



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

3

MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS EMPLEADOS EN LOS ENSAYOS

3.1 Materiales y procedimientos empleados en los ensayos con gatos planos.

El ensayo de gatos planos es un método directo e in situ que requiere solamente la remoción de una porción de mortero de las juntas. Puede considerarse como un ensayo ligeramente no destructivo (MDT) al ser un daño temporal y fácilmente reparable después de realizar el ensayo.

El ensayo de gato plano (o de gatos planos) es la técnica más utilizada para la evaluación no destructiva de algunas propiedades mecánicas en estructuras de obra de fábrica. Fundamentalmente, las técnicas de gatos planos tratan de obtener información estimativa y fiable sobre los siguientes parámetros:

- Nivel tensional de compresión en un punto de la estructura.
- Características de deformabilidad (módulo de deformación y coeficiente de Poisson) del material compuesto que conforma la obra de fábrica.
- Posibilidad de estimar, en ocasiones, la resistencia a compresión del material en el punto de ensayo.

El ensayo queda dividido en dos fases: en la primera, denominada de gato plano simple, se utiliza un gato plano para estimar el estado tensional de compresión en el punto elegido de la estructura; en la segunda fase, denominada de gato plano doble, se emplean dos gatos planos con el fin de estimar las características de deformabilidad del material existente entre los dos dispositivos referidos.

La metodología de ensayo se desarrolla en la normativa. En Europa, desde 1990, existen sendos documentos de referencia redactados por RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages):

- RILEM LUM.D.2 “In-situ stress tests on masonry based on the flat jack”.
- RILEM LUM.D.3 “In-situ strength/elasticity tests on masonry based on the flat-jack”.

Por su parte, en Estados Unidos dichos documentos fueron desarrolladas en 1991 por el ASTM (American Society for Testing and Materials):

- ASTM C1196 “In-situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flat-jack measurements”.
- ASTM C1197 “In-situ measurement of masonry deformability properties using flat-jack method”.

Obviamente, existen actualizaciones de dichos documentos normativos en años posteriores a los indicados.

Las técnicas de los gatos planos introducen **ventajas** notables con respecto a otras metodologías de examen aplicables a las estructuras en fábrica:

- Rapidez de ejecución. La simplicidad de la instrumentación (medida de la distancia entre puntos de control) y del equipo de carga, así como la rápida instalación, hacen que el ensayo completo (1ª y 2ª fase) pueda realizarse en 4-5 horas.
- Posibilidad de llevar a cabo el ensayo en cualquier posición de la fábrica.
- Bajo coste respecto a los ensayos de laboratorio y mayor representatividad de los resultados obtenidos.
- Técnica de ensayo de carácter ligeramente no destructiva (MDT). Al finalizar el ensayo se retira el gato de la fábrica con facilidad y se restauran las juntas de mortero.
- Posibilidad de utilizar los gatos planos como controladores de cualquier cambio en el estado de deformación del edificio durante la realización de trabajos de restauración.

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

- Permite evaluar la tensión límite de la fábrica en la puesta en carga con 2 gatos, incrementando la carga hasta que aparezca la primera fisura en los ladrillos.

En contrapartida, las **limitaciones** de las técnicas de gatos planos se encuadran en el desarrollo del ensayo:

- Los resultados obtenidos quedan estrechamente ligados a la capacidad del operario que lleva a cabo el ensayo.
- El personal no experto puede causar daños a la estructura y provocar situaciones de peligro para él mismo durante el desarrollo del ensayo.
- La fiabilidad de los resultados obtenidos dependen en gran medida de la ejecución de las rozas para la inserción de los gatos.

De forma complementaria al procedimiento expuesto en este capítulo puede obtenerse información complementaria tanto en el estado del arte desarrollado en esta tesis doctoral, como en las referencias bibliográficas referidas durante su exposición, en concreto, además de la normativa ASTM y RILEM relacionada, en BRE-Digest 409 (1995) y en Gregorczyk y Lourenço (2000) se trata el procedimiento de ensayo con bastante profundidad.

3.1.1 Localización del emplazamiento y acondicionamiento de la superficie.

El primer paso importante para la realización de un ensayo de estas características es la localización del emplazamiento y el acondicionamiento del mismo.

En relación con el emplazamiento, deberán evitarse los lugares de concentración de tensión, como cambios en la sección transversal y la periferia de huecos existentes.

La localización idónea para realizar un ensayo de gato plano simple es un tendel de al menos la longitud del gato plano susceptible de empleo (35 cm en los ensayos desarrollados en esta tesis doctoral), caso contrario la ejecución de la roza movilizaría, en parte, elementos pétreos o cerámicos de la estructura de fábrica.

Por su parte, en el caso del gato plano doble habría que encontrar dos tendeles horizontales, paralelos y en la misma vertical, de las dimensiones adecuadas. Al igual que ocurría en el caso del gato plano simple, caso contrario la ejecución de las rozas movilizaría, en parte, elementos pétreos o cerámicos de la estructura de fábrica.

Una vez elegido el emplazamiento de las rozas, debe de procederse al replanteo de los puntos de control. Es conveniente que se coloquen sobre los elementos pétreos y cerámicos de la fábrica, y nunca en las juntas de mortero, sobre pequeños materiales de relleno o en elementos extraños a la fábrica, para garantizar su adecuada fijación mecánica a lo largo del ensayo.

Para asegurar, dentro de lo posible, y sobre todo en superficies muy irregulares, la verticalidad y horizontalidad de los puntos de control debería emplearse un nivel (Fig. 3.1), de burbuja o digital.

A continuación debe procederse a la limpieza de la superficie, eliminando posibles pegotes de mortero u otros materiales que hayan podido quedarse adheridos a los mampuestos en los lugares elegidos para la disposición de los puntos de control.

Igualmente, hay que asegurarse que las irregularidades de las rocas no impidan realizar las medidas correctamente, o que su configuración no permita la correcta orientación de los puntos de control. En el caso de que exista algún saliente que impida realizar la medida de forma correcta habrá que eliminarlo. Para amolar la roca hasta conseguir una superficie apta para el ensayo, Fig. 3.2 y 3.3, se recomienda emplear una amoladora equipada con un disco de corte para piedra (se debe evitar la remoción de las irregularidades mediante maza y cincel, a golpes, dado que se podría generar una afección local en el comportamiento de la fábrica).



Fig. 3.1: Nivelado durante la fase de replanteo de los puntos de control necesarios para la ejecución de un ensayo de gato plano simple realizado en un contrafuerte de la iglesia del Seminario Mayor de Comillas (Cantabria, España).

Fig. 3.2: Preparación de una piedra en la que su forma no permitía realizar la medida de forma adecuada.

Fig. 3.3: Superficie plana rebajada adecuada para la realización del ensayo.

3.1.2 Pegado de los puntos de control

Los puntos de control para el montaje de los mecanismos de medida con extensómetro deben fijarse firmemente a la superficie para garantizar la precisión en la medición a lo largo del ensayo.

El procedimiento correcto para el pegado de los puntos de control comienza por pegar primero bien los ubicados en la parte inferior, bien los ubicados en la parte superior; para después usar los ya fijados como referencia para el posicionamiento de los restantes, comprobando que la longitud de control quede dentro del rango del comparador extensométrico empleado.

Dado que el comparador empleado en parte de los ensayos de esta tesis doctoral, tiene una longitud de medida de 20 cm, en el caso de los ensayos de gato plano doble en los que la longitud de control sea de 40 cm es necesario disponer tres puntos de control por cada longitud de medida. En ese caso se recomienda colocar primero los dispuestos en la hilada central, y usar ésta como referencia para posicionar los puntos de control superiores e inferiores. Para la colocación de los puntos de control horizontales, deben de fijarse primero los de un lado, para después posicionar los otros empleando los primeros como referencia.

Para el pegado de los puntos de control se ha utilizado un adhesivo bicomponente de la casa CEYS, denominado METAL CEYS, conocido como soldadura sintética, que funciona perfectamente en materiales cerámicos, pétreos de todo tipo y metales.



Fig. 3.4: Componente en forma de polvo.



Fig. 3.5: Componente en estado líquido.



Fig. 3.6: Mezcla de ambos con un espátula hasta conseguir viscosidad deseada.

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

El procedimiento de pegado consiste en mezclar de forma adecuada, en un recipiente que no contamine la mezcla, con una espátula, cada uno de los componentes del sistema adhesivo (Fig. 3.4, 3.5 y 3.6). La viscosidad de la mezcla puede variarse en función de que se añada más componente en polvo (menos viscosa) o más componente líquido (más viscosa). Cuanto más viscosa sea la mezcla más tarda en secar, más escurre por el paramento vertical del elemento portante, por el efecto de la gravedad, como consecuencia el punto de control podría desplazarse; por otro lado penetra mejor en los poros, generando una fijación de mejor calidad una vez curada. Si por el contrario la hacemos pastosa (menos viscosa), tarda menos en secar (el “pot life” se reduce), pudiendo incluso llegar a no pegar el punto de control de forma efectiva, resbalaría menos por el paramento vertical del elemento y, en consecuencia, el punto de control no deslizaría.

Hay que guardar ciertas precauciones con el adhesivo dependiendo de las condiciones climatológicas. Si la temperatura es elevada, hay radiación solar presente y la humedad es baja, tenemos que tener la precaución de hacer la pasta hacia líquida, ya que sino fraguará demasiado rápido y el pegado podría no ser correcto.

Y viceversa, si las condiciones son de frío intenso, humedad elevada y ausencia de radiación solar la masa debería realizarse del lado viscoso, porque en este caso el tiempo de fraguado podría prolongarse en demasía, pudiéndose descolgar la mezcla, desplazando, en consecuencia, el punto de control. En ocasiones puede ser recomendable proceder al secado superficial previo del elemento portante para garantizar una mayor adhesión de los puntos de control a disponer (Fig. 3.7).



Fig. 3.7: Operación de secado previamente a la adhesión de los puntos de control. Palacio de Riva-Herrera, Santander (Cantabria, España).



Fig. 3.8: Aplicación del adhesivo en el sustrato.

Fig. 3.9: Pegado del punto de control.

Fig. 3.10: Sujeción del punto de control con cinta aislante.

Una vez se tiene compuesta la mezcla adhesiva se procede al pegado de los puntos de control propiamente dicho. Con la espátula se aplica una cantidad adecuada en el punto replanteado previamente (Fig. 3.8), esparcimos ligeramente el adhesivo y se posiciona manualmente el punto

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

de control (Fig. 3.9), presionando, con posterioridad, ligeramente con el dedo. Acto seguido, se coloca un trozo de cinta aislante, sin presión, encima del punto de control a modo de sujeción (Fig. 3.10), con la finalidad de evitar posibles descuelgues del mismo que podrían generar que la longitud a controlar quede fuera del rango de medida del comparador. Si la consistencia del adhesivo es adecuada no es necesario colocar la cinta.

Debe de esperarse un tiempo prudencial hasta que el adhesivo haya curado (en condiciones normales no más de 20 minutos), de forma que el conjunto resulte estable y no se mueva.

Una vez adherido un punto de control de cada una de las longitudes de referencia, debe repetirse el proceso para el resto de los puntos de control. En este caso, dado que previamente se ha replanteado la posición de cada uno, una vez se tenga posicionado el adhesivo sobre el sustrato, y tras un posicionamiento primario manual, se emplea la barra fija calibrada, de 20 cm de longitud, para colocarlos a la distancia correcta (Fig. 3.11). Para ello, sobre el punto de control adherido, aún en fresco, posicionamos uno de los extremos de la barra fija (Fig. 3.12), deslizando el punto de control tanto como sea necesario hasta alcanzar la marca cónica del punto de control fijado con anterioridad, en ese momento se realiza una pequeña presión y a continuación se retira la barra, colocando una porción de cinta aislante para evitar el descuelgue del punto de control adherido (Fig. 3.13). Procedemos de esta manera con todos los puntos de control.



Fig. 3.11: Posicionamiento del segundo punto de control mediante barra fija.

Fig. 3.12: Detalle del arrastre, mediante la barra calibrada, del segundo punto de control dispuesto para garantizar una longitud de 20 cm.

Fig. 3.13: Sujeción del segundo punto de control con cinta aislante para evitar su desplazamiento.

Para casos en los que se intuya que se puede producir un descuelgue de los elementos pétreos o cerámicos que conforman el muro al hacer la roza, o que la fábrica pueda ser muy deformable, se corre el riesgo de que algún punto quede fuera de rango de medición del comparador, a mitad del ensayo. En este sentido podría ocurrir que los puntos de control se aproximen por debajo de la magnitud mínima medible del rango de medición del deformómetro, tanto en el caso del ensayo de gato plano simple (debido al proceso de ejecución de la roza), como en los puntos verticales del ensayo de gato plano doble (debido a que los puntos tenderán a aproximarse debido a la presión introducida por los gatos planos); o viceversa, que se separen los puntos de control por encima de la medida máxima del rango de medición del deformómetro, en el caso de los puntos horizontales del ensayo de gato plano doble (debido a que los puntos tenderán a separarse, por efecto Poisson, debido a la presión introducida por los gatos planos).

En estos casos para el posicionamiento del segundo punto de control, en lugar de emplearse la barra fija, se recomienda emplear el propio deformómetro, qué apoyado en el punto de control de referencia, fijado con antelación, nos permite posicionar el segundo punto a otra distancia deseada, distinta de 20 cm. Dicha distancia tenderá hacia los valores máximos del rango de medida en el caso del ensayo de gato plano simple, dado que tras la apertura de la roza los puntos de control tenderán a aproximarse, y en los puntos de control vertical del ensayo de gato

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

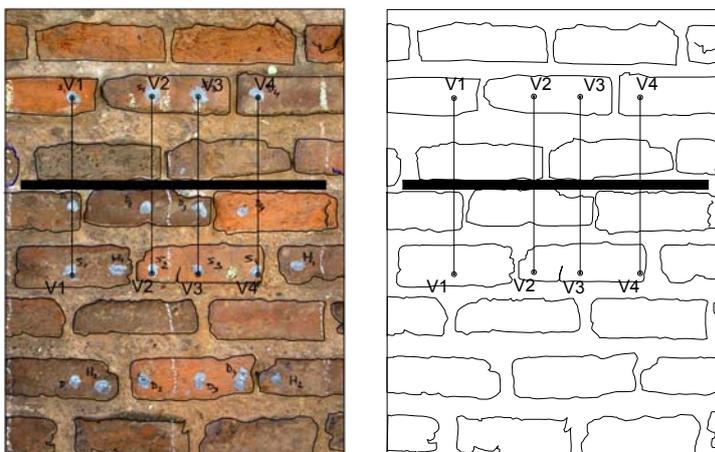
plano doble, dado que los puntos tenderán a aproximarse debido a la presión introducida por los gatos planos. Por su parte, la distancia inicial tenderá hacia los valores mínimos del rango de medida en el caso de los puntos de control horizontal del ensayo de gato plano doble, dado que los puntos tenderán a separarse, por efecto Poisson, debido a la presión introducida por los gatos planos

Finalmente, una vez colocados y curados todos los puntos de control, debe realizarse una medición entre cada par de ellos para comprobar que la operación es correcta, no encontrando magnitud alguna ni fuera del rango de medida, ni en las proximidades de quedar fuera de rango.

3.1.2.1 Caso del ensayo de tensión (gato plano simple).

Para el ensayo de tensión, tanto la normativa ASTM como la RILEM recomiendan ubicar los puntos de referencia simétricamente en las segundas hiladas (contadas desde la hendidura) de la parte superior y de la inferior de la roza (Fig. 3.14).

Fig. 3.14: Detalle de los puntos de control colocados para el gato plano simple realizado en el estribo Sur del arco de ladrillo sito en la estación de Campo-Grande de Valladolid (España).



La ASTM recomienda situar al menos cuatro pares equiespaciados (Fig. 3.15), mientras que la RILEM recomienda que se ubiquen al menos tres pares en la parte central de la longitud del gato plano (Fig. 3.16).

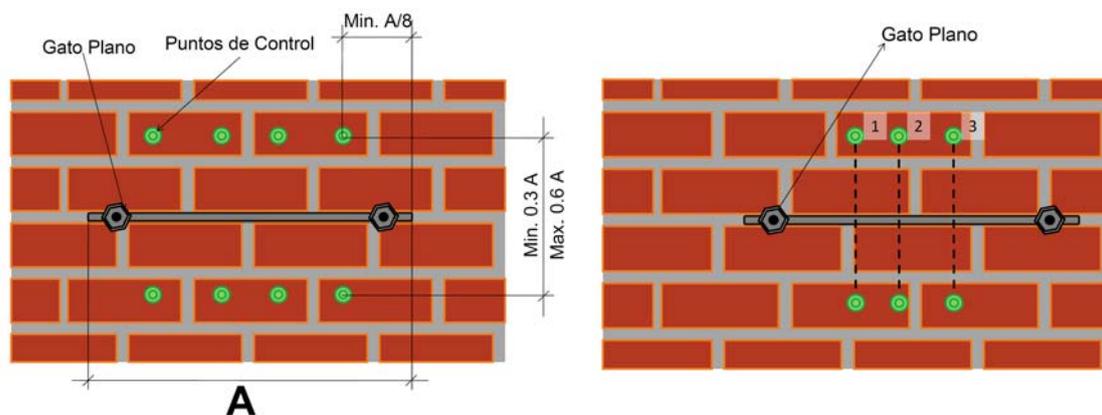


Fig. 3.15: Disposición de los puntos de control para el ensayo de tensión según ASTM.

Fig. 3.16: Posición de los puntos de referencia deformacional para el ensayo de tensión según la propuesta RILEM.

Las recomendaciones RILEM indican que la longitud de los medidores o galgas empleadas en el ensayo de tensión sean de 20 cm.

La norma ASTM C 1196-04 requiere que la longitud entre galgas sea entre $0,3 \cdot A$ y $0,6 \cdot A$, para el ensayo de tensión, siendo A la longitud del gato plano.

3.1.2.2 Caso del ensayo de deformación (gato plano doble).

Para el ensayo de deformación, ambas normativas requieren que los puntos de referencia estén situados simétricamente en las hiladas de la fábrica inmediatamente inferior (al gato plano superior) y superior (al gato plano inferior) de las rozas.

Para fábricas muy regulares dicha afirmación es, en ocasiones, de difícil verificación. En estos casos la localización de los puntos de control se aproximará lo más posible a lo indicado en la normativa dentro de las posibilidades existentes (Fig. 3.17).

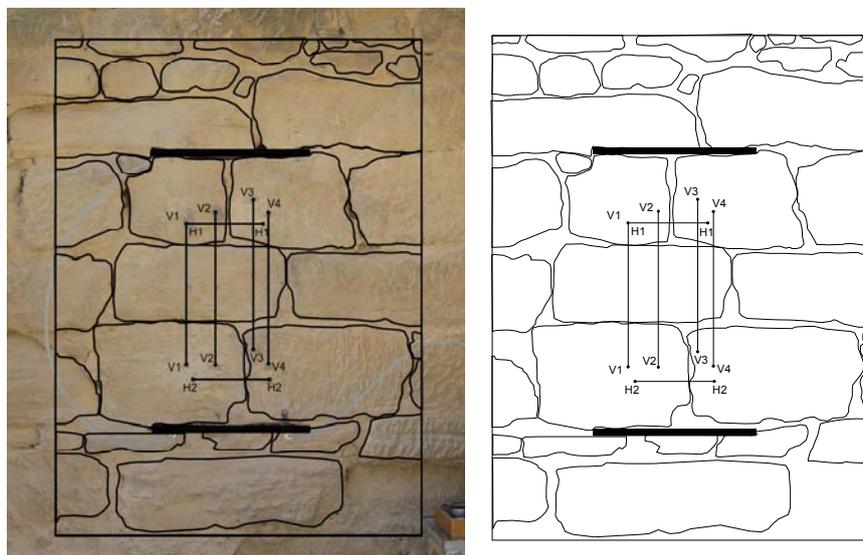


Fig. 3.17: Detalle de los puntos de control colocados para el ensayo de gato plano doble realizado en el muro Norte del Palacio de Casa-Fuerte sito en Zarratón (La Rioja, España). Puede apreciarse la irregularidad de la fábrica.

Las recomendaciones RILEM, para el ensayo de deformación, indican que la longitud de referencia, entre puntos de control, debe ser dentro de lo posible de 40 cm.

Para el ensayo de deformación las normas ASTM no especifican requerimientos concretos para la longitud de las galgas, pero se establece indirectamente por las especificaciones relativas a la distancia entre las hendiduras y los puntos de medida (Fig. 3.18).

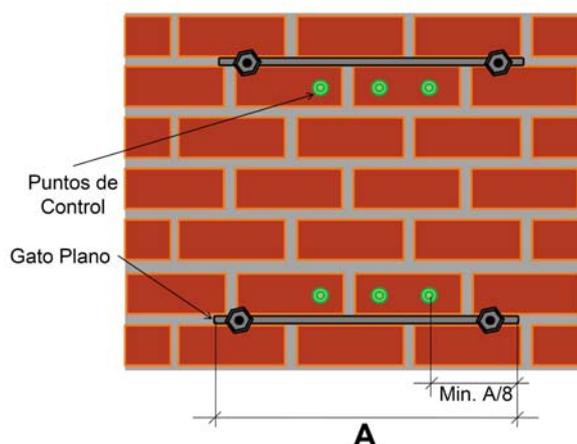


Fig. 3.18: Disposición de los puntos de control para el ensayo de deformación según la norma ASTM C1197-04.

3.1.3 Replanteo y ejecución de las rozas

Es fundamental que, previamente a la ejecución de la roza, en un ensayo de gato plano simple, deba medirse cada una de las longitudes de referencia existente entre cada par de puntos de control, de cara a disponer de la longitud inicial a recuperar durante la ejecución del ensayo.

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

Las herramientas para la ejecución de la roza dependen de la forma del gato plano que se empleará en los ensayos. En general, cuando se empleen gatos planos rectangulares la roza suele ser ejecutada mediante taladrado (Fig. 3.19) o mediante el empleo de sierra de disco y taladro. Por su parte si lo que se emplean son gatos circulares o semi-rectangulares la roza debe ser producida por el corte de una sierra de disco (Fig. 3.20 y 3.21). No es recomendable el empleo de taladros de gran potencia debido al posible deterioro que podría causarse en las zonas más próximas de la fábrica.



Fig. 3.19: Ejecución de la roza mediante taladrado en una fábrica de ladrillo ensayada en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

Fig. 3.20: Ejecución de la roza mediante sierra circular orbital en una sillería arenisca ensayada en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

Fig. 3.21: Detalle de la sierra de disco orbital marca Husqvarna K-950 y de un gato plano semi-rectangular de dimensiones 350x260x4 mm.

En las fábricas de ladrillo, el corte se puede hacer fácilmente en las juntas horizontales mediante sierra de disco. En fábricas de mampostería irregular, no es tan fácil debido a la dificultad de encontrar juntas regulares, por lo que el corte podría realizarse afectando a parte de los mampuestos.

Independientemente del método empleado para la preparación de la hendidura, habrá que poner especial cuidado en garantizar que ha sido extraído todo el mortero de la roza, porque los gatos planos deben de contactar con las superficies de las piezas de la fábrica perfectamente limpias. Las partículas residuales de mortero pueden ser removidas mediante aire a presión (Fig. 3.22) o por mecanismos de succión.



