



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales

Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales

TESIS DOCTORAL

OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS DE SUJECCIÓN PARA VÍAS DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD ESPAÑOLA



Autor: Isidro Alfonso Carrascal Vaquero

**Directores: Federico Gutiérrez-Solana Salcedo
Juan Antonio Polanco Madrazo**

Santander, Mayo 2006

CAPÍTULO 7

CONTROL DEL COMPORTAMIENTO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE SUJECIÓN

1. GENERALIDADES

Optimizado el sistema de sujeción, se realizó un exhaustivo examen para conocer el comportamiento de todos y cada uno de los componentes individuales del conjunto de sujeción seleccionado.

Se estudiaron por separado los componentes individuales, profundizando en su respuesta al ser sometidos aisladamente a sollicitaciones similares a las recibidas en su posición real de trabajo y sopesando la influencia que pueden tener cada uno de ellos en el sistema global, así como, en el resto de componentes.

Se analizó la posible influencia que sobre el comportamiento de los diferentes elementos tiene la acción de agentes externos que pudieran modificar su comportamiento. En el capítulo anterior ya se mencionó la influencia que la humedad tiene en el comportamiento mecánico de las poliamidas, aspecto éste, desarrollado con más profundidad en el Anexo II de la presente Tesis. En este

capítulo se realiza un análisis similar, pero sobre componentes reales de poliamida, concretamente, las placas acodadas y las vainas del anclaje VAPE. También se analizaron otros agentes como la temperatura y su influencia en el comportamiento de la placa de asiento y la corrosión y su efecto en el comportamiento de los componentes metálicos, entre otros.

2. PLACA ACODADA

La caracterización mecánica se realizó en base a tres tipos de esfuerzos: estático, impacto y fatiga, y se analizó la influencia en este comportamiento de parámetros como el contenido de humedad de la placa, el apriete del conjunto o el envejecimiento mecánico de la placa por el uso.

Para este estudio, se emplearon placas acodadas ligeras A2, correspondiendo todas ellas a una serie continua y a la misma cavidad. Las placas se recibieron en estado seco de inyección y, posteriormente, se las sometió a un tratamiento para ganar diferentes contenidos de humedad. Un primer grupo permaneció en estufa a 100 °C hasta el momento del ensayo. El mismo tiempo permaneció otro grupo de placas en el ambiente del laboratorio y ganó un 0.5 % de humedad. Se realizaron otros tres grupos más, cuyas piezas fueron sumergidas en un baño de agua a 50 °C hasta alcanzar el 1.8 %, el 2.2 % y el 3.6 % en peso respecto a la masa seca, respectivamente.

Para la caracterización de la placa acodada, se desarrolló un útil de ensayo específico que simulaba tanto el apoyo en la traviesa como el anclaje tipo VAPE, el apriete del clip y la acción del patín del carril (Figura 7.1). Por tanto, este útil estaba formado por dos elementos acoplados, por un lado, el útil empleado para la realización de ensayos mecánicos sobre vainas tipo VAPE descrito en la especificación propia de producto [109], y por otro lado, el útil descrito en la especificación de producto de la placa acodada A2 [78] que consta de un alojamiento para la placa similar al de la traviesa y de un aplicador de carga que simula el patín del carril (Figura 7.2). En este último útil se sustituyó el tornillo indicado, el empleado en la sujeción J2 de métrica 22, por el tornillo VAPE.

Debido a la geometría de los dos útiles acoplados, el tornillo de VAPE habitual, modelo 2-115-5, fue sustituido por otro con caña 40 mm más larga, de forma que la longitud roscada en el útil de ensayo coincide con la situación real (Figura 7.3).

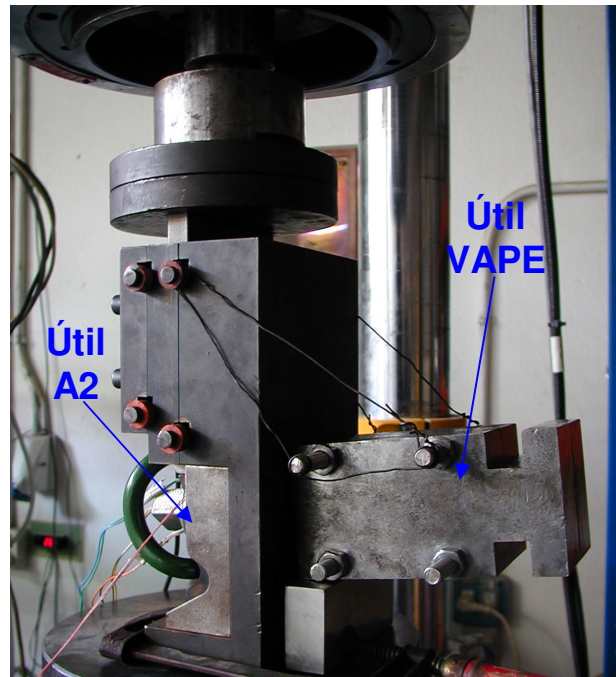


Figura 7.1.- Dispositivo empleado en la caracterización mecánica de las placas A2

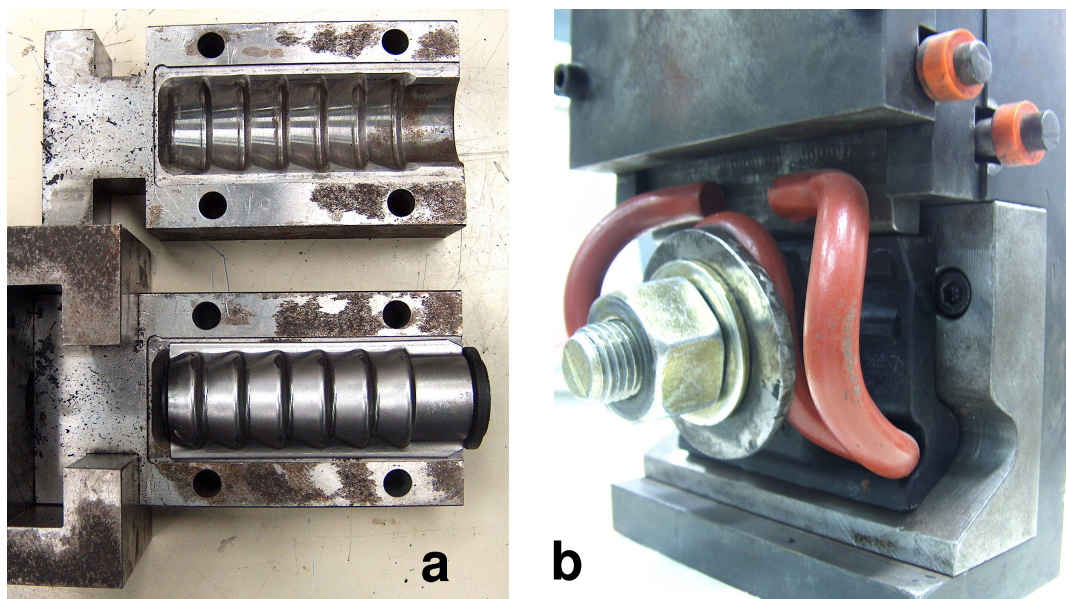


Figura 7.2.- Útil de las vainas VAPE (a) y de las placas acodadas A2 (b)

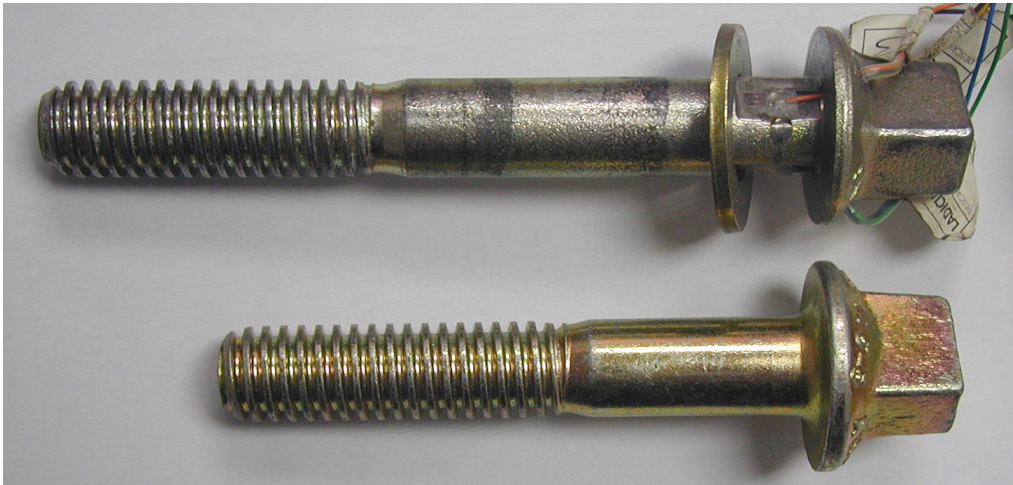


Figura 7.3.- Comparativa del tirafondo 2-115-5 y el usado en los ensayos

2.1. COMPORTAMIENTO ESTÁTICO

Para la realización de los ensayos estáticos, se aplicó un esfuerzo creciente por medio del actuador de una máquina universal servohidráulica de ensayo de ± 250 kN de capacidad en control de posición a una velocidad de 0.05 mm/s. Se utilizó un comparador LVDT de ± 5 mm de recorrido para registrar directamente el desplazamiento entre el simulador del patín del carril y el bastidor donde se aloja la placa acodada.

2.1.1. Influencia del contenido de humedad en el comportamiento estático

Para estudiar la influencia del contenido de humedad, se emplearon placas de cada uno de los grupos descritos anteriormente: secas en estufa, 0.5, 1.8, 2.2 y 3.6 % de humedad en peso respecto a la masa seca.

En el gráfico de la Figura 7.4, se representan los resultados obtenidos en el ensayo estático de placas con diferente grado de humedad.

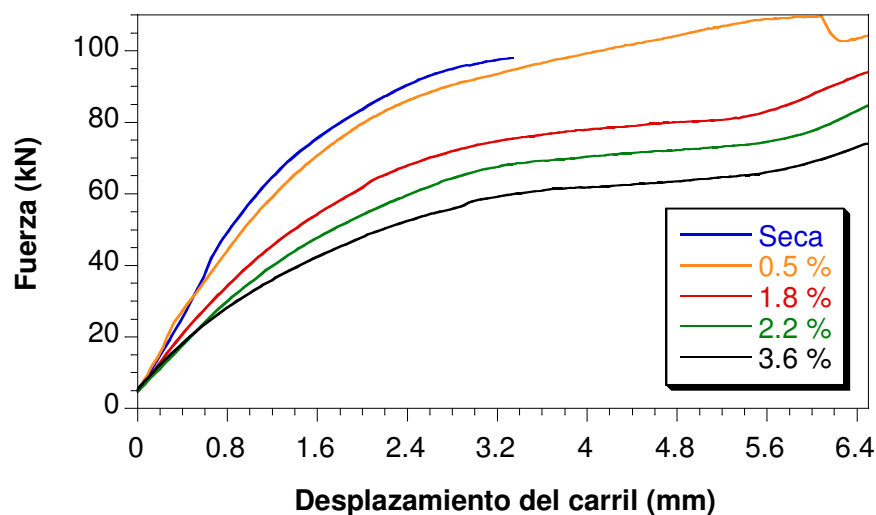


Figura 7.4.- Ensayo estático de placas con diferente contenido de humedad

Se comprueba en la figura que, salvo el caso de la placa seca, que se rompe al llegar a un cierto valor de carga, las placas presentan un punto de inflexión. Este fenómeno es debido a que al aumentar el contenido de humedad de la placa aumenta su deformabilidad y en el proceso de carga llega un momento que entre lo que se deforma y lo que se desplaza por efecto de la fuerza que intenta expulsarla del útil, la parte interior del agujero entra en contacto con el tornillo, y a partir de este momento éste colabora con la placa en la oposición al desplazamiento del patín del carril.

Si se observa en la Figura 7.5 la evolución de la pendiente en una curva tipo realizada con el útil tradicional descrito en la especificación de producto, se comprueba que la pendiente es monótona decreciente hasta rotura.

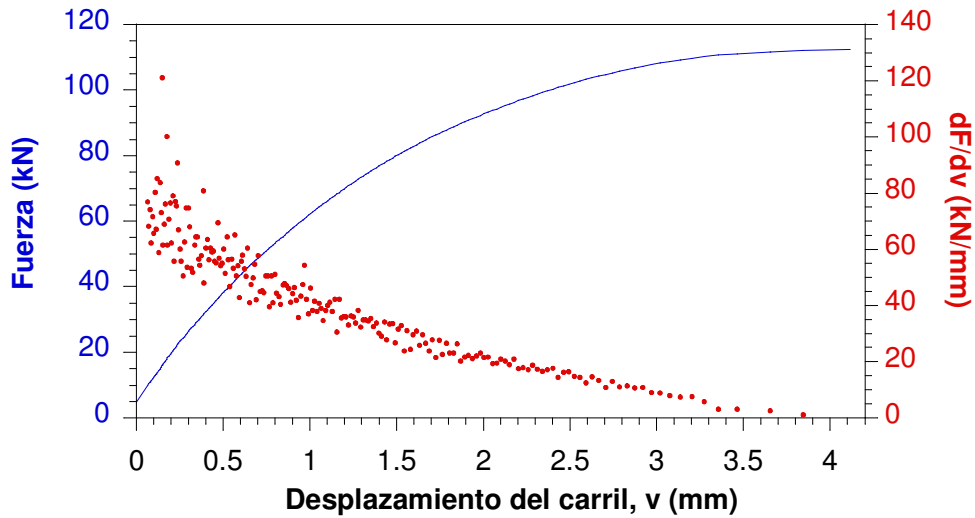


Figura 7.5.- Evolución de la pendiente en una curva tipo

Por el contrario al observar la evolución de la pendiente en las curvas obtenidas con este nuevo útil, se demuestra la existencia de un mínimo, es decir, que la pendiente pasa de decreciente a creciente. Este punto de inflexión se considerará el punto de contacto de la placa con el tornillo. En las siguientes figuras se representa el cálculo del punto de contacto para las cuatro placas.

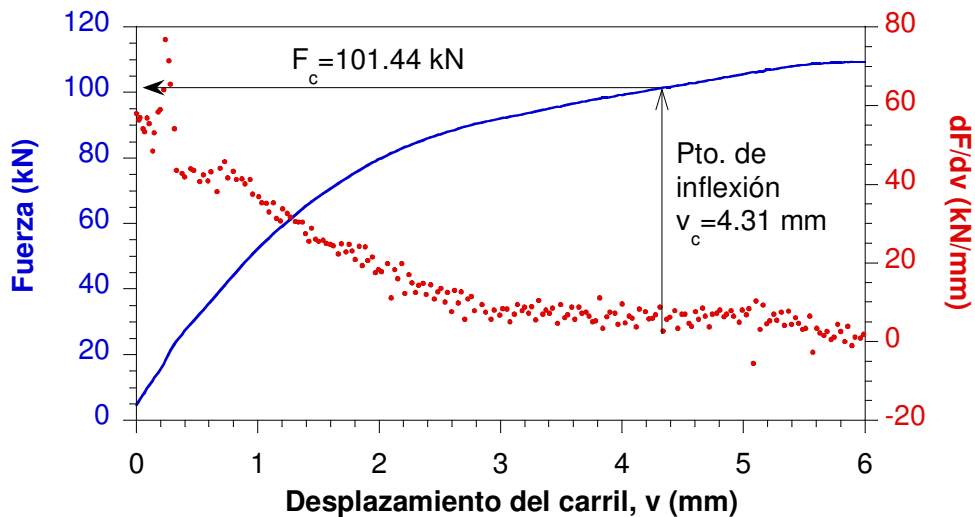


Figura 7.6.- Punto de inflexión en la placa de 0.5 % de humedad

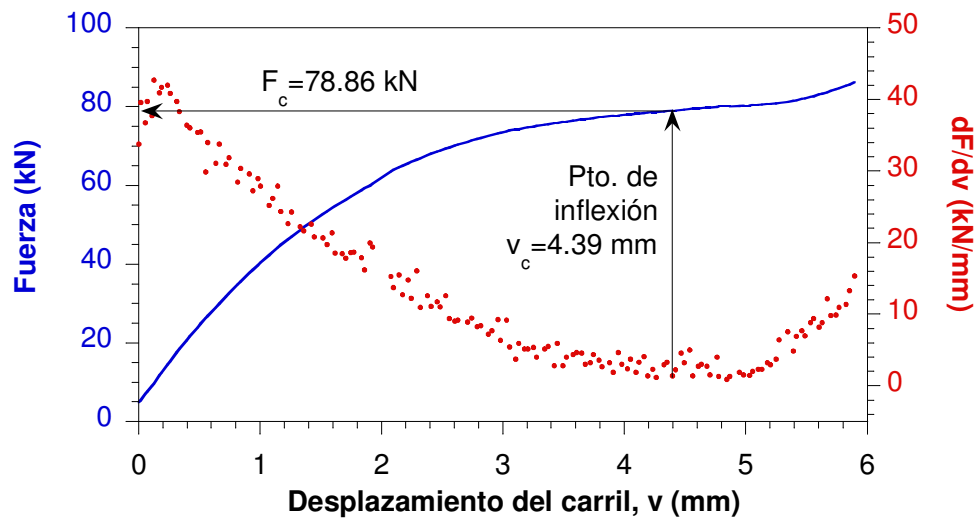


Figura 7.7.- Punto de inflexión en la placa de 1.8 % de humedad

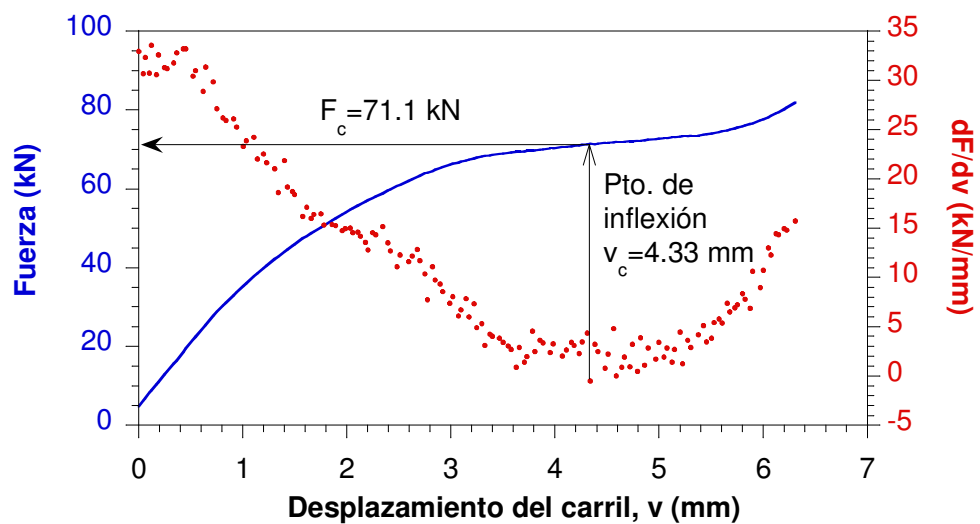


Figura 7.8.- Punto de inflexión en la placa de 2.2 % de humedad

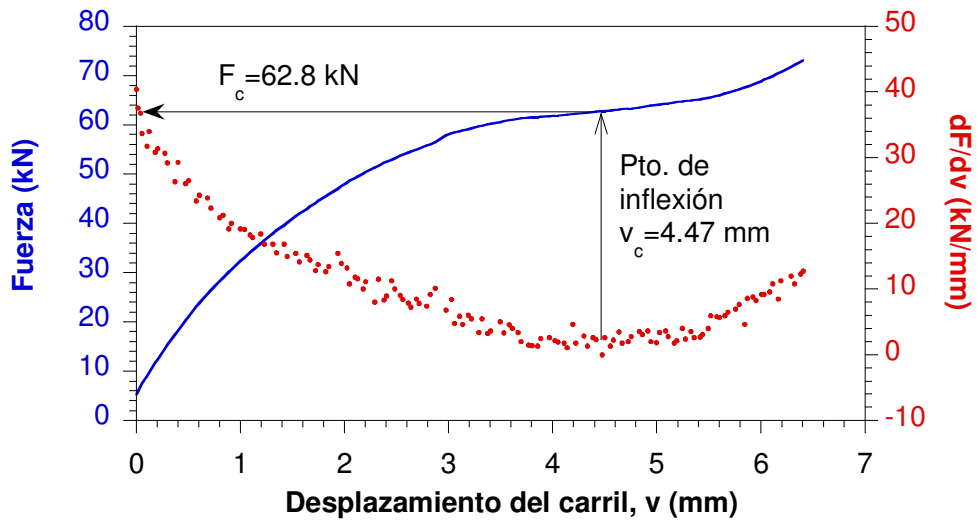


Figura 7.9.- Punto de inflexión en la placa de 3.6 % de humedad

Se comprueba, en todos los casos, que el punto de contacto de la placa con el tornillo en desplazamiento del patín del carril es constante, girando en torno a 4.4 mm, si bien, a medida que aumenta la humedad de la placa la fuerza soportada por la misma va disminuyendo, ya que la placa se vuelve cada vez más flexible y se alcanza el contacto con el tornillo con una carga más pequeña. En la Figura 7.10 se indica la variación de las coordenadas del punto de contacto en función de la humedad.

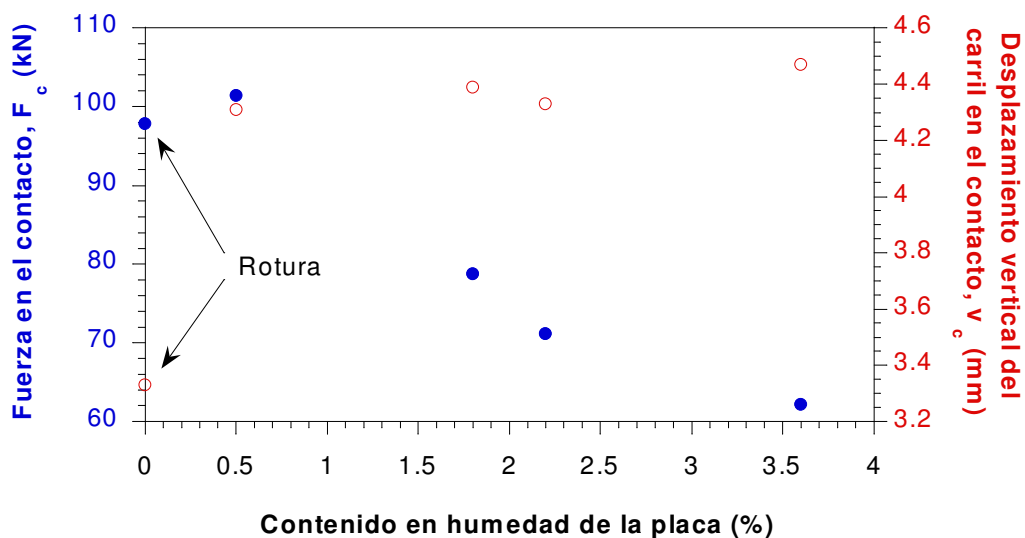


Figura 7.10.- Descripción del punto de contacto en función de la humedad

Como se puede ver en la Figura 7.11 la diferencia en el aspecto de la rotura es importante. En la placa seca ésta es totalmente frágil, apenas hay deformación, mientras que en el caso de la placa húmeda la deformación es apreciable, notándose, además, el contacto con el tornillo.

