tensional experimental y el estimado teóricamente en el ensayo GPAd-A Simple.

	K_m	K_a	$\sigma_{\text{experimental}}$ (MPa)	σ_{media} (MPa)	$\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{media}}$
$K_{\text{gato-roza}}$	0.713	0.866	0.63	0.57	1.10

Por su parte, la tensión vertical media “teórica” en el plano del gato plano, suponiendo un ángulo de apertura de carga de 35° (apartado 4.6.4), fue de 0.57 MPa (Fig. 4.6.37).

$$\sigma_{\text{media}} = \frac{25,560.00kp}{132.5634cm^2} = 5.67 = 0.57MPa \frac{kp}{cm^2} \text{ (compresión)}$$

En tanto que es la primera ocasión que en la comunidad científico-técnica internacional se aplica la técnica de gato plano simple a un muro de adobe, en laboratorio, no se disponen de datos de contraste. Si bien puede apreciarse como el error cometido en la estimación del nivel tensional fue reducido (10%).

4.6.9.2 Bondad de las características mecánicas obtenidas mediante gato plano doble.

La bondad de los resultados se ha tratado de estimar mediante la comparación de los módulos de elasticidad obtenidos mediante gato plano doble y el obtenido mediante un ensayo a compresión al uso, empleando para el registro de desplazamientos transductores potenciométricos.

En la Tabla 4.6.17 se presenta la comparación entre los módulos de elasticidad obtenidos mediante los ensayos de gato plano doble y el estimado mediante transductores potenciométricos. La tensión introducida a la fábrica, en cada ciclo de presión, ha sido obtenida empleando como coeficiente geométrico el propuesto por la normativa de referencia, que relaciona el área del gato con la de la roza ejecutada ($K_{\text{gato-roza}}$). Igualmente, se recuerda que el módulo de elasticidad obtenido mediante transductores (465.78 N/mm²) fue obtenido en el apartado 4.6.5.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 4.6.17: Comparación entre las características mecánicas obtenidas mediante transductores y las obtenidas experimentalmente en los ensayos de gato plano doble ejecutados en un muro de adobe en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

	K_a	K_m	E_{exp} (N/mm ²)	$E_{teorico}$ (N/mm ²)	$E_{exp}/E_{teorico}$
GPAAd-A Doble	0.853	0.855	1,442.38	465.78	3.10
GPAAd-B Doble ¹	0.794	0.855	1,362.24	465.78	2.92
			1,402.31		3.01

Puede apreciarse que la relación obtenida no se ajusta a lo que cabría esperar. A su vez, en tanto que es la primera ocasión que en la comunidad científico-técnica internacional se aplica la técnica de gato plano doble a un tapial, no se disponen de datos de contraste.

En relación con los ensayos de gato plano simple y doble realizados en la Tabla 4.6.18 se sintetizan los principales valores alcanzados.

Tabla 4.6.18: Resultados de los ensayos de gato plano realizados en un muro de adobe ensayado en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

Fecha	Cód.	$A_{mortero}/A_{piezas}$	$E_{sec, prom}$ (MPa)	v_{prom}	$\sigma_{servicio}$ (MPa)	$\sigma_{Límite\ elástico}$ (MPa)	σ_{rotura} (MPa)	E/σ_k^2
07-10-09	GPAAd-A Simple	-	-	-	0.63	-	-	-
05-11-09	GPAAd-A Doble	0.23	1,442.38	0.32	-	0.50	1.07	1,925.7
30-09-09	GPAAd-B Doble	0.16	1,362.24	-	-	-	-	-

El valor estimado para la tensión de rotura a compresión del muro de adobe, obtenido ajustando una regresión logarítmica a la parte de comportamiento no lineal de la envolvente obtenida en el ensayo de gato plano doble (Fig. 4.5.56), alcanza un valor de 1.07 MPa para una deformación en rotura del 3‰.

En este sentido, para reforzar el argumento relacionado con la tensión última estimada, conviene exponer que, para una presión instalada en el gato de 14 Ba (tensión equivalente en el muro de 1.02 MPa), se produjo un agrietamiento vertical aparente (Fig. 4.6.57). Dicha tensión es del mismo orden que la tensión a rotura estimada (1.07 MPa).