Fig. 3.22: Remoción de las porciones de material residual tras la realización de la roza mediante una bomba de aire. Ensayo de gato plano simple realizado en una fábrica de ladrillo ensayada en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

Fig. 3.23: Ejecución de un corte mediante sierra de disco manual para posterior guiado de la voluminosa sierra de disco orbital. Ensayo de gato plano simple ejecutado en el muro Oeste de la Iglesia de N^a S^a de la Asunción de Zarratón (La Rioja, España).

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

A continuación pasa a describirse el procedimiento seguido en la campaña experimental in situ desarrollada en esta tesis doctoral.

Tras replantear la posición exacta donde se realizará la roza, en primer lugar se ejecuta un corte mediante sierra de disco manual (Fig. 3.23) para posterior guiado de la voluminosa sierra de disco orbital marca Husqvarna K-950 (Fig. 3.20), dispositivo encargado, a la postre, de ejecutar la roza en sus dimensiones necesarias para el posterior alojamiento de un gato plano tipo semi-rectangular de dimensiones 350x260x4 mm (Fig. 3.21).

Por motivos de seguridad y ante la carencia de dispositivos de izado y guiado más elaborados, coincidiendo con la vertical correspondiente al plano medio de la roza a ejecutar, se empotra en el muro, mediante tacos y tornillos barraqueros cincados, un bastidor metálico (Fig. 3.24-3.26) sobre el que, a través de una cadena, se cuelga la sierra de disco orbital referida. La altura de la sierra respecto del bastidor es regulable, dado que esta puede referirse a los diferentes eslabones que constituyen la cadena de izado (Fig. 3.27). De esta manera el operario puede realizar la roza de manera cómoda, segura y eficiente colgando la sierra del bastidor, a través una argolla que desliza a lo largo de la longitud del mismo (Fig. 3.28).



Fig. 3.24-3.26: Proceso de taladrado y empotrado del bastidor metálico de izado de la sierra de disco orbital marca Husqvarna K-950.

Una vez colgada la sierra, tras ser arrancada en el suelo por motivos de seguridad, el operario que realice la roza deberá proceder a la ejecución de la misma, extremando el cuidado para hacerla lo más ajustada posible a las dimensiones del gato plano, manteniendo la sierra en posición horizontal. Una vez ejecutada la roza, el técnico tiene que introducir el gato plano en la misma sin forzar la operación en exceso (evitando la introducción a golpes dado que la operación puede favorecer la recuperación de parte de la deformación liberada durante el corte, aspecto no deseado). En ocasiones es necesario repasar la roza en determinadas áreas para permitir la introducción del gato plano.



Fig. 3.27: Ajuste de la altura necesaria de la sierra para ejecutar la roza en la posición replanteada. Ensayo de gato plano doble realizado en el Seminario Mayor de Comillas.

Fig. 3.28: Instante tomado durante el proceso de ejecución de la roza necesaria para la ejecución de un ensayo de gato plano simple en el Palacio de Riva-Herrera sito en Santander (Cantabria, España).

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

Una vez se ha verificado el correcto ajuste del gato plano, éste es extraído para poder replantear el área de corte de la roza ejecutada. Para ello, tras medir la anchura total de la roza, comenzando desde el borde izquierdo, se toma medida de la profundidad alcanzada en la misma cada 5 cm hasta llegar al otro extremo. Si se quiere mayor aproximación podrían tomarse puntos a menores distancias, por ejemplo 2 cm., si bien se corre el riesgo de demorar mucho la fase relacionada con el replanteo de la roza, circunstancia que podría tener repercusión en los resultados del ensayo, dado que tras producir la relajación tensional asociada al corte podrían desarrollarse deformaciones inelásticas en el borde superior de la roza.

Para la toma de medidas de profundidad se emplea una varilla metálica, de sección suficientemente reducida como para permitir su inclusión entre los labios de la roza, la cuál se introduce cuidadosamente lo mas perpendicular posible al plano del muro, por cada uno de los puntos marcados en superficie, hasta alcanzar el fondo de la roza (Fig. 3.29). Empleando el propio dedo como referencia, llevándolo hasta el borde de la roza, se extrae la varilla (Fig. 3.30) para medir con posterioridad la profundidad alcanzada (Fig. 3.31).



Fig. 3.29-3.31: Pasos para la medida de la profundidad de la roza ejecutada. Ensayo de gato plano simple realizado en una mampostería caliza ensayada en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

Una vez replanteadas todas las profundidades, se vuelve a introducir el gato plano en la roza, midiendo la distancia desde el borde izquierdo de la roza hasta el mismo extremo del gato plano para poder situarlo, de forma relativa, respecto de la roza ejecutada.

Con estas medidas se realiza un detalle CAD, aproximado, tanto de la roza como del gato plano. A partir de dicho croquis puede determinarse la relación de áreas entre el gato plano y la roza realizada (factor geométrico k_a), Fig. 3.32-3.33.

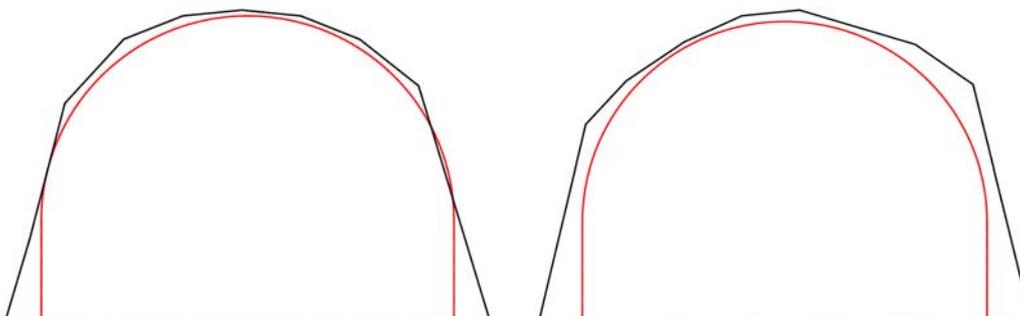


Fig. 3.32: Relación entre el área de la roza (833.50 cm^2) y el área del gato plano superior (778.56 cm^2) del ensayo FJD-1 del estribo Sur del arco de ladrillo sito en la estación de Campo-Grande de Valladolid (España).

Fig. 3.33: Relación entre el área de la roza (890.65 cm^2) y el área del gato plano (778.56 cm^2) del ensayo de gato plano simple realizado en la hoja exterior del muro portante Oeste de la torre de la Iglesia de N^a S^a de la Asunción (Zarrazón, La Rioja).

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

En el caso del ensayo de gato plano doble, debe repetirse el procedimiento descrito para la segunda roza involucrada.

3.1.4 Conexionado y purga

3.1.4.1 Conexión y purga del gato plano simple

Una vez el gato ya se encuentra insertado en la roza hay que conectarlo a la bomba hidráulica mediante uno de los puertos del gato.

Tras el conexionado, es necesario purgar el sistema hidráulico con la finalidad de eliminar todo el aire del circuito (manguito de conexión y del interior del gato). Para ello se abre el segundo puerto del gato plano, introduciéndolo en una botella vacía para recuperar el fluido bombeado una vez se haya extraído el aire existente (Fig. 3.34 y 3.35).

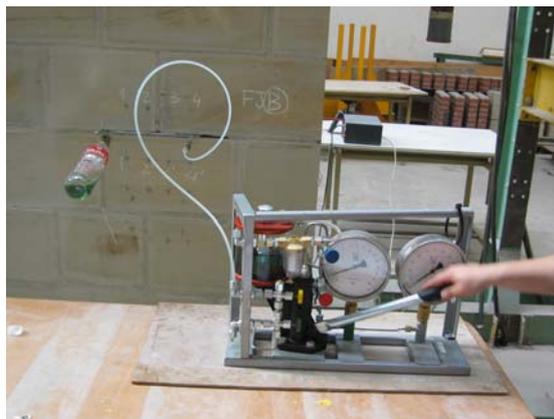


Fig. 3.34: Instante tomado durante el proceso de purga del aire, previamente a la ejecución de un ensayo de gato plano simple realizado en el Seminario Mayor de Comillas.

Fig. 3.35: Instante tomado durante el proceso de purga del aire, previamente a la ejecución de un ensayo de gato plano simple realizado en un muro de sillería ensayado en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

En el momento en que por dicho puerto de salida fluya un pequeño chorro continuo de líquido hidráulico, sin burbujas en su seno, se cierra la válvula de bola existente en el puerto de entrada del gato plano, y, finalmente, se cierra el puerto de salida mediante tapón roscado. Es entonces cuando se está en condiciones de comenzar el ensayo.

3.1.4.2 Conexión y purga del gato plano doble

La filosofía es la misma que la expuesta para el ensayo de gato plano simple, solo que en este caso además de la conexión entre el gato plano y la bomba debe de conectarse otro gato plano en serie con el anterior.

Se recomienda conectar la bomba siempre al gato inferior, en uno de sus dos puertos que hará las veces de entrada, en el cuál se dispondrá la válvula de cierre o apertura del circuito materializada, como ya se ha referido, por una llave de paso de bola.

El puerto libre de dicho gato inferior hará las veces de puerto de salida debiéndose conectar, mediante un manguito, al puerto de entrada del gato plano superior, el cuál se recomienda tomar el ubicado en el mismo lado que el inferior, para evitar que el manguito de conexión cruce el área de ensayo dificultando la toma de medidas de los puntos de control (Fig. 3.36 y 3.37).

El puerto libre del gato plano superior hará las veces de salida, constituyendo el elemento de purga del circuito. Para ello, una vez conexionado todos los elementos, bomba con gato plano inferior y éste con el superior, se repite el proceso de purgado de aire de la misma forma que se ha descrito para el ensayo de gato plano simple, teniendo la precaución de que la bomba tenga en el depósito fluido suficiente como para rellenar los manguitos y los dos gatos planos.

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



Fig. 3.36: Instante tomado durante el proceso de purga del aire, previamente a la ejecución de un ensayo de gato plano doble realizado en el Seminario Mayor de Comillas.



Fig. 3.37: Instante tomado durante el proceso de purga del aire, previamente a la ejecución de un ensayo de gato plano doble realizado en un muro de sillería ensayado en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

Una vez purgado el sistema se está en condiciones de comenzar el ensayo.

3.1.5 Ejecución del ensayo.

Como ya se ha indicado el ensayo de gato plano puede tener dos fases. En la primera fase se determina el estado tensional a compresión de la fábrica y en la segunda, las características de deformabilidad.

A menudo no es posible poner en carga todo el grosor de la pared, sobre todo en los casos en que se esté diagnosticando un muro de varias hojas. Obviamente, los resultados obtenidos se refieren solamente a la hoja que ha sido ensayada. Las hojas externas solían construirse, habitualmente, con materiales de relativa calidad, mientras que las internas suelen construirse con materiales de características más pobres, por ello que podría cometerse un error del lado de la inseguridad, si se consideran para todas las hojas de un muro las características de una de las hojas externas.

3.1.5.1 Ensayo de tensión in situ (ensayo de gato plano simple).

Este ensayo está basado en el principio de liberación parcial de tensiones e implica, localmente, la eliminación de tensiones, seguido de una restitución controlada del nivel tensional eliminado (Fig. 3.38).

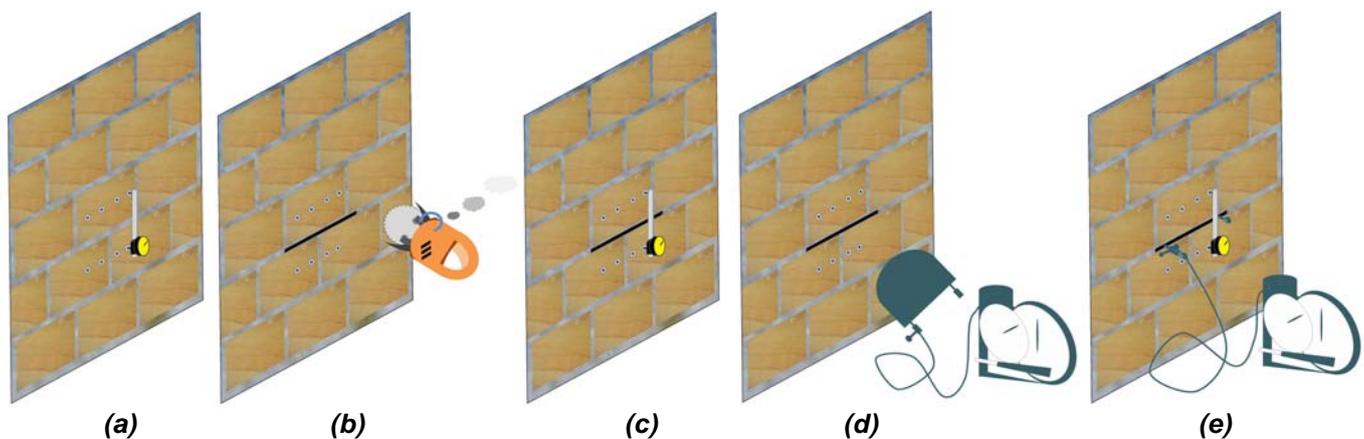


Fig. 3.38: Fases del ensayo de gato plano simple.

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

En primer lugar se determina la referencia del campo de desplazamientos mediante medida de las distancias entre los puntos de calibración fijados a la superficie de la fábrica (distancia d_0 , Fig. 3.38a).

Para realizar una medición correcta de la distancia definida entre dos puntos de control se encaja, en primer lugar, la parte móvil del deformómetro en uno de los puntos de control, asegurándonos que está bien fijada, para a continuación encajar la parte fija, jugando con la holgura proporcionada por la parte móvil, en el segundo punto de control. Una vez colocados sendos extremos en la forma indicada, asegurarse haciendo ligera presión arriba y abajo que la medida no fluctúa y leer en el reloj del comparador. Este procedimiento debe hacerse por escalón de presión y por cada par de puntos.

Posteriormente se practica una hendidura en un plano perpendicular a la dirección de medida de tensiones (Fig. 3.38b), esto conduce a que se produzcan deformaciones en la dirección normal a la roza. La distancia entre los puntos de medida decrece (la distancia d_i en la Fig. 3.38c es menor que la d_0 de referencia). Mediante el corte de la hendidura se motiva un relajamiento tensional parcial en la fábrica.

A continuación se introduce un gato plano dentro de la roza (Fig. 3.38d), conectándose a una bomba hidráulica. En base a este mecanismo se introduce, gradualmente, presión a la fábrica (Fig. 3.38e), acción que provoca una restauración parcial del campo de desplazamientos inicial (de referencia, d_0). La normativa ASTM recomienda que el valor del incremento de presión sea igual al 25% de la máxima presión estimada que se vaya a alcanzar en el ensayo de gato plano simple, mientras que la RILEM recomienda incrementos pequeños si bien no especifica su valor. Ronca et al. (1997) recomiendan incrementos de 0.07 a 0.14 N/mm² (70 a 140 kPa).

Como consecuencia, algunos de los puntos alcanzan, de forma aproximada, los valores previamente medidos. Una diferencia aceptable entre las distancias originales y las restauradas es (ASTM C1196-91):

- Para cada una de las desviaciones, éstas han de ser menores que ± 0.0025 cm.
- Para la desviación máxima ± 0.1 cm.
- Para la desviación media menor que ± 0.0013 cm o 0.05 de la máxima desviación inicial.

El valor de la presión que restaura las referencias a su distancia original (presión de cancelación o de neutralización) es la base para el cálculo de la tensión de compresión. La presión hidráulica, en el interior del gato plano, necesaria para restaurar la fase inicial previa a la producción del daño, es mayor que la tensión existente en la estructura. Esto es debido a la rigidez inherente del gato plano, el cuál resiste ciertas expansiones cuando el gato se pone en presión. Otro factor que contribuye en este efecto es la diferencia entre el área del gato plano y el área, mayor, de la hendidura. Ambos factores son tenidos en cuenta en la interpretación de resultados.

La tensión puede ser calculada por:

$$\sigma = k_m \cdot k_a \cdot p \quad (3.1)$$

Donde:

k_m : Factor de calibración (<1), asociado con la parte de la presión consumida en deformar el gato plano debido a su rigidez inherente.

k_a : Relación entre el área del gato plano y el área media de la roza (<1).

p : Presión interna 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

Según estipula tanto ASTM como RILEM el tiempo tomado para la aplicación de la carga debería ser aproximadamente el mismo que el tiempo requerido para realizar el corte y preparar el ensayo (después de que las medidas de deformación sean estables).

El ensayo, tal y como se ha descrito, está basado en los siguientes supuestos (Gregorczyk y Lourenço 2000):

- La tensión es de compresión.
- La fábrica de los alrededores de la hendidura es homogénea.
- La fábrica se deforma simétricamente en torno a la roza; el estado de tensiones en el lugar de medida es uniforme.
- La tensión aplicada a la fábrica por el gato plano es uniforme.

Considerando que en la mayor parte de los casos existentes, las fábricas ofrecen pobres características mecánicas en el rango elástico, el corte realizado en el ensayo, puede producir componentes de deformación más allá de los del rango elástico.

Como consecuencia, si el fenómeno inelástico se evidencia, la presión de cancelación, p , que se relaciona con el nivel tensional en servicio, σ , mediante las constantes relacionadas con la rigidez inherente del gato plano, k_m , y la relación entre el área del gato y el área de la roza, k_a , podría no corresponder siempre al nivel de presión para el que se recupera la distancia inicial medida antes de ejecutar la roza, d_0 , dado que ésta no se alcanza al mismo tiempo en todas las unidades de medida.

En estos casos, se obtendría una buena convergencia al valor correcto de la presión de cancelación, p , mediante el punto común de intersección definido por las curvas (Fig. 3.39), asociado con el momento en el que se produce la recuperación de la deformación elástica componente de la deformación total desarrollada (Ronca 1996 y 1996a; Ronca et al. 1997).

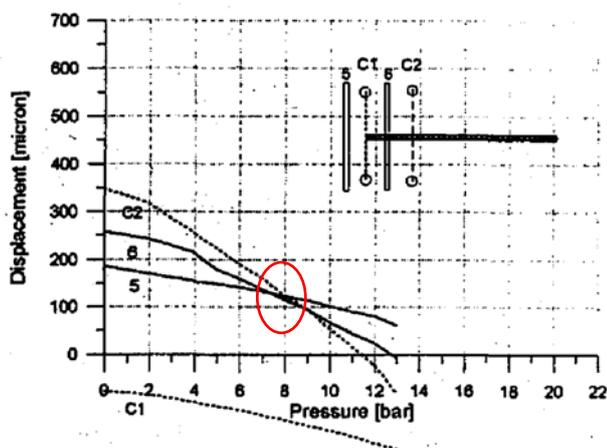


Fig. 3.39: Curvas presión-desplazamiento registradas en el ensayo TMJ3 realizado en la Torre de Monza, Italia (Ronca et al. 1997).

La ASTM C1196-91 afirma que este ensayo muestra un coeficiente de variación del 20%. Esto es, este es un método que puede tanto sobrevalorar como minusvalorar la tensión existente. Ronca et al. (1997) afirman que los ensayos de laboratorio han mostrado que los ensayos de tensión in-situ tienen un margen de error superior al 20%.

Una vez finalizado el ensayo debe de realizarse la desconexión, para ello, en primer lugar, debe cerrarse la válvula de paso, de bola, existente entre la bomba y el gato plano; entonces, desconectar la bomba del manguito; seguidamente, introducir el extremo del circuito en una botella vacía para recuperar la mayor parte de líquido posible una vez abierta la válvula de paso y el tapón roscado que constituye el final del circuito hidráulico; cuando ya no gotee líquido debe de desconectarse el otro extremo del manguito y, finalmente, si es factible, proceder a la extracción del gato plano o, en su defecto, dejarlo perdido mimetizando su localización con la del resto del elemento portante.

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

En el caso que se pueda extraer el gato de la roza, hay que proceder de forma muy cuidadosa para no dañar ni la fábrica circundante, ni el gato plano, ya que el objetivo es poder recuperarlo funcional para realizar otro ensayo. No es tarea sencilla, ya que debido a la presión movilizada en el ensayo, el gato plano se ha deformado adaptándose a las irregularidades presentes en las rozas y, por ese motivo, se encuentra acodado dentro de la roza. El método para la extracción el gato dependerá de la naturaleza de la fábrica, del emplazamiento del ensayo, de la importancia del inmueble, etc.

Si se decide dejarlo perdido la manera de proceder sería, en primar lugar, cortar los puertos de entrada y salida del gato plano mediante sierra de disco (Fig. 3.40). A continuación, mediante una maceta y un cincel, golpear el canto del gato para dejarlo lo mas introducido posible en la roza. Finalmente, con un mortero compatible con el existente en la construcción, en general un mortero de cal, rellenar la roza y retacar el tendel hasta ocultar el dispositivo por completo (Fig. 3.41 y 3.42).



Fig. 3.40-3.42: Corte de los puertos de entrada y salida del gato plano, y recibido con mortero de cal de la roza.

3.1.5.2 Ensayo de deformación in situ (ensayo de doble gato plano).

El principio del ensayo es similar al ensayo de compresión estándar. La diferencia es que la presión se aplica mediante dos gatos planos. Una configuración típica del ensayo de deformación in situ se muestra en la Fig. 3.43.

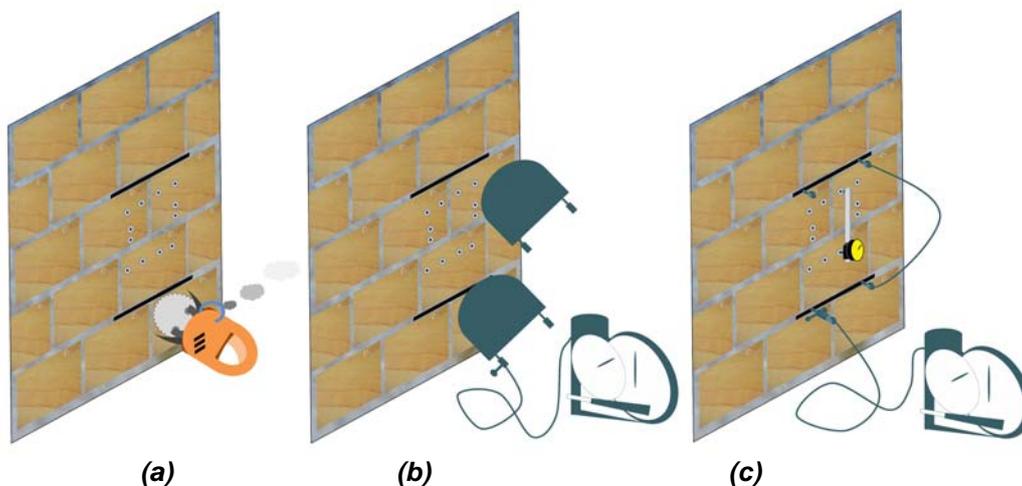


Fig. 3.43: Configuración típica del ensayo de deformación in situ.

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

En primer lugar se sitúan unas bases verticales de medida, formadas cada una de ellas por un par de puntos de base extensométrica o por transductores electrónicos, a una distancia determinada (d) y dentro de la zona comprendida entre los cortes a realizar.