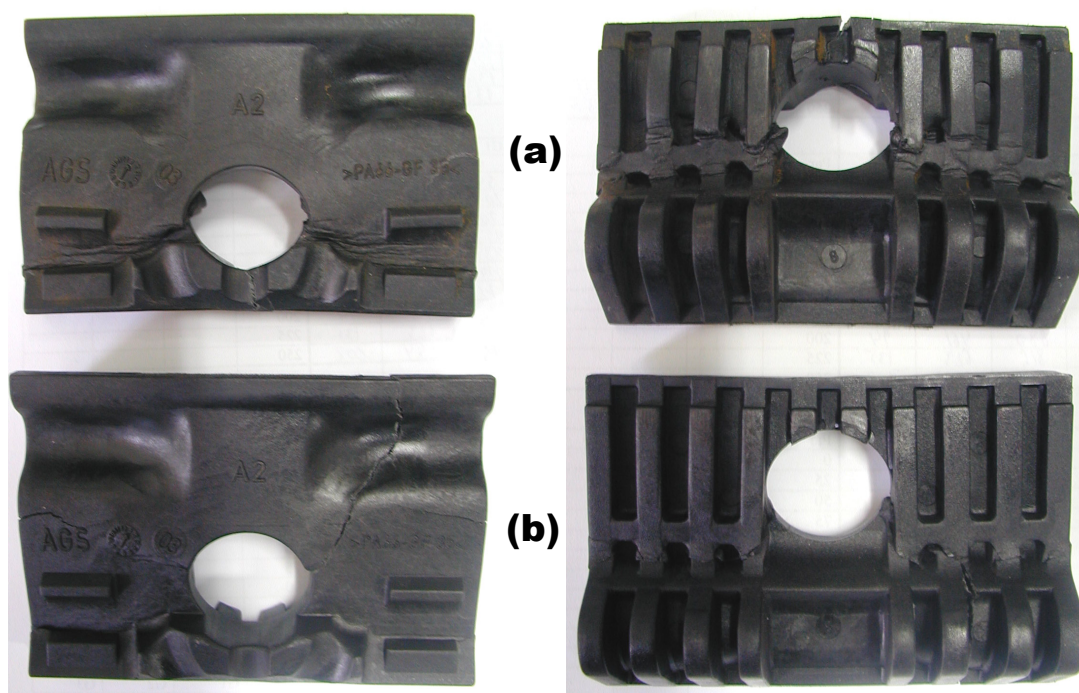


Figura 7.11.- Aspecto de la rotura estática de una placa con una humedad del 3.6 % (a) y otra seca (b)

2.1.2. Influencia del par de apriete en el comportamiento estático

Para evaluar la influencia que sobre el comportamiento estático de la placa acodada puede tener el valor del par de apriete, se realizaron ensayos con tres pares de apriete diferente, 100, 250 y 350 N·m, empleando en todos los casos placas con el mismo contenido de humedad, 1.8 %. En la Figura 7.12, se representa la evolución de los ensayos para los diferentes pares de apriete.

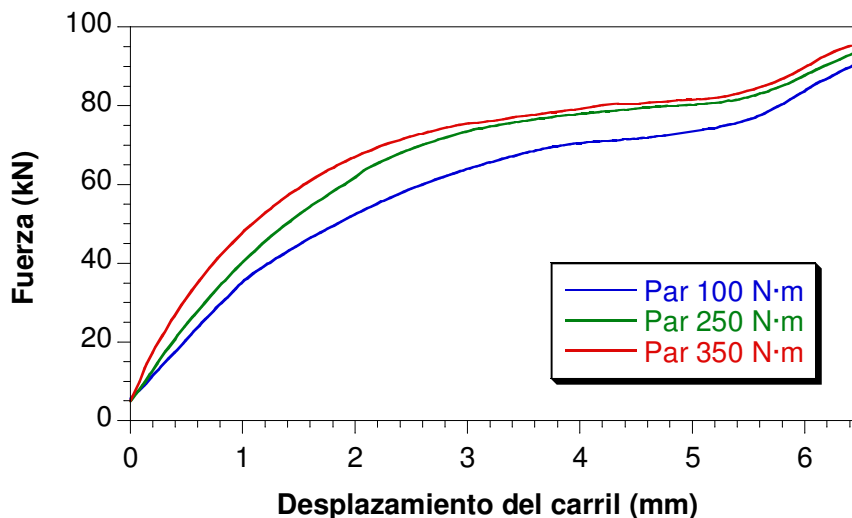


Figura 7.12.- Influencia del par de apriete en el comportamiento estático de la placa

Se comprueba que las curvas tienen el mismo aspecto en los tres casos, apareciendo, en todos ellos, un punto de inflexión, lo cual indica que en estos casos, también existe un punto de contacto de la placa con el tirafondo. En la Figura 7.13 se representan las derivadas de las curvas, y se comprueba que el punto de inflexión coincide con el medido en los casos anteriores, es decir 4.4 mm.

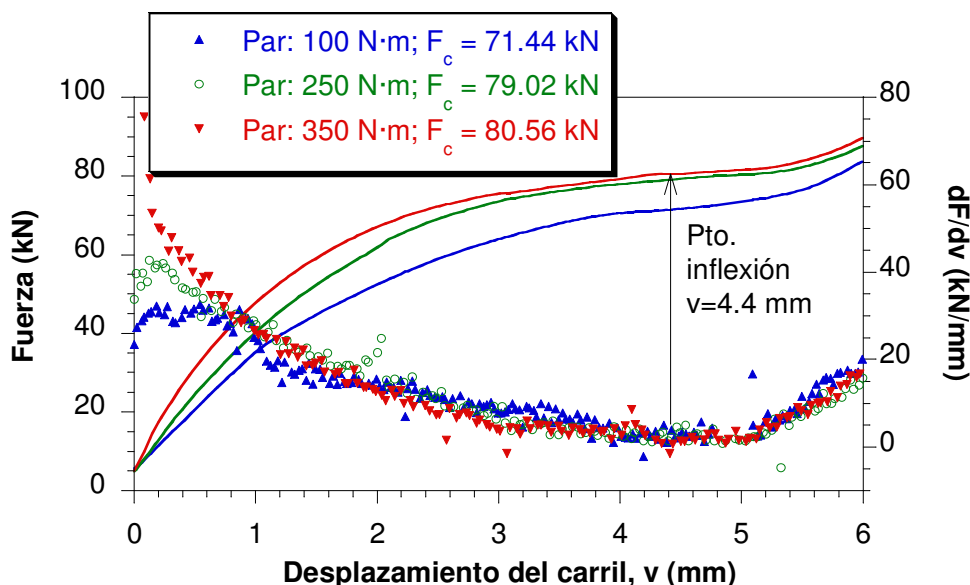


Figura 7.13.- Determinación del punto de contacto de la placa tonel tirafondo

Por otro lado, los valores de la fuerza en el punto de contacto disminuye a medida que lo hace el par de apriete, 71.44, 79.02 y 80.56 kN para 100, 250 y 350 N·m, respectivamente. Al tratarse de placas con la misma humedad, es decir, misma flexibilidad, el conseguir el contacto con el tornillo antes, en el conjunto con menor par, es debido a que el esfuerzo que mantiene la placa apretada contra el útil es menor y, por tanto, puede deslizarse con mayor facilidad por el mismo. Este deslizamiento irá disminuyendo a medida que se incrementa el par de apriete.

2.1.3. Influencia del deterioro por fatiga en el comportamiento estático

La evaluación de la influencia del deterioro por fatiga en el comportamiento estático se lleva a cabo sobre placas con la misma humedad, 0.6 %, una de ellas en estado original y otra deteriorada por medio de una fatiga de naturaleza sinusoidal con los siguientes parámetros:

- Frecuencia: 5 Hz
- Fuerza máxima: 37.7 kN
- Fuerza mínima: 2.5 kN
- Número de ciclos: 500.000 ciclos

El resultado se puede contemplar en la Figura 7.14, donde se representa la evolución de las dos placas, la original y la envejecida, ante un esfuerzo estático.

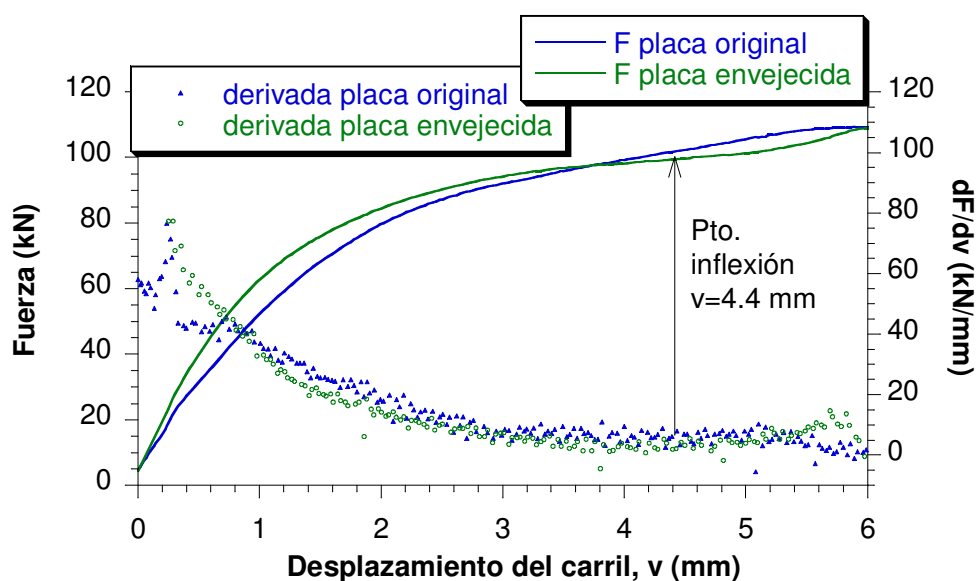


Figura 7.14.- Influencia en el comportamiento estático del envejecimiento por fatiga

El comportamiento de las dos es similar, mostrando en un cierto punto un contacto con el tirafondo, coincidiendo al igual que en los casos anteriores con un desplazamiento cercano a los 4.4 mm. La principal diferencia de comportamiento radica en la mayor rigidez inicial mostrada por la placa fatigada, no apreciándose apenas diferencia en el valor de la carga de contacto.

2.2. RESISTENCIA AL IMPACTO

Para la realización de los ensayos de impacto, se aplicó un ciclo de onda cuadrada por medio del actuador de la máquina de ensayo en control de posición con una amplitud suficiente para conseguir la rotura de la placa. La medida de los desplazamientos entre el simulador del patín del carril y el bastidor donde se aloja la placa acodada se realizó por medio de un comparador LVDT de ± 5 mm de recorrido. En este apartado, al igual que en el anterior, se trata de buscar la influencia que, sobre el comportamiento ante un impacto puedan introducir variables como el contenido de humedad, el par de apriete o el deterioro por fatiga.

2.2.1. Influencia del contenido de humedad en la resistencia al impacto

Para estudiar la influencia del contenido de humedad en el comportamiento ante un impacto, se emplearon placas con diferentes contenidos de humedad: secas en estufa, 0.5, 1.8, 2.2 y 3.6 %. En el gráfico de la Figura 7.15, se representan los resultados obtenidos en el ensayo de impacto de placas con diferente grado de humedad.

La primera diferencia apreciable con el comportamiento estático es que la rotura de las placas ocurre antes de producirse el contacto con el tirafondo, solamente la placa del 3.6 % puede plantear la duda, ya que sobrepasa, ligeramente, en rotura la barrera del 4.4 mm, pero al no apreciar cambio en la pendiente hasta la rotura, ni ningún tipo de marca sobre la placa A2, se considerará que no llega a entrar en contacto con el tirafondo.

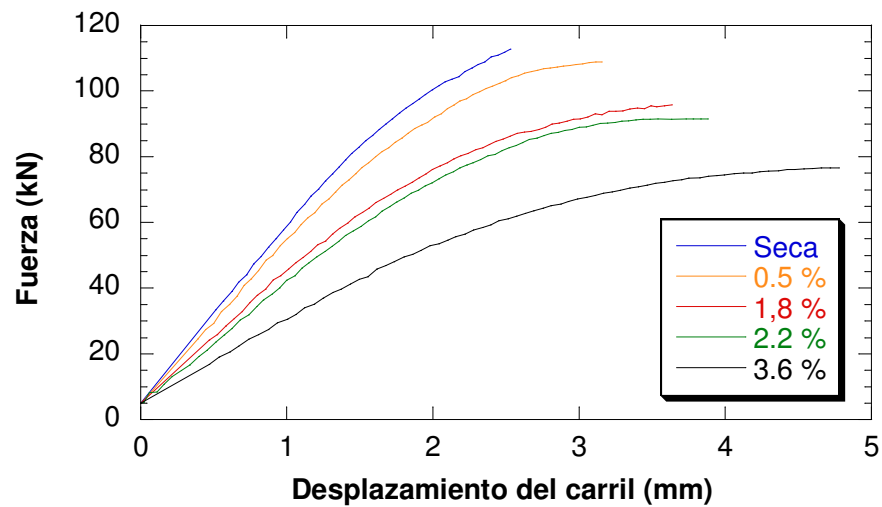


Figura 7.15.- Ensayo de impacto de placas con diferente contenido de humedad

A simple vista, de la figura anterior se pueden extraer las siguientes conclusiones: la rigidez, al igual que ocurría en el comportamiento estático, se incrementa al disminuir el contenido de humedad, de la misma forma, la deformación en rotura también disminuye al contrario de lo que le ocurre a la carga en rotura que aumenta. En la Figura 7.16, se representa la evolución de la energía a lo largo del ensayo, comprobando que la energía en rotura aumenta con el contenido de humedad.

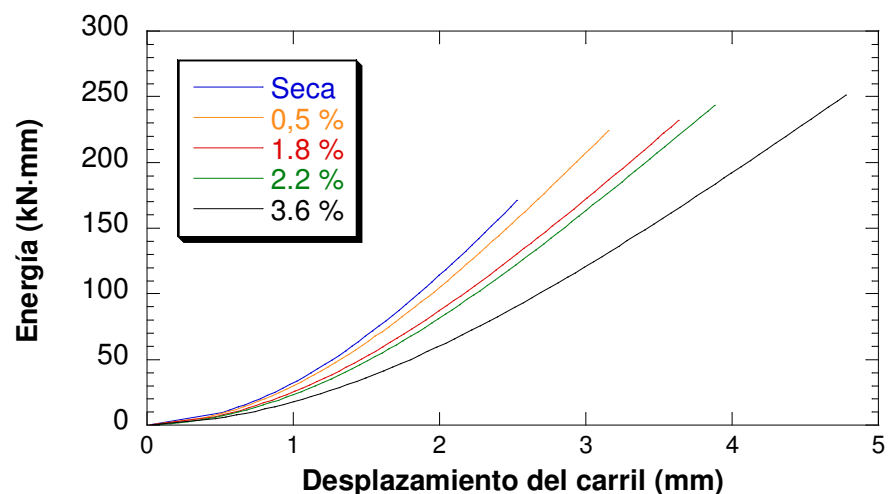


Figura 7.16.- Evolución de la energía en el ensayo de impacto

En la Figura 7.17 y Tabla 7.1, a modo de resumen, se muestran todos los parámetros medidos en rotura, así como su evolución en función del contenido de humedad de la placa acodada.

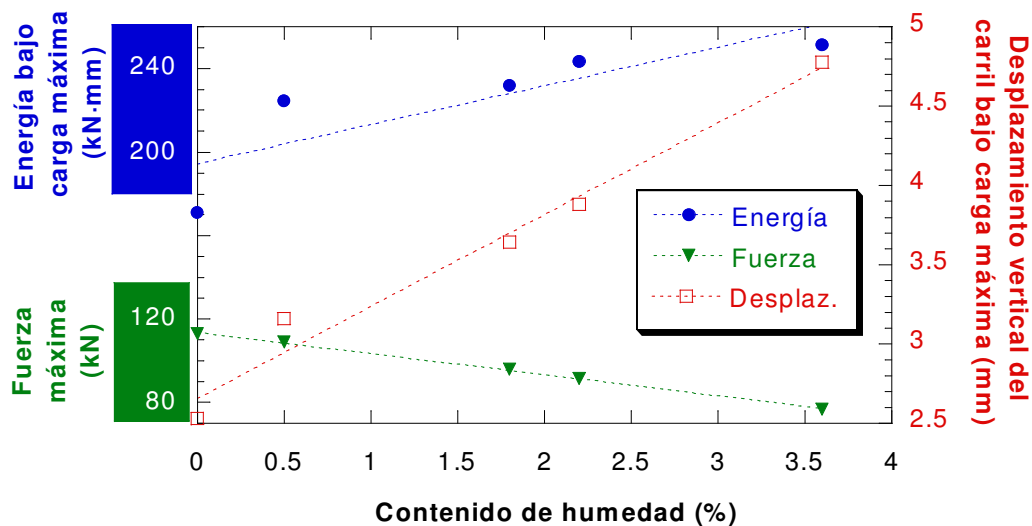


Figura 7.17.- Variación de los parámetros en rotura al impacto en función de la humedad la placa

Tabla 7.1.- Parámetros en rotura medidos en impacto para diferentes humedades

Humedad (%)	F. Rotura (kN)	Desp. Rot. (mm)	Energía (J/m ³)
Seca	112.8	2.53	171.22
0.5	108.9	3.16	224.44
1.8	95.9	3.64	231.96
2.2	91.6	3.88	243.51
3.6	76.6	4.78	251.39

No se puede comparar el comportamiento estático con el de impacto para todo el rango de humedades estudiado, ya que en el caso estático, en casi todos los casos, se producía el contacto con el tornillo antes de la rotura. Solamente en el caso de la placa seca, la menos deformable, se producía la rotura previamente al contacto, por lo que se ha realizado en el gráfico de la Figura 7.18 una comparativa de comportamientos entre el esfuerzo estático y de impacto para el caso particular de placa A2 sin humedad.

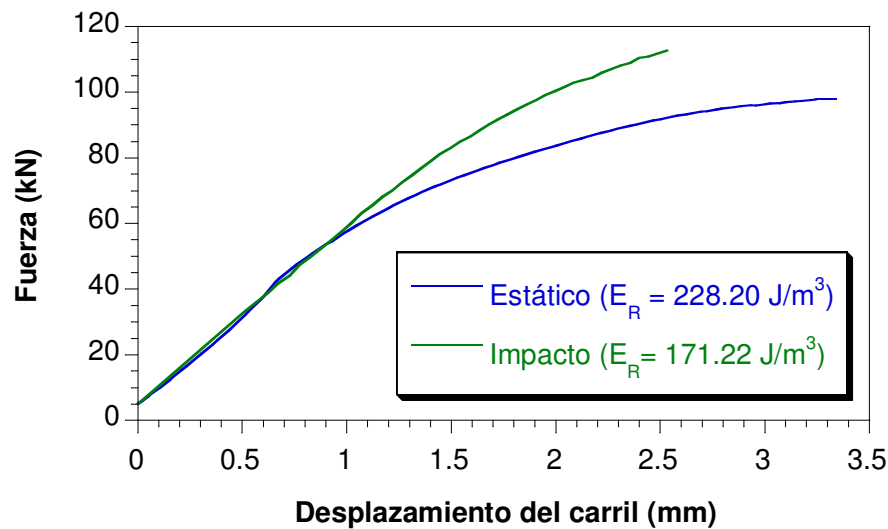


Figura 7.18.- Comparativa de comportamiento estático y de impacto para $H=0\%$

Se puede observar que hasta los 50 kN, o 1 mm de desplazamiento, los comportamientos son similares, pero a partir de dicho valor el comportamiento estático se vuelve más flexible, deformándose 0.83 mm más en rotura y soportando 15 kN menos de carga en esa situación. Por otro lado, se comprueba, también, que la energía en rotura para el caso estático supera en un 33 % a la necesaria en el impacto.

Otra diferencia respecto al comportamiento estático es la forma de la rotura, ya que, frente al impacto, las placas húmedas no muestran tanta deformación, presentando un aspecto bastante más frágil, pareciéndose más el tipo de rotura al de las placas secas. En la Figura 7.19 aparecen las roturas a impacto de una placa seca y otra con 3.6 % de humedad. En ninguno de los casos hay rastro del contacto entre tornillo y placa acodada.

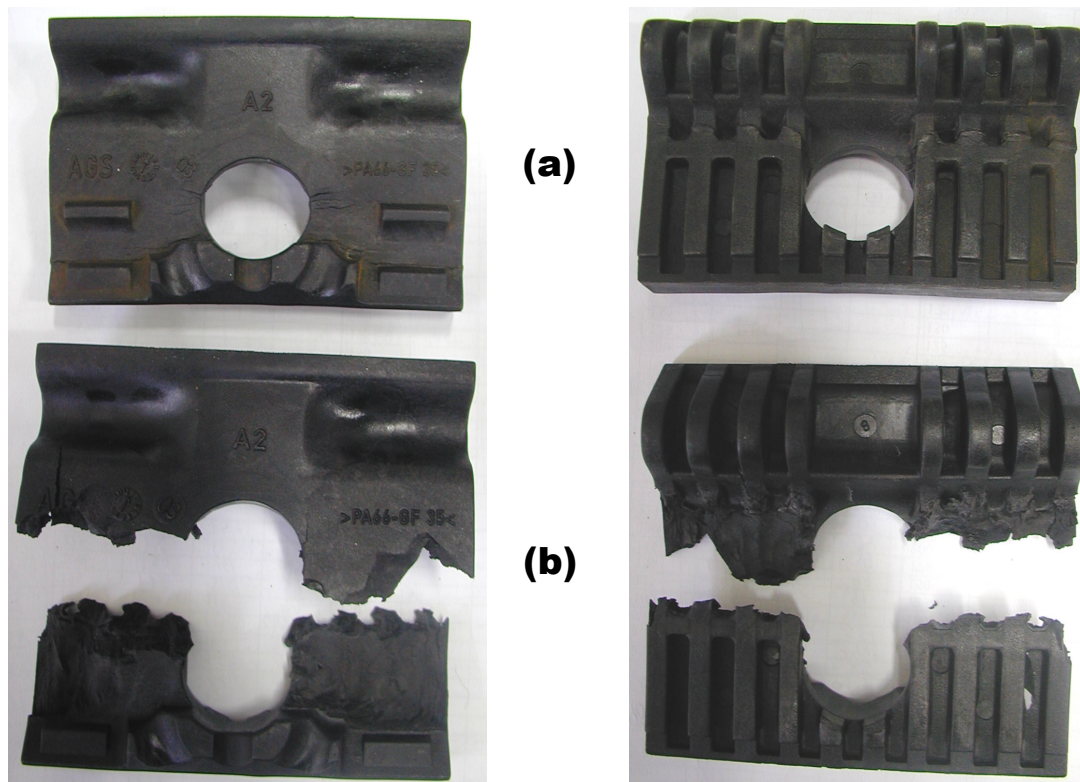


Figura 7.19.- Aspecto de la rotura a impacto de una placa con un contenido de humedad de 3.6 % (a) y otra seca (b)

2.2.2. Influencia del par de apriete en la resistencia al impacto

Para el estudio de la influencia del par de apriete, se realizaron los mismos ensayos que en el estudio estático, es decir, se emplearon tres pares diferentes de apriete sobre placas acodadas secas ($H = 0\%$), 100, 250 y 350 N·m. En la Figura 7.20, se representa la evolución de los tres ensayos con diferentes pares de apriete.

Se puede apreciar en dicha figura como las placas muestran un comportamiento más rígido al incrementar el par de apriete, igual que ocurría en el comportamiento estático, aumentando, también, la carga soportada en rotura y disminuyendo la deformación en dicho punto. A medida que disminuye el par, la fuerza que aprieta la placa contra el útil decrece, aumentando el deslizamiento de la placa sobre el útil

y por tanto el desplazamiento del simulador del patín. En la Tabla 7.2 se muestra a modo de resumen los valores obtenidos en los ensayos realizados.

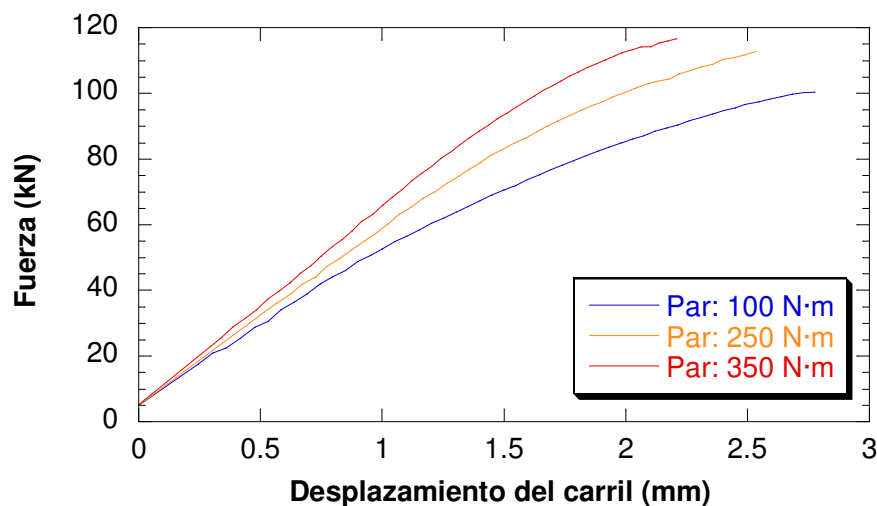


Figura 7.20.- Influencia del apriete en el comportamiento al impacto de la placa

Tabla 7.2.- Parámetros en rotura medidos en impacto para diferentes aprietes

Par (N·m)	F. Rotura (kN)	Desp. Rot. (mm)
100	100.5	2.78
250	112.1	2.53
350	116.6	2.21

2.2.3. Influencia del deterioro por fatiga en la resistencia al impacto

Para finalizar el estudio de la resistencia al impacto, se comprobó la influencia que pudiera tener sobre este comportamiento el deterioro mecánico por fatiga. El estudio se realizó sobre placas con 0.6 % de humedad, sometiendo a la placa previamente a 500.000 ciclos de naturaleza sinusoidal con los parámetros descritos en el apartado 2.1.3.