Por otro lado, cabe relacionar que la deformación en rotura obtenida en los ensayos a compresión realizados sobre adobes independientes (apartado 4.6.5) alcanzó un valor promedio del 5%, por ello que para el muro de adobe la deformación supuesta del 3‰ pueda parecer un umbral de deformación en rotura reducido, si bien queda del lado de la seguridad. Si se supone una deformación del 5%, la tensión de rotura estimada mediante el ajuste logarítmico referido alcanzaría un valor de 1.71 MPa, cifra un poco inferior a la resistencia a compresión promedio obtenida en los ensayos a compresión realizados sobre los adobes independientes (1.78 MPa, Tabla 4.6.1), aspecto lógico si cabe dado que el material empleado para aparejar los adobes (apartado 4.6.1) contribuiría de forma negativa en la resistencia a compresión de la fábrica en relación a la de los adobes.

4.6.9.3 Bondad de los ensayos mini-presurométricos desarrollados en el muro de adobe

Fueron realizados tres ensayos mini-presurométricos en el seno del muro de adobe. El primero de ellos fue realizado contenido en el plano del muro, mientras que los dos siguientes la perforación

¹ Ejecución mediante transductores de desplazamiento y de presión.

² De acuerdo con las recomendaciones del CEN, Eurocode 8, Part 1-4, el valor de σ_k (valor característico) debe ser obtenido multiplicando el valor medio, σ_{rotura} , por un factor de 0.7.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

fue realizada perpendicular al plano del elemento portante, por lo que fue preciso emplear dos tubos rígidos de acero, de diámetro ajustado con respecto al de la sonda, en los extremos de la misma para evitar cualquier posible “sobredeformación” de la sonda que induzca tanto al colapso de ésta, como a una mala interpretación de los resultados.

En la Tabla 4.6.19 se resume, para los tres ensayos mini-presurométricos realizados, la presión de rotura estimada y el módulo presurométrico obtenido.

Tabla 4.6.19: Presión última y módulo presurométrico estimado en los dos ensayos mini-presurométricos realizados en el Tapial

Fecha	Ensayo	p_L (MPa)	E_{PMT} (MPa)
13/10/2009	DILAd1	0.3	7.7
07/11/2009	DILAd2	0.5	14.8
13/11/2009	DILAd3	0.8	22.3
		0.53	14.9

Finalmente en la Tabla 4.6.20 se sintetizan los resultados alcanzados por varias metodologías del módulo de elasticidad y de la resistencia a compresión.

Tabla 4.6.20: Módulos de elasticidad y resistencia a rotura estimada en el muro de adobe por varias metodologías.

Fecha	E (MPa)	σ_{rotura} (MPa)	E/σ_k^3
Rotura a compresión adobes independientes	130.88 (Tabla 4.6.1)	1.78 (Tabla 4.6.1)	105.04
Transductores potenciométricos	465.78 (Tabla 4.6.3)	-	-
Gato plano doble (asociado a deformación en rotura del 3‰)	1,402.31 ⁴	1.07	1872.24
Gato plano doble (asociado a deformación en rotura del 2‰)	1,402.31	1.71	1171.52
Mini-presurómetros	14.9	0.53	40.16

Puede apreciarse como el valor obtenido para la resistencia a compresión, sensiblemente, es del mismo orden en todos los ensayos referidos, pudiendo establecerse en el umbral de 1 MPa.

No ocurre lo mismo en lo referente al módulo de deformación. En primer lugar es necesario referir que el denominado módulo presurométrico (E_{PMT}) no parece corresponderse de forma directa con el módulo de elasticidad longitudinal, en tanto que el valor que alcanza es bastante inferior al obtenido mediante gato plano doble o mediante transductores.

Finalmente, al igual que ocurrió al exponer los resultados del tapial, lo que si que sorprende es la diferencia manifestada entre el módulo de elasticidad obtenido mediante gato plano doble y el obtenido mediante transductores potenciométricos (Tabla 4.6.17). En este sentido sería necesario, además de ahondar en la problemática en trabajos experimentales futuros, el realizar una simulación numérica del muro de adobe (macromodelo), considerando respectivamente los parámetros mecánicos obtenidos mediante gato plano doble y mediante transductores, para estudiar en base a que características se ajustan mejor los resultados obtenidos en el ensayo de gato plano simple. Este aspecto será contrastado con posterioridad a la finalización de la tesis doctoral.

³ De acuerdo con las recomendaciones del CEN, Eurocode 8, Part 1-4, el valor de σ_k (valor característico) debe ser obtenido multiplicando el valor medio, σ_{rotura} , por un factor de 0.7.

⁴ Valor promedio obtenido en los dos ensayos de gato plano doble realizados en el tapial.