Mediante el corte de dos hendiduras paralelas, separadas del orden de unos 50 cm, se produce el aislamiento de parte de la fábrica constituyendo una “probeta” (Fig. 3.43a). La fábrica que queda entre los gatos planos se considera liberada de cargas.

Una vez introducidos los gatos planos en los cortes (Fig. 3.43b), se comunican a la “probeta” pequeños escalones de presión (p_i), mediante presurización de los gatos (Fig. 3.43c) sin superar su capacidad operativa, tomando lectura, para cada escalón de presión, de la distancia existente entre los puntos de referencia dispuestos (d_i). Obviamente, mediante la introducción de incrementos de presión en los gatos planos las distancias entre los puntos de control decrecen.

Mediante dichos incrementos graduales de la presión puede determinarse la relación tensión – deformación. En base a esta curva experimental puede calcularse el valor del módulo de elasticidad. Igualmente, también se puede estimar el coeficiente de Poisson colocando de inicio dos puntos de control horizontal a una distancia inicial conocida y controlando la evolución de sus desplazamientos a lo largo de los escalones de presión introducidos. También pueden simularse ciclos de carga – descarga.

Además puede estimarse la tensión límite de la fábrica incrementando la presión hasta que aparezca la primera fisura en los ladrillos.

El valor estimado de la tensión, σ_i , en la zona delimitada por los gatos planos para cada estado de presión i se calcula de la misma forma que en el ensayo de gato plano simple, en este caso, las constantes a emplear serán el promedio de las obtenidas para ambos gatos planos.

$$\sigma_i = p_i \cdot K_m \cdot K_a \quad (3.2)$$

Para cada escalón de presión i corresponderá una deformación que se calcula mediante la expresión:

$$\varepsilon_i = \frac{(d - d_i)}{d} \cdot K_e \quad (3.3)$$

donde:

- ε_i : deformación correspondiente al estado de presión del escalón i .
- d : distancia inicial existente entre los puntos de referencia.
- d_i : distancia entre puntos de referencia para el escalón de presión i .
- K_e : constante de deformación del extensómetro.

El método de gato plano doble está basado en los siguientes supuestos (Gregorczyk y Lourenço 2000):

- La fábrica que rodea las hendiduras es homogénea.
- La tensión que se aplica a la fábrica mediante gatos planos es uniforme.
- El estado de tensiones en el área de ensayo es uniaxial.
- El efecto de confinamiento lateral de la “probeta” motivado por la reacción de la fábrica adyacente puede ser despreciado.

Para el ensayo de deformación la ASTM C1197-91 ofrece un coeficiente de variación del 24%, indicando que el ensayo sobreestima en más de un 15% el valor medio del módulo de elasticidad de la fábrica debido a las condiciones de contorno existentes. La influencia de la fábrica circundante es menor en la parte central del área de ensayo, por esta razón, la localización de los puntos de referencia para control de deformaciones en la zona central del área de carga (tal y

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

como indica la normativa RILEM) conduciría a unos resultados más precisos que una distribución simétrica (recomendada por la ASTM).

Una vez finalizado el ensayo la desconexión se realiza de la misma manera que se ha descrito para el ensayo de gato plano simple, vaciando el circuito hidráulico por el puerto de entrada del gato plano inferior, una vez abierto el circuito, para la entrada del aire, por el puerto de salida del gato superior.

3.1.5.3 Equipamiento y materiales.

En la Tabla 3.1 se refiere el equipamiento básico requerido para llevar a cabo un ensayo de gatos planos.

Tabla 3.1: Equipamiento básico requerido para llevar a cabo un ensayo de gatos planos.

Puntos de control	Bases de medida fija (en el ensayo de gato plano simple y en el de gato plano doble en modo analógico)	
	Transductores electrónicos (en el ensayo de gato plano doble en modo digital)	
Sierra de disco y/o taladro para ejecutar la roza		
Gatos planos	1 gato plano (en ensayo de gato plano simple)	
	2 gatos planos (en ensayo de gato plano doble)	
Placas de relleno		
Sistema hidráulico	Bomba hidráulica	Registro de presión mediante manómetro (modo analógico)
		Registro de presión mediante transductor de presión (modo digital)
Manguitos de conexión entre la bomba y el gato, y entre los gatos		
Instrumentos para la medida de los desplazamientos	Modo analógico	Medidor de la deformación mecánica (extensómetro)
	Modo digital	Transductores electrónicos
		Sistema de adquisición y procesamiento de datos
Equipamiento opcional	Maza y cincel	
	Bomba de aire para extraer fragmentos de mortero tras el corte	
	Equipamiento de seguridad (gafas, guantes, etc.)	
	Fuente de energía (generador) en el caso del ensayo de gato plano doble en modo digital, si el sistema de adquisición de datos no es autónomo.	

En lo que sigue se pasa a realizar algunos comentarios sobre los útiles más significativos.

3.1.5.3.1 Gatos planos.

Un gato plano es una célula de presión, a modo de vejiga, con puertos de entrada y salida, el cuál puede ser presurizado mediante un circuito hidráulico. En general consiste en dos placas de acero inoxidable soldadas a lo largo de las esquinas con uno o dos puertos de entrada y salida (Fig. 3.44).

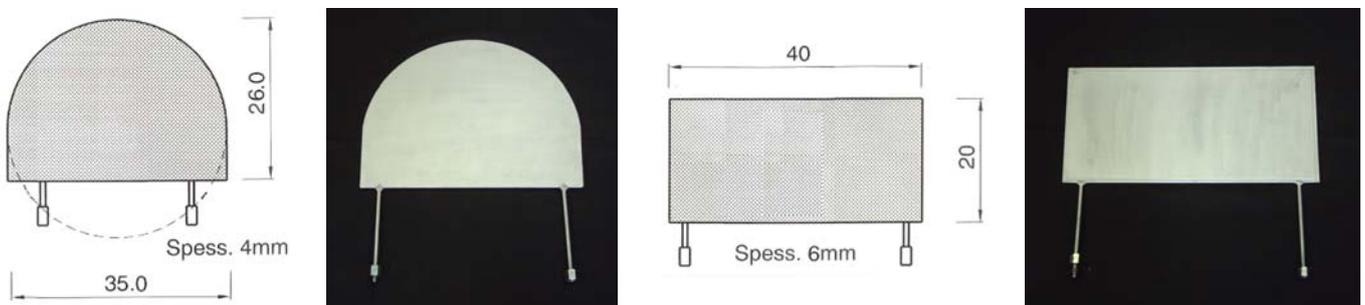


Fig. 3.44: Gatos planos de tipo semi-rectangular (350x260x4 mm) y rectangular (400x200x6 mm). Equipamiento del laboratorio de ensayos no destructivos del Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria (GTED-UC).

Un gato plano puede ser fabricado con muchas formas y tamaños, las dimensiones actuales están determinadas por su función, por la técnica empleada para preparar la hendidura y por las propiedades de la fábrica que va a ser ensayada.

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. 3.45 se muestran algunas configuraciones típicas. Los gatos rectangulares (tipos a, b y c) son empleados cuando el mortero debe ser removido mediante taladros. Los gatos planos circulares (tipo d) y semi-rectangulares (tipos e y f) están diseñados para encajar en una roza producida por el corte de una sierra de disco, circunstancia que facilita la ejecución práctica del ensayo. Independientemente de la muestra de ensayo, el gato plano debe encajar perfectamente en la hendidura.

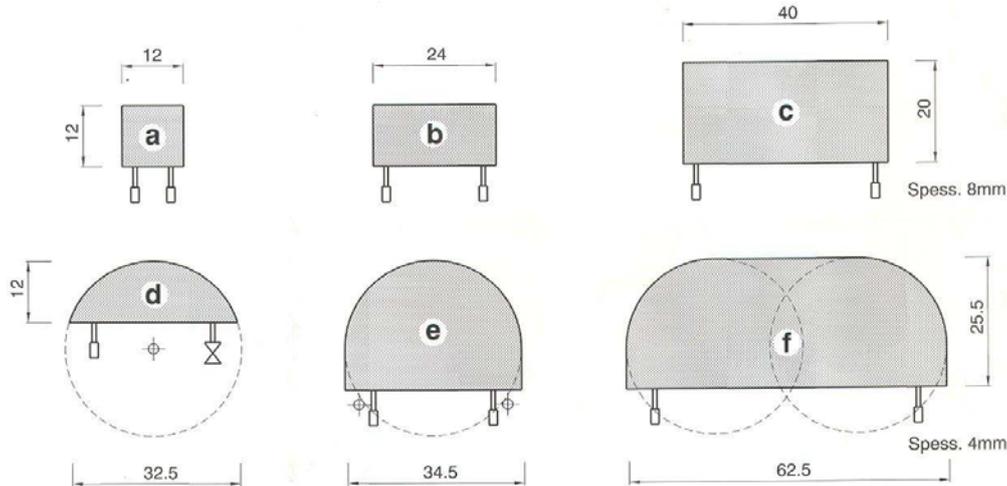


Fig. 3.45: Forma y dimensiones de los gatos planos empleados para la medida del estado de sollicitación en muros de fábrica (Rossi 1993b): (a), (b) y (c) fábricas de ladrillo; (d), (e) y (f) fábricas de piedra.

El grosor de un gato plano ideal será tal que éste rellene completamente la hendidura practicada. De cualquier forma, si un gato plano no tiene la dimensión suficiente para engrosar la roza por completo, junto con éste se emplean placas para rellenar completamente el grosor de la roza. El rango de grosor habitual de los gatos planos oscila entre 1 mm a 6mm.

Los gatos planos, en general, incorporan dos puertos de modo que se permite la salida del aire por uno de ellos mientras por el otro se suministra un fluido (para facilitar la purga). De todas formas algunos gatos planos son suministrados solamente con un puerto de entrada (BRE-Digest 409 1995; de Veckey 1995)

Las dimensiones de los gatos planos oscilan entre unos pocos centímetros a más de un metro (principalmente en mecánica de rocas).

Para el ensayo de tensión, la normativa ASTM C1196-91 requiere una dimensión A (Fig. 3.46) igual o mayor que la longitud de una pieza aislada de fábrica pero no menor que 20.32 cm (8 pulgadas). Para el ensayo de deformación, debería ser igual o mayor que la longitud de dos piezas de la fábrica, pero por encima de al menos 20.3 cm. La anchura del gato plano (dimensión B) debe ser igual o mayor que el grosor de una hoja de la fábrica y no menor que 7.6 cm.

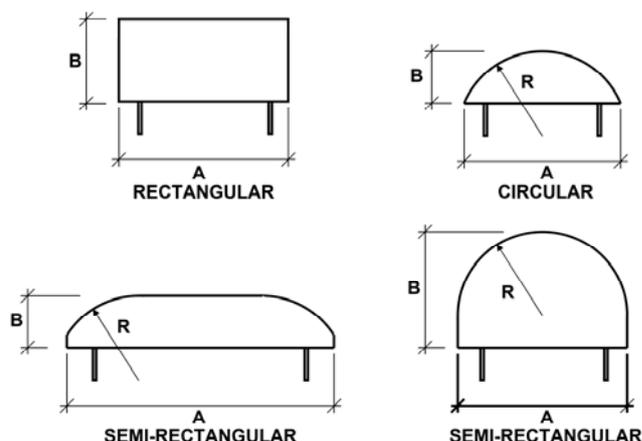


Fig. 3.46: Formas y dimensiones de los gatos planos.

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 la RILEM refiere que, tanto para el ensayo de tensión (RILEM LUM.D.2) como para el de deformación (RILEM LUM.D.3), el área del gato no debe ser menor que la de las piezas de la fábrica. Igualmente refieren que si el gato plano es rectangular su longitud debería ser doble que su anchura.

Ambas normas requieren que el radio R de un gato plano semicircular sea igual al radio de la sierra de disco empleada para realizar la hendidura (Fig. 3.21).

Como regla general para obtener buenos resultados representativos del estado de tensión real del conjunto de la fábrica es emplear el mayor tamaño posible de gato plano.

Dado el buen ajuste de los resultados obtenidos mediante el empleo de gatos planos de tamaño más reducido (Binda et al. 1983; Rossi 1985 y 1988), para medidas de tensiones en elementos como arcos, bóvedas y pilares podrían emplearse gatos planos más pequeños que los referidos. Si bien, no deben emplearse en el caso del ensayo del gato plano doble (Rossi 1985) en tanto que los resultados obtenidos no fueron adecuados.

3.1.5.3.1.1 Factor de calibración k_m .

El procedimiento de calibración de un gato plano se describe en RILEM LUM.D.2 y en ASTM C1196-91, y su objetivo es conocer la relación existente entre la presión interna aplicada en el gato y la tensión real transmitida por el mismo, al elemento portante. La presión comunicada al gato debe ser corregida mediante una constante adimensional propia de cada gato plano, K_m , que refleja el área efectiva debida a su rigidez.

En lo que sigue se pasa a describir el procedimiento de calibración de un gato plano (Fig. 3.47), para ello, en primer lugar, se debe disponer de una prensa controlada con una célula de carga.

Entre los platos superior e inferior de la prensa se ubica el gato objeto de calibración, confinado entre dos placas de acero de 5 cm de espesor, a las cuales se fija un comparador que controla la distancia existente entre ambas. Ésta debe mantenerse constante durante el proceso de calibración.

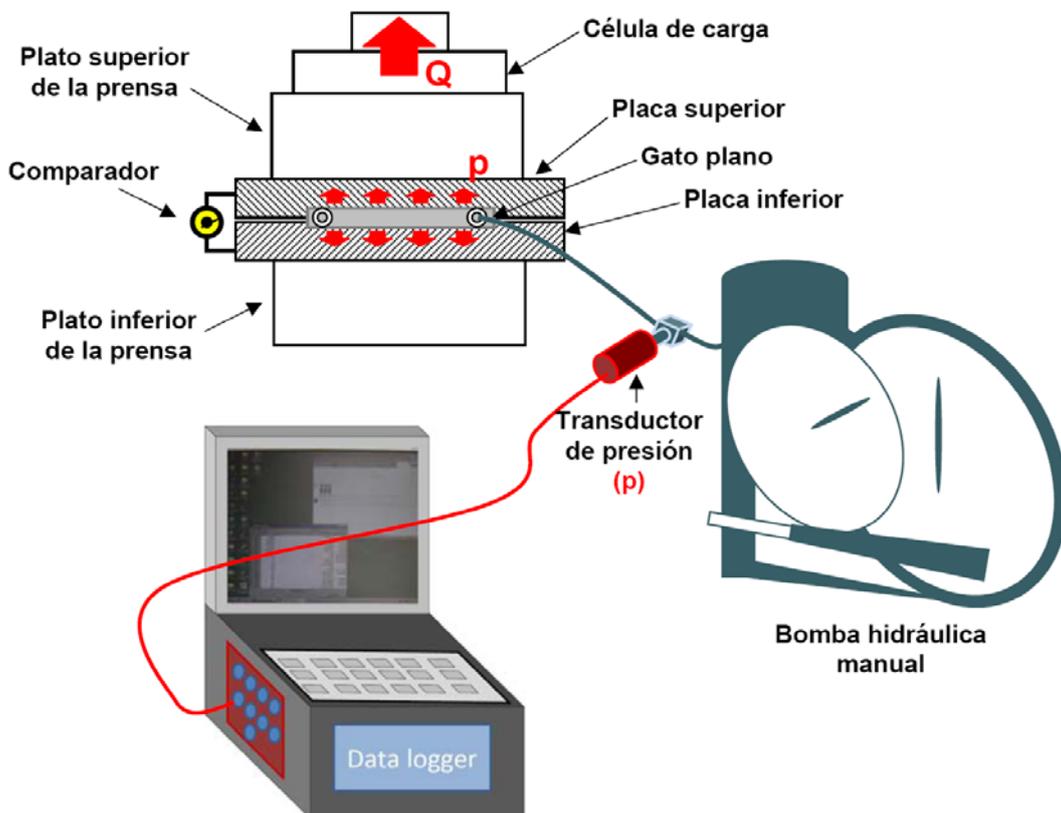


Fig. 3.47: Procedimiento de calibración de un gato plano.

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

Mediante una bomba manual, se aplica al gato plano una presión, p (kp/cm^2), cuya magnitud debe controlarse mediante un manómetro o mejor mediante un transductor de control electrónico de la presión. El gato transmite esta presión a través el plato superior de la prensa a una célula de carga Q (Kg). Si se considera que la superficie total del gato plano es S_{ff} , puede plantearse la siguiente igualdad.

$$p \cdot k_m = \frac{Q}{S_{ff}} \rightarrow k_m = \frac{Q}{p \cdot S_{ff}} \quad (3.4)$$

La relación entre la carga registrada por la célula de carga (Q) y la carga aplicada por el gato ($p \cdot S_{ff}$), será la constante de calibración buscada, k_m . En condiciones ideales, de esta relación debería desprenderse que el gato trasmite completamente la presión interna y que, por tanto, k_m sería igual a la unidad. La influencia de la rigidez del material y de la coacción que ejercen las soldaduras, hace que el gato no transmita esta presión completamente, obteniéndose un valor de k_m menor que la unidad.

En la Fig. 3.48 se muestra un instante captado durante el proceso de calibración de un gato plano.

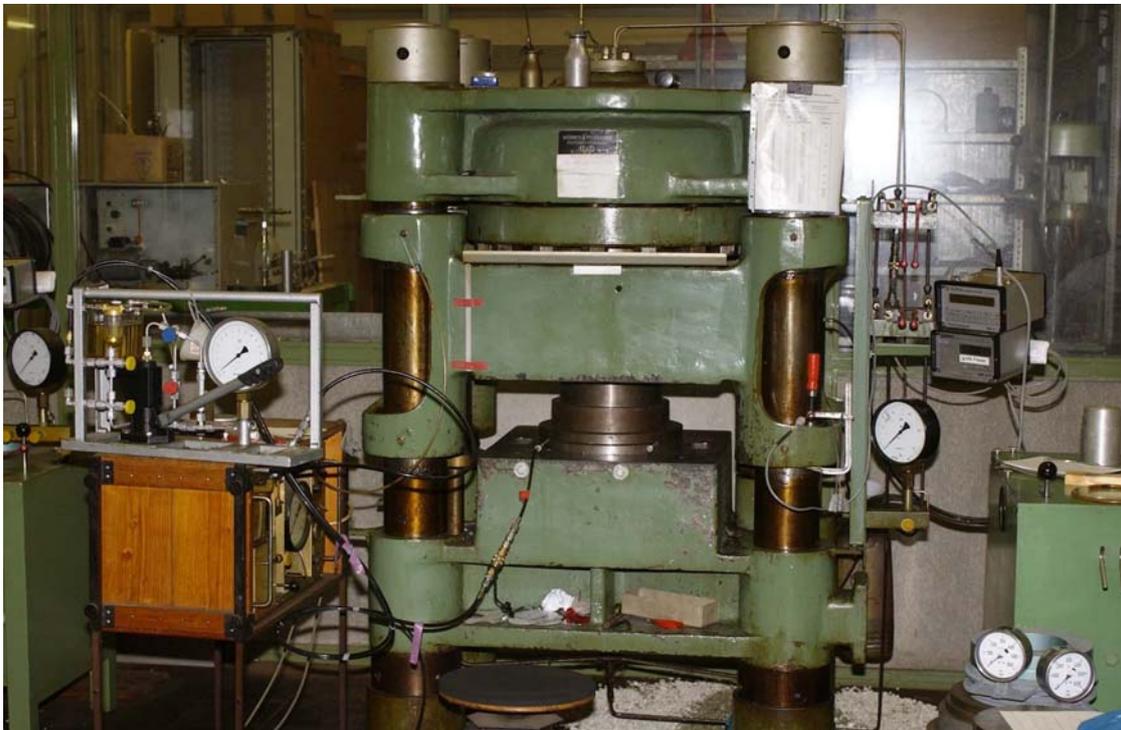


Fig. 3.48: Instante captado durante el proceso de calibración de un gato plano (Glötlz y Bovio 2002).

En la Fig. 3.49 se presentan las curvas de calibración obtenidas para diferentes tipos de gatos planos (Rossi 1988 y 1993b), puede apreciarse como los que presentan un mejor comportamiento, de forma general, son los semi-rectangulares.

Normalmente, para gatos planos nuevos, el factor de calibración K_m es proporcionado por el fabricante del gato plano. Si bien, como los gatos planos se ablandan por el uso repetido, estos deben ser recalibrados después de 4 o 5 ensayos, o con más asiduidad si durante el ensayo los gatos planos desarrollan deformaciones excesivas (Gregorczyk y Lourenço 2000). No obstante las variaciones obtenidas en los coeficientes no son significativas (SICEXPAR 2000-2003), aunque en todo caso se observa que la constante del gato aumenta a medida que aumenta el número de usos, circunstancia lógica pues progresivamente va perdiendo su rigidez intrínseca.

En cualquier caso, los gatos planos deberían ser restituidos a su espesor después de cada ensayo para asegurar que el factor de calibración permanece inalterado.

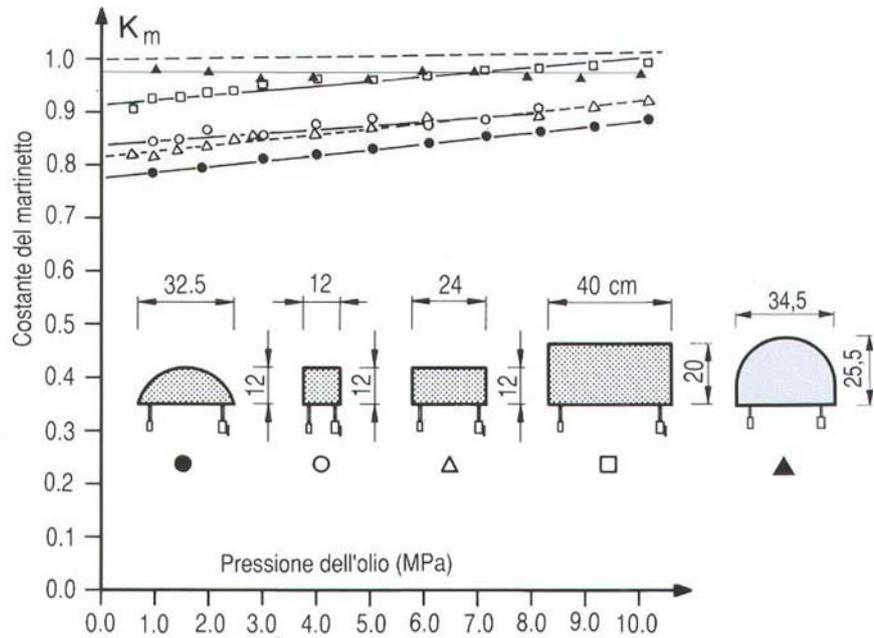


Fig. 3.49: Curvas de calibración obtenidas para diferentes tipos de gatos planos (Rossi 1993b).

3.1.5.3.2 Placas de relleno

Durante el ensayo puede ser necesario el emplear placas de relleno (Fig. 3.50), colocadas entre el gato plano y la superficie de la fábrica, para conseguir el acoplamiento perfecto del gato plano a la ranura y asegurar, de esta forma, una transferencia uniforme de presión al elemento portante.