El resultado obtenido es el que se refleja en la Figura 7.21, donde se muestra la evolución de sendos ensayos de resistencia al impacto, uno sobre una placa original y el otro sobre una placa envejecida.

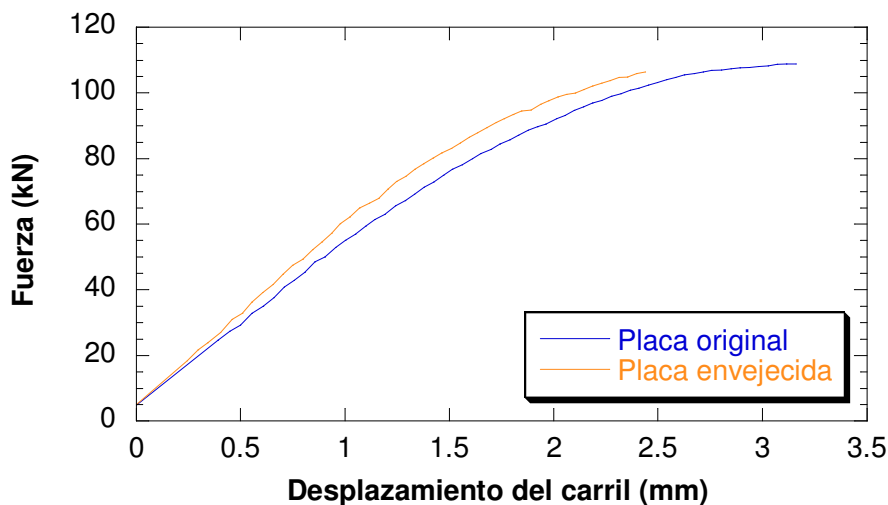


Figura 7.21.- Influencia del envejecimiento por fatiga en al resistencia al impacto

A la vista del gráfico se comprueba que el envejecimiento por fatiga tiende a rigidizar la placa, disminuyendo la deformabilidad en rotura en más de 0.5 mm y manteniendo prácticamente constante la carga soportada en rotura.

2.3. COMPORTAMIENTO EN FATIGA

En este apartado, se estudia el comportamiento de la placa A2 colocada en su posición de trabajo frente a esfuerzos dinámicos cíclicos e, igualmente, se intentará valorar la influencia sobre este comportamiento de parámetros externos, como pueden ser el contenido de humedad de la propia placa o el valor del par de apriete aplicado al conjunto de sujeción.

Para la caracterización en fatiga, se empleó la técnica del ensayo LOCATI, consiste en aplicar una fuerza máxima escalonada y creciente, a partir de un valor inferior al límite de fatiga, durante un número constante de ciclos.

Al alcanzar un cierto nivel de carga, aparece un escalón crítico a partir del cual los valores de la deformación pierden su estabilidad y crecen con una velocidad crítica que precede a la rotura de la placa.

En este apartado se pone en práctica el modelo para la determinación del fallo por fatiga, analizando el parámetro que relaciona a las energías disipadas y almacenadas por ciclo (E_d/E_a) a partir de los resultados obtenidos en el ensayo de caracterización acelerada empleando el método LOCATI y desarrollado en el Anexo III de la presenta Tesis.

2.3.1.1. Influencia del contenido de humedad en el comportamiento en fatiga de la placa acodada.

En el Anexo II se estudió cómo variaba el comportamiento a fatiga de la poliamida reforzada a medida que el material absorbía agua, ahora se trata de comprobar esa influencia en un componente real como es la placa acodada A2.

Para ello, se utiliza el método LOCATI en bloques de 20.000 ciclos de onda cuadrada a una frecuencia de 5 Hz, entre valores de carga de compresión iniciales de 5 y 45 kN. El valor mínimo se conservó en todos los bloques mientras que el valor máximo se incrementaba 2 kN en cada bloque. Los parámetros empleados se resumen en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3.- Parámetros empleados en el ensayo LOCATI

N (ciclos)	F _{máx} (kN)	F _{mín} (kN)	N. medio (kN)	Amplitud (kN)
[1 - 20.000]	45	5	25	20
[20.000 - 40.000]	47	5	26	21
[40.000 - 60.000]	49	5	27	22
[60.000 - 80.000]	51	5	28	23
[80.000 - 100.000]	53	5	29	24
[100.000 - 120.000]	55	5	30	25
[120.000 - 140.000]	57	5	31	26
[140.000 - 160.000]	59	5	32	27
[160.000 - 180.000]	61	5	33	28
[180.000 - 200.000]	63	5	34	29
[200.000 - 240.000]	65	5	35	30
[240.000 - 260.000]	67	5	36	31

En los ensayos realizados se registraron datos de ciclos completos, tanto de la fuerza, como del desplazamiento del patín del carril, cada 500 ciclos, almacenándose 50 puntos por onda, lo que permite representar la evolución de estos parámetros a lo largo del ensayo. También se registró el valor de la temperatura interna de la placa medida entre dos nervios de la misma.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos es posible establecer un nivel de variación de tensiones crítico, a partir del cual determinar el valor de la resistencia a la fatiga de la placa.

La búsqueda del escalón crítico, debido a la poca diferencia en carga de un escalón a otro, no siempre es una tarea inmediata y, en muchos casos, puede surgir la duda entre varios escalones. Se empleará en esta tarea el método desarrollado en el Anexo III, basado en la obtención de la temperatura crítica de funcionamiento del sistema a partir de los siguientes parámetros:

- ❑ Evolución del ángulo de desfase entre las señales de fuerza y desplazamiento del carril. Como se vio en el Anexo III, al atravesar la temperatura crítica, a partir de la cual se produce el fallo, este parámetro presentaba un máximo.
- ❑ Relación entre la energía disipada y la almacenada ($E_{d/a}$) en cada uno de los ciclos de carga, ya que este parámetro es proporcional a la tangente del ángulo de desfase, por lo que también debería presentar un máximo al llegar a condiciones críticas.

Para contrastar los resultados obtenidos y en algún caso ayudar en la estimación del escalón crítico se emplea un índice diferente que aporta información similar:

- ❑ Variación de los desplazamientos del simulador del patín frente al nº de ciclos, es decir, al estudio de la derivada del desplazamiento [107]. Para observarse con mayor claridad se empleará la derivada de la deformación máxima ($\epsilon_{m\acute{a}x}$). El escalón crítico es el último en el que la derivada de la deformación máxima no alcanza el valor nulo.

En las siguientes figuras (7.22 a 7.26) se representan los resultados obtenidos para 5 placas acodadas A2 ensayadas con diferentes contenidos de humedad: seca, 0.6, 1.8, 2.2 y 3.6 %. Cada una de estas figuras consta de tres gráficos.

En el primero de los mismos se representa la determinación de la temperatura crítica a partir del parámetro $E_{d/a}$, para lo cual se ha recogido la evolución tanto de este parámetro como del ángulo de desfase frente a la temperatura conseguida en el interior de la placa por efecto de la fatiga, verificándose que los dos parámetros presentan tendencias similares

Una vez determinada la temperatura crítica, en el segundo de los gráficos se obtiene el escalón crítico tras representar la evolución de la temperatura frente al número de ciclos. En el diagrama se representan además la envolvente de los ciclos de desplazamiento, es decir desplazamiento máximo (Δ_{max}) y desplazamiento mínimo (Δ_{min}) y la rigidez ó módulo de la rigidez compleja, expresada como la relación entre amplitud de carga y la amplitud de desplazamiento.

En el tercero de los gráficos se contrasta la determinación del escalón crítico a partir de la derivada del desplazamiento máximo frente al número de ciclos. También se representan frente al número de ciclos el ángulo de desfase y el cociente E_d/E_a .

A medida que la humedad de las placas disminuye, también lo hacen los desplazamientos medidos y, por tanto, la precisión en la determinación de la energía, medida en base al área encerrada por la curva, y en la determinación de los desfases. Esto ocasiona que para humedades bajas los criterios para la determinación del escalón crítico difieran ligeramente, como ocurre en el caso de las Figuras 7.25 y 7.26. En estos casos, para la determinación del límite de fatiga se tomará como escalón crítico el inferior de los dos, manteniendo el resultado del lado de la seguridad.