El uso de placas de relleno evita la deformación excesiva de los gatos planos durante el ensayo, que pueden causar resultados inexactos en la prueba y cambiar el factor de calibración K_m asociado.

Las placas tendrán la misma forma y tamaño que los gatos planos empleados, pudiendo ser de tres tipos: placas aisladas, placas múltiples o placas con cojinetes amortiguadores (estas calzas se asientan inicialmente presurizando entre el 75 y el 80% de la fuerza de compresión máxima del muro, permitiendo que la calza se adapte a los vacíos e irregularidades de la ranura).

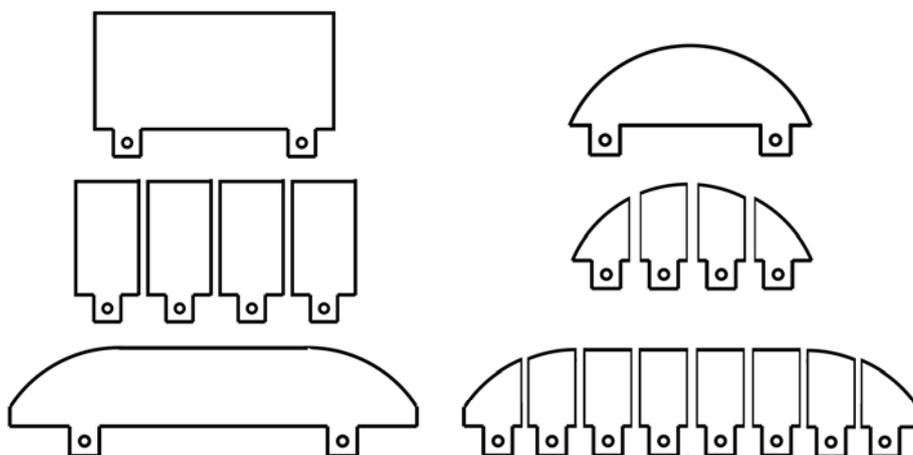


Fig. 3.50 Ejemplos de láminas de relleno de pieza aislada y de piezas múltiples.

No está permitido enlazar la hendidura una vez que el gato plano esté en su interior, dado que la inyección fluiría dentro de los huecos y grietas existentes pudiendo desembocar en cambios locales del comportamiento de la fábrica (Gregorczyk y Lourenço 2000), dado que podría afectarse la rigidez del muro.

3.1.5.3.3 Sistema hidráulico

La presión suministrada por una bomba hidráulica (Fig. 3.51 y 3.52) debe ser controlada por medio de comparadores o por transductores de presión, con rango similar a la máxima presión de operación del gato plano, y precisión de 1% de la escala hidráulica completa.

El sistema deberá ser capaz de suministrar y mantener durante aproximadamente 5 minutos una presión igual a la máxima admitida por el gato.



Fig. 3.51: Bomba hidráulica manual Glötzl M2H16 de la casa alemana Glötzl, empleada en el laboratorio de ensayos no destructivos del Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria.

Fig. 3.52: Bomba hidráulica manual con manómetro (0-50 bar), de la casa comercial Controls, modelo 58-D0568/A (nº serie 16110501), empleada en el laboratorio de ensayos no destructivos del Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria.

El sistema hidráulico lo completan los manguitos de conexión de la bomba con el gato plano y los de conexión de los gatos planos entre sí, en el caso del gato plano doble.

El fluido hidráulico inyectado en el sistema caso de emplear la bomba Glötzl M2H16, según especificaciones del fabricante, está compuesto por una mezcla de queroseno y petróleo blanco al 10% en volumen.

3.1.5.3.4 Equipo de medida de desplazamientos.

Las deformaciones pueden ser calculadas a partir de los desplazamientos registrados mediante comparadores mecánicos, por transductores potenciométricos o por LVDTs (Linear Variable Displacement Transducers).

El equipo de medida de desplazamientos debe tener una precisión de al menos 0.0005 cm. La normativa ASTM requiere para el extensómetro una precisión de ± 0.005 % de la distancia entre puntos de control. Por su parte, las recomendaciones RILEM requieren una precisión de 0.1 % de la distancia entre puntos de control. El equipo debe ser capaz de medir desplazamientos superiores a los 0.5 cm.

3.1.5.3.4.1 Ensayo de gato plano simple.

En el caso del ensayo de tensión, los puntos de referencia sobre la fábrica se sitúan por encima y por debajo de la hendidura. Las primeras medidas deben ser tomadas antes de ejecutar la roza, para luego continuar con su registro una vez finalizada ésta. Es por ello que la instrumentación para la medida de los desplazamientos no puede interferir con el equipo que se empleará para la remoción del mortero. Por tanto, en el ensayo de gato plano simple el registro de los desplazamientos se realiza mediante comparadores (Fig. 3.53 y 3.54).

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

Fig. 3.53 y 3.54: Instante captado durante el registro tanto de la distancia inicial previamente a la ejecución de la roza, como del desplazamiento registrado por un par de puntos de control durante un ensayo de gato plano simple llevado a cabo en una sillería arenisca ensayada en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.



El comparador empleado en los ensayos es de la casa comercial Mayes instruments, modelo FM-4 (nº serie 5816).

3.1.5.3.4.2 Ensayo de gato plano doble.

En el ensayo de deformación puede optarse por llevar a cabo un control de desplazamientos discreto, mediante el empleo de comparadores (Fig. 3.55) o bien monitorizar la evolución de las distancias de referencia mediante transductores electrónicos (Fig. 3.56).



Fig. 3.55: Instante tomado durante el registro del desplazamiento registrado por un par de puntos de control durante un ensayo de gato plano simple llevado a cabo en Zarratón (La Rioja).

Fig. 3.56: Detalle de la disposición de cuatro transductores electrónicos verticales y dos horizontales para monitorizar la evolución de los desplazamientos durante la realización de un ensayo de gato plano doble ejecutado sobre un muro de adobe realizado en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

Fig. 3.57: Aspecto general de los transductores electrónicos dispuestos en uno de los muretes de ladrillo hueco ensayados en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

Para la realización de un gato plano doble con sensores electrónicos (LVDTs, transductores potenciométricos, etc.) el procedimiento se realiza de la misma manera y siguiendo la misma filosofía y manera de proceder. En lugar de pegar los puntos de control, se fijan los sensores de desplazamiento abarcando una longitud de control determinada. La configuración de montaje es la misma, en general 4 sensores verticales y 2 horizontales (Fig. 3.57).

En relación con los sensores, en primer lugar debe inspeccionarse el muro para elegir los posibles lugares donde fijar los mismos. Una vez marcados los extremos de las alineaciones de control, de longitud habitual 40 cm o mayor, deben fijarse los sensores a la superficie.

Para ello, según los sensores y la superficie del elemento portante se elegirá una manera u otra de adherirlos a la pared. Durante los ensayos, normalmente, se ha empleado la fijación mecánica

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

mediante tirafondos alojados en tacos introducidos en una perforación previa (Fig. 3.58). No obstante también pueden emplearse adhesivos de fijación.

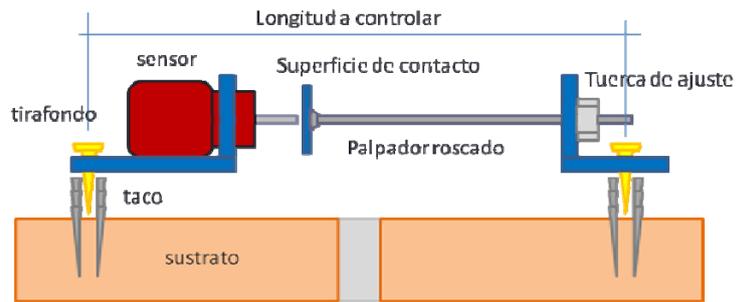


Fig. 3.58: Detalle de la fijación mecánica mediante tirafondos de un sensor de desplazamiento.

Finalmente, para registrar de forma continua la evolución de la señal eléctrica (voltaje) que permitirá obtener el desplazamiento es necesario disponer de un sistema de adquisición de datos. En este sentido en las Fig. 3.59 y 3.60 se ilustran los dos “data logger” empleados en el desarrollo de la presente tesis doctoral.



Fig. 3.59: Detalle general del sistema de adquisición de datos, marca Solartron IMP 35951C-35951B, equipado con tarjeta a PC IMP 25954C.



Fig. 3.60: Sistema portátil de adquisición, acondicionamiento y registro para la medida de hasta 16 canales analógicos de entrada, con bastidor modelo Cronos SL-2, marca IMC, y con 2 módulos de 8 entradas diferenciales modelo CRSL/DCB-8-D, marca IMC (Laboratorio de ensayos no destructivos del Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria, LABEND-UC).

Igualmente, durante los ensayos en los que se han empleado transductores electrónicos de desplazamiento, se ha dispuesto un transductor de presión para controlar la presión del fluido hidráulico introducido, de esta manera puede comprobarse la evolución de la ley presión-deformación en tiempo real.

Un aspecto importante es donde ubicar dicho transductor de presión, para laminar posibles picos de presión en la señal registrada asociados con las sobrepresiones generadas durante el bombeo en cada uno de sus ciclos. En este sentido, tras varias pruebas (Fig. 3.61 y 3.62), se decidió ubicar dicho transductor de presión en la parte final del circuito hidráulico dado que dichas sobrepresiones generadas en la salida de la bomba no afectaban tanto a la señal de presión registrada.

La ejecución del ensayo de gato plano doble materializado con transductores electrónicos, tanto para el control de los desplazamientos como de la presión, se facilita bastante, en tanto que se automatiza sensiblemente el proceso. Igualmente, y más importante, se eliminan varios errores relacionados con:

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

- La colocación del comparador en cada medida.
- Lectura de la distancia en el reloj del comparador.
- Lectura de la presión en el manómetro.

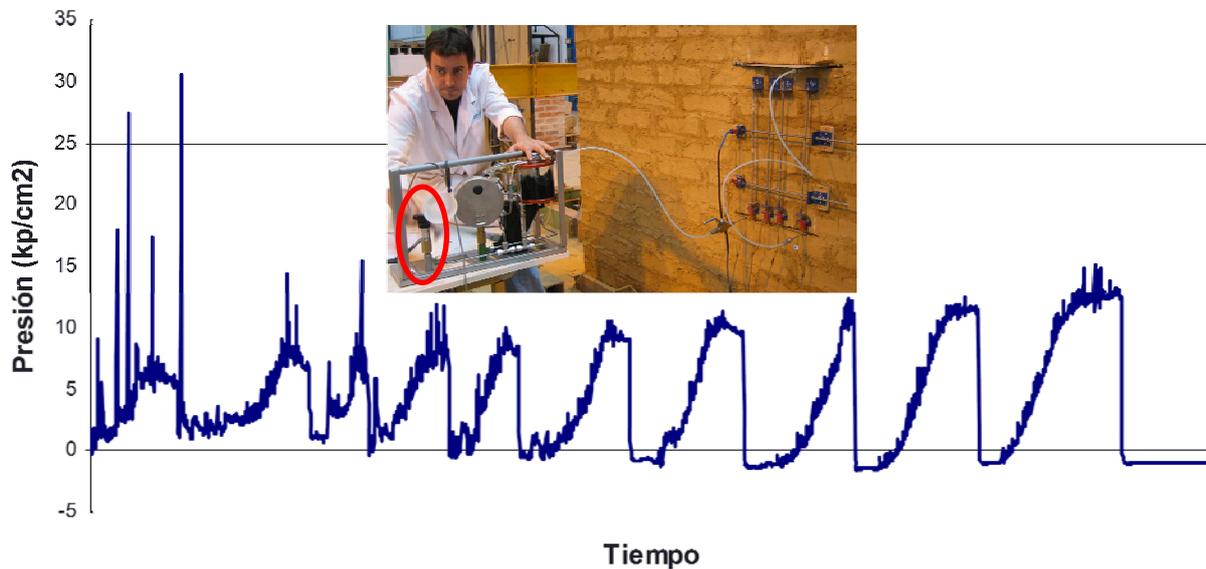


Fig. 3.61: Evolución de la presión registrada durante el ensayo de gato plano doble realizado sobre un muro de tapial en el Laboratorio de Estructuras de la UC con fecha 30-09-09. El sensor de presión se ubica (óvalo rojo) en la parte inicial del circuito, en la conexión habilitada para uno de los manómetros, comprobándose que la señal registrada está contaminada con picos de presión múltiples y de amplitud significativa. Cada pico se corresponde con un ciclo de bombeo.

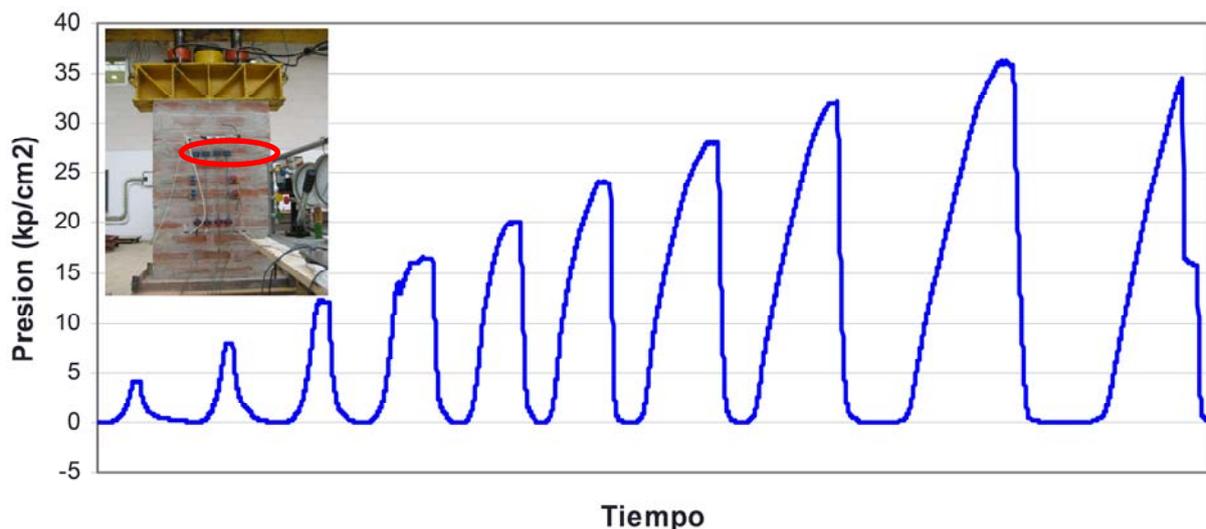


Fig. 3.62: Evolución de la presión registrada durante el ensayo de gato plano doble realizado sobre un murete de ladrillo hueco en el Laboratorio de Estructuras de la UC con fecha 10-03-10. En este caso, el sensor de presión se ubica en la parte final del circuito (óvalo rojo), apreciándose como los picos se han laminado de manera significativa, siendo la señal registrada bastante más funcional.

3.2 Materiales y procedimientos empleados en los ensayos de corte in situ.

La norma ASTM C 1531-02 (2002), y actualizaciones posteriores, expone el procedimiento de varios métodos de ensayo para la medida in situ de la resistencia al corte de la junta de mortero

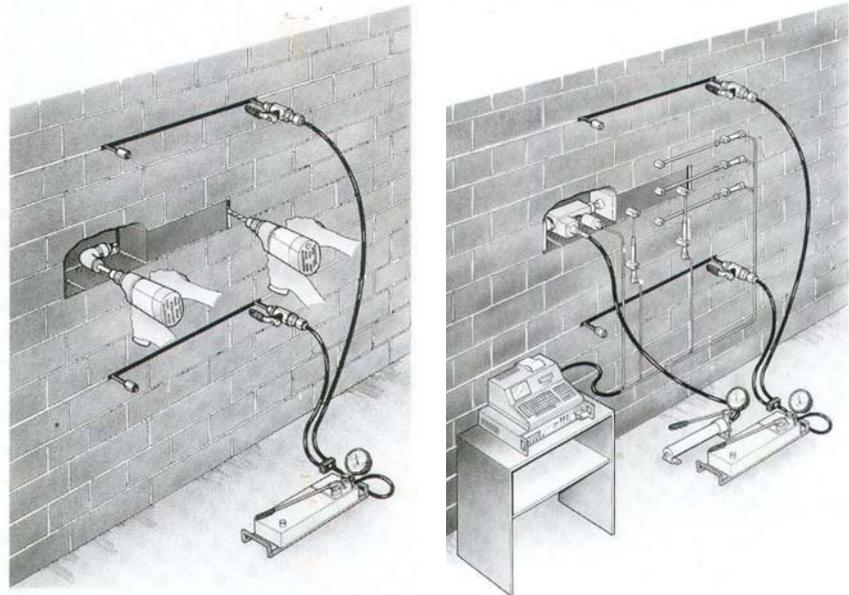
Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

de fábricas sin armar y fábrica de bloque hueco (shove test o push test). Concretamente, dos son los métodos expuestos:

- Método I: con gatos planos para controlar la tensión normal de compresión (Fig. 3.63 y 3.64). Este método se emplea para determinar la resistencia al corte en juntas de mortero cuando el estado tensional de compresión del ensayo in situ se controla mediante doble gato plano (Fig. 3.65). La carga horizontal es introducida mediante un dispositivo hidráulico de émbolo. El desplazamiento horizontal de la unidad ensayada se controla a lo largo del ensayo mediante transductores. Para este método es necesario extraer una pieza simple de la fábrica en cada uno de los lados de la que va a ser susceptible de ensayo.

Fig. 3.63: Técnica empelada para el aislamiento del ladrillo involucrado en la prueba de corte in situ (Rossi 1993b; Modena y Rossi 1992)

Fig. 3.64: Esquema de la prueba para la determinación de la resistencia al corte en la junta de mortero (Rossi 1993b; Modena y Rossi 1992)



- Método II: sin gatos planos para controlar las tensiones de compresión. Se emplea para determinar la resistencia al corte en juntas de mortero cuando se realiza una estimación de la tensión de compresión existente en la localización del ensayo. La carga horizontal es introducida bien mediante un dispositivo hidráulico de émbolo (Método II-a, Fig. 3.66) o mediante un gato plano de pequeñas dimensiones (Método II-b, Fig. 3.67). En el Método II-a son removidas una pieza simple de la fábrica a un lado de la pieza susceptible de ensayo y una llaga de mortero al otro lado; mientras que en el Método II-b son removidas las dos llagas de mortero existentes a ambos lados de la pieza susceptible de ensayo.

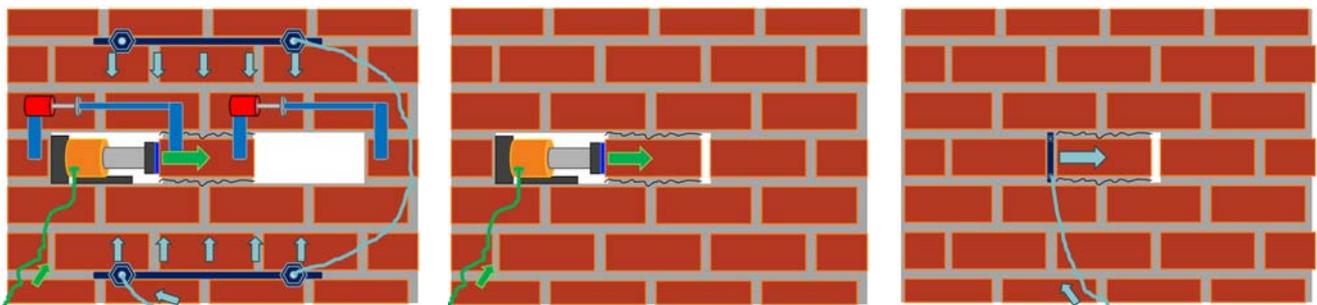


Fig. 3.65: Configuración general del ensayo para la medida in situ de la resistencia al corte de la junta de mortero de fábricas controlando el nivel tensional normal de compresión mediante dos gatos planos (Método I).

Fig. 3.66: Configuración general del ensayo para la medida in situ de la resistencia al corte de la junta de mortero de fábricas cuando la tensión de compresión existente en la localización del ensayo es estimada, y la carga horizontal es introducida mediante un dispositivo hidráulico de émbolo (Método II-a).

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

Fig. 3.67: Configuración general del ensayo para la medida in situ de la resistencia al corte de la junta de mortero de fábricas cuando la tensión de compresión existente en la localización del ensayo es estimada, y la carga horizontal es introducida mediante un gato plano de dimensiones reducidas (Método II-b).

El “Uniform Code for Building Conservation” (UCBC) proporciona una relación empírica, en el Apéndice del Capítulo 1, que relaciona la resistencia a corte de la junta de mortero, obtenida mediante estos métodos de ensayo, con la resistencia a corte de la fábrica (Transue 2003).

El ensayo de corte in situ fue desarrollado, originalmente, para la evaluación sísmica de estructuras de fábrica en la costa Oeste de los Estados Unidos, y es descrito en la Norma 21-6 “In Place Masonry Shear Tests” del “Uniform Building Code” (UBC). Dicho Apéndice del Capítulo 1 del UCBC requiere el uso de la Norma 21-6 del UBC para evaluar muros de fábrica que deben resistir fuerzas sísmicas¹.

El empleo de esta referencia ha de tomarse con cautela en tanto que la relación dada para la resistencia al corte en el “Uniform Code for Building Conservation” es de carácter empírico en base a ensayos realizados a principios del siglo XX en fábricas sin reforzar. La relación asume que la resistencia al corte del muro está limitada por la resistencia al corte de las juntas de mortero más que por la resistencia al corte de las unidades que componen la fábrica.

En lo que sigue se va a desarrollar la metodología relacionada con el Método I en tanto que, en conjunción con el ensayo de gato plano doble, proporciona más información sobre la fábrica. Para más información sobre la técnica se remite al lector a las referencias Schmid (1979), Kariotis et al.

243

¹ En este sentido, dicha Norma refiere que la resistencia a corte de una fábrica sin refuerzo, v_m , debería determinarse a partir de:

$$v_m = 0.56 \cdot v_t + \frac{0.75 \cdot P_D}{A}$$

Donde:

- v_t : Resistencia al corte del mortero.
- P_D : Carga muerta existente en la localización del ensayo.
- A : Área movilizada de la fábrica.

v_t no debe de exceder 689.5 kPa para la determinación de v_m , pudiéndose obtener a partir de la siguiente expresión:

$$v_t = \frac{V_{test}}{A_b} - P_{D+L}$$

Donde:

- V_{test} : Carga registrada hasta el primer movimiento del ladrillo ensayado.
- A_b : Área de contacto entre la pieza y el mortero.
- P_{D+L} : Tensión resultante de la suma de las cargas muertas y de las cargas vivas existentes en el lugar e instante del ensayo.

(1985), Atkinson et al. (1988), Abrams y Epperson (1989), Epperson y Abrams (1989), Noland et al. (1990a), Schuller et al. (1995), Schuller (2003) y Transue (2003)

3.2.1 Ensayo de corte in situ para la determinación de la tensión de adhesión y el coeficiente de fricción de una fábrica.

Dicha metodología trata de estimar, in situ, la tensión de adhesión, τ_0 , y el coeficiente de fricción de la fábrica, μ .

Como ya se ha referido, 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.

Este método de ensayo puede considerarse como una extensión del método de ensayo de ASTM C1197, dado que el ensayo de doble gato plano, llevado a cabo como se indica en dicha normativa, proporciona la mitad de los requerimientos a tener en cuenta en el desarrollo del ensayo de corte in situ.

3.2.1.1 Equipamiento requerido

El siguiente equipamiento es requerido:

- Un gato hidráulico horizontal.
- Un bomba, manual o eléctrica, con manguitos de conexión para presurizar el gato de carga horizontal.
- Equipo para la medida de la carga introducida por el gato hidráulico horizontal.
- Placas de acero. Deberían interponerse placas de carga de acero entre el gato hidráulico horizontal y la pieza a ensayar para distribuir la carga uniformemente en su sección transversal. Según ASTM C 1531-02 (2002) las placas de carga deberían:
 - Tener un espesor mínimo igual a 1/8 de su dimensión vertical.
 - Tener una dimensión vertical menor (3.2 mm, 1/8 de pulgada) que la altura de la unidad a ensayar. Las placas deberían estar centradas verticalmente en el extremo de la pieza.
 - Tener una dimensión horizontal igual o mayor que el espesor de la pieza.
 - La superficie de contacto de la placa de carga con la pieza cargada debería estar revestida con una almohadilla de neopreno de 1.6 mm (1/16 de pulgada) de grosor, para evitar concentraciones de tensiones; la almohadilla debería tener una dureza mediante durómetro en el rango de 50 a 60.
- Dos gatos planos y el equipamiento asociado para medir el estado de compresiones (ver apartado 3.1.5.2).
- Extensómetros mecánicos o dispositivos electrónicos para medir el desplazamiento horizontal de la unidad a ensayar. Dichos medidores de deformaciones deberán sujetarse firmemente a la fábrica mediante el empleo de dispositivos de anclaje o adhesivos rígidos.

3.2.1.2 Preparación del emplazamiento del ensayo.

En primer lugar es necesario realizar sendas rozas para la inserción de los dos gatos planos movilizados para introducir el nivel de tensión vertical requerido (Fig. 3.68), de la forma expuesta en el apartado 3.1.3 de la presente tesis doctoral.

La norma ASTM C 1531-02 (2002) recomienda ubicar un gato plano en la parte superior de la pieza seleccionada para realizar el ensayo, dos hiladas por encima, y centrada respecto a ésta

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

con unas tolerancias de ± 3.2 mm (1/8 de pulgada), Fig. 3.68. Igualmente, la ubicación del gato plano inferior debe realizarse cinco hiladas por debajo del gato plano dispuesto en la parte superior, centrado bajo la pieza de ensayo con una tolerancia de ± 3.2 mm (1/8 de pulgada).

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 a mediante el empleo de dos gatos planos y, por ende, la tensión normal es conocida.

A continuación, deben extraerse las dos piezas dispuestas en los laterales de la seleccionada (Fig. 3.69).

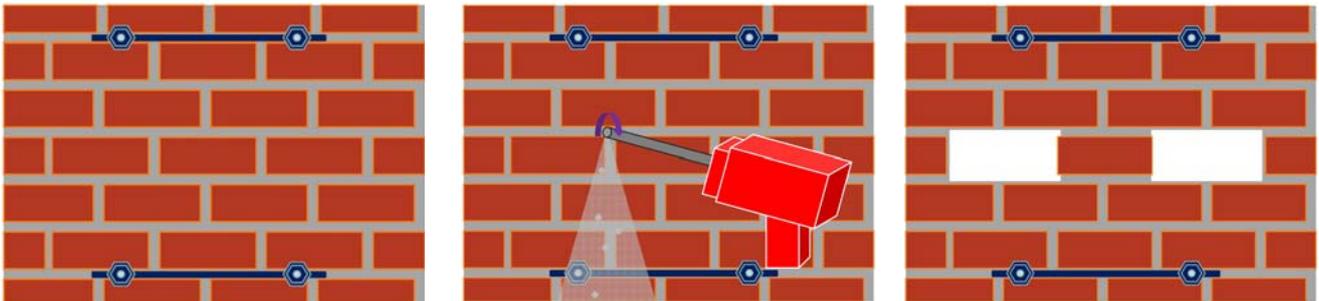


Fig. 3.68: Ejecución de las rozas e inserción de los gatos planos para el posterior control del nivel tensional vertical requerido.

Fig. 3.69: Remoción de las piezas dispuestas a ambos lados de la seleccionada para realizar el ensayo de corte in situ.

Fig. 3.70: Configuración del área de ensayo una vez extraídas las piezas existentes a ambos lados de la seleccionada para realizar el ensayo de corte in situ.

La norma ASTM C 1531-02 (2002) refiere que debe evitarse ejecutar el ensayo en áreas en las que las juntas de mortero no muestren ser paralelas, y que la localización del área de ensayo debe estar lo suficientemente lejos de los huecos existentes en el muro o de los extremos del mismo, de forma que los gatos, tanto los verticales como el horizontal, tengan opuestos a ellos suficiente extensión de fábrica como para reaccionar las fuerzas generadas durante el proceso de carga de la unidad ensayada.

3.2.1.3 Ejecución del ensayo.

Una vez extraídas las piezas referidas (Fig. 3.70) es necesario el introducir el estado tensional normal de compresión requerido empleando los gatos planos.

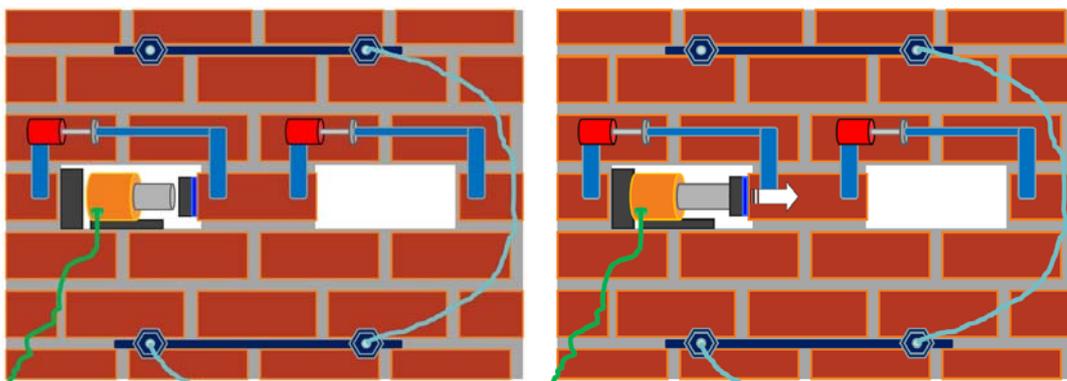


Fig. 3.71: Disposición de transductores, gato hidráulico y placas de acero con almohadillas de neopreno para favorecer la distribución de la carga en la testa de la pieza.

Fig. 3.72: Incremento gradual de la presión en el dispositivo hidráulico horizontal, bajo un nivel tensional vertical de compresión nulo.

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

Para ello, previamente, debe instrumentarse la unidad a ensayar mediante la fijación de sendos transductores electrónicos de desplazamiento como se muestra en la Fig. 3.71. A continuación, ubicar el gato de carga, provisto de una rótula para evitar introducir esfuerzos de flexión, y las placas de acero, provistas de almohadillas de neopreno, para proveer la distribución de la carga en la testa de la pieza.

Obviamente, para proporcionar la fuerza horizontal de forma adecuada el gato debe de disponerse centrado respecto de la pieza a ensayar.

Una vez configurado el sistema como se refiere en la Fig. 3.73, el siguiente paso es, con presión nula dentro de los dos gatos planos y con la válvula de su circuito hidráulico de los mismos cerrada, incrementar la presión en el dispositivo hidráulico horizontal gradualmente (Fig. 3.74), de forma que el fallo de la junta suceda entre 30 segundos y 2 minutos después de iniciar la carga, 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 (Fig. 3.73) 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 MPa).

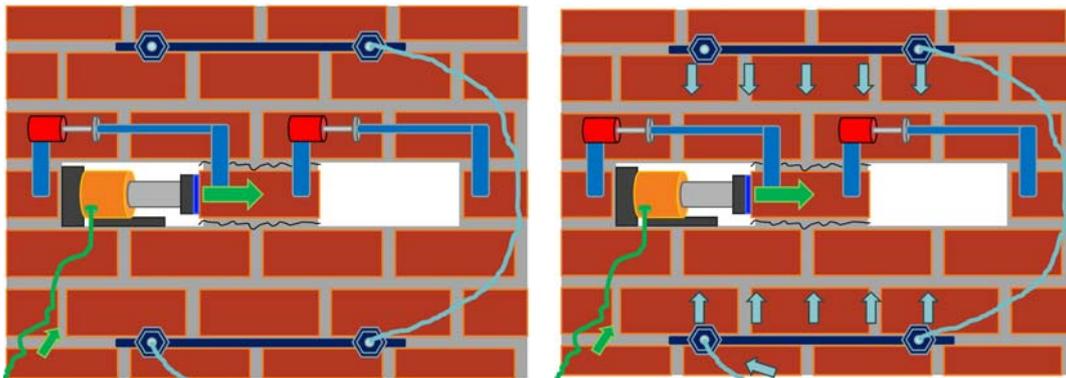


Fig. 3.73: Rotura de la traba entre la pieza y el mortero bajo una carga constante horizontal (sin tensión de compresión). Dicha carga entre el área de las juntas de mortero representa la tensión de adhesión, τ_0 .

Fig. 3.74: Incremento gradual de la presión en el dispositivo hidráulico horizontal, bajo un nivel tensional vertical determinado.

A continuación, debe incrementarse la presión en los gatos planos para inducir el siguiente nivel de tensiones normales de compresión deseado y repetir el proceso de carga horizontal hasta alcanzar la máxima carga para este nivel de tensiones normales de compresión (Fig. 3.74).

Repitiendo la secuencia podría estimarse la tensión de corte del tendel asociada a diferentes niveles de tensiones normales de compresión.

Una vez acabado el ensayo, se libera la presión en el gato horizontal, después de que se haya tomado la medida final de desplazamiento, procediendo a su extracción. A continuación, se libera 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.

3.2.1.4 Estimación de la tensión de adhesión y el coeficiente de fricción de la fábrica.

Partiendo de dichas fuerzas horizontales, el índice medio de la resistencia a corte en la junta de mortero, τ_i , para cada nivel de tensiones normales existentes sobre la pieza de ensayo, σ_v , se obtiene de la forma siguiente:

$$\tau_i = \frac{P_{hi}}{A_j} \quad (3.5)$$

Donde:

- P_{hi} : Máxima fuerza horizontal resistida por la pieza de ensayo bajo un nivel tensional normal de compresión “i”.
- A_j : Área bruta de los tendeles superior e inferior en el caso de fábricas de piezas macizas, o el área neta de mortero en el caso de fábricas de piezas perforadas.

En general, para una pieza maciza la tensión tangencial asociada a cada nivel de tensión vertical será (Mónaco y Santamaria 1998):

$$\tau_i = \frac{P_{hi}}{2 \cdot A} \quad (3.6)$$

Siendo A el área de la junta entre el ladrillo y el mortero (en un aparejo a sogas $A = \text{Soga} \times \text{Tizón del ladrillo}$).

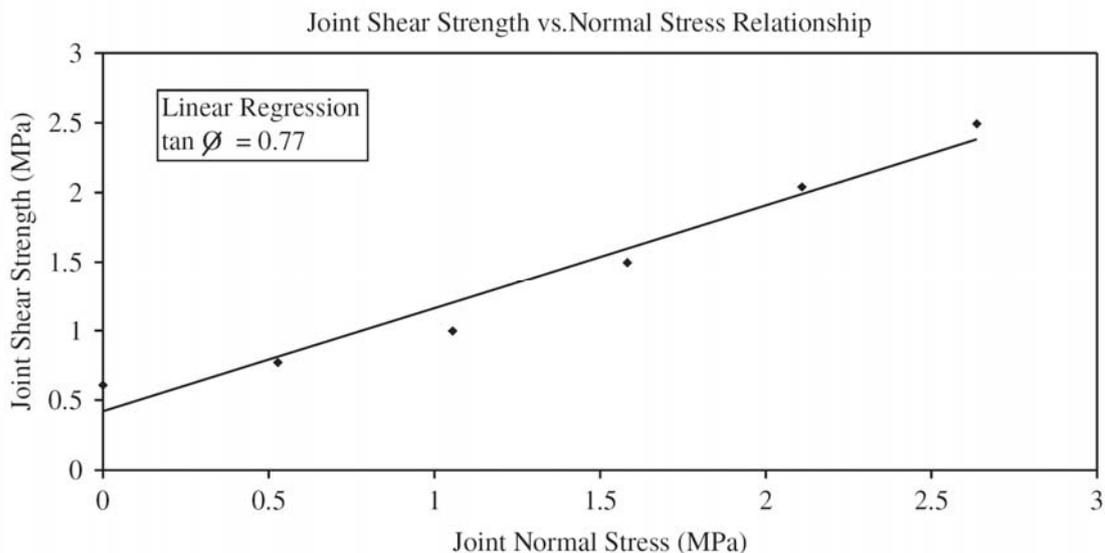


Fig. 3.75: Gráfico $\sigma_v - \tau_i$, del que puede obtenerse el coeficiente de fricción de la fábrica, μ , y la tensión de adhesión, τ_0 (Schuller 2003).

Finalmente, podría representarse el gráfico $\sigma_v - \tau_i$, Fig. 3.75, 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, $\Phi = \arctan(\mu)$.

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

- 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 (σ_v) se calcula empleando la relación siguiente:

$$\tau_i = \tau_0 + \mu \cdot \sigma_v \quad (3.7)$$

Cabe realizar un comentario sobre las tensiones normales existentes sobre la pieza de ensayo, σ_v (ASTM C 1531-02 2002). En las prácticas pasadas se asumía que las tensiones normales existentes sobre la pieza de ensayo eran equivalentes a la tensión uniforme impuesta sobre la fábrica mediante gatos planos (σ_{ff}), sin embargo, análisis recientes han mostrado que la distribución de tensiones real sobre la pieza es significativamente diferente.

Es necesario modificar el nivel tensional normal aplicado a la pieza por un factor “j”, para convertir la tensión debida al gato plano en tensión normal sobre la pieza de ensayo:

$$\sigma_v = j \cdot \sigma_{ff} \quad (3.8)$$

Donde:

- σ_v : Tensión normal sobre la pieza de ensayo.
- j : Factor de modificación.
- σ_{ff} : Tensión aplicada por el gato plano a la fábrica, introducida de acuerdo con el método de ensayo ASTM C1197.

Han sido desarrollados modelos analíticos bidimensionales y tridimensionales de elementos finitos para el ensayo de corte descrito, con la finalidad de determinar la distribución de tensiones normales sobre la junta ensayada.

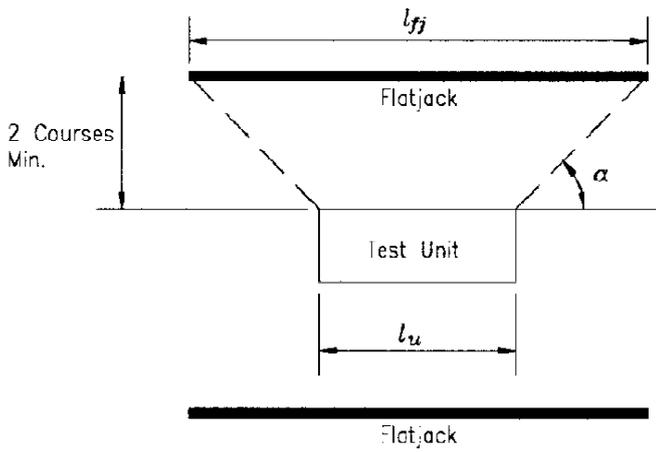
El análisis de un ensayo de corte in situ sobre una fábrica de ladrillo de dos hojas, con la configuración que se muestra en la Fig. 3.76, ha mostrado que la distribución de tensiones normales sobre la pieza de ensayo no es uniforme, siendo la tensión media equivalente a 1.7 veces la tensión aplicada por los gatos planos. De ahí que el factor de modificación “j” sea igual a 1.7 para este caso.

Dicho factor de modificación “j” obtenido es muy próximo al alcanzado al suponer que la parte de la presión comunicada por los gatos planos que le llega a la pieza de ladrillo es la referida en la Fig. 3.77, para la que se obtiene un factor “j” de 1.65 introduciendo las dimensiones de los gatos planos y del ladrillo empleadas en el modelo analítico referido (Fig. 3.76).

El valor de “j” mencionado sólo es aplicable a esa configuración particular. Es razonable asumir que, sin embargo, este factor puede aplicarse en casos donde la configuración del ensayo sea proporcional a la que se muestra en la Fig. 3.65 (el ángulo α mostrado en la Fig. 3.76 puede emplearse para comparar diferentes configuraciones de ensayos).

Tendrían que llevarse a cabo ensayos más específicos para determinar el estado real de tensiones normales de compresión actuando sobre un espécimen para otras configuraciones de ensayos con diferentes geometrías.

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

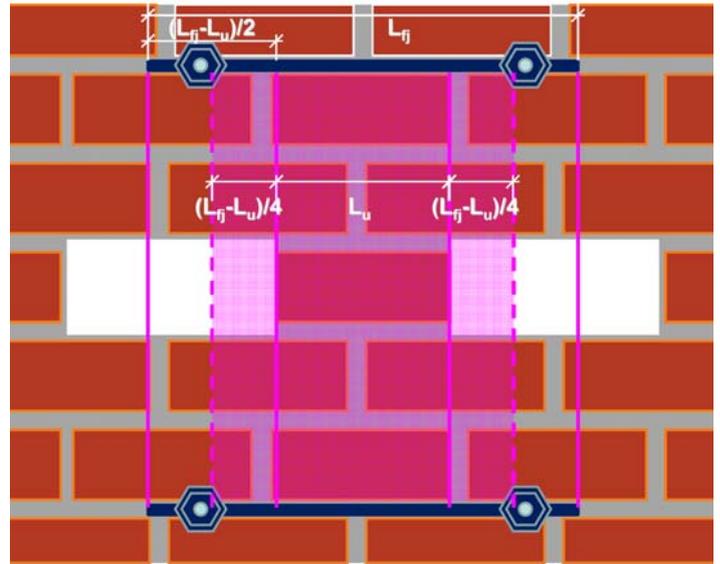


Analytical Model:

$$l_{fj} = 19.0 \text{ inches} \\ (48.3 \text{ cm})$$

$$l_u = 8.25 \text{ inches} \\ (21.0 \text{ cm})$$

$$\alpha = 45^\circ$$



$$L_{fj} = 48.3 \text{ cm}; L_u = 21.0 \text{ cm}$$

$$j = \frac{\frac{L_{fj} - L_u}{4} + L_u + \frac{L_{fj} - L_u}{4}}{L_u} = \frac{6.825 + 21.0 + 6.825}{21.0} = 1.65$$

Fig. 3.76: Configuración geométrica del modelo analítico (ASTM C 1531-02 2002).

Fig. 3.77: Aproximación al valor del factor de modificación "j".

3.3 Materiales y procedimientos empleados en los ensayos Hole Drilling.

En este apartado se describirán los materiales necesarios para la realización de un ensayo de hole drilling, así como la preparación previa y el procedimiento empleado para la consecución de los resultados.

El procedimiento se compone de varios pasos que tienen todos ellos una fuerte incidencia en los resultados. Por otra parte, todo el trabajo experimental se realiza sobre elementos verticales lo que dificulta la experimentación (Barrallo et al. 1994, 1994a, 1995, 1995a, 1997 y 1999; Sánchez-Beitia y Barrallo 2001; Sánchez-Beitia et al. 1999; Sánchez-Beitia S. 2001, 2002 y 2007).

3.3.1 Preparación de la zona analizada

En el caso de fábricas de sillería o mampostería la zona de medida se ha elegido de tal modo que todo el proceso experimental pueda realizarse en un sillar o mampuesto. Nunca las bandas o el taladro deben incluir el mortero.

Una vez elegida la zona, debe pulirse ligeramente la superficie (Fig. 3.78 y 3.79). El pulido garantiza que las bandas extensométricas se van a adherir sobre una superficie razonablemente lisa. En la mayor parte de los casos, la superficie del elemento analizado (p. ej. muro, pilar, contrafuerte, arco, etc.) presenta irregularidades superficiales o pátinas que deben ser eliminadas (Fig. 3.80 y 3.81).



Fig. 3.78: Piedra antes de la preparación.

Fig. 3.79: Preparación y regulación de la superficie con radial.



Fig. 3.80: Instante captado durante el proceso de preparación y limpieza de la superficie pétreo en la que se realizó un hole drilling en el palacio de Riva-Herrera de Santander.

Fig. 3.81: Aspecto final del mampuesto a ensayar una vez acondicionado.

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

En lo que respecta a las fábricas de ladrillo el pulido superficial debe de abarcar una zona tal que asegure que las bandas extensométricas se colocarán sobre ladrillo (cada una en un ladrillo) y que el taladro se centre en otro. En todo caso, en el análisis de fábricas de ladrillo el taladro abarcará forzosamente mortero y ladrillo.

3.3.2 Elección y pegado de las bandas extensométricas

En vez de utilizar tres bandas extensométricas como propone la Norma ASTM E837-95, para el análisis de las fábricas de sillería se van emplear siempre ocho bandas con el objeto de eliminar o modular posibles errores experimentales. En general, no es posible utilizar un número tan elevado de galgas en fábricas de ladrillo por lo que se empleará el número inicial de tres, si bien, cuando sea posible, el número de galgas empleadas será mayor.

Las galgas empleadas son en todos los casos de 6 mm de longitud. Esta dimensión asegura que miden, al menos, diez veces más que el tamaño de grano del material.

En estos experimentos se emplearon galgas extensométricas cableadas de la marca Tokyo Sokki Kenkyujo, tipo FLA-6-11, con un factor de gaga de 2.1.

Sobre la zona pulida de la fábrica se marca un sistema de referencia vertical-horizontal y ocho radios cada 45°. En cada radio se marcan las zonas de pegado de las bandas que se colocarán sobre una circunferencia de 4 cm de radio.

Para ello debe de emplearse un nivel (Fig. 3.82) para replantear la dirección vertical, y una plantilla (Fig. 3.83) para obtener la dirección de los radios cada 45°, y marcar la ubicación de las bandas (Fig. 3.84).

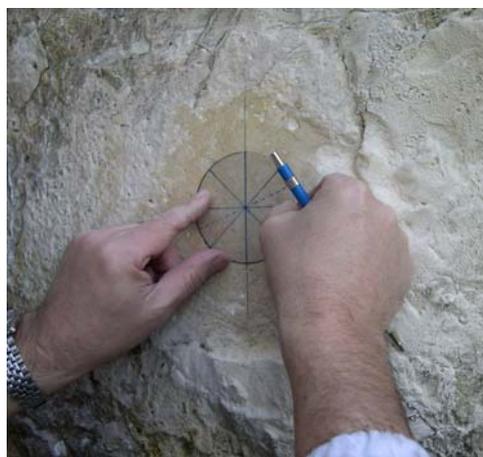


Fig. 3.82: Obtención de la alineación vertical mediante nivel de burbuja.