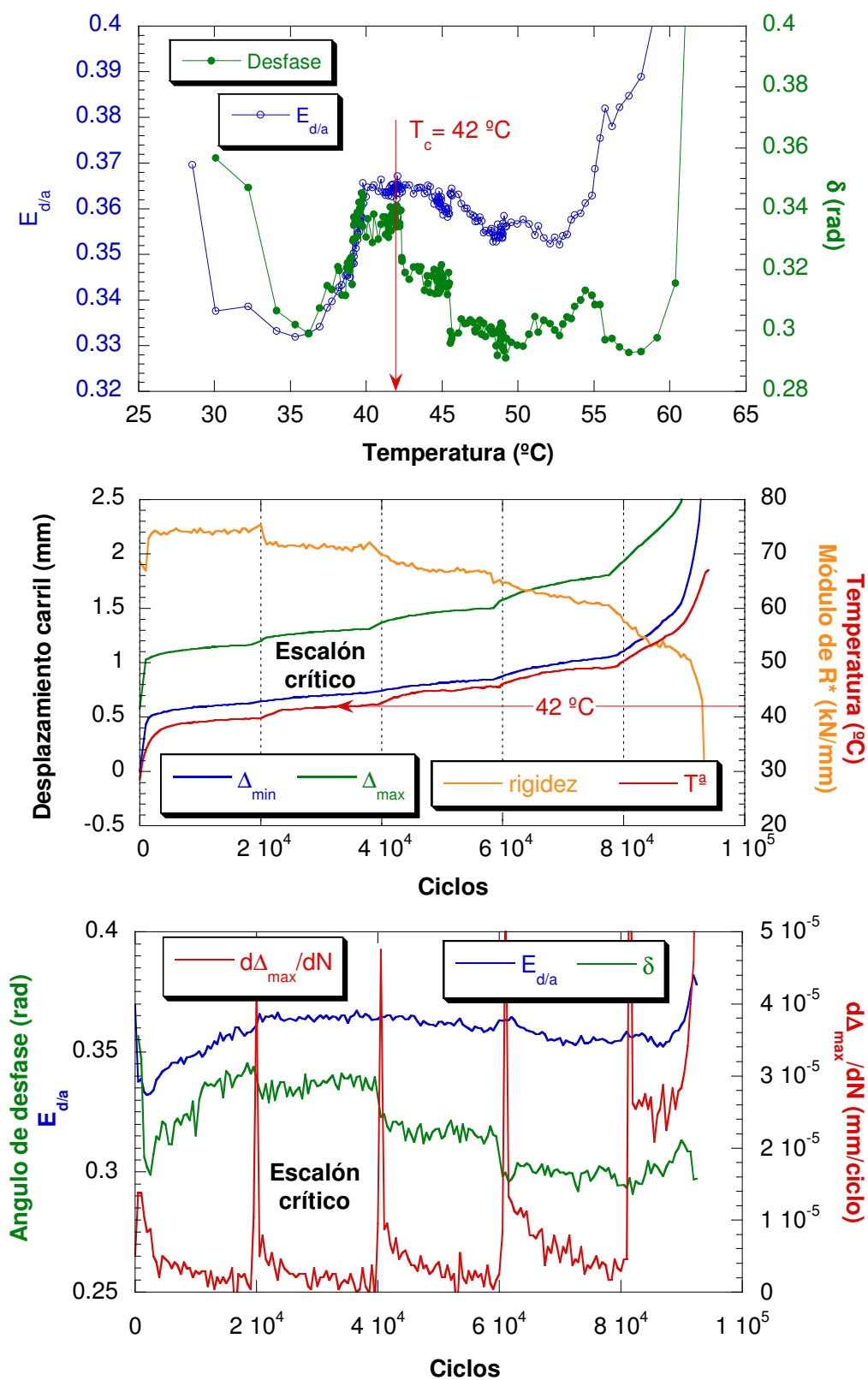


Figura 7.22.- Determinación del escalón crítico para la placa A2 con $H=3.6\%$

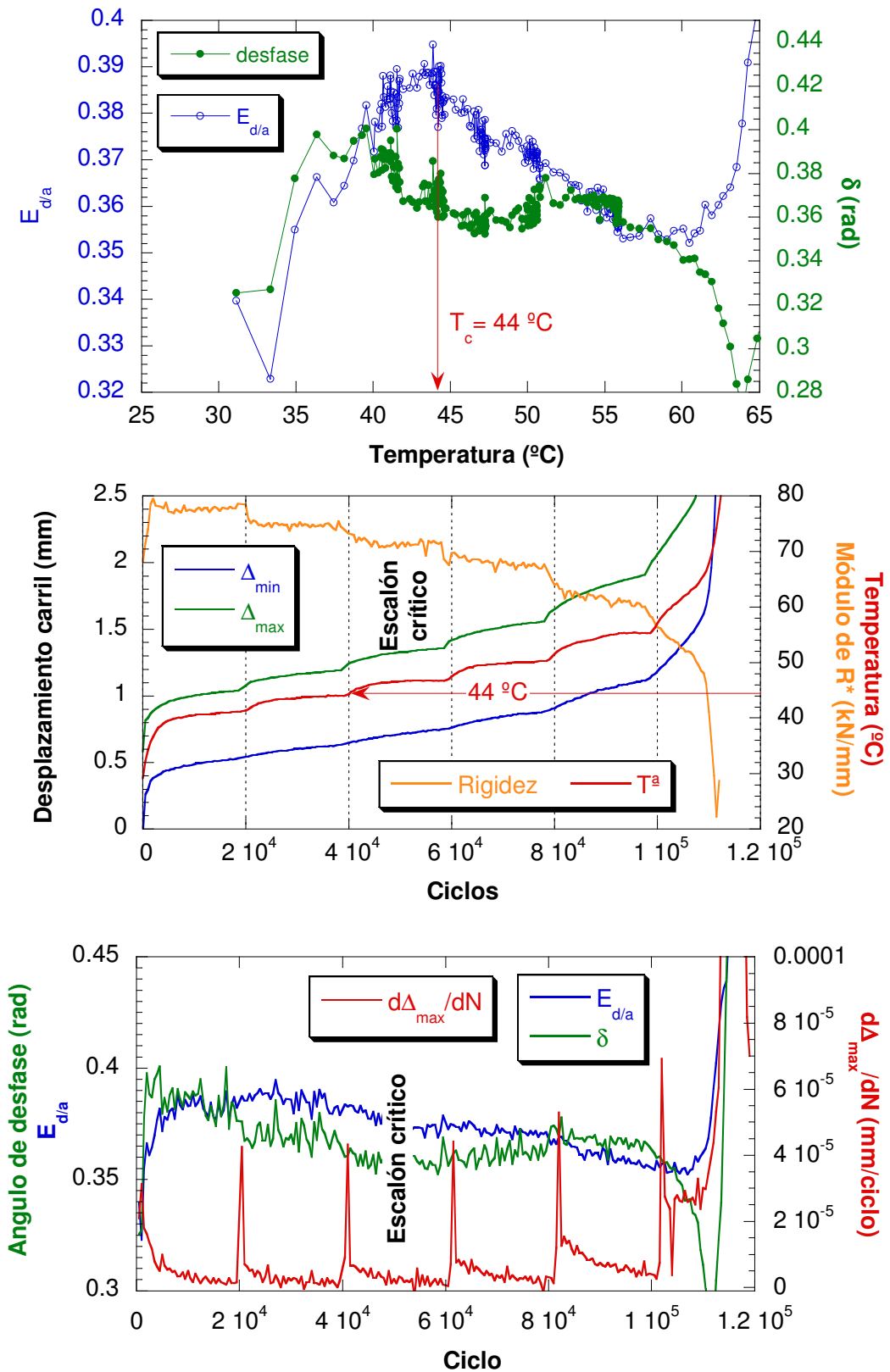


Figura 7.23.- Determinación del escalón crítico para la placa A2 con $H=2.2\%$

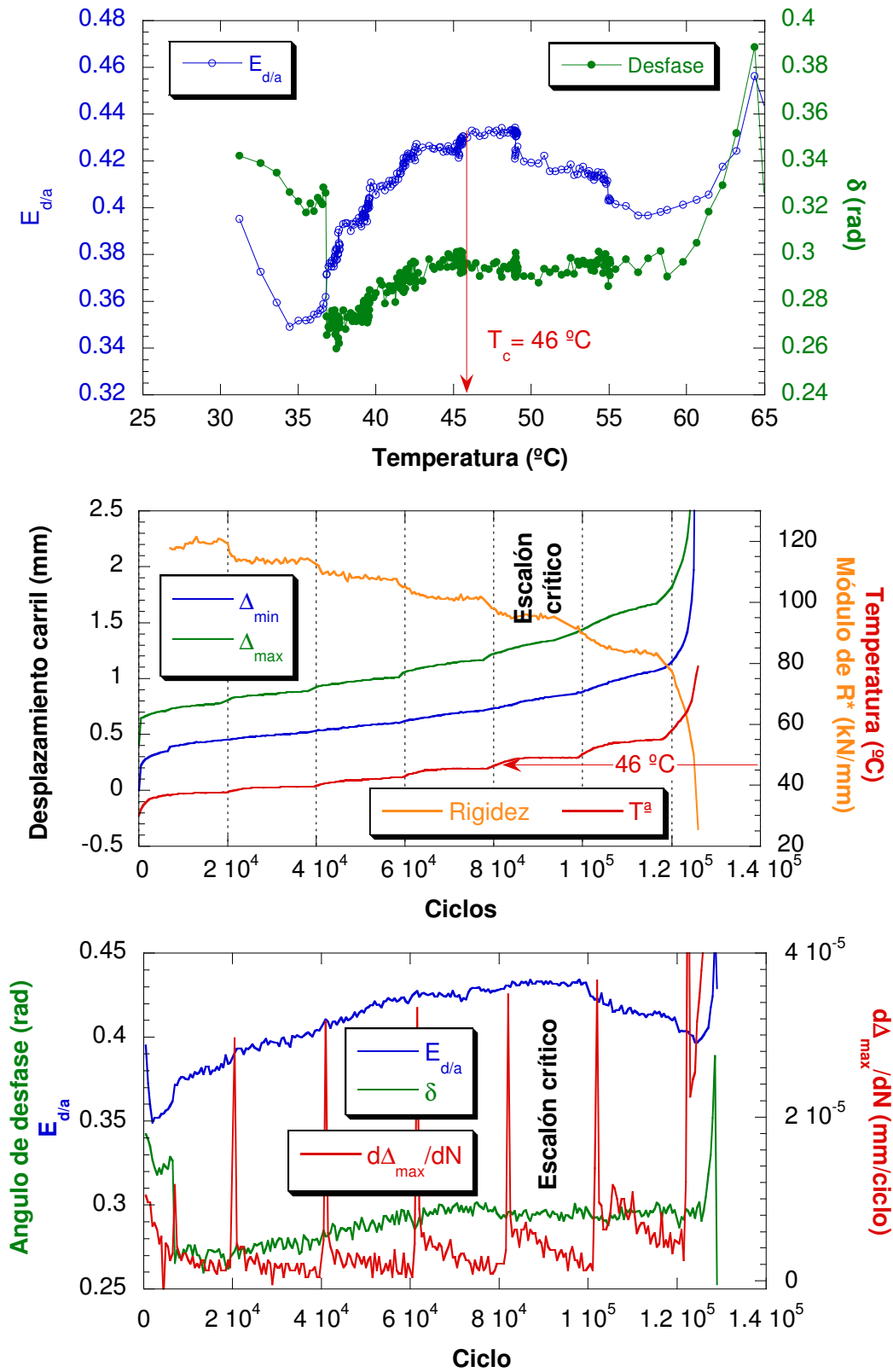


Figura 7.24.- Determinación del escalón crítico para la placa A2 con $H=1.8 \%$

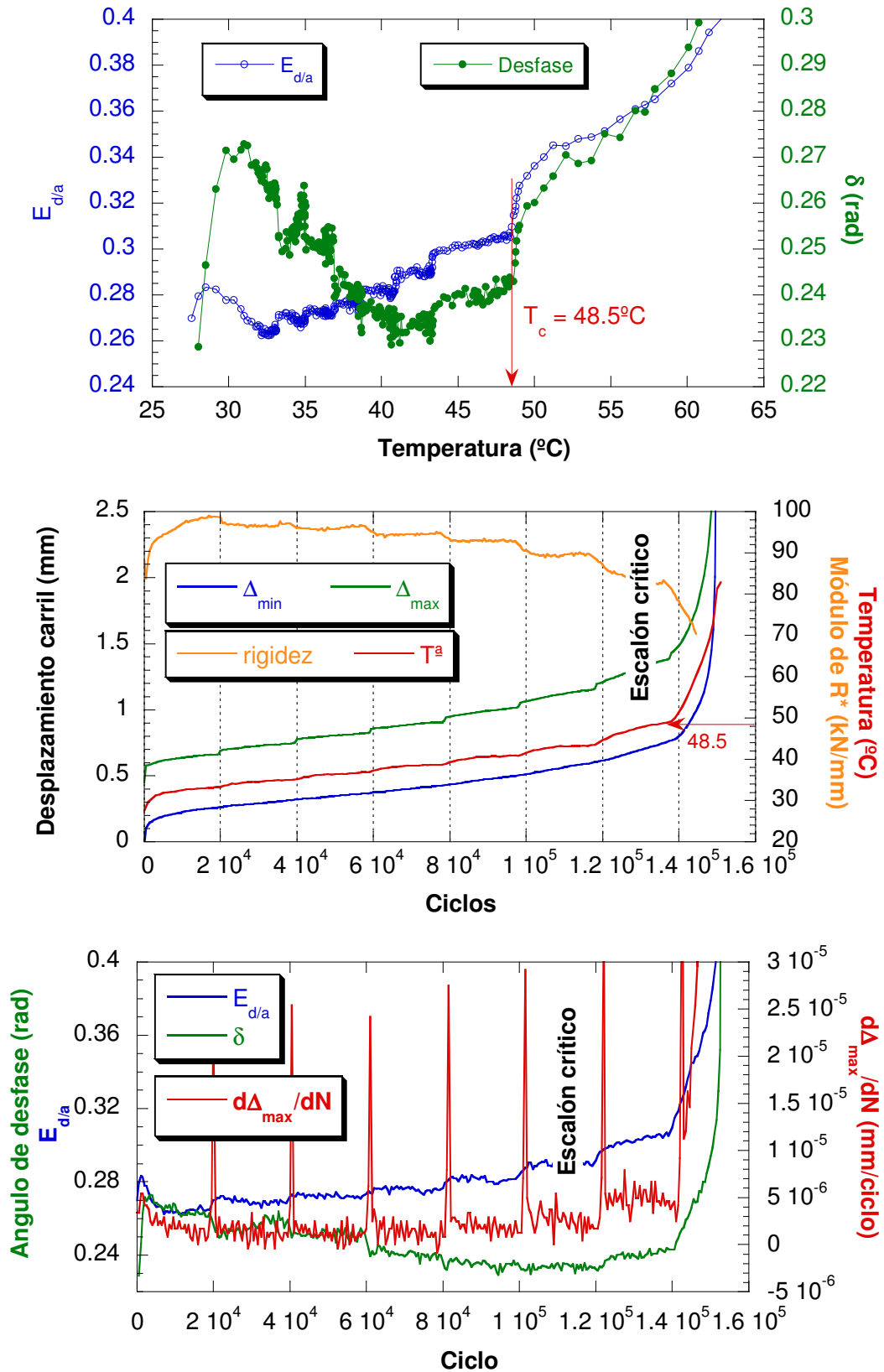


Figura 7.25.- Determinación del escalón crítico para la placa A2 con $H=0.6\%$

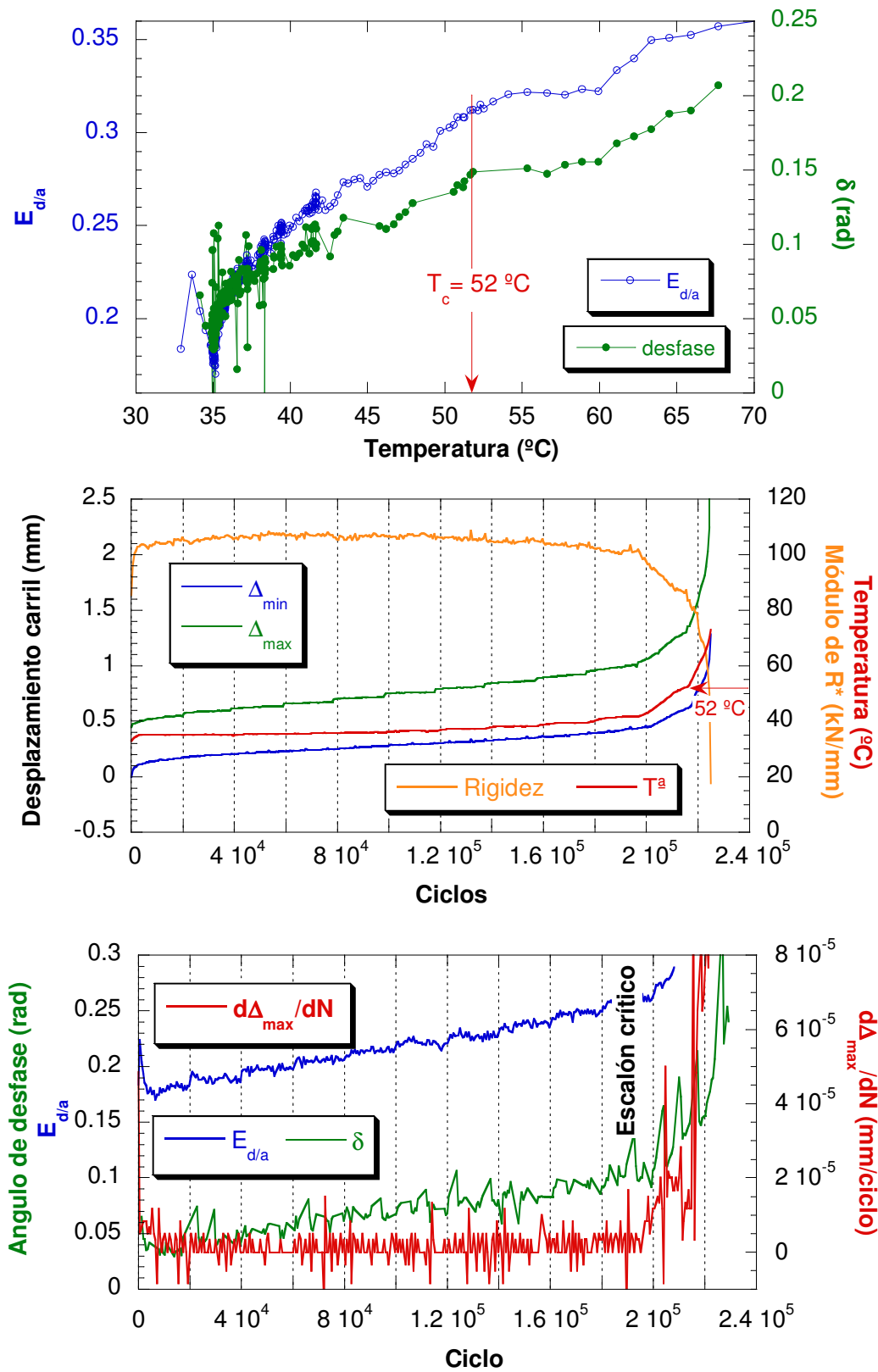


Figura 7.26.- Determinación del escalón crítico para la placa A2 seca

En la Tabla 7.4 y Figura 7.27 se muestran, a modo de resumen, los resultados obtenidos en los ensayos LOCATI realizados sobre placas A2 con diferentes contenidos de humedad, comprobándose cómo el límite de fatiga, $\Delta\sigma_e$, se incrementa con la disminución del contenido de humedad de la placa. En la misma figura se representa la evolución de la temperatura crítica para los diferentes contenidos de humedad de placa, obteniéndose la misma relación decreciente.

Tabla 7.4.- Influencia del contenido de humedad en el comportamiento en fatiga

Humedad (%)	Escalón crítico	$\Delta\sigma_e$ (kN)	T_c (°C)	Ciclo crítico	Ciclos de rotura
3.6	2	40	42	20.000-40.000	98.887
2.2	3	42	44	40.000-60.000	119.508
1.8	5	46	46	80.000-100.000	129.057
0.6	6/7	48	48.5	100.000-140.000	153.929
0	10/11	56	52	180.000-220.000	229.297

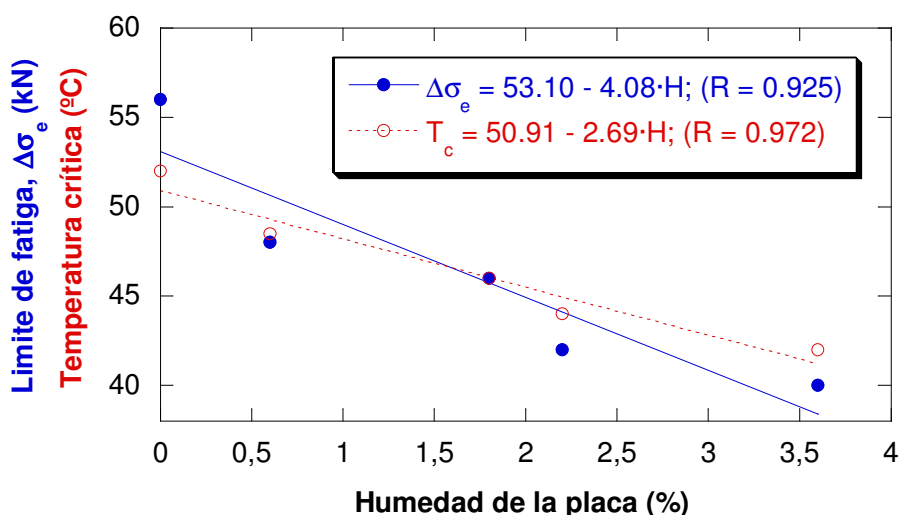


Figura 7.27.- Influencia del contenido de humedad en el límite de fatiga y la T_c

La rotura de las placas secas bajo sollicitación estática muestra un aspecto frágil y las húmedas dúctil; en la rotura a impacto las dos placas presentan un comportamiento frágil; y en el ensayo de fatiga, como puede verse en la Figura 7.28, la respuesta de ambas placas, tanto la seca como la húmeda, es totalmente dúctil debido a que antes de la rotura, las placas atraviesan la temperatura de transición, incrementándose, a partir de este momento, las deformaciones de forma acelerada.

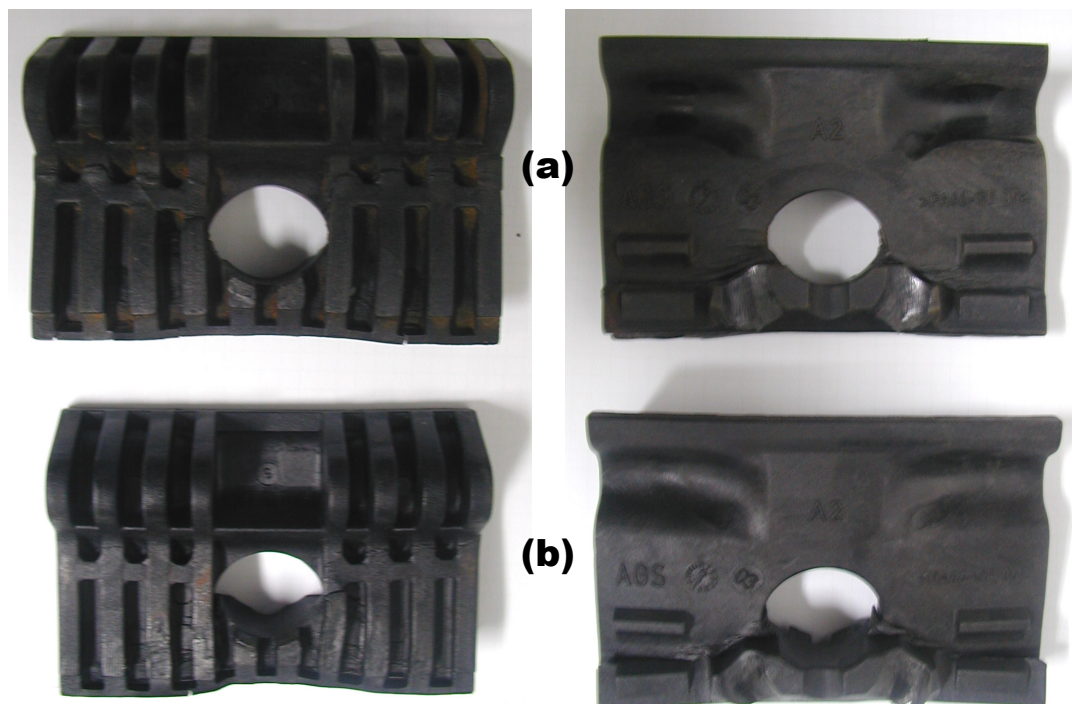


Figura 7.28.- Aspecto de la rotura en fatiga de una placa con un contenido de humedad de 3.6 % (a) y otra seca (b)

2.3.1.2. Influencia del par de apriete en el comportamiento en fatiga de la placa acodada.

Al igual que ocurría en el caso estático y de impacto el apriete introducido en la sujeción puede condicionar el comportamiento a fatiga de la placa A2. Para comprobar la influencia de este parámetro, se realizaron ensayos Locati sobre placas con el mismo contenido de humedad (0.6 %) y variando el par de apriete: 100, 250 y 350 N·m.

Los parámetros elegidos en el ensayo Locati fueron los mismos que en el apartado anterior (Tabla 7.3) y, en todos los casos, se empleó una vaina nueva y un clip usado.

Los resultados obtenidos con la placa apretada con 250 N·m se representaron en la Figura 7.25. Para el resto de aprietes, los mismos se muestra en las siguientes figuras.

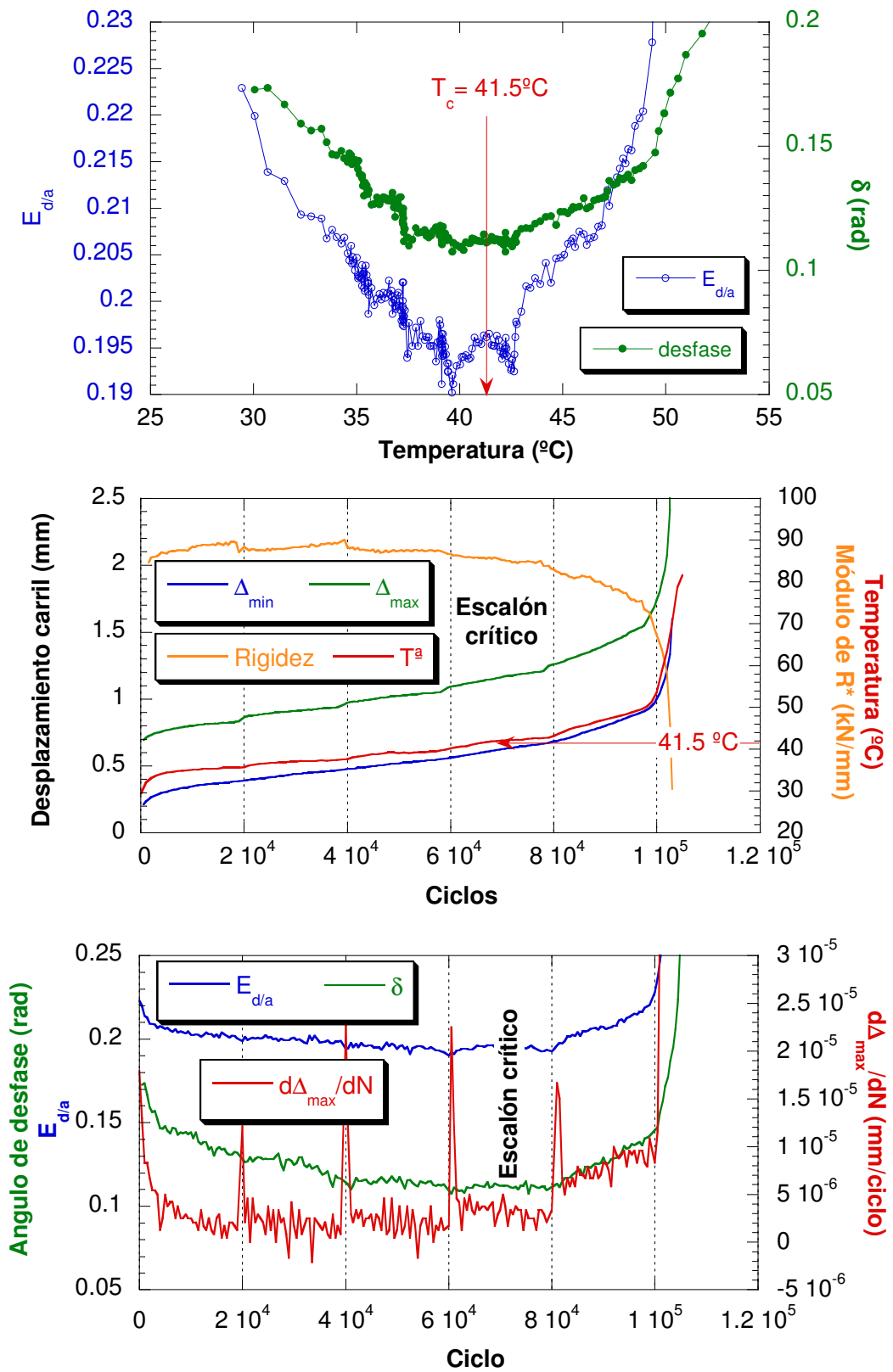


Figura 7.29.- Escalón crítico para la placa A2 con $H = 0.6\%$ y par $100 \text{ N}\cdot\text{m}$

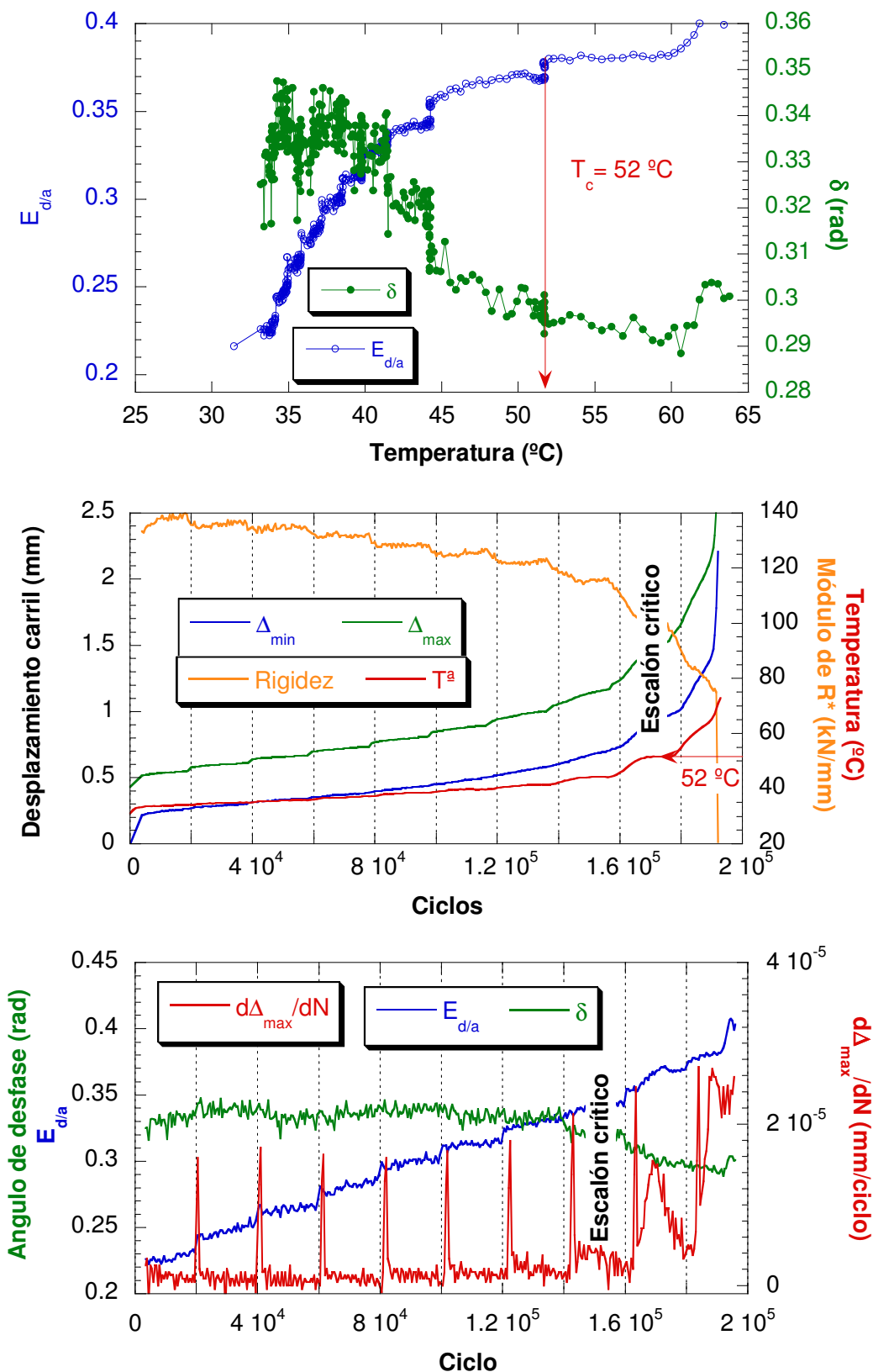


Figura 7.30.- Escalón crítico para la placa A2 con $H = 0.6\%$ y par 350 N·m

El incremento de par produce un descenso en los desplazamientos, disminuyendo la precisión en la determinación de las energías, provocando ligeras diferencias en la determinación del escalón crítico empleando diferentes criterios, al igual que ocurría al reducir la humedad de las placas.

Como puede deducirse de las figuras anteriores, el aumento del par de apriete mejora el comportamiento a fatiga de la placa A2. En la Tabla 7.5 y en la Figura 7.31 se muestran, a modo de resumen, los resultados obtenidos en los ensayos Locati realizados sobre placas A2 con diferentes pares de apriete y contenidos de humedad.

Tabla 7.5.- Influencia del par de apriete en el comportamiento en fatiga

Par (N·m)	Escalón crítico	$\Delta\sigma_c$ (kN)	T_c (°C)	Ciclo crítico	Ciclos de rotura
100	4	44	41.5	60.000-80.000	107.832
250	6/7	48	48.5	100.000-140.000	153.929
350	8/9	52	52	140.000-180.000	196.377

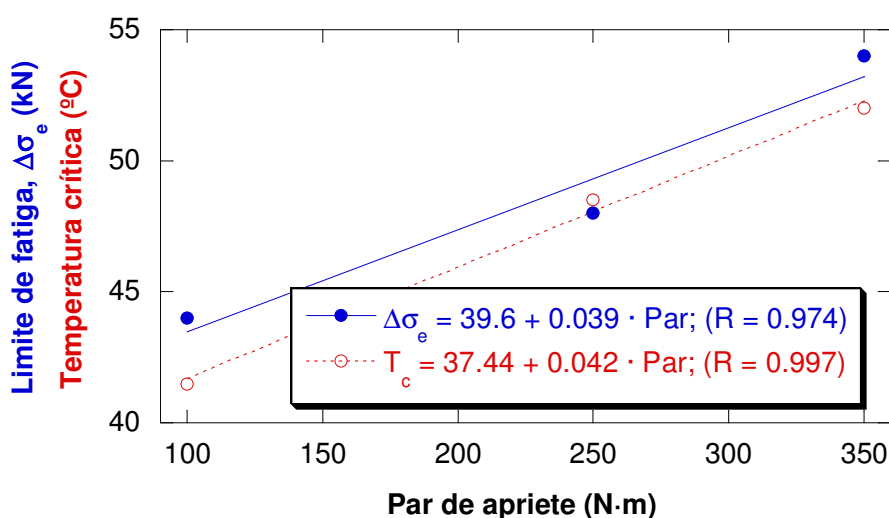


Figura 7.31.- Influencia del par de apriete en el comportamiento a fatiga de la placa A2

Por otro lado, en la Figura 7.32, se representa la influencia de las dos variables estudiadas sobre la temperatura crítica, comprobándose que a efectos de fatiga sobre la placa A2, incrementar el par de apriete tiene consecuencias similares a eliminar humedad de la misma.

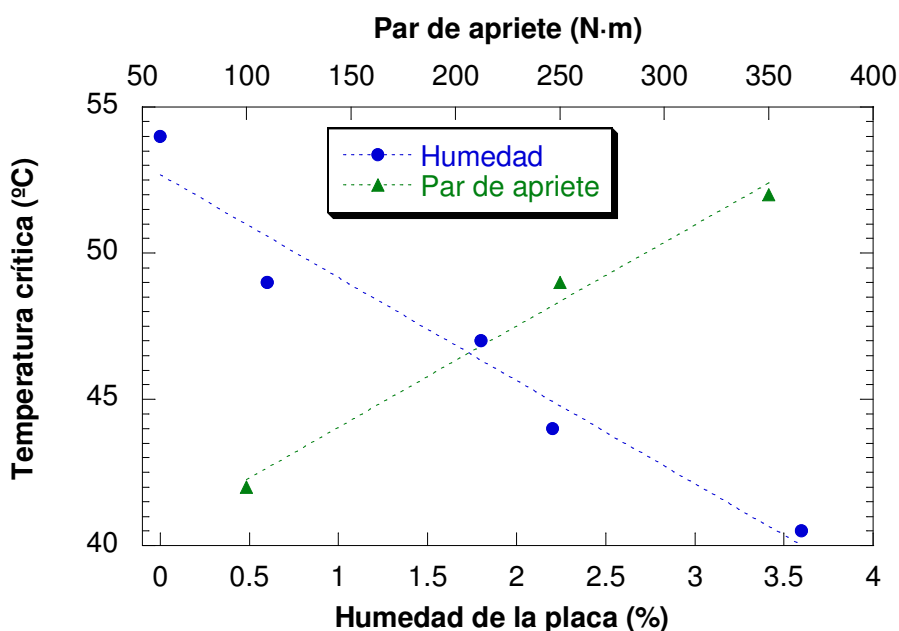


Figura 7.32.- Influencia del contenido de humedad y del par de apriete en la T^a crítica

A partir de los resultados reflejados en el gráfico anterior se puede concluir que la temperatura crítica no es, únicamente, un parámetro del material, por que, además de depender de las propiedades de éste (humedad), también depende de ciertas condiciones de contorno, es el caso estudiado, del par de apriete de montaje.

3. PLACA DE ASIENTO

El uso generalizado de la traviesa de hormigón en los ferrocarriles de alta velocidad, ha supuesto la evolución de los sistemas de sujeción hacia el empleo de la placa de asiento elástica, ya que, se hace necesario intercalar un elemento viscoelástico entre el carril y la propia traviesa para evitar, en la medida de lo posible, los impactos entre ambos componentes y suplir la excesiva rigidez del hormigón (3 a 5 veces superior a la de las traviesas de madera).

A medida que una vía nueva se va sometiendo a las cargas repetitivas originadas por el paso de las ruedas de los trenes, va sufriendo deformaciones plásticas que crecen con pendiente decrecientes hasta que, con el tiempo, se acomoda el sistema y se alcanza un régimen de verdadera elasticidad semejante al de los sólidos homogéneos.