Fig. 3.83: Replanteo de la roseta extensométrica mediante plantilla.

Fig. 3.84: Aspecto final antes del pegado de las galgas. Ubicación de las 8 galgas extensométricas en la superficie del elemento portante.

Una vez tenemos replanteado el centro y la posición de las bandas extensométricas, debe de fijarse cada una en su localización correspondiente. Para ello, previamente al pegado en si mismo, se aplica una mezcla bicomponente (Metal CEYS) cuya finalidad no es otra que preparar el soporte de forma adecuada (obtener una superficie regular, plana, rellenando poros y otras discontinuidades que podrían afectar en la fase de medida, Fig. 3.85 y 3.86). Una vez aplicado, debe esperarse a que se seque y endurezca, para, a continuación, proceder a su lijado.

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



Fig. 3.85: Acondicionamiento de las superficies.

Fig. 3.86: Detalle de las superficies de pegado de las galgas.

A continuación, mediante un pegamento adhesivo adecuado (en los ensayos se empleó un cianocrilato de la marca Tokio Sokki), se adhieren a la superficie del sillar las ocho galgas, cada una sobre un radio (Fig. 3.87).

La longitud de la zona resistiva de las galgas empleadas es de 6 mm de longitud. A su vez la parte resistiva está integrada sobre un soporte plástico, ligeramente mayor, por lo que la longitud real de las galgas es de 8 mm. Si las galgas se colocan con uno de sus extremos sobre la circunferencia de 8 cm de diámetro, el diámetro real de la circunferencia de posición de las galgas será de 8.8 cm.

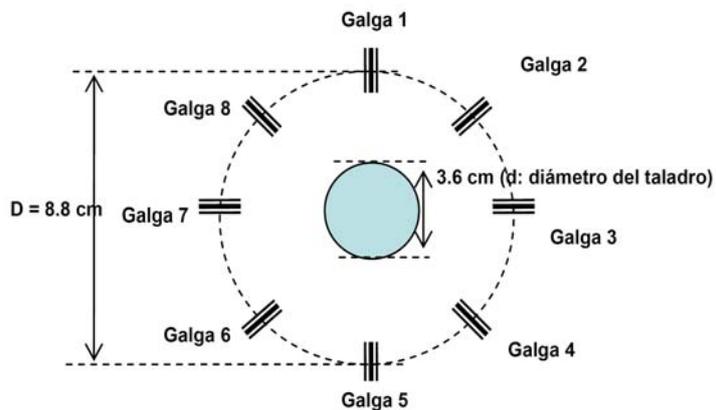


Fig. 3.87: Esquema de la posición de las ocho galgas en fábricas de sillería (Sánchez-Beitia 2006).

En el caso de fábricas de ladrillo, el radio de la circunferencia debe de garantizar que las bandas se colocarán sobre un ladrillo y el centro del taladro, a poder ser, se ubicará en otro (Fig. 3.88). Se puede utilizar una circunferencia de 4 cm de radio u otra de 6 cm de radio hasta encontrar al menos tres posiciones adecuadas.

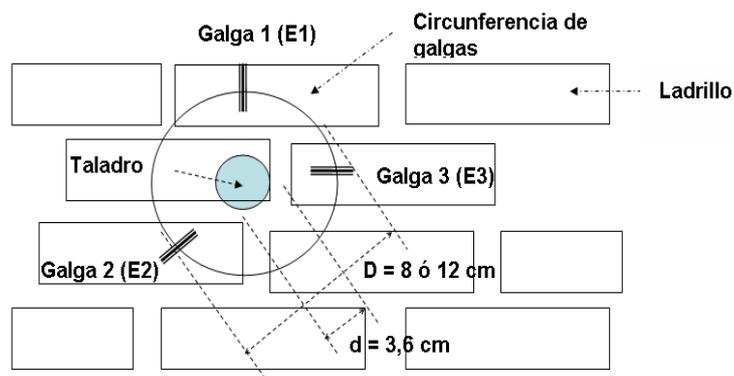


Fig. 3.88: Esquema de la posición de galgas en fábricas de ladrillo (Sánchez-Beitia 2006).

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

El proceso de pegado se inicia con la disposición de una gota de adhesivo sobre la cara de la banda que debe estar en contacto con la superficie (Fig. 3.89), para después posicionar la misma en el lugar y orientación correcta. Con la ayuda de un papel graso, para que el adhesivo no se adhiera, presionamos la banda, pasando el dedo varias veces asegurándose que la adhesión es correcta y que la banda queda perfectamente fijada (Fig. 3.90).



Fig. 3.89: Aplicación del adhesivo en la banda.

Fig. 3.90: Pegado, propiamente dicho, de la banda en el soporte.

Previamente a continuar con el ensayo, se recomienda encarecidamente proteger las bandas extensométricas, dado que por su gran sensibilidad, cuanto más aisladas del exterior y, por ende, más protegidas queden, más precisas serán las medidas obtenidas. Además al tratarse de un ensayo in situ, se está condicionado por las condiciones ambientales de lugar, circunstancia que redundante en la necesidad de la protección. A su vez, otro objetivo es proteger a las bandas del polvo generado durante la posterior perforación.



Fig. 3.91: Protección de las galgas extensométricas mediante adhesivo plástico maleable.

Fig. 3.92: Se aconseja dar una vuelta al cable de la banda sobre este material plástico, apretando con el dedo para que quede bien fijado al material de protección, de esta forma se evitan incertidumbres de medición relacionadas con la tensión del cable.

Fig. 3.93: Protección de las galgas extensométricas con cinta americana.

Para la protección se ha empleado un adhesivo plástico maleable suministrado en rollo (marca 5B Tape de la casa comercial Tokio Sokki). Se corta una porción, de longitud ligeramente superior a la de la banda, disponiéndola encima de la misma. Seguidamente, la cinta adhesiva debe extenderse aumentando su superficie hasta que proteja a la banda en toda su extensión (Fig. 3.91); a continuación, se aconseja dar una vuelta al cable de la galga sobre este material plástico,

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

apretando con el dedo para que quede bien fijado al material de protección (Fig. 3.92), de esta forma se evitan incertidumbres de medición relacionadas con la tensión del cable, incluso relacionadas con su peso propio, que podrían afectar a las medidas tomadas. Para finalizar la protección, se recomienda cubrir las galgas con cinta americana (Fig. 3.93).

3.3.3 Conexión de las galgas

Una vez adheridas las bandas extensométricas, se conectan mediante “medio puente de Wheastone” a un equipo multicanal de registro de deformaciones (Fig. 3.94 y 3.95).

Igualmente, sobre una zona alejada de la analizada, o sobre una porción del mismo material, se coloca y conecta otra banda extensométrica, adicional a las ya dispuestas, que servirá como banda de compensación de temperatura (Fig. 3.95 y 3.96). Esta galga tiene por objeto eliminar efectos térmicos no mecánicos.

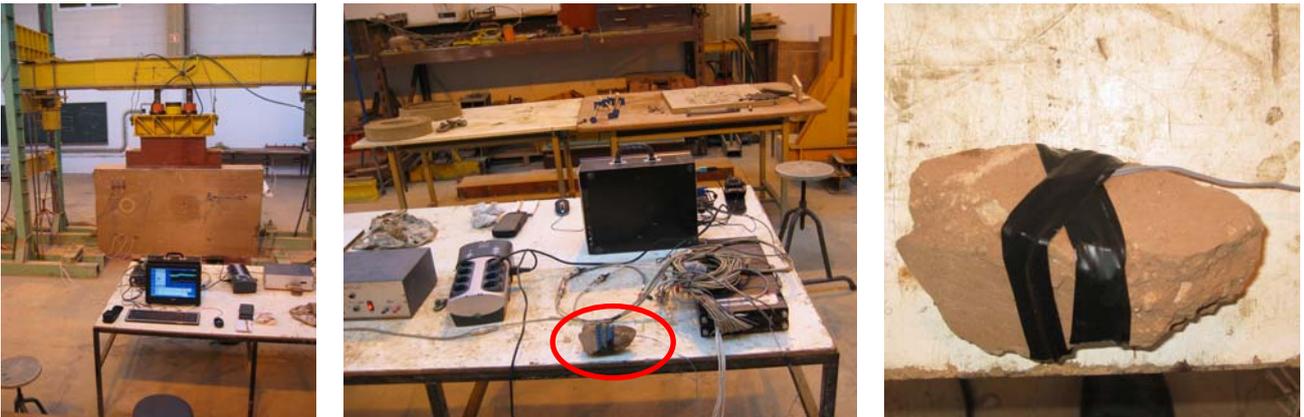


Fig. 3.94 y 3.95: Conexión a un equipo multicanal de registro de deformaciones. En la Fig. 3.95 se ha localizado la ubicación de la galga de compensación de la temperatura, como en este ensayo de laboratorio se ejecutó sobre un tapial, la galga se adhirió sobre una porción de tapial desprendida de una de las esquinas inferiores del mismo para evitar su afección por la carga introducida en el elemento portante.

Fig. 3.96: Detalle de la localización de la galga de compensación de temperatura.

3.3.4 Registro de deformaciones antes del taladrado

Una vez conectadas las bandas, las inicializamos a cero, comenzando el ensayo propiamente dicho.

En la Fig. 3.97 se presentan las fases de un ensayo hole drilling.

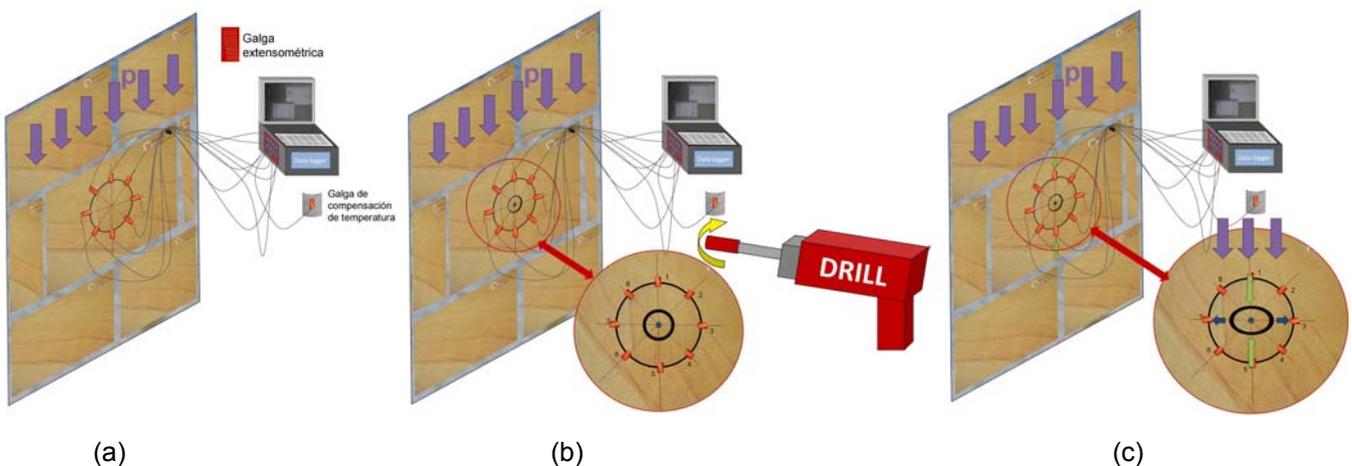


Fig. 3.97: Fases en la ejecución de un ensayo hole drilling. La Fig. 3.97-a muestra el registro de las deformaciones antes del taladrado hasta la estabilización de las mismas. La Fig. 3.97-b ilustra el proceso de perforación propiamente dicho. Finalmente, la Fig. 3.97-c representa el registro de las deformaciones después del taladrado hasta la estabilización de las mismas.

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

Es conveniente que el comienzo de registro de las deformaciones en las bandas se realice tres horas, al menos, después de su pegado.

Una vez que las galgas han sido adheridas y conectadas al equipo de medida se registran las deformaciones hasta su estabilización. Ésta puede considerarse alcanzada cuando las fluctuaciones captadas en las galgas en función del tiempo son menores, como caso ideal, que $\pm 5 \mu\text{m/m}$. En zonas cercanas a la existencia de un tráfico intenso o en zonas elevadas y sometidas a fuerte viento estas fluctuaciones pueden ser mayores e incluso estabilizarse alrededor de un valor distinto de cero. Si tiene lugar esta situación se precisa estimar el promedio de las deformaciones durante 90 minutos al menos

En otras referencias (Sánchez-Beitia et al. 2002) se alude a que el proceso continuará cuando estas fluctuaciones sean menores que $\pm 10 \mu\text{m/m}$, rango dentro del cual generalmente se estabilizan las deformaciones según se ha observado en multitud de análisis efectuados en anteriores ensayos, si bien como regla general se continuará una vez que las fluctuaciones sean menores que $\pm 5 \mu\text{m/m}$.

3.3.5 Taladrado

El diámetro del taladro y el de la roseta no están sujetos a ninguna disposición según la norma ASTM y depende de la experiencia (Sánchez-Beitia et al. 2002). No obstante se debe tener en cuenta que el taladro puede afectar a las bandas por contacto y por calentamiento.

El diámetro del taladro viene impuesto por las coronas de diamante existentes en el mercado. La distancia de este a las bandas debe permitir una relativa comodidad de operación. No obstante es preciso hacer la consideración de que la norma ASTM sugiere una profundidad de 0.4 veces el diámetro de la roseta, con lo que se supone que las tensiones se han relajado totalmente y consecuentemente se registra lo que corresponde íntegramente a la carga que soporta el material extraído. En el caso general de que se ubiquen las galgas en una circunferencia de 8.8 cm de diámetro, la profundidad debería o bastaría con ser de 3,6 cm. Si bien en otros casos (Sánchez-Beitia 2007) dicha profundidad puede verse modificada.

Para la realización del taladrado se ha empleado un dispositivo manual de alta calidad, de la casa comercial Hilti o Bosch en función de la dureza y compacidad del sustrato del elemento portante, al que se le acopla una corona de diamante de 36 mm de diámetro, con una broca trazadora para asegurar el centrado del taladro.

El centro de la circunferencia definida por la posición de las galgas y el del taladro deben de ser coincidentes. Para asegurar esta coincidencia puede marcarse el centro mediante un granete (Fig. 3.98), y con posterioridad emplear brocas de diámetro reducido (Fig. 3.99 y 3.100), aumentando el mismo progresivamente, hasta que pueda alojarse en la perforación practicada la broca trazadora dispuesta en la corona de diamante (Fig. 3.101 y 3.102).

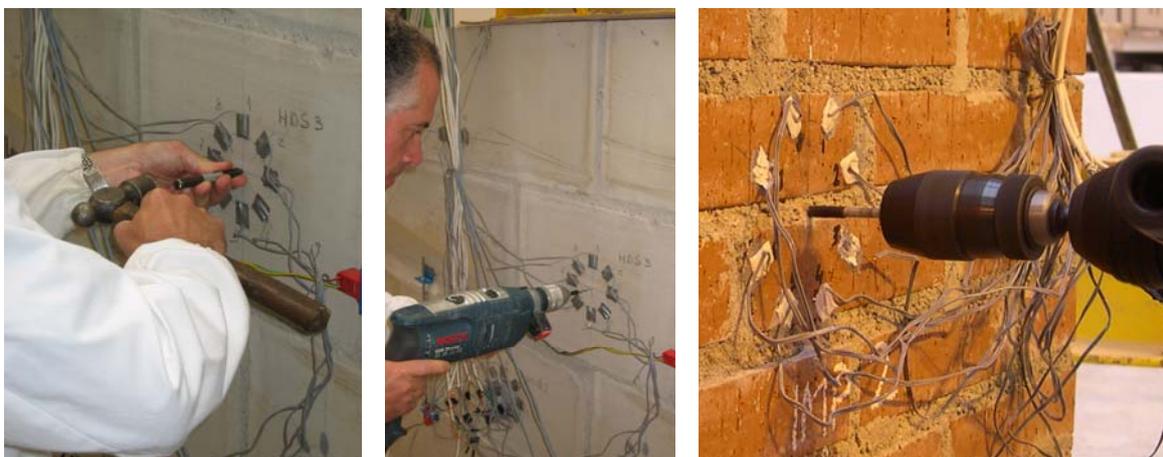


Fig. 3.98: Instante captado durante el marcado del centro de la perforación mediante granete.

Fig. 3.99 y 3.100: Instantes tomados durante el empleo de brocas de diámetro reducido, progresivamente creciente, para obtener el centrado adecuado de la broca trazadora y, por ende, de la corona hueca.

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

Es conveniente controlar la horizontalidad del taladro con un nivel adherido al útil y ejecutar el taladrado a pasos, con breves paradas entre cada uno, con objeto de no generar un calentamiento excesivo de la zona donde se ubican las galgas.



Fig. 3.101 y 3.102: Detalles de la perforación de una fábrica de ladrillo y otra de sillería arenisca, mediante corona hueca, ensayadas en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

En las Fig. 3.103 y 3.104 se muestra un ensayo una vez finalizado, en el que la profundidad de la perforación realizada ha sido de 36.88 mm, suficiente dado que es algo superior a 0.4 veces el diámetro de la roseta (8.8 cm), con lo que se supone que las tensiones se han relajado totalmente y consecuentemente se registra lo que corresponde íntegramente a la carga que soporta el material extraído.

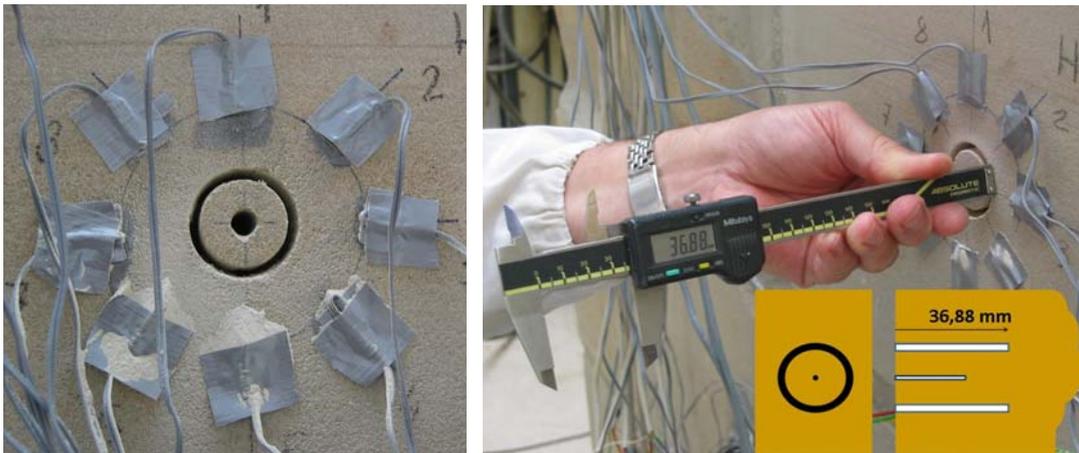


Fig. 3.103 y 3.104: Detalles de un ensayo hole drilling una vez finalizado.

3.3.6 Registro de las deformaciones después del taladro

Una vez finalizado el taladro, se registran las deformaciones hasta la estabilización de las lecturas. Las deformaciones válidas para la continuación del proceso son los valores a los que se estabilizan las medidas de deformación tras realizar el taladrado.

El valor mínimo recomendado para un ensayo en condiciones normales, oscila alrededor de 90 minutos.

En la gran mayoría de los casos se ha observado una variación asintótica en las deformaciones captadas por las bandas extensométricas hasta su nueva estabilización. Dicha variación asintótica es debida al calentamiento y posterior enfriamiento de las bandas extensométricas (Sánchez-Beitia et al. 2002). En algunos casos se observa una variación asintótica combinada con una senoidal. En aquellos casos en los que la variación no es perfectamente asintótica, se ajustan los valores finales a aquella recta que tenga una pendiente menor que 1/20 o simplemente se estima su promedio.

El ajuste matemático asintótico deformación-tiempo se puede realizar con una aplicación informática convencional. El valor de deformación elegido será aquél a partir del cual la curva de ajuste alcanza una pendiente menor que 1/20. Este valor es producto de la experiencia y puede considerarse aceptable. En aquellos casos en los que la variación no sea claramente asintótica se acepta como deformación válida el promedio del conjunto de las deformaciones registradas durante los últimos 60 minutos. Si las fluctuaciones registradas antes del taladro son mayores de +/- 5 µm/m o se estabilizan alrededor de un valor diferente de cero, es preciso añadir su promedio a las obtenidas después del taladro

3.3.7 Obtención de los estados tensionales

La deducción de los estados tensionales a partir de las deformaciones registradas en las bandas está fuertemente influenciada por unas constantes A y B que relacionan aquéllas con los estados tensionales que las originan.

De acuerdo con la Norma ASTM E837-95 las tensiones principales y sus direcciones se obtienen a partir de las siguientes expresiones (Fig. 3.105):

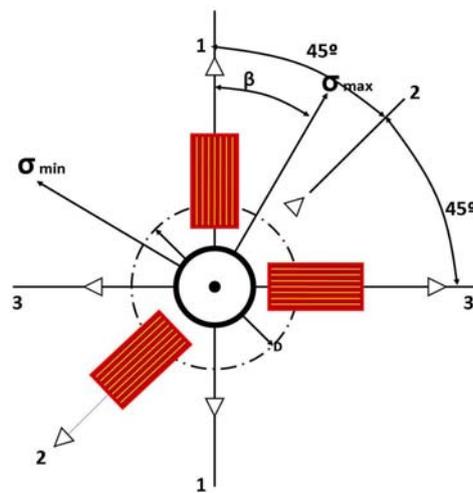


Fig. 3.105: Reproducción de la figura correspondiente de la Norma ASTM E837-95.

$$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{A} - \frac{\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}}{B} \quad (3.9)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{A} + \frac{\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}}{B} \quad (3.10)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}\right) \quad (3.11)$$

Donde:

- ε_1 , ε_2 y ε_3 las deformaciones registradas a 0°, 225° y 90° con una dirección de referencia.
- σ_{\max} y σ_{\min} son las tensiones principales máxima y mínima respectivamente.
- β es el ángulo entre σ_{\max} y la dirección de ε_1 medido en sentido antihorario (también es el ángulo entre σ_{\min} y la dirección de ε_3). Para la deducción del ángulo β debe de tenerse en cuenta los signos del numerador y del denominador. En la gran mayoría de ordenadores puede emplearse la función ATAN2

La obtención de las constantes A y B se trata en un apartado posterior.

De acuerdo con el procedimiento experimental, en el caso general se disponen de ocho deformaciones en otras tantas direcciones cada 45°. Las ocho deformaciones generan ocho

ternas diferentes de deformaciones, de las que se pueden obtener otros tantos valores de un mismo estado tensional. Los ocho valores de los estados tensionales se deducen a partir de las siguientes combinaciones de deformaciones (Fig. 3.87):

- Combinación 1: Galgas 1 (E1), Galga 3 (E3) y Galga 6 (E2)
- Combinación 2: Galgas 2 (E1), Galga 4 (E3) y Galga 7 (E2)
- Combinación 3: Galgas 3 (E1), Galga 5 (E3) y Galga 8 (E2)
- Combinación 4: Galgas 4 (E1), Galga 6 (E3) y Galga 1 (E2)
- Combinación 5: Galgas 5 (E1), Galga 7 (E3) y Galga 2 (E2)
- Combinación 6: Galgas 6 (E1), Galga 8 (E3) y Galga 3 (E2)
- Combinación 7: Galgas 7 (E1), Galga 1 (E3) y Galga 4 (E2)
- Combinación 8: Galgas 8 (E1), Galga 2 (E3) y Galga 5 (E2)

En ausencia de errores experimentales estos ocho valores de estados tensionales serán similares, por lo que es posible obtener un promedio como resultado final válido. Si bien, en una apreciable cantidad de ocasiones se observa que existe algún valor del estado tensional que puede considerarse anómalo. Ello es debido a la existencia de algún error experimental en alguna galga. Las fuentes de error son variadas: una mala alineación de las bandas extensométricas, un mal pegado e incluso algún deterioro durante el taladrado, puede ser el origen de errores experimentales.

En estos casos se observa que existe una (o más de una en ciertas ocasiones) deformación registrada por una galga que es común a las combinaciones de los valores anómalos. En este caso se desechan los valores de estados tensionales obtenidos a partir de las combinaciones en las que se encuentre esa o esas galgas. El estado tensional válido será el promedio del resto de los valores de estados tensionales. En el marco del Proyecto BIA2004-05801, se analizó la posibilidad de detectar, a priori, las deformaciones que son anómalas, reduciendo su impacto sobre los valores de los estados tensionales

3.3.8 Deducción de las Constantes A y B

3.3.8.1 Constantes A y B en función de unos parámetros adimensionales, del Módulo de Elasticidad y del Coeficiente de Poisson (A_t y B_t).

De acuerdo con la Norma ASTM E837-95 las constantes A y B dependen de dos parámetros adimensionales “a” y “b”, del Módulo de Elasticidad (E) y del Coeficiente de Poisson (ν). En este caso las constantes se denominan A_t y B_t y se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$A_t = -4 \left(\frac{1+\nu}{2E} \right) a \quad (3.12)$$

$$B_t = -4 \left(\frac{1}{2E} \right) b \quad (3.13)$$

Los parámetros a y b dependen de la geometría experimental y se encuentran tabulados para las dimensiones empleadas en la referida Norma. Sánchez Beitia et al. han realizado un modelo de Elementos Finitos con objeto de comprobar estos valores tabulados y deducidos para unas dimensiones muy reducidas con respecto a las empleadas en fábricas de sillería. La correlación obtenida fue muy alta con respecto a los valores que figuran en la Tabla 3.2. Consecuentemente pueden considerarse válidos, en principio, los valores tabulados de “a” y “b”. En la página siguiente se reproduce parte de dicha Tabla 3.2.

Los valores del Módulo de Elasticidad y del Coeficiente de Poisson se obtienen a partir de ensayos normalizados convencionales sobre muestras de material de calidad similar al analizado in situ.

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

Tabla 3.2. Valores de los parámetros a y b en función de la relación d/D, siendo d el diámetro del taladro y D el diámetro de la circunferencia de bandas.

d/D	a	b
0,38	0,174	0,430
0,39	0,182	0,448
0,40	0,190	0,466
0,41	0,199	0,484
0,42	0,208	0,503
0,43	0,217	0,521

En el caso de fábricas de sillería la obtención de estos valores no presenta dificultad alguna siempre que se pueda conseguir un material de las mismas características al que forme parte de un elemento portante en servicio. Esta afirmación, pese a que aparentemente involucra un procedimiento sencillo, es bastante optimista debido a la heterogeneidad del material y, por ende, la gran variabilidad de sus propiedades.

En el caso de fábricas de ladrillo se dispone de dos alternativas. Una de ellas es construir y ensayar en laboratorio una probeta de fábrica de ladrillo similar a la que se analice in situ (harto complicado, debido fundamentalmente al estado de carbonatación del mortero de cal localizado in situ). Otra opción es caracterizar el mortero y el ladrillo mediante ensayos diferentes, con las consecuentes incertidumbres asociadas a esos métodos de ensayo, y emplear uno de los diversos métodos existentes para obtener las características de la fábrica de ladrillo a partir de las de sus componentes individuales (Sánchez-Beitia et al. 2007a), si bien dichas correlaciones no siempre arrojan resultados adecuados.

Lo más correcto sería obtener dichas características mecánicas in situ para el punto concreto donde se va a realizar el ensayo, circunstancia harto compleja. Concretamente, a juicio del autor, este aspecto es la mayor debilidad de la metodología expuesta.

3.3.8.2 Constantes A y B deducidas experimentalmente (A_s y B_s)

La Norma ASTM E837-95 propone un método totalmente experimental para la deducción directa de las constantes A y B (en este caso se denominan A_s y B_s).

Sobre una probeta paralelepípedica de similar calidad al material ensayado in situ (obviamente vuelven a surgir las incertidumbres relacionadas con anterioridad), se colocan sobre una cara vertical dos galgas en direcciones vertical y horizontal. La posición de las bandas debe de ser idéntica a la disposición empleada en un ensayo in situ.

Una vez cableadas y conectadas al equipo de registro de deformaciones, la probeta se somete en laboratorio a una tensión conocida σ , registrando las deformaciones en ambas galgas que se denominarán ε_{vb} (galga vertical) y ε_{hb} (galga horizontal).

Con la probeta descargada se realiza un taladro idéntico al realizado en un elemento portante en servicio. Posteriormente la probeta se somete a la misma tensión σ , registrando, una vez más, las deformaciones en ambas bandas extensométricas que se denominaran ε_{va} y ε_{ha} respectivamente.

Las constantes A_s y B_s se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$A_s = -2 \left(\frac{(\varepsilon_{ha} - \varepsilon_{hb}) + (\varepsilon_{va} - \varepsilon_{vb})}{\sigma} \right) \quad (3.14)$$

$$B_s = -2 \left(\frac{(\varepsilon_{ha} - \varepsilon_{hb}) - (\varepsilon_{va} - \varepsilon_{vb})}{\sigma} \right) \quad (3.15)$$

Esta operación puede realizarse tanto en fábricas de sillería como en fábricas de ladrillo. No obstante en este último caso debe de tenerse presente los comentarios realizados en el epígrafe anterior, así como que el taladro debe de abarcar una proporción similar de mortero y ladrillo al que se produce en la fábrica analizada en servicio (Sánchez-Beitia 2007).

3.4 Materiales y procedimientos empleados en los ensayos con técnicas mini-presurométricas.

En este apartado se describirán los materiales necesarios para la realización de un ensayo mini-presurométrico, así como la preparación previa y el procedimiento empleado para la consecución de los resultados.

El ensayo presiométrico, discutido con detalle por Martin (1977), Baguelin et al. (1978), Barksdale et al. (1982), y Gambin y Rousseau (1988), se lleva a cabo aplicando presión a las paredes laterales de una perforación. El presiómetro consiste en dos partes, la unidad de medida y la sonda presurométrica que es insertada dentro de la perforación mencionada. Una vez que la sonda está dispuesta en la profundidad requerida, es presurizada con agua, inflando el recubrimiento de goma flexible que ejerce una presión sobre las paredes de la perforación. A los 60 segundos es registrado el volumen requerido para mantener constante dicha presión, de forma que realizando dicha operación durante diferentes escalones de presión puede obtenerse la relación presión vs volumen inyectado, a partir de la cuál es posible obtener el módulo presurométrico del medio objeto de ensayo y la presión límite del mismo.

En este sentido en la Fig. 3.106 se presentan las fases de un ensayo de estas características.

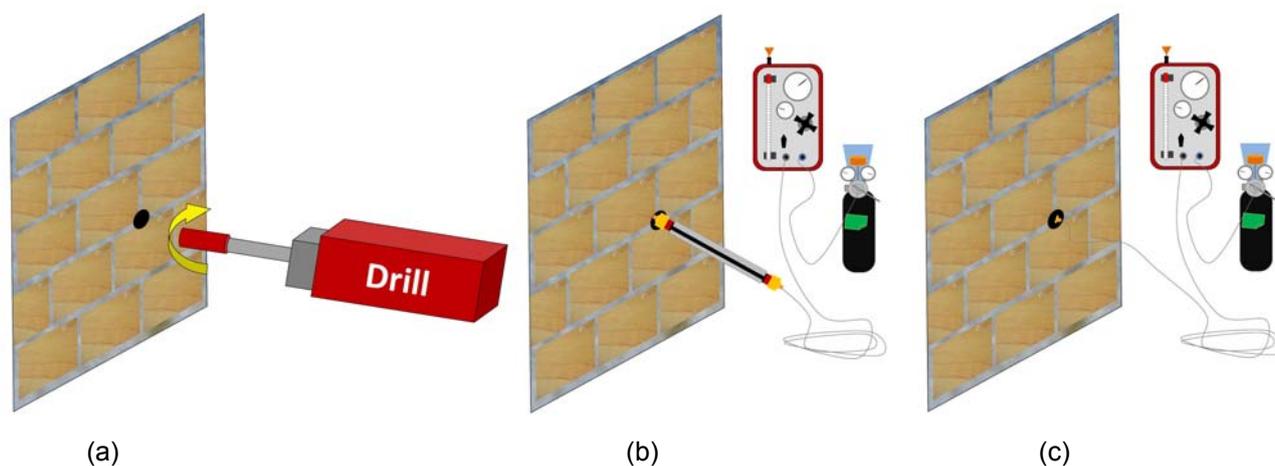


Fig. 3.106: Fases en la ejecución de un ensayo mini-presurométrico en un elemento portante de fábrica. La Fig. 3.106-a muestra el proceso de perforación para la inserción de la sonda presiométrica (Fig. 3.106-b). Por su parte, la Fig. 3.106-c representa la ejecución propiamente dicha del ensayo, en la que se introducen en la sonda, gradualmente, incrementos de presión, registrando el incremento volumétrico experimentado por la misma.

El equipo con que se cuenta para la realización de los ensayos es un minipresurómetro de la casa comercial Apageo, de 24 bar de presión máxima y equipado con una sonda de 400 mm de longitud y 34 mm de diámetro máximo. Debido a las reducidas prestaciones mecánicas del dispositivo, un primer problema, del que se era consciente previamente a la ejecución de los ensayos, era la escasa capacidad para plastificar estructuras rígidas de piedra o ladrillo.

Derivado de lo anterior, el primer problema tecnológico que se plantea a la hora de realizar el ensayo en muros de fábrica con el mini-presurómetro referido, es la realización de la perforación necesaria para realizar dicho ensayo.

3.4.1 Realización de perforaciones de cierta profundidad de 36 mm de diámetro.

En patrimonio, en gran cantidad de ocasiones, intervienen elementos portantes de espesor considerable o armados con varias hojas (dos con hojas exteriores rígidas con un relleno entre ellas más deformable, o una hoja exterior de calidad y otra interior de peores prestaciones),

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

circunstancias que implican que para caracterizar las zonas intermedias, objeto de esta técnica dado que las exteriores podrían caracterizarse mediante el empleo de técnicas de gato plano, deben realizarse perforaciones de diámetro reducido, y de longitud considerable.

El principal hándicap para practicar perforaciones de estas características es que no se encontró en el mercado ningún dispositivo comercial que permitiese acometer dicha tarea, dado que los útiles existentes para realizar perforaciones con longitud importante sólo estaban disponibles para diámetros muy superiores a los que precisa el mini-presurómetro susceptible de empleo, circunstancia que no era aceptable dado que la sonda debe quedar lo mas justa posible dentro de la perforación practicada.

En una primera aproximación, para alcanzar profundidades mayores con una corona de 36 mm de diámetro, se fabricó un útil consistente en una barra de acero maciza roscada de forma que podría ajustarse por un lado a la cabeza de un taladro tipo Bosch y por otra a una corona de perforación tipo Hilti (Fig. 3.107-3.109).



Fig. 3.107-3.109: Primera aproximación para la consecución de perforaciones de mayor profundidad que las proporcionadas por la corona hueca de 36 mm.

Debido a la reducida inercia a torsión del útil generado, éste presentaba holguras importantes en el giro que complicaban la ejecución de la perforación, en tanto que debido a esta holgura se producía un continuo desenroscado de las piezas. Además, se comprobó que la potencia del taladro empleado era insuficiente para perforar materiales de la naturaleza de los existentes en las estructuras de fábrica, sufriendo calentamientos continuados que demoraban mucho la perforación, así como atascamientos del sistema en el interior de la misma debido a su reducida velocidad de giro. No obstante, se consiguió finalizar una perforación, si bien se comprobó que esta solución carecía de funcionalidad práctica.

Para solucionar dicha problemática se realizó una modificación del sistema, partiendo de una corona HILTI de 40 cm de longitud y 36 mm de diámetro, en la forma que se expone. Cabe referir, previamente, que el diámetro nominal de la perforación obtenida es algo mayor que el diámetro propiamente dicho de la corona, del orden de los 38 mm, por ello que la sonda del minipresurómetro de diámetro 36 mm, puede alojarse sin problemas y de forma muy ajustada

En primer lugar se cortó la corona como se muestra en la Fig. 3.110, con objeto de disponer el conector especial Hilti separado de la cabeza de corte de diamante. A continuación, en el taller del Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria, se realizaron dos roscas cónicas interiores en los extremos de las porciones obtenidas tras el corte. Para poder tallar la rosca

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

cónica sin problemas, en el extremo del lado del conector, se soldó al mismo, interiormente, un tubo con la finalidad de dotarle de mayor rigidez.



Fig. 3.110. Corte de una corona Hilti de de 40 cm de longitud y 36 mm de diámetro.

Seguidamente, se fabricaron un total de 3 conectores-alargadores, de unos 30 cm de longitud cada uno (pudiendo alcanzar en total perforaciones de 1.30 m de profundidad, Fig. 3.111).



Fig. 3.111: Conectores tubulares fabricados, así como la cabeza de ajuste al perforador Hilti (parte superior) y cabeza de corte de diamante (parte inferior).

Dichos manguitos fueron realizados en un tubo de acero, proveyéndoles de sendas roscas cónicas en los extremos (Fig. 3.112), en un lado macho y en otro hembra, de forma que podrían acoplarse mediante roscado unos con otros, y éstos, a su vez, con las dos porciones residuales del corte de la corona inicial, de forma que en cabeza tendríamos la corona de diamante para practicar el corte, y en cola el adaptador necesario (Fig. 3.113) para ajustarlo a un perforador Hilti DCM II.



Fig. 3.112: Detalle de las roscas cónicas macho y hembra de uno de los manguitos-conectores fabricados en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.



Fig. 3.113: Detalle general del cabezal adaptado para el perforador Hilti, desarrollado en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria. Puede apreciarse la rosca hembra existente para el posterior roscado de la rosca macho de uno de los manguitos-conectores fabricado.

El montaje final se ilustra en las Fig. 3.114 y 3.115.

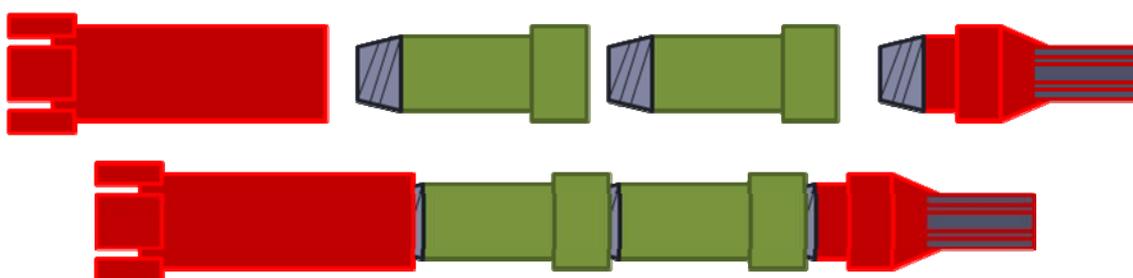


Fig. 3.114: Detalle final de las conexiones de los manguitos roscados al perforador Hilti.



Fig. 3.115: Aspecto del útil una vez fabricado y ensamblado haciendo uso de un único manguito-conector. La longitud aproximada del útil de perforación ilustrado en la imagen es de 70 cm, la cuál puede incrementarse hasta 1.30 m mediante acoplamiento de los otros manguitos producidos.

Con esta adaptación pueden alcanzarse profundidades importantes en muros de fábrica, obteniendo una perforación recta y muy ajustada con el diámetro máximo de la sonda del minipresurómetro (34 mm).

3.4.2 Realización de la perforación

Es necesario realizar la perforación en un emplazamiento donde en el diámetro de la misma movilice mortero y piezas individuales, con objeto de caracterizar la fábrica. Caso contrario, si se realiza la perforación atravesando por ejemplo un sillar, obtendremos resultados relacionados con las características del sillar afectado, no de la fábrica en su conjunto.

Para la colocación del perforador, es necesario tener en cuenta 3 condiciones: Su peso, que debe quedar perfectamente anclado al muro y que debe quedar nivelado. Obviamente, en la colocación del perforador también influirá la altura del emplazamiento respecto del suelo, ya que si está demasiado próximo al terreno, es preciso dar la vuelta al taladro (Fig. 3.116), para evitar que los dispositivos que gobiernan el avance de la perforación queden en contacto con el terreno, circunstancia que complica ligeramente la perforación.

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

Destacar que si el muro no es lo suficientemente resistente, como para anclar el perforador al mismo (Fig. 3.118 y 3.119) sustentando el peso del dispositivo a través del anclaje (Fig. 3.116), no se podrá anclar el taladro al muro, por lo que habrá que dejarlo apoyado (Fig. 3.117), con la consiguiente localización de medios auxiliares para colocarlo en la posición requerida (mesas, caballetes, estribos, etc.).



Fig. 3.116: Necesidad de dar la vuelta al taladro para evitar que los dispositivos que gobiernan el avance de la perforación queden en contacto con el terreno si el ensayo queda a una altura reducida. Igualmente, puede apreciarse como el taladro está anclado al muro sin necesidad de disponer elementos de apoyo.

Fig. 3.117: En este caso la imagen muestra un ensayo dilatométrico realizado en un muro de adobe en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria. Dado que el elemento portante no era lo suficientemente resistente, como para anclar el perforador al mismo hubo que apoyarlo mediante el apoyo de medios auxiliares para colocarlo en la posición requerida.



Fig. 3.118: Detalle del proceso de introducción del anclaje mecánico para izado del perforador en una mampostería caliza.

Fig. 3.119: Detalle del punto de anclaje del perforador en un muro de mampostería.

La perforación debe realizarse de forma gradual y lenta (Fig. 3.120 y 3.121), nunca forzando la máquina, de otra manera, pueden producirse rupturas indeseadas, creación de oquedades internas, desagregaciones de morteros, etc. También cabe referir que estas perforaciones se refrigeran, normalmente, con agua, circunstancia que debe evitarse para evitar introducir variaciones significativas en las características de la fábrica, o bien, si se emplea, dejar el tiempo prudente para favorecer el secado del elemento portante.

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



Fig. 3.120: Configuración general de la perforación ejecutada en relación con un ensayo mini-presurométrico realizado en la mampostería caliza existente en uno de los muros portantes del Seminario Mayor de Comillas (Cantabria, España).

Fig. 3.121: Instante tomado durante la ejecución de un ensayo mini-presurométrico realizado en el Seminario Mayor de Comillas (Cantabria, España).

3.4.3 Inspección de la perforación

Una vez realizada la perforación, es necesaria una inspección visual previa para evaluar posibles zonas conflictivas dentro de la misma, como son fundamentalmente las oquedades internas, cocheras o zonas débiles. Para ello es recomendable emplear un endoscopio flexible (Fig. 3.122 y 3.123) que permita realizar la inspección con detalle en toda su profundidad.



Fig. 3.122 y 3.123: Auscultación de la perforación realizada en un muro de mampostería caliza ensayado, con posterioridad, en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria, para verificar la idoneidad de la misma.

3.4.4 Preparación de la sonda y el equipo

Antes de proceder al ensayo en si mismo, hay que montar el dispositivo mini-presurométrico. Para ello se conecta al aparato la bombona de nitrógeno líquido, que es la que nos proporciona la presión necesaria para introducir el agua a presión en la sonda presiométrica.

Se remite al lector a la Fig. 3.124 para comprender la preparación del ensayo, en suma con la descripción que se realiza a continuación.

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

La llave de paso entre la bombona (D) y el equipo tiene dos manómetros, uno que marca la presión interna de la bombona (A) y otro que marca la presión que se deja pasar al equipo (B), este último se encuentra duplicado en el propio aparato (1).

Por medio de la llave (C) limitamos la presión máxima susceptible de aplicar al mini-presurómetro, es un dispositivo de seguridad, de forma que hay que asegurarse de que se encuentre cerrada antes de abrir la llave de la bombona.

A continuación debe conectarse el manguito de conexión entre la bomba y el mini-presurómetro, y el existente entre éste y la sonda. Este último constituye la parte del circuito por el que se introducirá el agua destilada en la sonda, siendo este fluido el medio encargado de proporcionar la presión bajo la acción del nitrógeno.

Una vez conectado todo el circuito, se debe purgar el aire que podría existir en la sonda. Para ello debe presurizarse levemente el aparato, asegurándose que el depósito está lleno de agua destilada (vemos que el tubo medidor de volumen está próximo al cero), en ese momento debe de abrirse, parcialmente, el tapón ubicado al final de la sonda. A continuación, se aplica presión al circuito, (4) en la Fig. 3.124, y, en consecuencia, el aire comenzará a salir por el final del circuito. Cuando se compruebe que únicamente sale agua, debe cerrarse el tapón, asegurándonos que quede perfectamente sellado para evitar pérdida de agua a lo largo del ensayo.

Acto seguido retiramos la presión. Debiendo de rellenar mediante agua destilada, a través del embudo y por la parte superior del aparato, hasta que tengamos la escala de volumen nuevamente a cero.

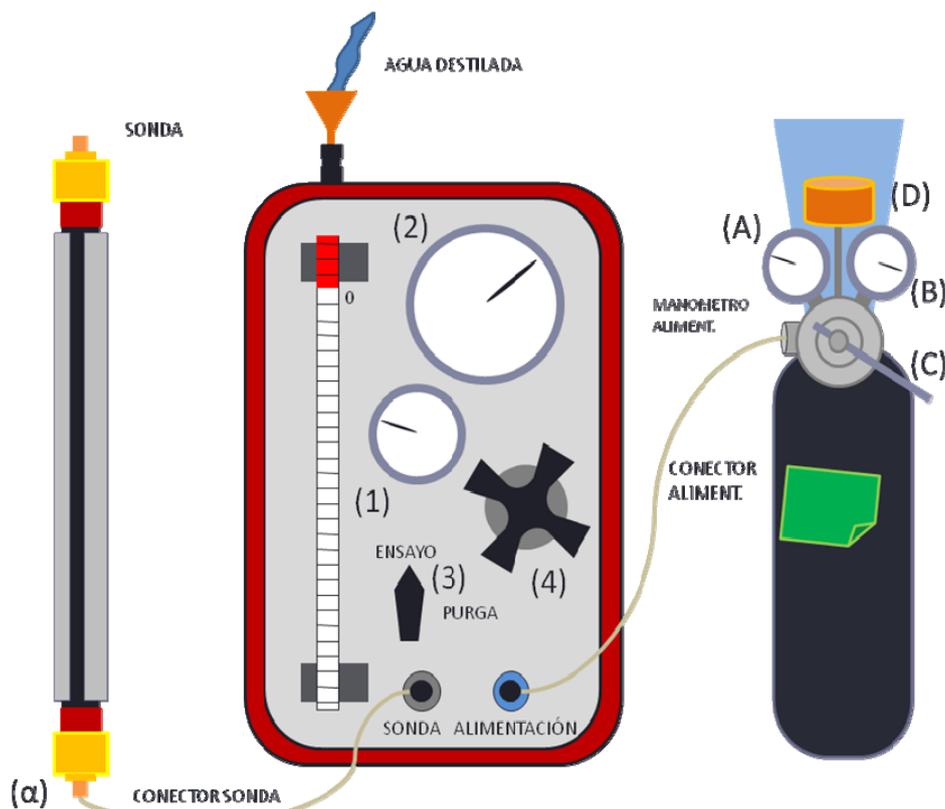


Fig. 3.124: Procedimiento de preparación de la sonda y el equipo.