Se ha comprobado [45] que un valor alto de la rigidez de la placa de asiento incrementaría las sobrecargas dinámicas debido a las masas no suspendidas, acelerando el deterioro de la vía, mientras que un valor bajo de la misma provocaría un hundimiento excesivo de la vía, con una importante elevación de la tensión de los carriles.

Por tanto, una vez obtenido el valor óptimo de rigidez, se hace necesario acotarlo, tanto superior como inferiormente. En la Especificación Técnica para el suministro de Sujeciones del GIF [7] se acotan tanto los valores de rigidez estáticos como los dinámicos. El valor de la rigidez vertical estática, k_s , debe estar comprendido, como se ha visto en el capítulo 4, en el intervalo $80 \leq k_s \leq 125$ kN/mm, mientras que, el valor de rigidez dinámica, k_d , lo estará en el intervalo $k_s \leq k_d \leq 2 \cdot k_s$.

Debido a la naturaleza del material constituyente de las placas, estos valores de rigidez se pueden ver alterados por diferentes agentes ambientales como pueden ser la temperatura, que puede llegar a fluctuar en vía entre -20 y 80 °C, la humedad o el deterioro sufrido por las placas debido a los esfuerzos mecánicos continuados de fatiga en compresión [110].

En este apartado, se ha comprobado cómo afectan todas estas variables, presentes en condiciones normales de trabajo, a la rigidez de la placa, estableciendo las circunstancias bajo las cuales puede quedar fuera de especificación y, por lo tanto, fuera de uso.

Para la realización de este estudio se han empleado placas de asiento del modelo B para dos tipos diferentes de carril, UIC 54 y UIC 60 inyectadas en HYTREL® fabricado por Du Pont. La geometría de cada una de ellas se resume en la Tabla 7.6.

Tabla 7.6.- Dimensiones de las placas de asiento en mm.

Nomenclatura	Ancho	Largo	Espesor
Modelo B-54 (UIC-54)	140 ± 1	180 ± 1	7 ^{+0,15} _{-0,05}
Modelo B-60 (UIC-60)	148 ± 1	180 ± 1	7 ^{+0,15} _{-0,05}

3.1. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL COMPORTAMIENTO ESTÁTICO

La evaluación del comportamiento estático se realizó a partir de ensayos de rigidez estática P_0/P_{0+75} , aplicando sobre la placa de asiento una carga vertical por medio del dispositivo indicado en la Figura 7.33. El dispositivo simula las condiciones de trabajo reales, sustituyendo la traviesa por un soporte de acero de dimensiones 162x165 mm. La carga se aplicó por medio de un cupón de carril, dotado de una rótula que aseguraba la verticalidad de los esfuerzos.

Se consideró como índice de deformación de la placa de asiento, el descenso vertical medio del carril respecto del útil de apoyo registrado por cuatro comparadores lvdt de ± 5mm de recorrido, situados en cada una de las esquinas del soporte. La carga se aplicó por medio de un actuador de ±250 kN de capacidad.

La influencia de la temperatura en el comportamiento de la placa de asiento, se evaluó introduciendo el dispositivo mencionado anteriormente dentro de una

cámara climática adaptada a la máquina de ensayo, tal como se puede observar en la Figura 7.34.



Figura 7.33.- *Dispositivo de ensayo.*

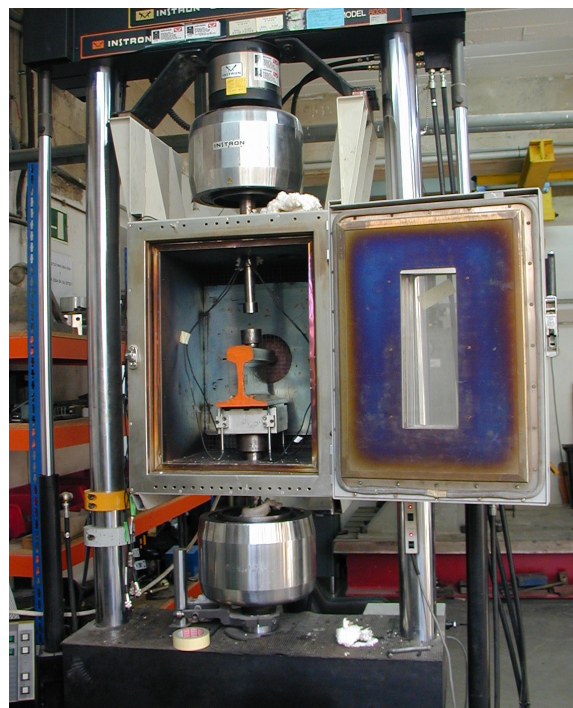


Figura 7.34.- *Dispositivo de ensayo en la cámara climática.*

También se realizaron medidas de la dureza Shore D [111], tratando de buscar una correlación de este parámetro con la evolución del comportamiento mecánico de la placa.

Los ensayos de rigidez vertical secante estática P_0/P_{0+75} se realizaron siguiendo las disposiciones indicadas en la Especificación Técnica (capítulo 4) [7] empleando una fuerza de apriete, P_0 , de 20 kN.

Se estudió el comportamiento estático de placas modelo B-54 a diferentes temperaturas, -10, 20, 50 y 80°C.

En el gráfico de la Figura 7.35, se aprecia la evolución del acortamiento de la placa del modelo B-54 en el tercer ciclo de carga-descarga, aplicado en el caso estático, a las temperaturas de -10, 20, 50 y 80 °C.

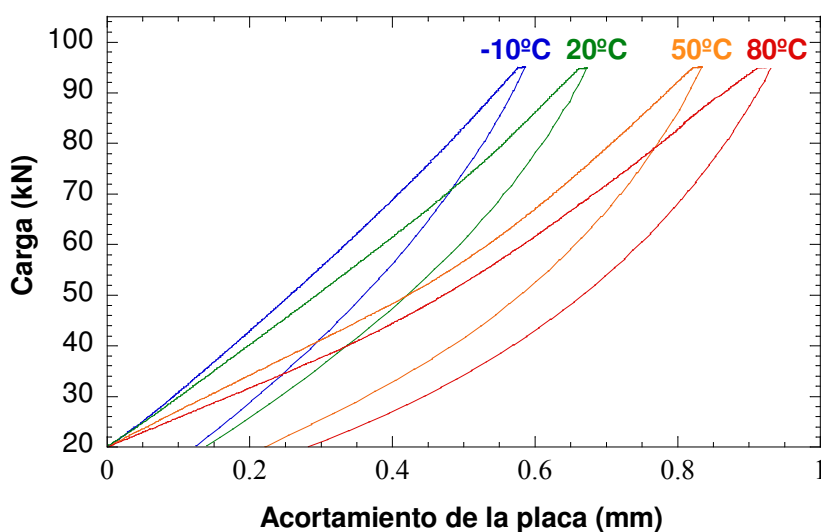


Figura 7.35.- Comportamiento estático de la placa modelo B-54 a diferentes temperaturas

El acortamiento en la placa oscila desde valores máximos de 0.93 mm a 80 °C hasta uno mínimo de 0.59 mm a -10 °C.

En la Figura 7.36, se representan, en doble eje de ordenadas, la rigidez y la dureza de la placa frente a la temperatura. Se comprueba la buena correlación lineal inversa existente entre la rigidez estática P_0/P_{0+75} y la dureza Shore D con la temperatura de la placa, es decir, que un incremento de la temperatura provoca una flexibilización y un ablandamiento de la placa.

Un incremento de 90 °C en la temperatura de ensayo, desde -10 °C, genera un decremento del 44% en la rigidez de la placa, pasando de 128 kN/mm a 80.6 kN/mm a 80 °C. El decremento en la dureza Shore D es menos notorio, desde 43.6 a 39.6, lo que supone una disminución de un 9.5 % respecto a la temperatura ambiente.

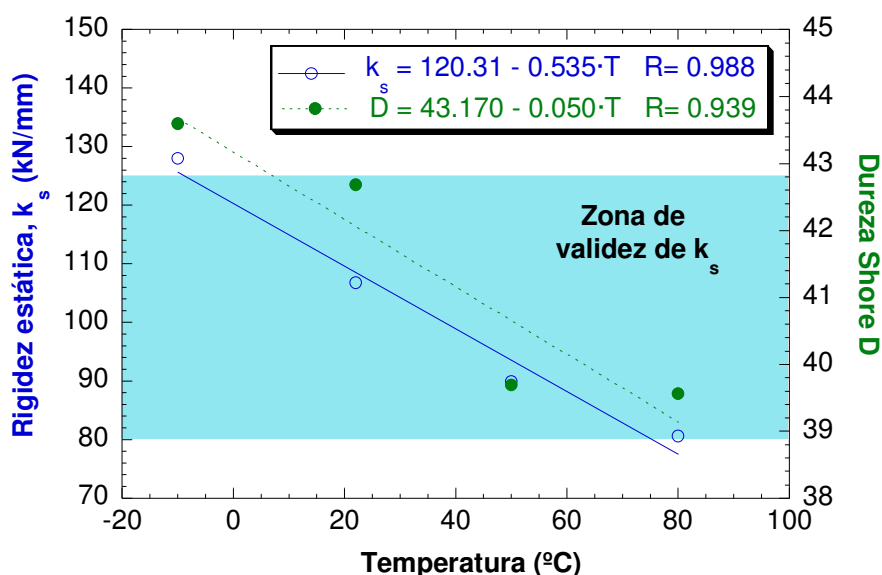


Figura 7.36.- Evolución de la rigidez y la dureza de la placa modelo B-54 con la T^a

El valor de la rigidez se encuentra entre los límites establecidos (80-125 kN/mm), salvo para los valores extremos de temperatura 128.0 kN/mm para -10 °C y 80.6 kN/mm para 80 °C, que están próximos.

En la Figura 7.37, se correlacionan los valores de rigidez y dureza obtenidos a las diferentes temperaturas.

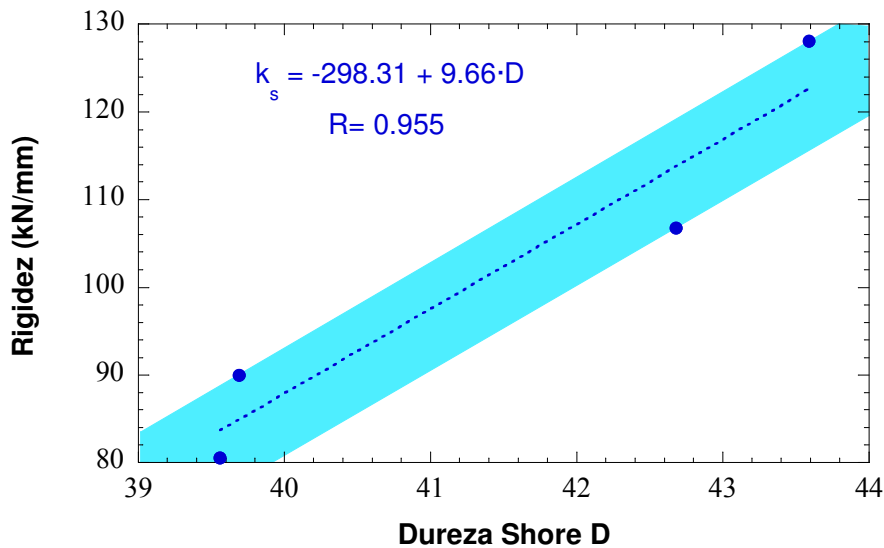


Figura 7.37.- Relación entre la rigidez y la dureza de la placa de asiento

En vista de los resultados, se confirma una relación directa, y prácticamente lineal, entre dureza y rigidez, por lo que el parámetro dureza, fácilmente medible, se puede convertir en un índice a partir del cual obtener el valor de la rigidez de la placa, parámetro que requiere llevar a cabo un ensayo más complicado.

3.2. COMPORTAMIENTO DINÁMICO

3.2.1. Influencia de la temperatura

La evaluación de la influencia de la temperatura en el comportamiento dinámico, se realizó a través del parámetro de la rigidez dinámica a baja frecuencia. Los ensayos se realizaron tal como se indica en la norma UNE-EN 13146-4:2003 [59], aplicando 1000 ciclos de carga de naturaleza sinusoidal entre 20 y 95 kN a una frecuencia de 5 Hz, determinándose la rigidez como la media obtenida en los 10 últimos ciclos. La rigidez dinámica, se analizó a diferentes temperaturas: 20, 40, 60 y 80 °C, para lo cual se empleó un dispositivo similar al indicado en la Figura 7.34.

En el gráfico de la Figura 7.38, se representa la evolución del acortamiento de la placa del modelo B-54 durante el último ciclo, de los 1000 aplicados, a las temperaturas de 20, 40, 60 y 80 °C. En la Tabla 7.7 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en el primer ciclo y en el ciclo 1000, respectivamente, del acortamiento de la placa (d_0 y d_f) y de la energía disipada en dinámico (E_{dd0} y E_{ddf}).

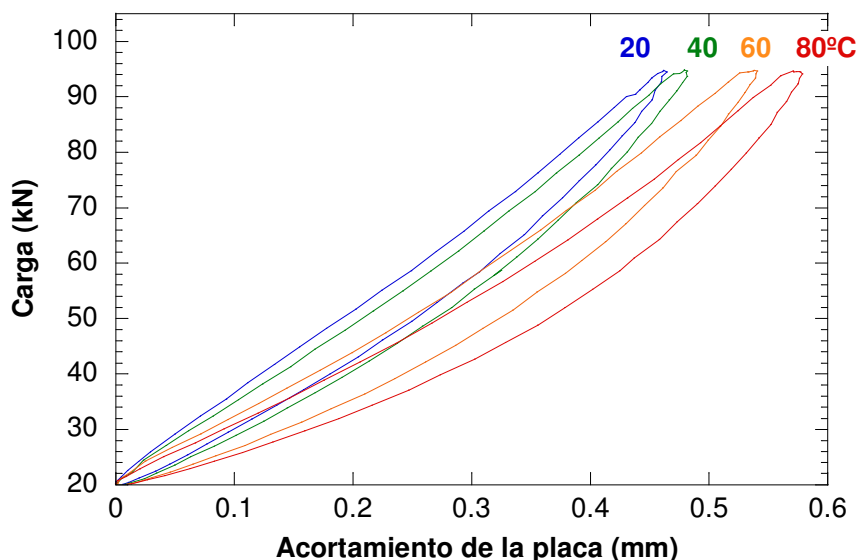


Figura 7.38.- Comportamiento dinámico a diferentes T^a (ciclo 1000).

Tabla 7.7.- Resultados obtenidos en el ensayo dinámico.

T^a (°C)	d_0 (mm)	d_f (mm)	Δd (%)	E_{dd0} (J)	E_{ddf} (J)	ΔE_{dd} (%)
20	0.46	0.46	0.0	4.22	3.37	20.7
40	0.48	0.47	2.0	4.28	3.41	20.3
60	0.58	0.53	8.6	5.80	4.36	24.8
80	0.64	0.57	10.9	7.13	4.96	30.4

Se aprecian las diferencias respecto al comportamiento estático anterior. Así, para 80 °C, la placa solamente se acorta 0.64 mm en régimen dinámico, habiendo alcanzado una deformación 31.2 % superior en estático. Esta disminución de las deformaciones, también refleja un descenso de la energía disipada en dinámico (E_{dd}), o lo que es lo mismo, indica que el material, en régimen dinámico, se asemeja más a un cuerpo elástico que no disipa energía y, en mayor medida, al igual que el régimen estático, cuanto menor es la temperatura (Figura 7.39).

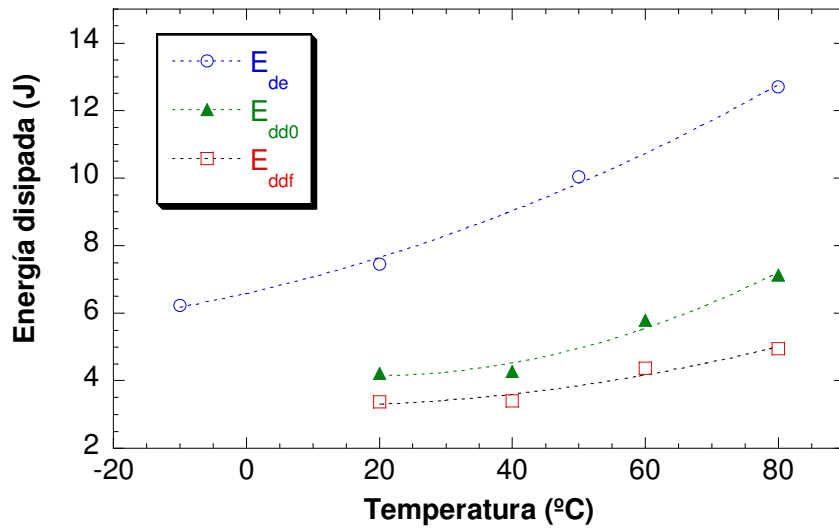


Figura 7.39.- Energía disipada en régimen estático (E_{de}) y dinámico (E_{dd}).

Se comprueba que entre 40 y 60 °C las energías disipadas tanto en estático como dinámico crecen más deprisa y que la diferencia entre la energía en dinámico del ciclo inicial y del ciclo 1000 se acentúan. Este fenómeno hace suponer que la temperatura de transición vítrea de este material pueda estar comprendida en este intervalo de temperaturas. En la Figura 7.40 se representa la energía disipada por ciclo para las diferentes temperaturas ensayadas.

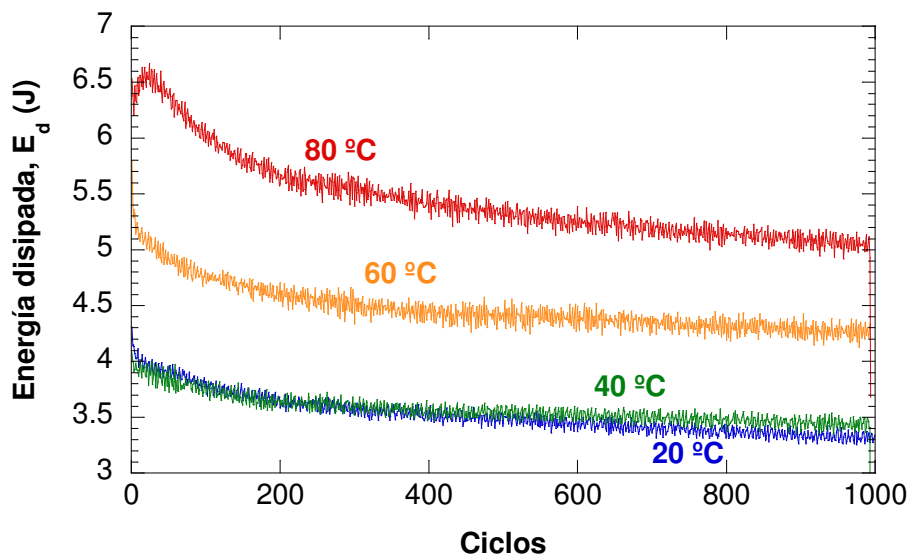


Figura 7.40.- Evolución de la E_d a lo largo de los 1000 ciclos.

Se comprueba que la energía disipada es superior a medida que se incrementa la temperatura de la placa, manteniéndose prácticamente constante para las temperaturas de 20 y 40 °C. La energía disipada en dinámico, E_{dd} , decrece con el número de ciclos aplicado, debido al cambio de geometría en la placa producido por su acortamiento progresivo a medida que transcurre el ensayo. Esta disminución de la E_{dd} se acentúa a partir de los 40 °C.

En la Figura 7.41, se muestra la evolución de la rigidez dinámica medida en cada uno de los 1000 ciclos aplicados para las diferentes temperaturas, comprobándose, también, que se produce un salto cuantitativo de valores de rigidez entre 40 y 60 °C,

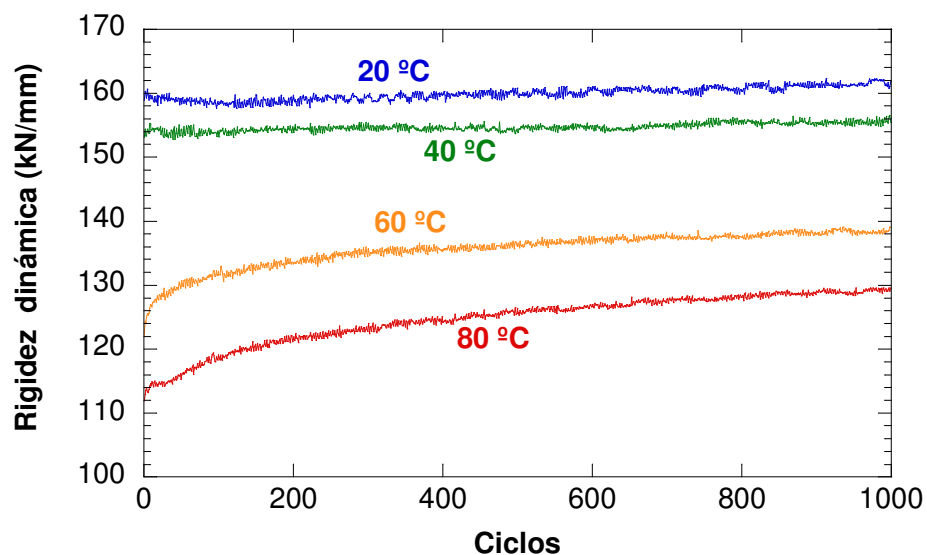


Figura 7.41.- Evolución de la rigidez dinámica a distintas temperaturas

A modo de resumen, en la Figura 7.42 se representan los valores de la rigidez dinámica medida en el primero de los ciclos, k_{d0} , y la medida en el ciclo 1000, k_d , así como la variación entre estos dos parámetros. Se puede observar que, a medida que se incrementa la temperatura de la placa, los dos parámetros cada vez difieren más entre sí, corroborando, además, el salto de propiedades observado anteriormente entre 40 y 60 °C, ya que hasta 40 °C la variación no supera el 1.5%, llegando a alcanzar el 10 % para 60 °C. Los valores de rigidez, tanto inicial como final, también muestran una transición en el intervalo de temperaturas mencionado.

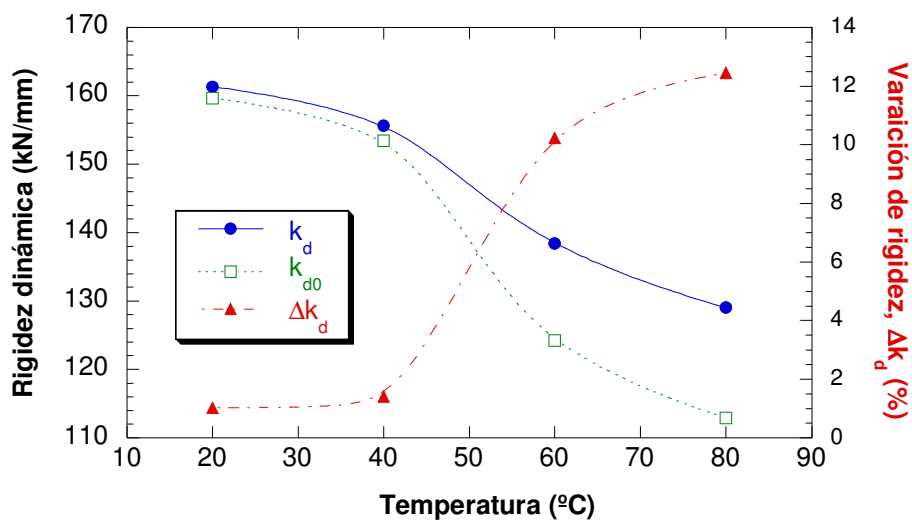


Figura 7.42.- Rigidez dinámica inicial y final y su variación en función de la temperatura.

Por tanto, un calentamiento por encima de los 40 °C, bien por una fuente externa, o bien internamente como consecuencia de un esfuerzo cíclico, puede acelerar el deterioro mecánico de la placa. Esta pérdida de funcionalidad de la placa es debida al incremento de su deformación viscoplástica de forma acelerada, ya que, por encima de esta temperatura, disminuye de la misma forma la rigidez dinámica.

3.2.2. Influencia del deterioro por fatiga

Para verificar el deterioro sufrido por la placa debido a una fatiga de larga duración, se sometió a una placa Modelo B-54 a $2 \cdot 10^6$ ciclos de carga a temperatura ambiente, en el mismo dispositivo indicado en la Figura 7.33 y con el mismo nivel de esfuerzos que en los ensayos a diferentes temperaturas (F_{max} : 95 kN y F_{min} : 20 kN). Previa y posteriormente al ensayo de fatiga, se realizaron ensayos estáticos con el objeto de evaluar la pérdida de propiedades en base al estudio de la variación de la rigidez estática y la energía disipada entre los dos ensayos.