3.4.5 Eliminación de la rigidez de la sonda

A pesar de que se trata de sondas de goma y por tanto su rigidez es muy baja, debido a las protecciones metálicas que contornean todo el área lateral de la misma, cuando a bajas presiones la sonda no ha hecho aún contacto con las paredes de la perforación (es decir se está hinchando sin entrar en contacto) la propia rigidez de la sonda y de las protecciones afecta la medida, en tanto en cuanto se precisa de presión para producir su hinchamiento y, por ende, su deformación.

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

Para minorar el posible efecto de rigidez de las protecciones metálicas, se aconseja realizar 3 ciclos de llenado en vacío de la sonda, en el entorno de los 2.5 bares, en el interior de un tubo rígido de acero (Fig. 3.125-3.126).



Fig. 3.125-3.126: Procedimiento para la eliminación de la rigidez de la sonda presiométrica.

De esta manera también puede verificarse que la sonda no pierda nada de agua, tanto por defecto de montaje como por estar el tapón mal apretado.

3.4.6 Realización del ensayo.

Realizados los pasos anteriores se está en condiciones de llevar a cabo el ensayo.

Se introduce la sonda en la perforación, asegurándose que se encuentra en el lugar elegido, decisión previa tomada teniendo en cuenta la inspección visual mediante endoscopia.

En los casos en los que la sonda sea mas larga que el espesor del muro será necesario cubrir con tubos rígidos de acero, de diámetro ajustado con respecto al de la sonda, los extremos de la sonda (Fig. 3.127), para evitar cualquier posible “sobredeformación” de la misma que induzca tanto al colapso de la sonda, como a una mala interpretación de los resultados

Una vez colocada la sonda, y los tubos metálicos si procediese, se comienza el ensayo propiamente dicho.



Fig. 3.127: Manguito de acero, de diámetro ajustado con respecto al de la sonda, para cubrir los extremos de la sonda en el caso que tenga mayor longitud que el espesor del muro.

Fig. 3.128: Configuración general del ensayo una vez preparado.

Fig. 3.129: Instante que muestra un nivel de presión en la sonda de 3.5 Ba y un incremento volumétrico de 140 cm³.

Para ello debe de presurizarse el equipo. Previamente, debe girarse la llave de la bombona de nitrógeno, (C) en Fig. 3.124, hasta que en el manómetro derecho (B), el que indica la presión que

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

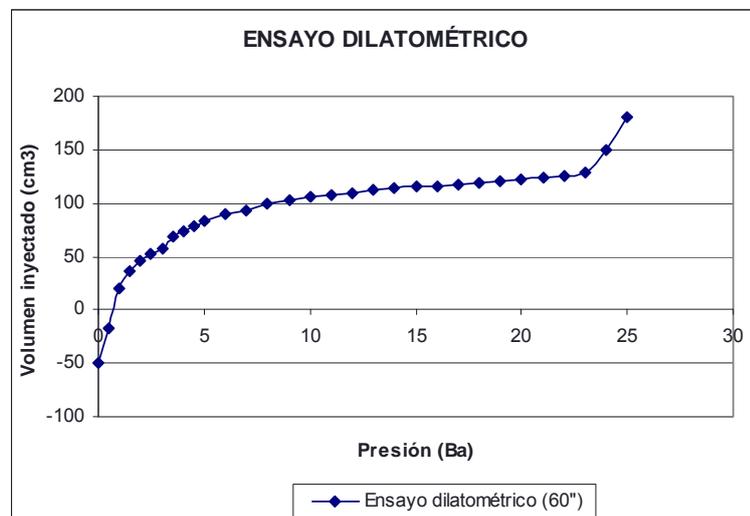
sale de la bombona al mini-presurómetro, registre una presión en torno a los 25 bares. El dispositivo, teóricamente, soporta una presión interna de 24 bar, es por eso que no se debe subir la presión mas de uno o dos bares sobre la nominal, para poder alcanzarla con facilidad.

Con el equipo en presión (Fig. 3.128), empezamos a hacer escalones con incrementos de presión, controlados por el manómetro (2) de la Fig. 120, registrando para cada escalón el incremento de volumen (Fig. 3.129). Se recomienda realizar los escalones de medio bar en medio bar hasta los 5 bares de presión, para a partir de ahí hacerlos de bar en bar.

Para cada escalón de presión, una vez alcanzada la presión deseada, jugando con la válvula de apertura (4) o cierre del circuito (3), se toman tres medidas de volumen. Se toma una primera nota de la medida a los 15 segundos, una segunda a los 30 y una tercera al minuto. En el caso que se aprecie que las medidas no se estabilizan en este periodo, se puede realizar una cuarta medida realizada a los 2 minutos.

El ensayo queda finalizado, cuando alcanzamos la presión, para la que el incremento de volumen aumenta de forma brusca, circunstancia que pone de manifiesto la plastificación de la zona de ensayo (Fig. 3.130). En ese momento despresurizar el equipo.

Fig. 3.130: Gráfica presión-volumen inyectado obtenida mediante un ensayo mini-presurómetro de un elemento portante de tierra (tapial).



Una vez acabado el ensayo y con la sonda despresurizada, debe ponerse el equipo en posición de purga, (3) en la Fig. 3.124, cerrarse la válvula de la bombona y abrirse la válvula que introduce presión a la sonda. De esta manera se elimina toda presión en el equipo y el circuito.

A partir de este momento ya puede procederse a la desconexión de todos los elementos del circuito y recoger el dispositivo.

3.4.7 Procesado de resultados

Como ya se ha referido, una vez que la sonda está dispuesta en la profundidad requerida, es presurizada con agua, inflando el recubrimiento de goma flexible que ejerce una presión sobre las paredes de la perforación. A los 60 segundos es registrado el volumen requerido para mantener constante dicha presión, de forma que realizando dicha operación durante diferentes escalones de presión puede obtenerse la Fig. 3.131.

Se distinguen tres fases en la curva de deformación:

- La **fase de re-establecimiento**, que se extiende desde el origen hasta el punto A. Después de que la perforación es realizada, el orificio se relaja, reduciéndose el volumen de la cavidad. Como la sonda presurométrica es inflada, inicialmente las paredes de la perforación serán reestablecidas a su posición original. El punto A, de coordenadas (v_0, p_0) , marca el punto en el cuál el volumen de la cavidad ha retornado completamente a su posición inicial.

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

- La **fase pseudo-elástica**, desde el punto A al B. Está constituida por la porción rectilínea de la curva. El punto B, de coordenadas (v_f, p_f) , es el punto en el cuál se alcanza la presión de fluencia lenta.
- La **fase plástica**, desde el punto B al C. Dicha rama es asintótica a la presión límite. El punto C, de coordenadas (v_L, p_L) , se define como el punto ideal en el que mantenida constante la presión se registra un incremento indefinido del volumen.

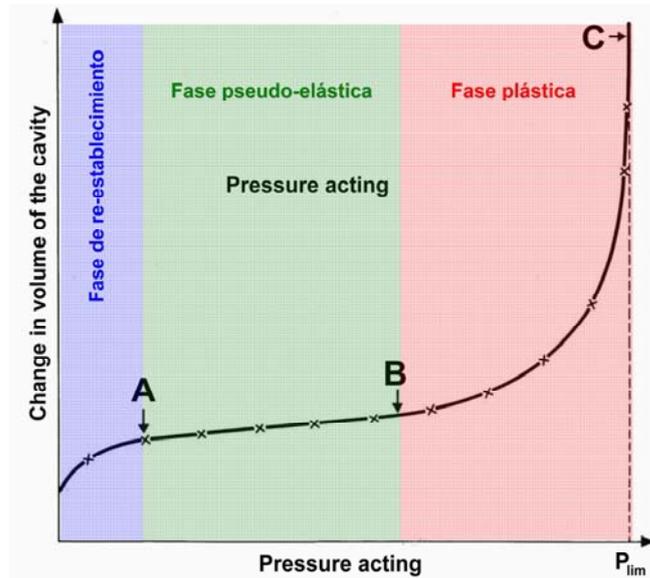


Fig. 3.131: Ejemplo de resultado ideal de un ensayo presiométrico (Baguelin et al. 1978).

La presión límite se define (Waisnor et al. 2001) como la presión requerida para expandir la célula de medida en una cantidad v_0 , más el volumen requerido para inflar el presurómetro, V_C , y el necesario para restablecer la perforación a su posición inicial, v_0 . Por tanto, el volumen inyectado a la presión límite, v_L , se obtiene:

$$v_L = v_0 + V_C + v_0 = 2 \cdot v_0 + V_C \quad (3.16)$$

Donde:

- v_0 : Volumen requerido para inflar el presurómetro y restablecer el medio de ensayo a su posición original.
- V_C : Volumen inicial de la célula de medición. Dicho parámetro, según el manual de operación proporcionado por el fabricante del presurómetro (Apageo 2007), puede obtenerse mediante un ensayo de calibración de la sonda en un tubo de acero, trazando la curva de los volúmenes a 60 segundos en función de las presiones aplicadas (Fig. 3.132). V_C es la ordenada en el origen de la recta que da el mejor ajuste con la segunda parte de la curva de expansión referida.

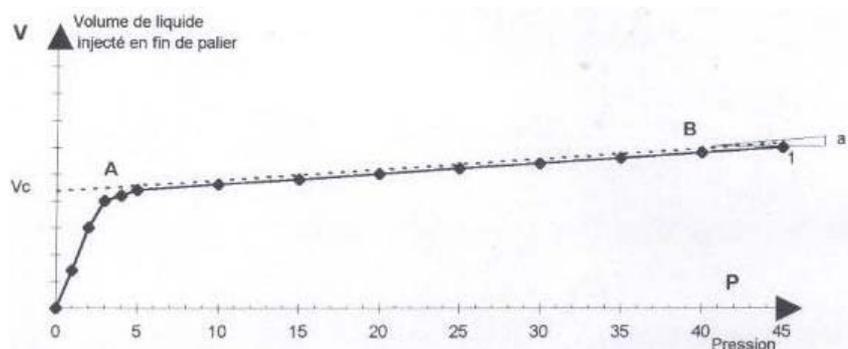


Fig. 3.132: Curva de expansión de una sonda presurométrica en un tubo de acero (Apageo 2007).

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 3.3 se relacionan los incrementos volumétricos obtenidos en un ensayo de calibración de la sonda mini-presurométrica empleada en los ensayos, dentro de un tubo de acero (Fig. 3.133). Igualmente, en la Fig. 3.134 se representa la curva de expansión obtenida y el ajuste lineal en la zona pseudo-elástica a partir de la cuál puede obtenerse el volumen V_C como la ordenada en el origen de dicha recta.

Tabla 3.3: Incrementos volumétricos obtenidos en un ensayo de calibración de la sonda mini-presurométrica empleada en los ensayos, dentro de un tubo de acero.

Presión (Ba)	Incrementos de volumen (cm ³)		
	15"	30"	60"
0	0	0	0
1	65	77.5	95
2	124	124	125
3	131	131	132
4	136	136	137
5	140	140	140
6	142.5	142.5	142.5
7	145	145	145
8	147	147	147
9	149	149	149
10	152	152	152
11	155	155	155
12	157	157	157.5
13	160	160	160
14	162	162	162
15	166	166	166
16	170	170	171
17	173	174	175
18	177.5	177.5	180

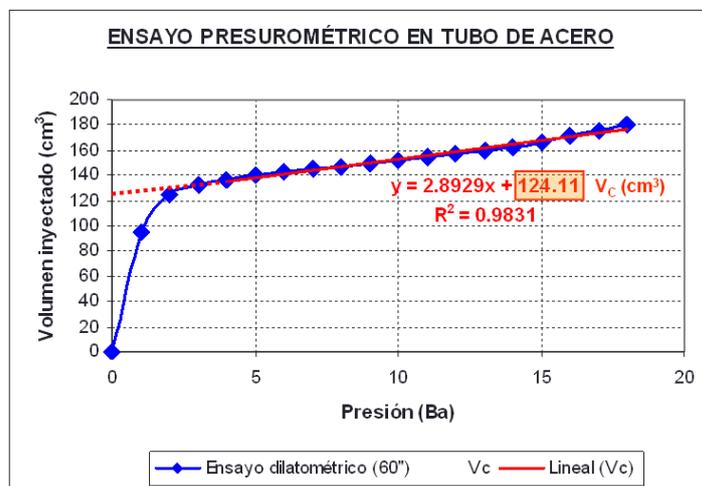


Fig. 3.133: Instante tomado durante el ensayo de calibración de la sonda empleada en los ensayos dentro de un tubo de acero, con la finalidad de obtener V_C .

Fig. 3.134: Curva de expansión de la sonda mini-presurométrica empleada en los ensayos, y el ajuste lineal en la zona pseudo-elástica a partir del cuál puede obtenerse el volumen V_C como la ordenada en el origen de dicha recta (124 cm³).

Si el incremento volumétrico al final del ensayo es menor que dos veces el volumen de la cavidad, debe realizarse una extrapolación para obtener p_L . Se comprueba como la gráfica presión vs. el logaritmo del volumen inyectado es aproximadamente lineal para la fase plástica (Fig. 3.135). Dicho ajuste lineal puede extenderse hasta v_L para determinar la presión límite, p_L .

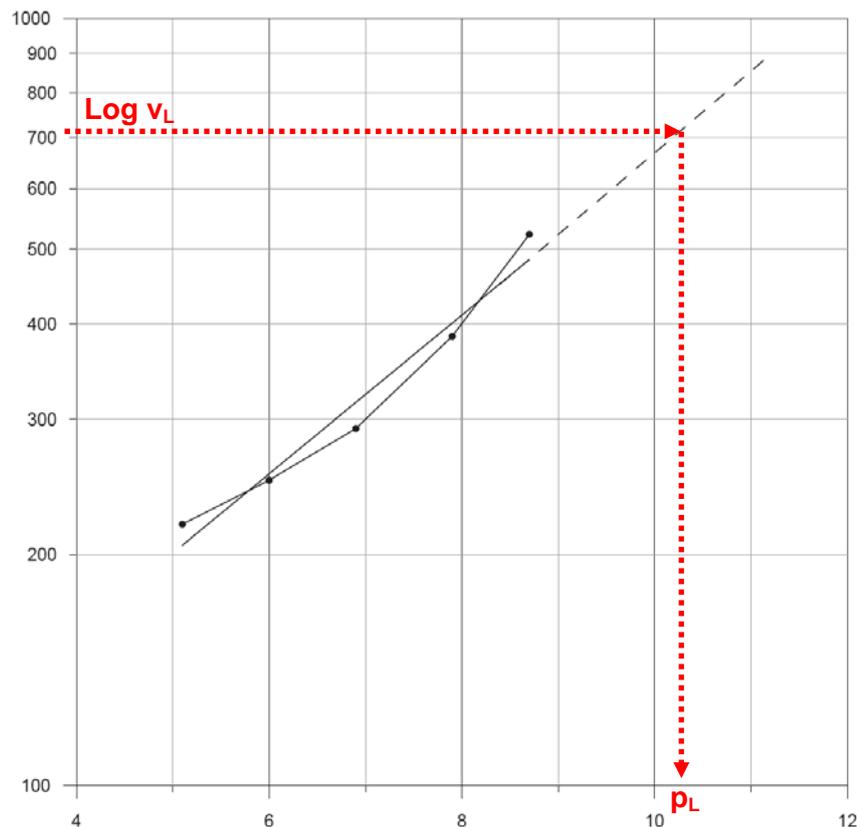


Fig. 3.135: Gráfica presión vs. Logaritmo del volumen para la extrapolación de la presión límite de un suelo real (Wilson 1988).

En lo que respecta al módulo presurométrico, E_{PMT} , puede obtenerse de la fase pseudo-elástica referida (Waisnor et al. 2001). E_{PMT} es función del coeficiente de Poisson, de la pendiente de la línea recta (fase pseudo-elástica), y del volumen de la cavidad en el rango pseudo-elástico.

Como el volumen de la cavidad se incrementa a medida que se avanza en dicho rango pseudo-elástico, de forma convencional se emplea el volumen medio de la cavidad, v_m , durante esta fase (por ello que es necesario plastificar el material para poder obtener el volumen medio en dicha fase y, por ende, determinar correctamente el E_{PMT}).

El módulo de deformación puede obtenerse empleando la ecuación (3.17), (Waisnor et al. 2001). De la misma forma, en la Tabla 3.4 se muestran rangos típicos de módulos presurométricos y de presiones límite para varios tipos de suelos, de forma que puedan orientar al lector en relación a los hipotéticos de los rellenos interiores en muros de varias hojas, componente estructural objeto de la aplicación de estas técnicas presurométricas.

$$E_{PMT} = 2 \cdot (1 + \mu) \cdot V \cdot \frac{\Delta p}{\Delta v} \quad (3.17)$$

Donde:

- μ : Coeficiente de Poisson, en suelos suele ser típico suponerle igual a 0.33 (Waisnor et al. 2001).
- V : Volumen de la cavidad durante la fase pseudo-elástica = $V_C + v_m$
- V_C : Volumen inicial de la célula de medición. Se obtiene en la forma referida con anterioridad (Fig. 3.132 y 3.134).
- v_m : Volumen medio de la fase pseudo-elástica = $\frac{v_f + v_0}{2}$.
- $\frac{\Delta p}{\Delta v}$: Pendiente 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

Tabla 3.4: Rangos habituales del modulo presurométrico E_{PMT} y de la presión límite p_L para varios tipos de suelos (Gambin y Rousseau, 1988).

Tipo de suelo	E_{PMT} (bar)	p_L (bar)
Lodo, turba	2 – 15	0.2 – 1.5
Arcilla blanda	5 – 30	0.5 - 3
Arcilla media	30 – 80	3 – 8
Arcilla dura	80 – 400	6 - 20
Marga	50 – 600	6 - 40
Arena limosa suelta	5 – 20	1 – 5
limo	20 – 100	2 - 15
Arena y grava	80 – 400	12 - 50
Arenas sedimentarias	75 – 400	10 - 50
Caliza	800 – 200,000	30 – más de 100
Relleno reciente	5 – 50	0.5 – 3
Relleno antiguo	40 – 150	4 - 10

3.5 Tiempos relacionados con la ejecución de los ensayos referidos.

A modo de corolario, y para información del lector, en las Tablas 3.6-3.8 se relacionan los tiempos asociados a cada una de las fases de los ensayos descritos en este capítulo.

Por su parte, en la Tabla 3.5 puede apreciarse como el ensayo hole drilling tiene una duración mayor, aproximadamente 1 hora, que el de gato plano simple y doble, y éste, a su vez, una duración mayor, de aproximadamente 1 hora, que el mini-presurómetro. Por su parte también se indica, para cada uno, la información potencialmente obtenible.

Tabla 3.5: Tiempos involucrados e información obtenida en los ensayos estudiados.

Ensayo	Duración	Información obtenida
Gatos planos	5 ^h 30' – 6 ^h 30'	$\sigma_{servicio}$, estimación de $\sigma_{última}$, coef. de seguridad, módulo de deformación (E) y coeficiente de Poisson (ν) de la fábrica
Hole drilling	6h – 7h	Deformaciones principales
Dilatometría	3 ^h 30' – 4 ^h 30'	Módulo presurométrico (E_{PMT}) y estimación de $\sigma_{última}$

Tabla 3.6: Tiempos relacionados con el ensayo hole drilling

Fases del ensayo	Tipología de fábrica (Tiempo en minutos)				
	Sillería	Mampostería	Ladrillo	Tapial	Adobe
1. Localización del emplazamiento	10	20	15	10	-
2. Acondicionamiento de la superficie	10	20	10	5	-
3. Pegado de las bandas extensométricas	20	20	35	30	-
4. Conexión de las bandas	20	20	20	20	-
5. Ejecución del ensayo (registro de deformaciones antes del taladrado, perforación y registro de deformaciones después del taladrado)	180	180	180	180	-
6. Desmontaje de dispositivos	10	10	10	10	-
7. Procesado de la información	120	150	120	120	-
Totales (tiempo de minutos):	370	420	390	375	-
Totales (tiempo de horas):	6^h15'	7^h	6^h30'	6^h15'	-

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

Tabla 3.7: Tiempos relacionados con los ensayos de gato plano (simple y doble)

Fases del ensayo	Tipología de fábrica (Tiempo en minutos)				
	Sillería	Mampostería	Ladrillo	Tapial	Adobe
1. Localización del emplazamiento	10	40	15	10	15
2. Acondicionamiento de la superficie	10	25	10	10	10
3. Pegado de los puntos de control (simple y doble)	25	35	25	25	30
4. Replanteo y ejecución de la 1ª roza	10	25	10	20	20
5. Conexión y purga del gato plano simple	10	10	10	10	10
6. Ejecución del ensayo de tensión in situ	30	30	30	30	30
7. Replanteo y ejecución de la 2ª roza	25	35	25	30	30
8. Conexión y purga del gato plano doble	10	10	10	10	10
9. Ejecución del ensayo de deformación in situ	90	90	90	90	90
10. Desmontaje de dispositivos, extracción de los gatos y reintegración estética de la zona de ensayo	40	40	30	30	30
11. Procesado de la información	60	60	60	60	60
Totales (tiempo de minutos):	320	400	315	325	335
Totales (tiempo de horas):	5^h20'	6^h45'	5^h20'	5^h25'	5^h35'

Tabla 3.8: Tiempos relacionados con el ensayo presiométrico

Fases del ensayo	Tipología de fábrica (Tiempo en minutos)				
	Sillería	Mampostería	Ladrillo	Tapial	Adobe
1. Localización del emplazamiento	10	20	10	10	10
2. Perforación de la cavidad para el alojamiento de la sonda*	120*	90*	120*	60*	60*
3. Inspección de la perforación	5	10	5	10	10
4. Preparación de la sonda y del equipo	25	25	25	25	25
5. Realización del ensayo	50	50	50	50	50
6. Desmontaje de dispositivos, extracción de la sonda y reintegración estética de la zona de ensayo	20	20	20	20	20
7. Procesado de la información	30	30	30	30	30
Totales (tiempo de minutos):	260	245	260	205	205
Totales (tiempo de horas):	4^h20'	4^h10'	4^h20'	3^h25'	3^h25'

* Tiene fuerte dependencia de la naturaleza de la roca.