Como se ha visto anteriormente, la temperatura es un factor muy importante en el comportamiento mecánico del componente, por lo que se controló el incremento de la misma a medida que la placa iba siendo solicitada. La geometría de la placa de asiento hace complicado determinar la temperatura empleando métodos de contacto, por lo que se utilizaron técnicas de termografía infrarroja.

En el gráfico de la Figura 7.43 se representa la evolución de la rigidez dinámica y de la energía disipada por ciclo, pudiéndose observar que la mayor variación se ha producido en los 200.000 primeros ciclos, aproximadamente, siendo poco acusada a partir de este momento.

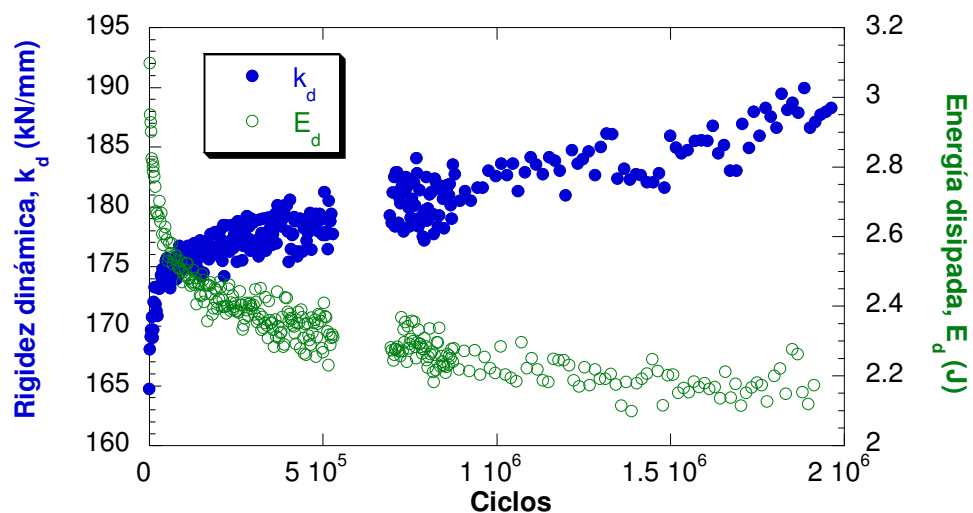


Figura 7.43.- Rigidez dinámica y energía disipada por ciclo en el ensayo de $2 \cdot 10^6$ ciclos

Los resultados de los ensayos estáticos realizados antes y después de la fatiga aparecen en la Figura 7.44 donde se representa la evolución del último de los tres ciclos de cada uno de los ensayos, así como los valores de rigidez y energía disipada en el último de los ciclos del ensayo previo a fatiga (k_{s0} y E_{de0}) y los del posterior (k_{sf} y E_{de0}).

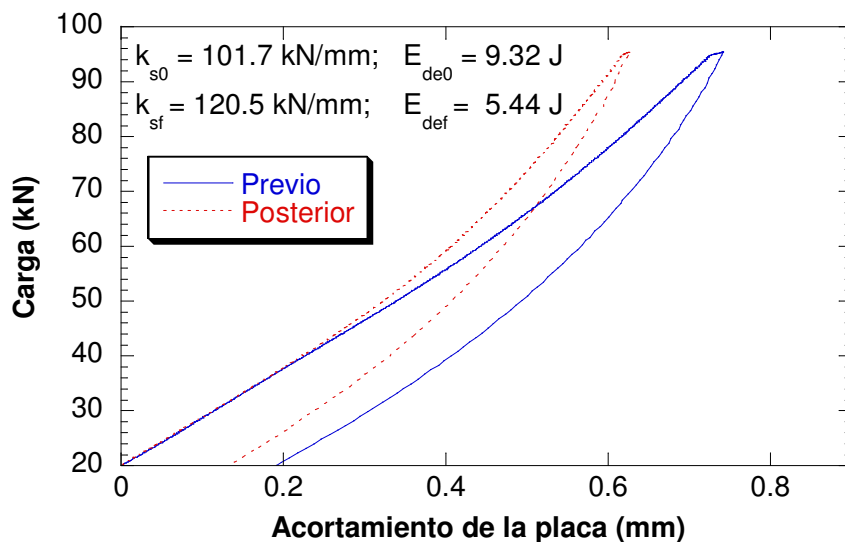


Figura 7.44.- Resultados del ensayo estático previo y posterior al de fatiga

El valor de rigidez estática se incrementó tras la fatiga en un 18.5 %, mientras que el valor de energía disipada en el ensayo estático se redujo en un 41.6 %. Si se analizan los mismos parámetros en el ensayo dinámico y se evalúa la diferencia entre ellos al principio y al final del ensayo, las variaciones son muy similares, 17.3 % para la rigidez dinámica y 40.0 % para la energía disipada. Por otro lado, la temperatura exterior de la placa tras los $2 \cdot 10^6$ ciclos se incrementó solamente 7 °C.

El efecto del sometimiento a diferentes niveles de carga, se analizó por medio de un ensayo LOCATI con cuatro niveles de carga (20/95, 20/110, 20/125 y 20/140 kN) de 50.000 ciclos cada uno de ellos. En el gráfico de la Figura 7.45, se muestra la evolución de la rigidez y la temperatura a lo largo del ensayo.

En la Figura 7.46, se reflejan los datos de la energía disipada en el ensayo LOCATI. En ella, se observa el crecimiento exponencial de la energía disipada a medida que se incrementa el nivel tensional, tanto al comenzar el nivel, E_{dd0} , como al finalizar, E_{ddf} , así como el descenso, también exponencial, de la variación de energía disipada entre el comienzo y final de cada nivel.

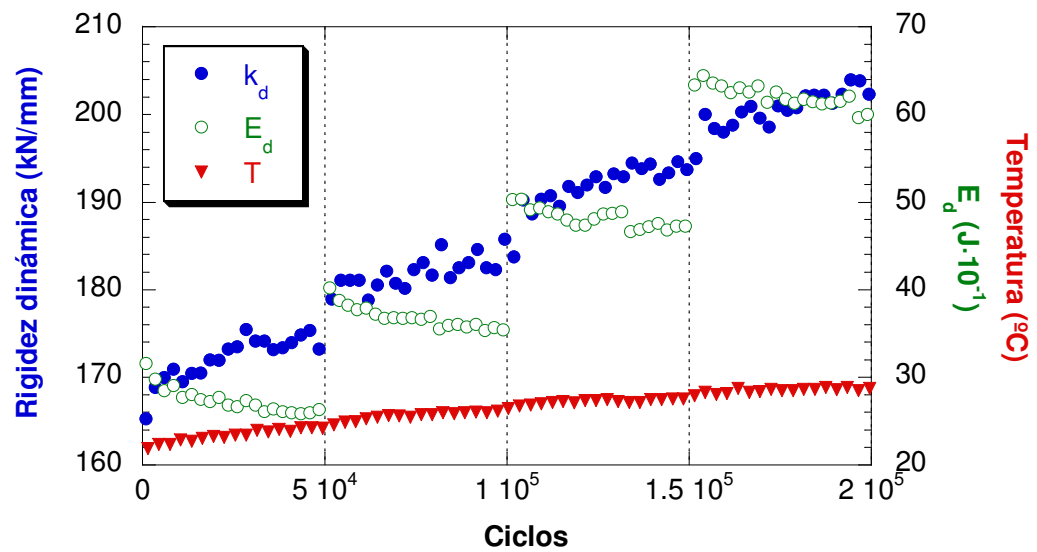


Figura 7.45.- Rigidez e incremento de temperatura en el ensayo Locati

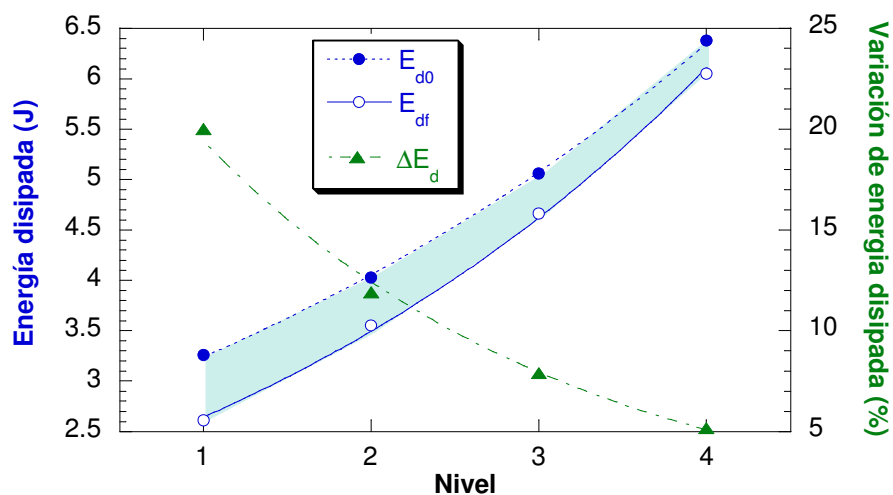


Figura 7.46.- Variación de la energía disipada en cada nivel en el ensayo Locati

El crecimiento de la energía disipada al subir de nivel de carga es evidente ya que se produce un incremento de la carga y, por tanto, del desplazamiento, pero además, se aprecia que la placa, a medida que se incrementa el esfuerzo aplicado, tiende a comportarse como un elemento elástico ya que la variación de energía disipada en cada escalón es cada vez más pequeña. Es decir, que un incremento en los esfuerzos dinámicos sufridos por la placa provocaría una pérdida creciente de sus propiedades de amortiguación.

3.2.2.1. Influencia de la rigidez inicial de la placa

Para conseguir una placa del mismo material que la placa origen, pero con diferente rigidez, se modificó geométricamente una placa modelo B-60, eliminando 20 de los 80 botones de apoyo de la parte inferior uniformemente distribuidos, es decir un 25 % del total. Con esta modificación se consiguió un valor de rigidez cercano al límite inferior permitido por la especificación técnica.

El deterioro de la placa se realizó por medio de una prueba de fatiga monótona a temperatura ambiente de 200.000 ciclos de naturaleza senoidal y 4 Hz entre valores de fuerza de 18 y 93 kN. Se decidió reducir el número de ciclos en un orden de magnitud ya que como se comprobó en el ensayo a $2 \cdot 10^6$ ciclos las principales variaciones tuvieron lugar en los 200.000 primeros ciclos, suponiendo, además, un enorme ahorro de tiempo de ensayo. También se redujo la P_0 a 18 kN por tratarse de un valor mas parecido a los medidos realmente sobre el conjunto de sujeción.

La posible pérdida de funcionalidad, se evaluó por medio de la rigidez estática y la energía disipada obtenida a partir de ensayos de rigidez estática P_0/P_0+75 ($P_0 = 18$ kN) realizados previa y posteriormente a la prueba dinámica.

En las Figuras 7.47 y 7.48, se representa el último de los ciclos de los ensayos de rigidez estática realizado antes y después del ensayo de envejecimiento por fatiga para la placa original (N) y para la placa modificada (M).

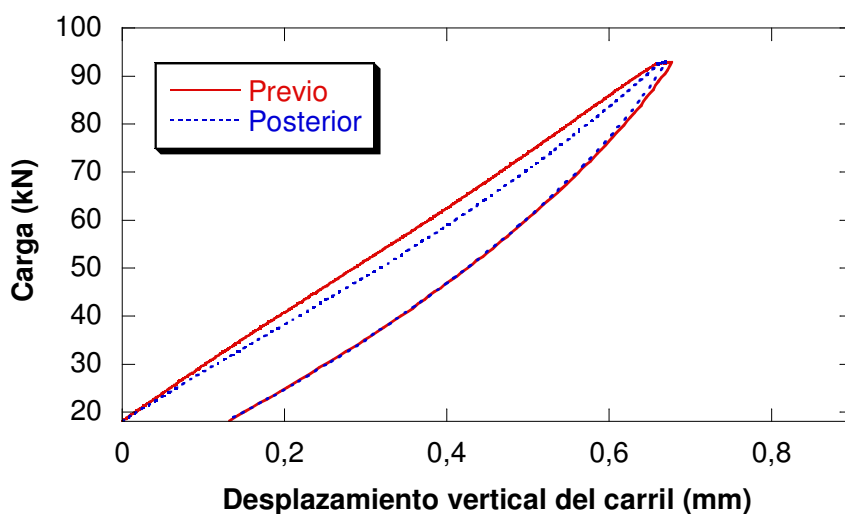


Figura 7.47.- Ensayos de rigidez estática, previo y posterior, sobre placa original

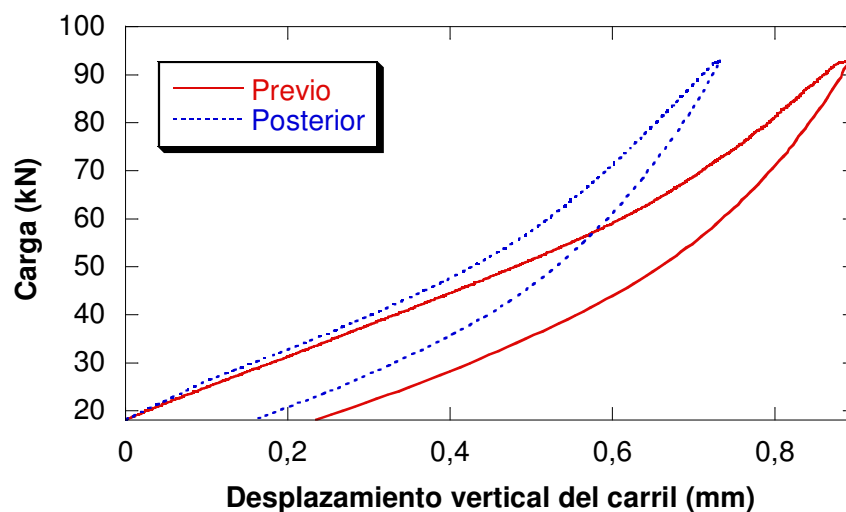


Figura 7.48.- Ensayos de rigidez estática, previo y posterior, sobre placa modificada

En la Tabla 7.8, a modo de resumen, se recopilan los resultados de rigidez y energía disipada obtenidos en los ensayos estáticos.

Tabla 7.8.- Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de rigidez estática

Placa	Rigidez estática			Energía disipada estática		
	inicial (kN/mm)	final (kN/mm)	Variación (%)	inicial (J)	final (J)	Variación (%)
Normal (N)	110.7	111.9	1.2	8.4	6.7	21.1
Modificada (M)	84.2	102.2	21.4	10.9	7.1	35.3

Se puede observar que, en la placa original, apenas hay diferencia entre el comportamiento previo y posterior en cuanto al parámetro rigidez, pasando de 110.7 a 111.9 kN/mm, lo que supone una rigidización del 1.2 %. Atendiendo al segundo de los parámetros estudiados, la energía disipada, la variación alcanza el 21.1 %, pasando de 8.5 a 6.7 J.

Por otro lado, la placa modificada, con una rigidez inicial inferior a la original, mostró un mayor cambio en sus propiedades, detectables, incluso a simple vista, tras la observación de la Figura 7.48. La rigidización tras el ensayo de fatiga alcanzó el 21.4 %, llevando la rigidez inicial de 84.2 kN/mm hasta 102.2 kN/mm al final de la prueba. La variación de energía disipada alcanzó todavía valores superiores, desde 10.9 hasta 7.1 J (35.3 %).

En la Figura 7.49, se representa la evolución de la rigidez dinámica y de la energía disipada en cada uno de los ciclos a lo largo del ensayo. En la Tabla 7.9, se muestran los valores obtenidos tras un balance entre los parámetros dinámicos al comienzo del ensayo de fatiga y al final del mismo.

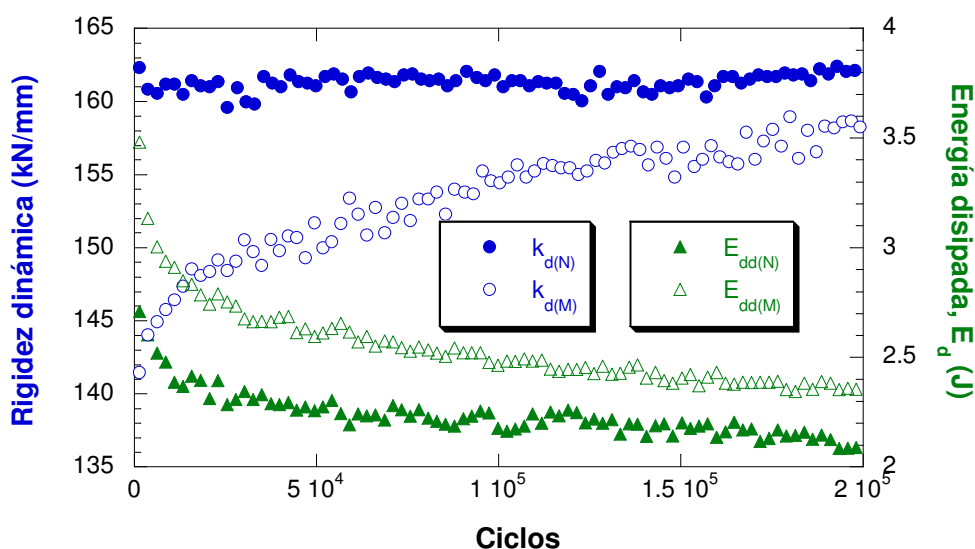


Figura 7.49.- Evolución de la rigidez dinámica y la energía disipada para la placa original y la modificada geoméricamente

Tabla 7.9.- Resumen de los resultados dinámicos de rigidez y energía disipada

Placa	Rigidez dinámica			Energía disipada dinámica		
	inicial (kN/mm)	final (kN/mm)	Variación (%)	inicial (J)	final (J)	Variación (%)
Normal (N)	160.1	162.0	1.3	2.84	2.1	26.0
Modificada (M)	137.0	158.7	15.8	3.7	2.3	37.7

Se advierte el mismo comportamiento mostrado en los ensayos estáticos. En la placa modificada, de menor rigidez, la rigidez dinámica es inferior, siendo mayor la energía disipada. Además, si se realiza un balance entre los parámetros dinámicos al comienzo del ensayo de fatiga y al final del mismo, se puede observar que, en la placa modificada, las variaciones son mayores, 15.8 % para la rigidez y 37.7 % para la energía disipada, manteniéndose en un 1.3 y 26 %, respectivamente, para la placa original.

Por tanto, la pérdida de propiedades de la placa debido al deterioro por la aplicación repetida de acciones dinámicas, se ve incrementada a medida que disminuye la rigidez inicial de la placa. Una placa más flexible sufrirá mayores deformaciones a igualdad de esfuerzos y, por tanto, también serán mayores las deformaciones viscoplásticas lo que origina una rigidización más acusada por el deterioro causado por la fatiga, traduciéndose, a su vez, en una pérdida de propiedades más acelerada.

3.2.2.2. Influencia del envejecimiento ambiental

Para este estudio también se eligieron placas modelo B-60 sometidas a diferentes tratamientos de envejecimiento ambiental:

- Placa original, en estado de recepción, dotada de un contenido de humedad próximo al 0.5 % (N).
- Placa secada en estufa a 100 °C durante 2 meses (S).
- Placa sumergida en agua a 40 °C durante 2 meses con un contenido de humedad de 2.3 % en peso (H).
- Placa sometida a un envejecimiento artificial en cámara climática consistente en la repetición de 25 ciclos de 36 horas como el que se muestra en la Figura 7.50, variando las condiciones de temperatura y humedad a lo largo del tiempo (C).

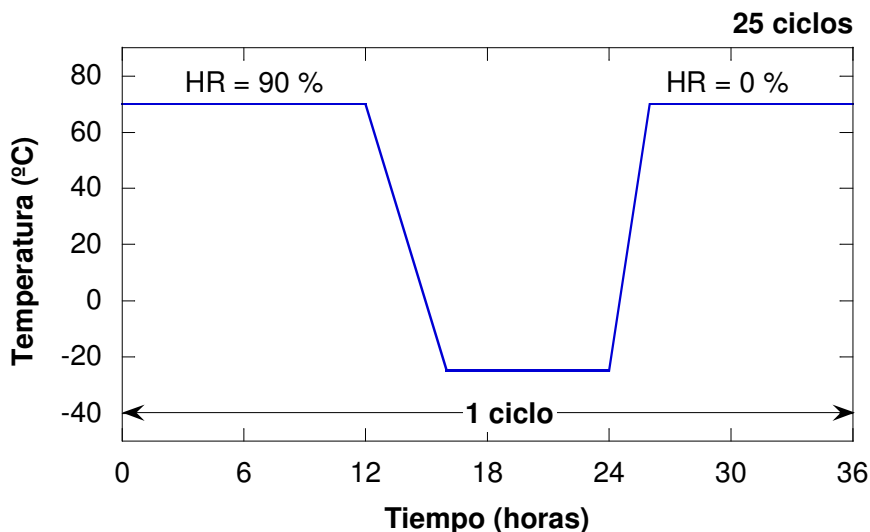


Figura 7.50.- Secuencia del envejecimiento artificial de la placa de asiento Modelo B-60 en cámara climática

Se realizaron sobre cada una de las muestras dos ensayos de rigidez estática, intercalando entre los mismos la prueba dinámica de fatiga descrita en el apartado anterior (200.000 ciclos de naturaleza senoidal a 4 Hz entre 18 y 93 kN). El último de los tres ciclos de los ensayos estáticos, previo y posterior a la fatiga, realizado sobre las diferentes placas, se muestran en los gráficos de las Figuras 7.47 y 7.51 a 7.53.

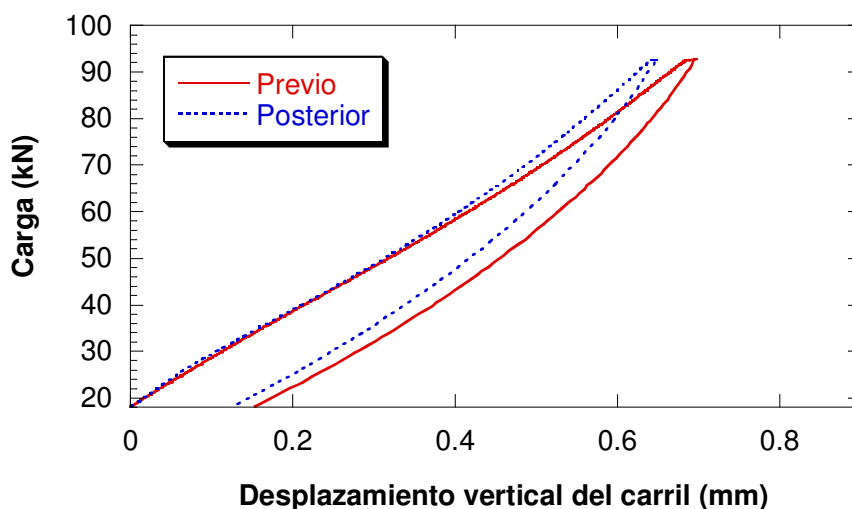


Figura 7.51.- Ensayos de rigidez, previo y posterior, sobre placa seca

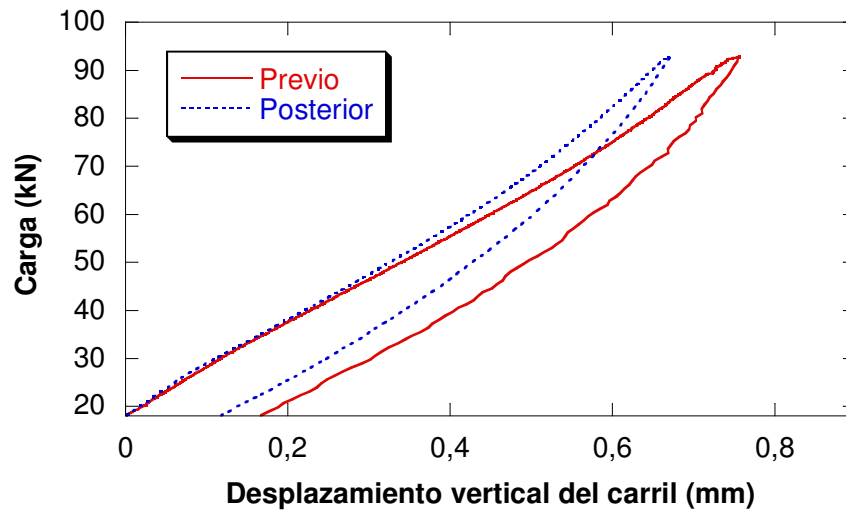


Figura 7.52.- Ensayos de rigidez, previo y posterior, sobre placa húmeda ($H = 2.3 \%$)

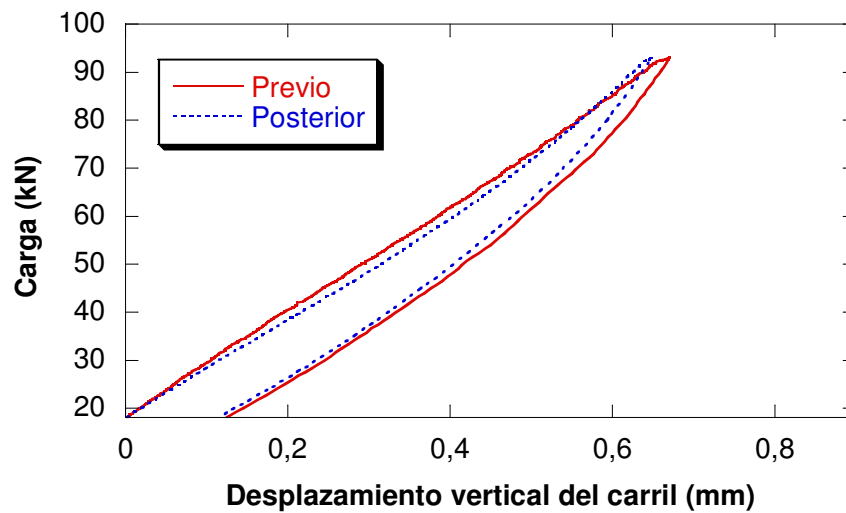


Figura 7.53.- Ensayos de rigidez, previo y posterior, sobre placa climática

En la Tabla 7.10, a modo de resumen, se recopilan los resultados de rigidez y energía disipada obtenidos con las placas envejecidas ambientalmente junto con los presentados por la original, analizada en el apartado anterior.

Tabla 7.10.- Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de rigidez estática

Placa	Rigidez estática			Energía disipada estática		
	inicial (kN/mm)	final (kN/mm)	Variación (%)	inicial (J)	final (J)	Variación (%)
Normal (N)	110.7	111.9	1.2	8.4	6.7	21.1
Seca (S)	107.3	115.6	7.73	8.4	6.6	21.4
Húmeda (H)	99.1	111.8	12.8	9.4	6.2	33.5
Climática (C)	111.9	115.74	3.4	7.6	5.6	25.5

Se puede observar en las Figuras 7.54 y 7.55 que un valor bajo de la rigidez inicial de la placa, ya sea por modificación física o por modificación del material debido a envejecimiento ambiental, provoca un deterioro prematuro de la misma, reflejado en una mayor pérdida de rigidez, así como de energía disipada, tras el deterioro producido por fatiga.

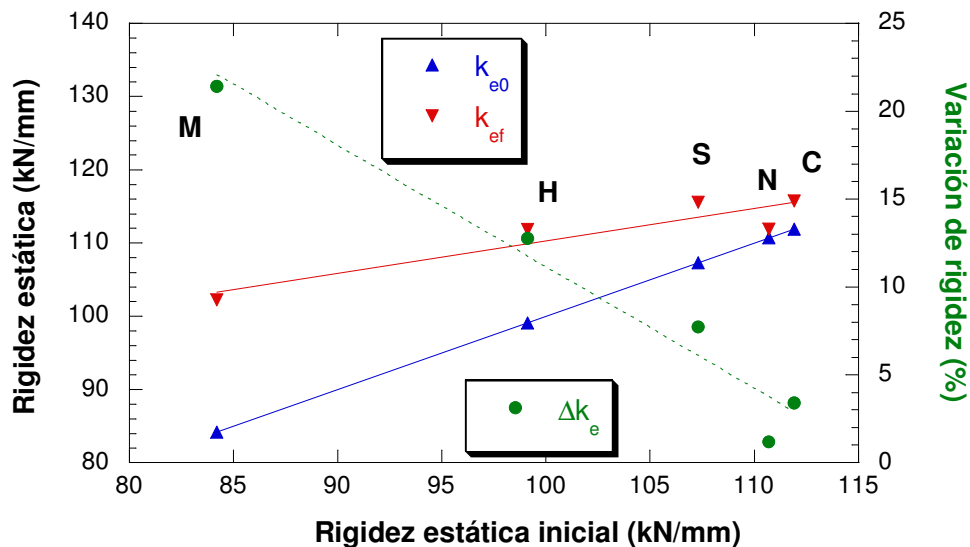


Figura 7.54.- Evolución de la rigidez estática y su variación en función de la rigidez inicial de la placa de asiento

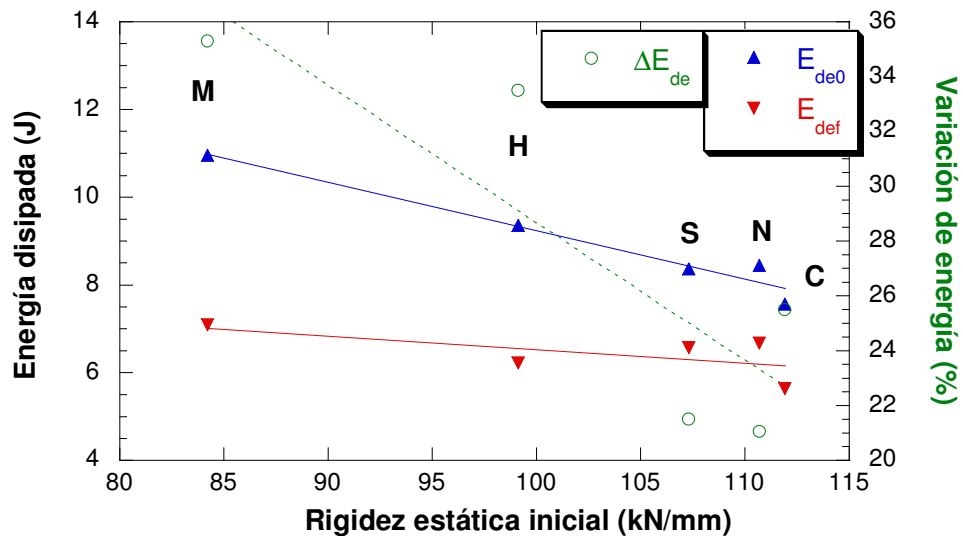


Figura 7.55.- Evolución de la energía disipada en el ensayo estático y su variación en función de la rigidez inicial

A partir de los gráficos anteriores se puede encontrar un valor de la variación de rigidez y de energía disipada que sirvan de índice para establecer el límite de funcionamiento de la placa. Sabiendo que la especificación técnica fija el valor mínimo de la rigidez de la placa en 80 kN/mm y extrapolando en los dos gráficos anteriores se comprueba que estos valores umbrales se sitúan entorno a un 25 % para la variación de rigidez y un 40 % para la variación de energía disipada.

En las Figuras 7.56 y 7.57, se representa la evolución de la rigidez dinámica y de la energía disipada en cada uno de los ciclos a lo largo del ensayo para todas las placas estudiadas. En la Tabla 7.11, se muestran los valores obtenidos tras un balance entre los parámetros dinámicos de rigidez y energía disipada al comienzo del ensayo de fatiga y al final del mismo.

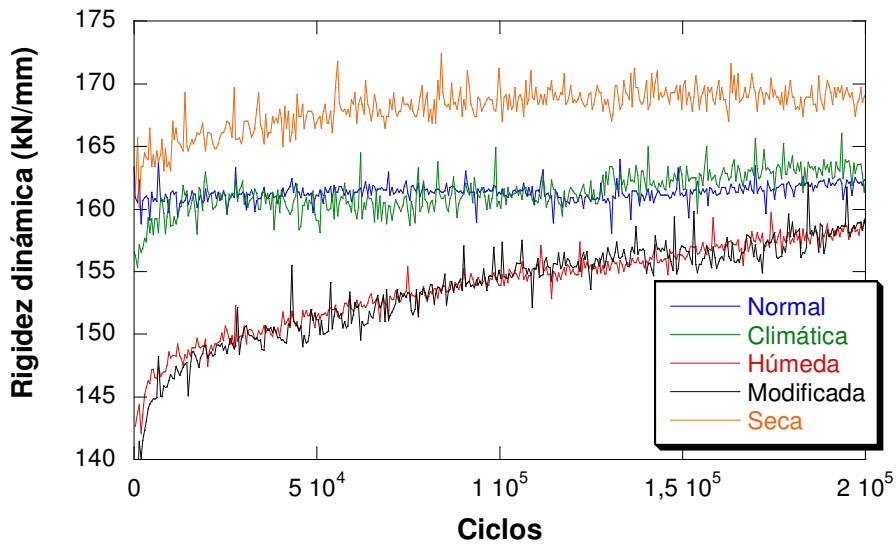


Figura 7.56.- Evolución de la rigidez dinámica a lo largo del ensayo de fatiga

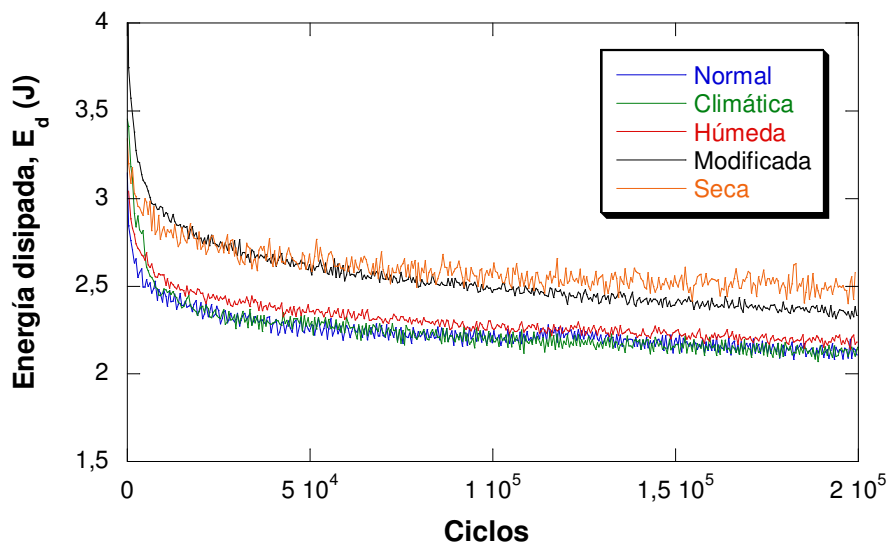


Figura 7.57.- Evolución de la energía disipada por ciclo a lo largo del ensayo de fatiga

Tabla 7.11.- Resumen de los resultados dinámicos de rigidez y energía disipada

Placa	Rigidez dinámica			Energía disipada dinámica		
	inicial (kN/mm)	final (kN/mm)	Variación (%)	inicial (J)	final (J)	Variación (%)
Normal (N)	160.1	162.0	1.3	2.84	2.1	26.0
Seca (S)	163.0	169.2	3.8	3.2	2.6	18.8
Húmeda (H)	142.6	158.6	11.2	3.0	2.2	28.3
Climática (C)	156.3	163.0	4.3	3.2	2.13	33.0

A la vista de los resultados, no se aprecia una relación tan clara de los valores absolutos de los parámetros dinámicos de rigidez y energía disipada con la rigidez inicial de la placa pero sí con su variación. El incremento de la rigidez dinámica y decremento sufrido por la energía disipada como consecuencia del proceso de fatiga tienden a disminuir cuando se eleva la rigidez estática inicial de la placa. En la Figura 7.58, como resumen, se muestra la variación de los parámetros de rigidez y energía disipada, tanto en los ensayos estáticos como en los de fatiga, mostrando en ambos casos la misma tendencia.

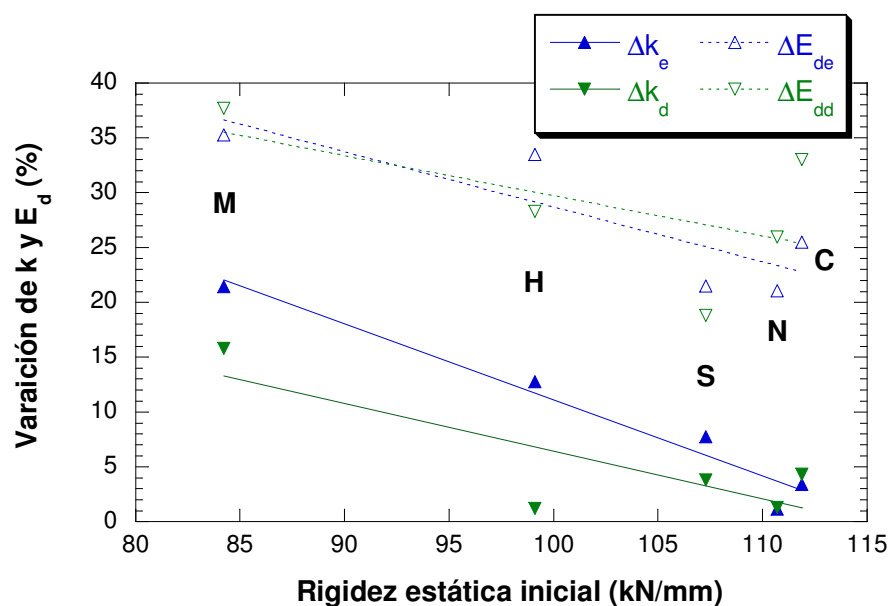


Figura 7.58.- Variación de la rigidez y de la energía disipada estática y dinámica

La variación de la rigidez y de la energía disipada se puede considerar, en principio, como un índice del agotamiento o deterioro de la placa, es decir, que un mayor incremento en estos parámetros, supondrá una mayor pérdida respecto de las propiedades iniciales del componente.

A la vista de los resultados, se comprueba que se produce una rigidización de la placa tras el ensayo dinámico, tanto mayor cuanto menor es la rigidez inicial de la placa, es decir, que a mayores rigideces iniciales de la placa, el agotamiento mecánico será inferior.

Además, el aumento de la humedad en los TPE, al igual que ocurre en la poliamida, actúa como un plastificante, disminuyendo la rigidez con la ganancia en contenido de agua.

Bajo condiciones normales de trabajo el deterioro ambiental, producido sobre las placas de asiento, no genera pérdidas importantes en sus prestaciones mecánicas. En el caso más desfavorable se aprecia para las placas con excesivo grado de humedad, condición H, una rigidización del 12 % tras su proceso de fatiga.

4. ANCLAJE

El estudio del anclaje se ha separado en dos partes: por un lado, se analizó la vaina, como componente de naturaleza polimérica, estudiando su comportamiento mecánico ante acciones estáticas y dinámicas, y por otro, el tornillo metálico que fue sometido a esfuerzos similares a los sufridos en condiciones reales de trabajo, es decir, tracción, flexión e impacto.

4.1. VAINA

La vaina del anclaje está formada por dos componentes, un cuerpo principal fabricado en poliamida 6.6 reforzada con fibra de vidrio en un 30 % en peso y una chapa metálica que envuelve el núcleo periféricamente y que no interviene desde el punto de vista resistente.

Debido a la naturaleza higroscópica de la poliamida, ampliamente caracterizada a lo largo de esta Tesis, se realizaron distintos tratamientos para dotar a una serie de vainas, desprotegidas de la chapa exterior, de diferentes contenidos de humedad con la finalidad de conocer la influencia de este parámetro en el comportamiento mecánico de las mismas:

- Secada en estufa a 100 °C durante un año
- Mantenido en el ambiente del laboratorio durante un año

- ❑ Llena de agua a T^a ambiente durante tres meses y posteriormente vaciada para permanecer 9 meses en el ambiente del laboratorio
- ❑ Llena de agua a T^a ambiente durante un año

Estos tipos de tratamientos intentan simular, exagerando los tiempos, las condiciones que se dan en los acopios de las traviesas con las vainas desprotegidas con capacidad de almacenamiento de agua proveniente de la lluvia, sin posibilidad de otra evacuación que la evaporación.

Los contenidos de humedad conseguidos con los diferentes tratamientos, se determinaron de dos formas diferentes. Por un lado, se midió el contenido global, pesando la vaina antes y después del tratamiento y, por otro lado, se calculó el contenido de humedad de la rosca una vez arrancada de la vaina en los ensayos mecánicos, ver Figura 7.59, y pesando la misma antes y después de introducirla en estufa durante 7 días a 100 °C.



Figura 7.59.- *Aspecto de la rosca tras la rotura mecánica o extracción*

Esta última aportará valores más representativos, ya que se está midiendo en la zona resistente del componente. Además, la humedad de la rosca es, en todos los casos, superior a la global ya que se trata de una zona con mayor superficie exterior y el agua se absorbe con más facilidad, siendo más claro en los dos últimos tratamientos ya que la zona interior es la que estaba en contacto directo con el agua que contenía la vaina. Los resultados obtenidos de los diferentes contenidos de humedad se muestran en la Tabla 7.12.

Tabla 7.12.- Humedad de la vaina en función del tratamiento

Tratamiento	Humedad global (%)	Humedad rosca (%)
Seca de estufa 1 año	0.0	0.0
Ambiente 1 año	1.08	1.54
3 meses con agua y 9 amb.	1.43	1.90
1 año con agua	2.60	4.80

Los esfuerzos críticos que debe soportar el anclaje son, principalmente, paralelos al eje del conjunto vaina-tornillo, es decir, esfuerzos que tratan de arrancar el tornillo de la vaina. Por tanto, el útil desarrollado para la caracterización mecánica de las vainas trata de simular esfuerzos de esta naturaleza, tal como se recoge en las Figuras 7.60 y 7.61.



Figura 7.60.- Dispositivo empleado para la caracterización de las vainas

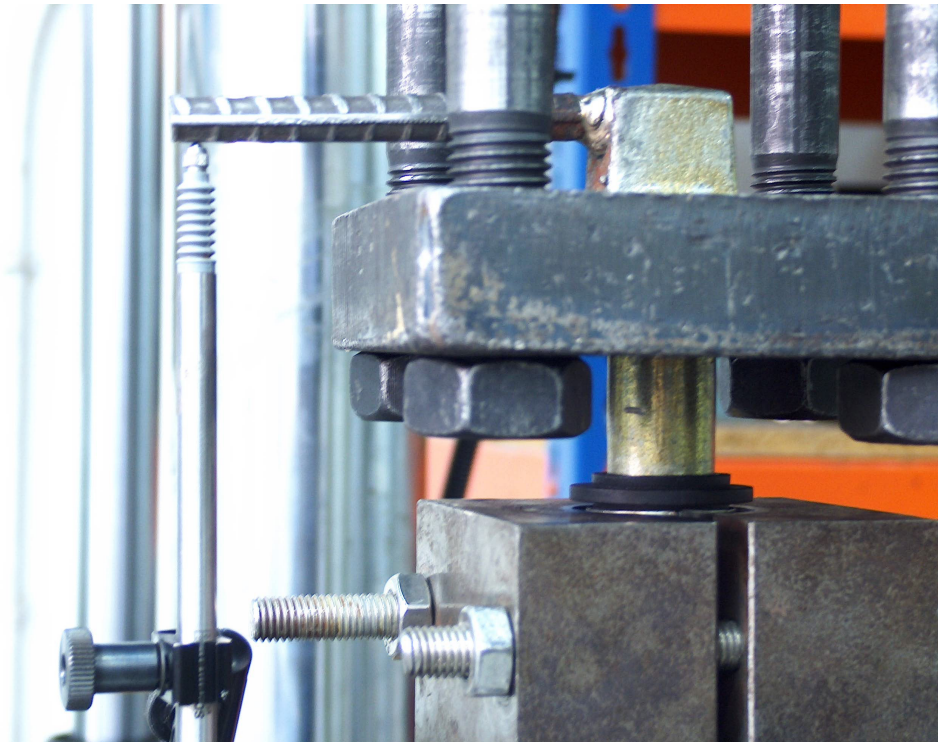


Figura 7.61.- *Detalle del dispositivo para la medición de desplazamientos*

La caracterización se realizará en base a esfuerzos tanto estáticos como dinámicos y dentro de estos últimos se distinguirá entre esfuerzos de impacto y de fatiga.

4.1.1. Caracterización de las vainas ante esfuerzos estáticos

Para la caracterización estática de las vainas se roscó el tornillo aplicador de carga hasta una longitud de 64 mm, similar a su posición real de trabajo y, a continuación, se aplicó un esfuerzo de extracción hasta rotura a una velocidad de 1 kN/s.

Los resultados obtenidos sobre las vainas sometidas a los diferentes tratamientos de humedad aparecen en la gráfica de la Figura 7.62 y a modo de resumen, se reflejan los resultados en la Tabla 7.13.

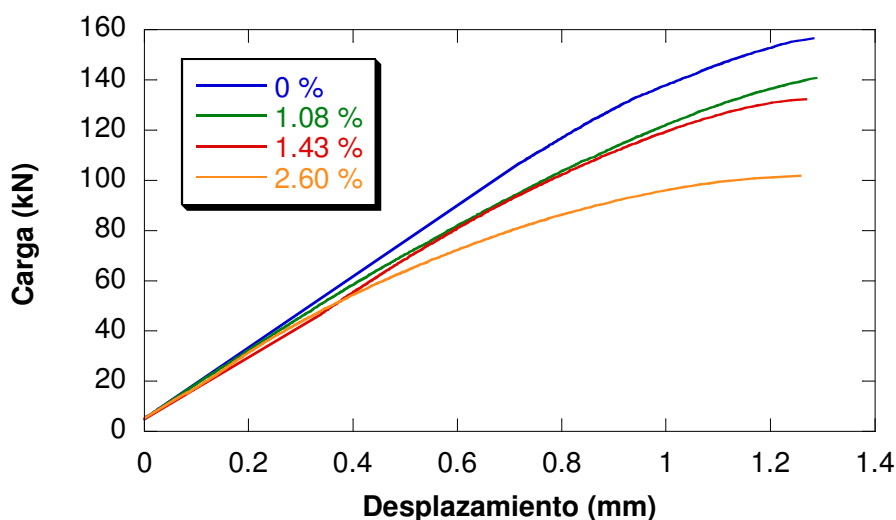


Figura 7.62.- Ensayo estático sobre vainas

Tabla 7.13.- Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos estáticos

Humedad (%)	Fuerza máxima (kN)	Desp. máximo (mm)	Energía (J)
0/0	156.53	1.28	123.52
1.08/1.54	140.83	1.29	106.37
1.43/1.90	132.38	1.26	100.27
2.60/4.80	101.75	1.26	84.87

A la vista de los resultados, se comprueba que la carga de rotura, así como la rigidez inicial del componente aumentan al disminuir la humedad, mientras que la deformación en rotura permanece más o menos constante. Por tanto, la energía consumida en la rotura decrece con el aumento de humedad. El valor constante del desplazamiento en rotura es debido a que el esfuerzo aplicado se reparte uniformemente a lo largo de 14 pasos de rosca, provocando la rotura de todos ellos al unísono por cortante. Como también se puede comprobar, incluso la vaina más húmeda, supera el valor límite impuesto por la especificación técnica de 60 kN.

4.1.2. Caracterización de las vainas ante esfuerzos de impacto

Para la caracterización estática de las vainas se roscó el tornillo aplicador de carga hasta una longitud de 64 mm y a continuación se aplicó un ciclo de onda cuadrada con la amplitud suficiente para conseguir la rotura del componente.

Los resultados obtenidos sobre las vainas sometidas a los diferentes tratamientos de humedad aparecen en la gráfica de la Figura 7.63. A modo de resumen, se reflejan los resultados en la Tabla 7.14.

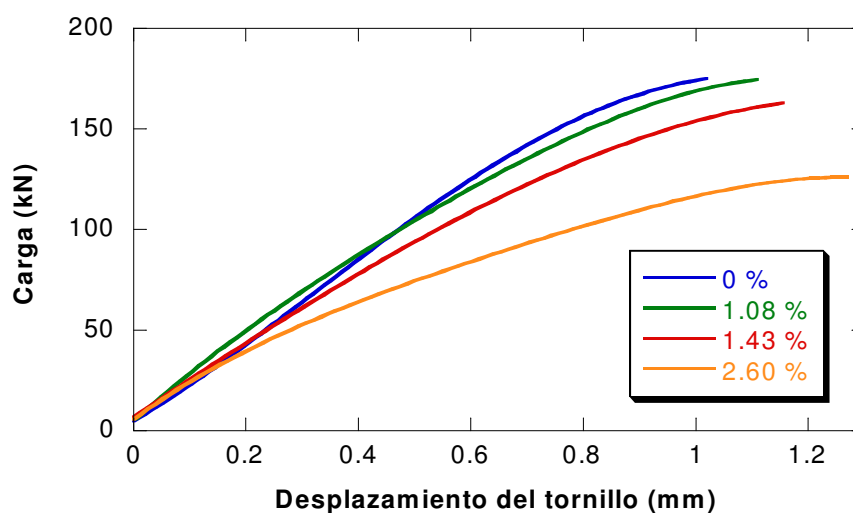


Figura 7.63.- Ensayo de impacto sobre vainas

Tabla 7.14.- Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de impacto

Humedad (%)	Fuerza máxima (kN)	Desp. máximo (mm)	Energía (J)
0/0	175.35	1.02	101.94
1.08/1.54	174.17	1.11	115.10
1.43/1.90	161.62	1.16	114.26
2.60/4.80	126.36	1.26	103.60

A la vista de los resultados, se comprueba que las cargas de rotura aumentan al disminuir la humedad, y estos valores son superiores, además, a los obtenidos en

los ensayos estáticos, mientras que la deformación tiende a incrementarse con el aumento de humedad, hasta alcanzar los valores medidos en el caso estático.

En el caso de las dos vainas con menor contenido de humedad, además de la rotura de la rosca interna, y debido a la fragilidad que presenta el material, se produjo la rotura transversal de la misma a la profundidad hasta donde llega la rosca del tornillo, como puede verse en la Figura 7.64, siendo esta la causa de que las deformaciones en rotura de las piezas secas son ligeramente inferiores a las de las humedades.



Figura 7.64.- Rotura transversal de las dos vainas más secas ante un impacto

4.1.3. Caracterización de las vainas ante esfuerzos de fatiga

Para la caracterización en fatiga, se empleó la metodología LOCATI, ya comentada anteriormente, con una disposición experimental igual a la descrita en los apartados precedentes.

Se aplicaron bloques de 20.000 ciclos de onda cuadrada a una frecuencia de 5 Hz, entre valores de carga iniciales de 5 y 50 kN. El valor mínimo se conservó en todos los bloques mientras que el valor máximo se incrementaba 2 kN en cada bloque. Los parámetros empleados se resumen en la Tabla 7.15.

Tabla 7.15.- *Parámetros empleados en el ensayo LOCATI sobre vainas*

N (ciclos)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$F_{m\acute{i}n}$ (kN)	N. medio (kN)	Amplitud (kN)
[1 - 20.000]	50	5	27.5	22.5
[20.000 - 40.000]	52	5	28.5	23.5
[40.000 - 60.000]	54	5	29.5	24.5
[60.000 - 80.000]	56	5	30.5	25.5
[80.000 - 100.000]	58	5	31.5	26.5
[100.000 - 120.000]	60	5	32.5	27.5
[120.000 - 140.000]	62	5	33.5	28.5
[140.000 - 160.000]	64	5	34.5	29.5
[160.000 - 180.000]	66	5	35.5	30.5
[180.000 - 200.000]	68	5	36.5	31.5
[200.000 - 220.000]	70	5	37.5	32.5
[220.000 - 240.000]	72	5	37.5	32.5
[240.000 - 260.000]	74	5	38.5	33.5
[260.000 - 280.000]	76	5	39.5	34.5
[280.000 - 300.000]	78	5	40.5	35.5
[300.000 - 320.000]	80	5	41.5	36.5
[320.000 - 340.000]	82	5	42.5	37.5

En los ensayos Locati realizados se registraron datos de ondas completas cada 500 ciclos, almacenándose 50 puntos por onda de carga y de desplazamiento relativo entre el tornillo y la vaina, permitiendo representar la evolución de estos dos parámetros a lo largo del ensayo.

La medida de los desplazamientos relativos entre el tornillo y la vaina planteó dos problemas fundamentales, por un lado el apoyo de la cabeza del tornillo sobre el útil no es muy estable, con lo que la medida depende de la posición inicial del tornillo, y por otro lado, por efecto de la carga cíclica, la vaina, desprovista de chapa metálica, pudo sufrir pequeños desplazamientos dentro del dispositivo de ensayo no cuantificados. Por estas dos razones los resultados obtenidos no sirven para ser intercomparados entre diferentes ensayos, pero si servirán para poder establecer el escalón crítico en cada uno de los ensayos.

Para la búsqueda del escalón crítico no se ha podido recurrir a la metodología desarrollada en el Anexo III, ya que la falta de precisión en la medida de los desplazamientos impidió determinar los parámetros energéticos con la suficiente precisión.

Se empleó, para esta tarea, el estudio de la variación de los desplazamientos frente al nº de ciclos, es decir, al estudio de la derivada de la deformación máxima, ya que, a pesar de la falta de exactitud en la medida de los desplazamientos y por tanto en su derivada, realizando un ajuste de los valores de ésta, se consiguió definir el nivel crítico de carga como el último en el que la derivada de la deformación máxima alcanza el valor nulo.

En los gráficos de las Figuras 7.65 a 7.68 se representa la evolución de los desplazamientos máximo y mínimo, así como, un ajuste realizado sobre la derivada respecto al número de ciclos del desplazamiento máximo en los ensayos Locati realizados sobre vainas con diferentes contenidos de humedad a fin de determinar los parámetros críticos de fatiga.

A partir de los gráficos se obtienen los resultados resumidos en la Tabla 7.16

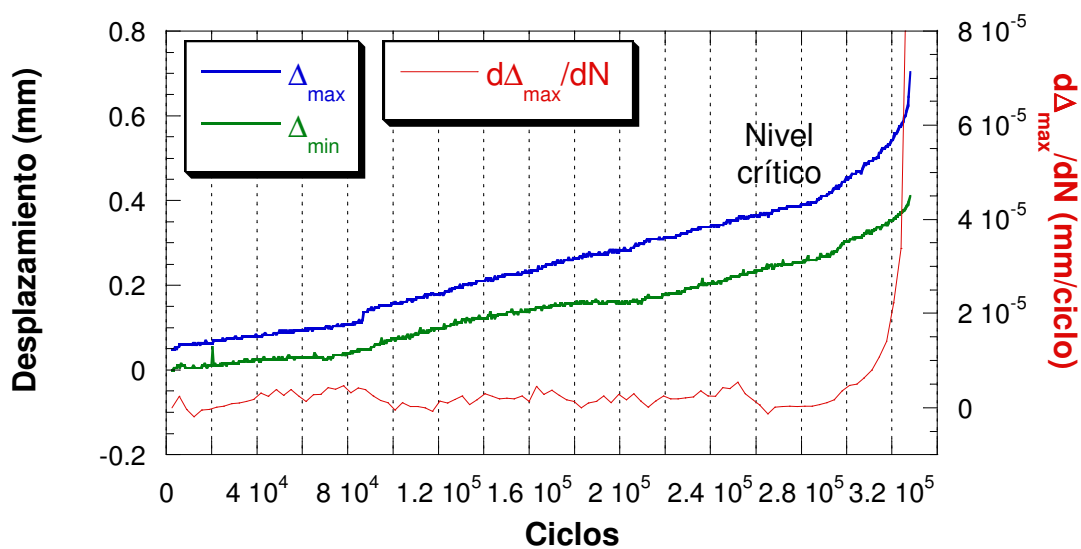


Figura 7.65.- Evolución de los desplazamientos y la derivada para la vaina 0/0

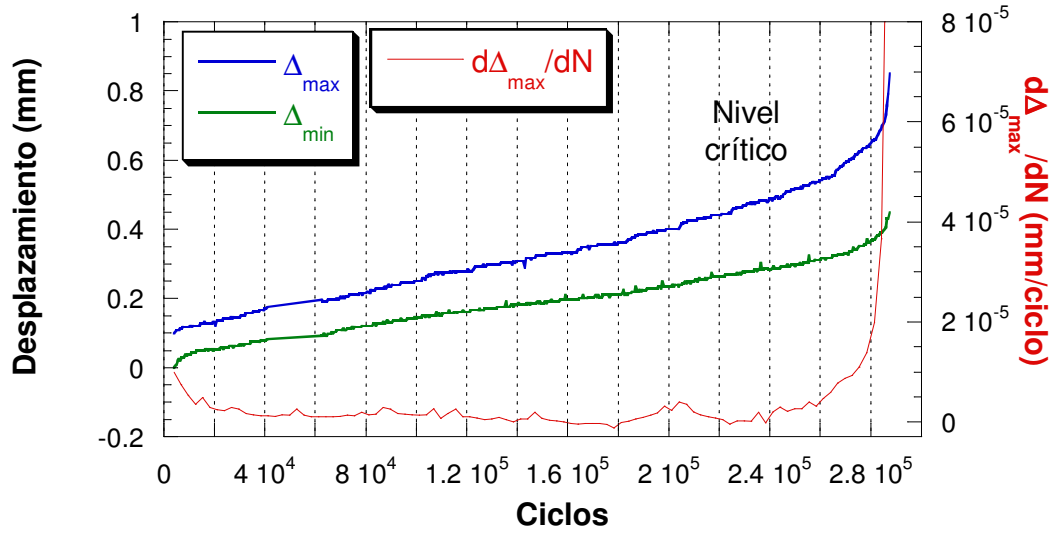


Figura 7.66.- Evolución de los desplazamientos y la derivada para la vaina 1.08/1.54

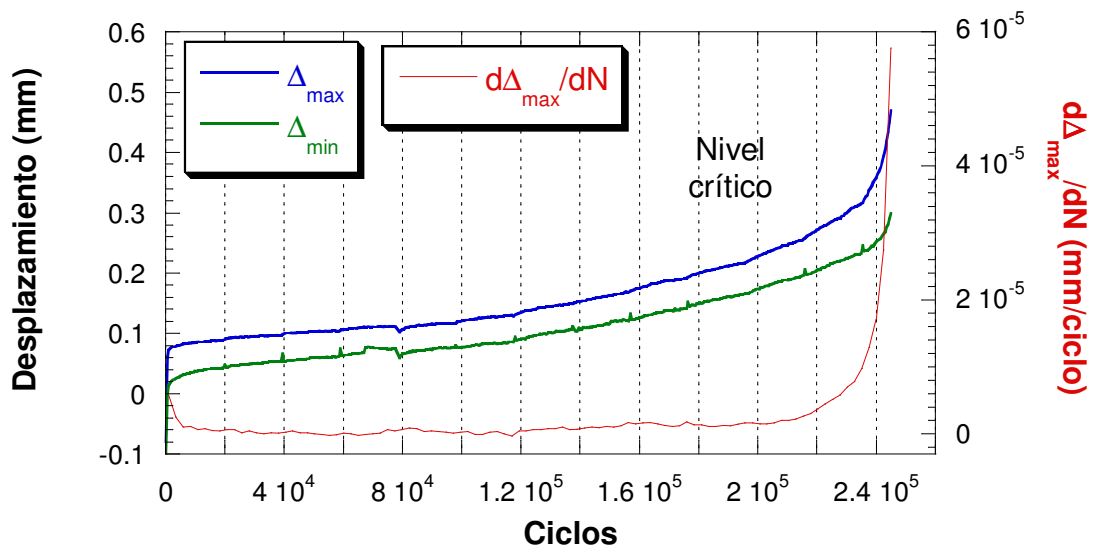


Figura 7.67.- Evolución de los desplazamientos y la derivada para la vaina 1.43/1.90

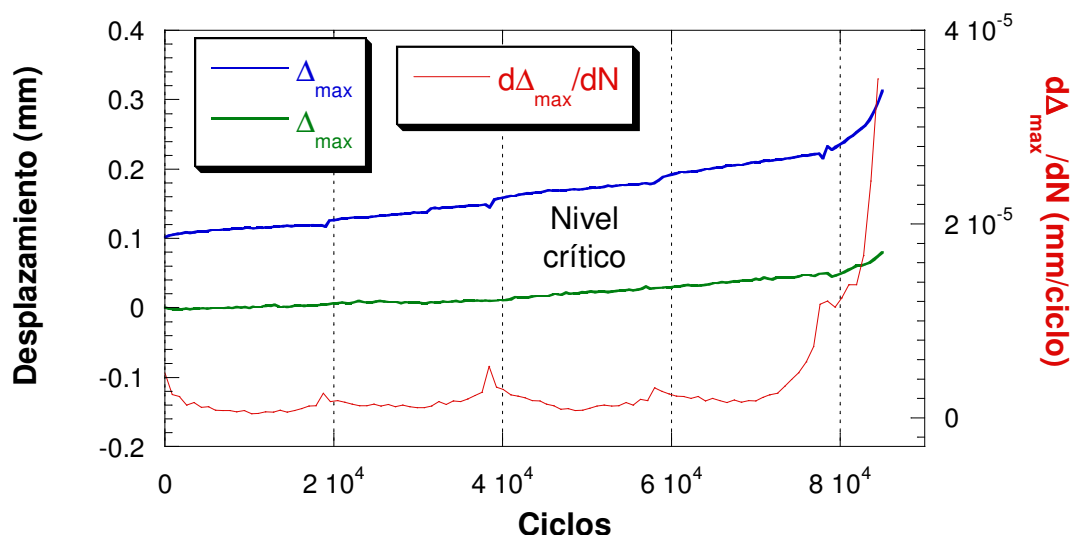


Figura 7.68.- Evolución de los desplazamientos y la derivada para la vaina 2.60/4.80

Tabla 7.16.- Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos LOCATI

Humedad (%)	Escalón crítico	F. crítica (kN)	$\Delta\sigma_e$ (kN)	Nº de ciclos Crítico	Nº de ciclos de rotura
0/0	14	76	74	$260-280 \cdot 10^3$	321.101
1.08/1.54	12	72	70	$220-240 \cdot 10^3$	281.961
1.43/1.90	10	68	66	$180-200 \cdot 10^3$	251.072
2.60/4.80	3	54	52	$40-60 \cdot 10^3$	87.989

Se comprueba de nuevo la enorme influencia que puede tener el contenido de humedad en el comportamiento en fatiga de materiales inyectados con poliamida, pasando la resistencia a fatiga de la vaina seca de 74 a 52 kN en el caso de la vaina húmeda, una disminución próxima al 30 %. La exigencia en extracción de la especificación técnica de sujeciones es de 60 kN en estático, por tanto, como se puede comprobar salvo en el caso de máxima humedad (situación difícil de encontrar en la realidad), el límite de fatiga supera al límite estático establecido en la Especificación Técnica.

4.2. TORNILLO

La caracterización mecánica se realizó siguiendo las disposiciones indicadas en la norma interna de control del suministrador [112]. Las propiedades evaluadas fueron la resistencia a tracción, a doblado y al impacto. Se emplearon tornillos en estado de recepción y tornillos sometidos a una corrosión acelerada durante 300 horas en cámara de nieblas salinas para evaluar la posible influencia que, sobre las propiedades mecánicas, pudiera tener esta exposición a un ambiente corrosivo.

El comportamiento de los tornillos ante la corrosión fue analizado en el apartado 2.9 del capítulo 6 de la presente Tesis.

4.2.1. Caracterización en tracción

Para la caracterización a la tracción se empleó el dispositivo que se indica en la Figura 7.69 siguiendo las disposiciones indicadas en la UNE-EN 100002-1 [113].

Las deformaciones se registraron sobre la rosca, por medio de un extensómetro de 12.5 mm de base de medida colocado, inicialmente, sobre dos de los filetes del tirafondo como puede observarse en la Figura 7.70.

Con este tipo de dispositivo de ensayo, además del estudio en tracción del tirafondo, se puede evaluar el posible fallo de la cabeza del mismo, al ejercer el esfuerzo de tracción tirando de la parte inferior de la misma.

Se realizaron ensayos sobre un tornillo nuevo y sobre dos de los tornillos sometidos previamente a la cámara de nieblas salinas, uno de los cuales había sufrido, incluso, una pequeña entalla en el fondo de un filete, a fin de acelerar el proceso de corrosión.

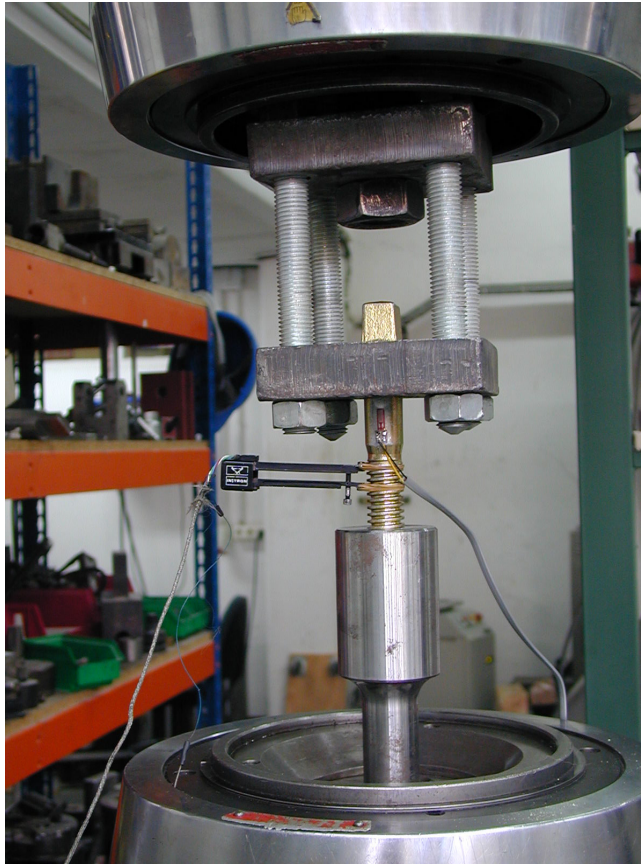


Figura 7.69.- *Dispositivo empleado para la caracterización en tracción de los tirafondos*

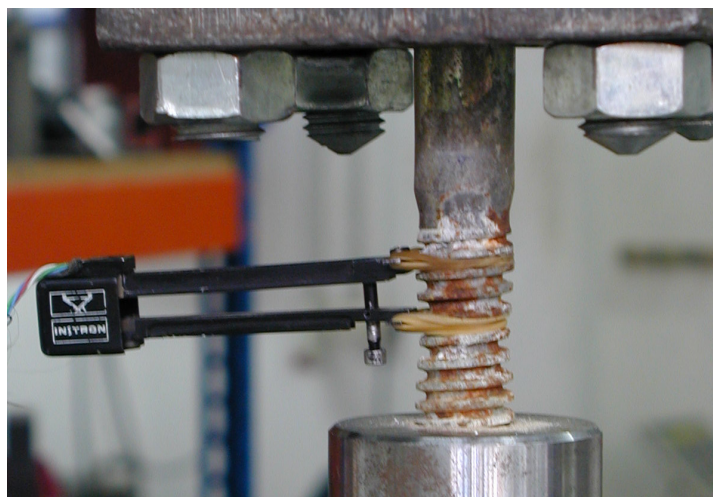


Figura 7.70.- *Detalle del ensayo de la muestra corroída y de la colocación del extensómetro*

En el gráfico de la Figura 7.71 aparecen los resultados de los ensayos de tracción realizados sobre las tres muestras y los parámetros obtenidos en cada uno de los ensayos se resumen en la Tabla 7.17.

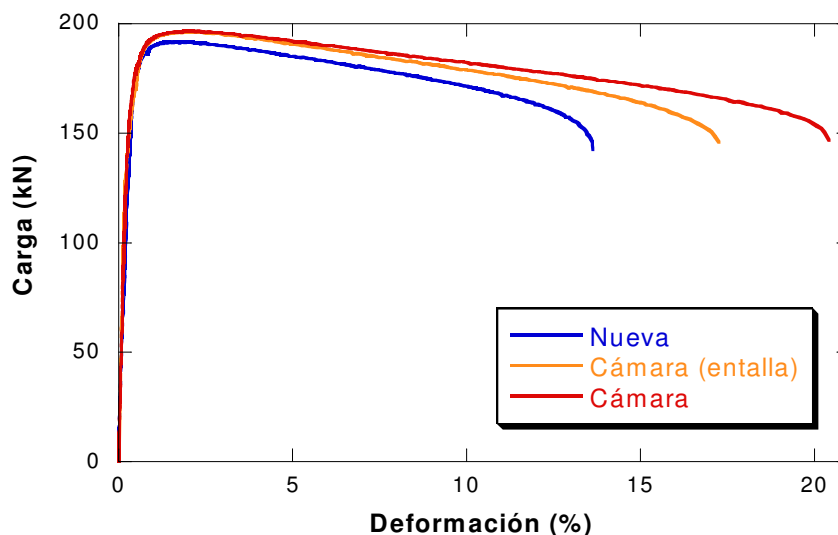


Figura 7.71.- Ensayo de tracción sobre los tirafondos

Tabla 7.17.- Parámetros obtenidos en los ensayos de tracción

Tornillo	Fuerza máxima (kN)	Def. bajo F_{max} (%)	Reducción área (%)
Normal	191.7	1.80	13.65
Cámara (entalla)	196.2	1.96	14.13
Cámara	196.6	2.02	12.56

Como se puede observar, el efecto de la exposición en cámara de nieblas salinas no ha penalizado el comportamiento mecánico en tracción del tirafondo. Incluso la entalla ha tenido poca influencia ya que la rotura se ha producido por otra sección diferente.

La rotura en todos los casos se ha producido por la rosca. En la Figura 7.72 se muestra un detalle de la rotura y el aspecto macroscópico que presentan las secciones de rotura, tanto de la muestra nueva como de la corroída, donde se aprecia el efecto severo de la laminación. La Figura 7.73 muestra una fractografía tomada por SEM donde se aprecia el aspecto dúctil de la rotura.

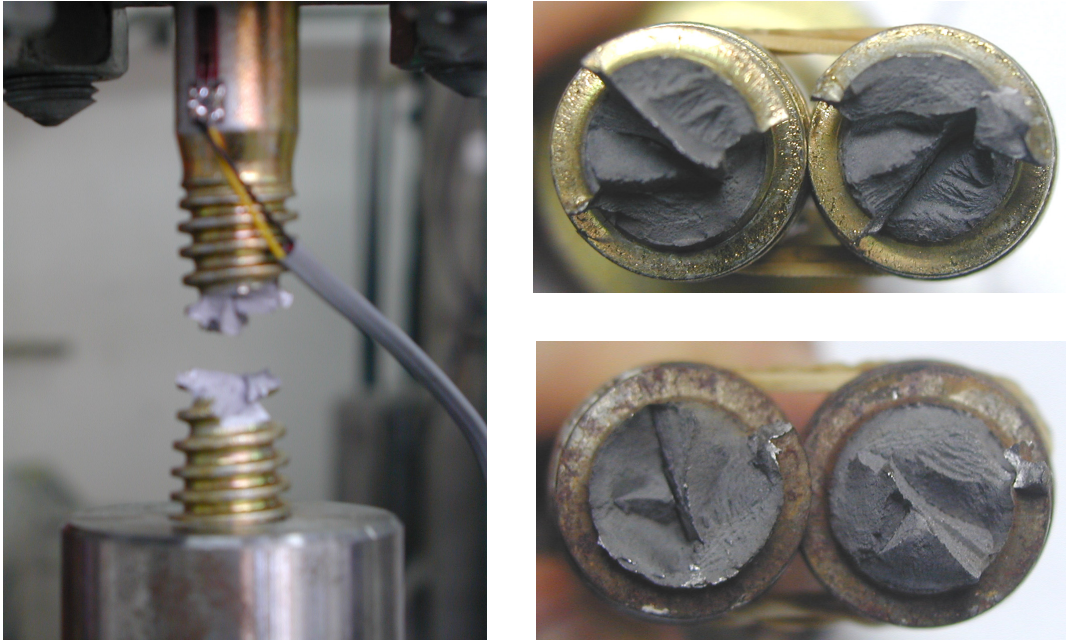


Figura 7.72.- Aspecto de las secciones de rotura de los tirafondos en tracción

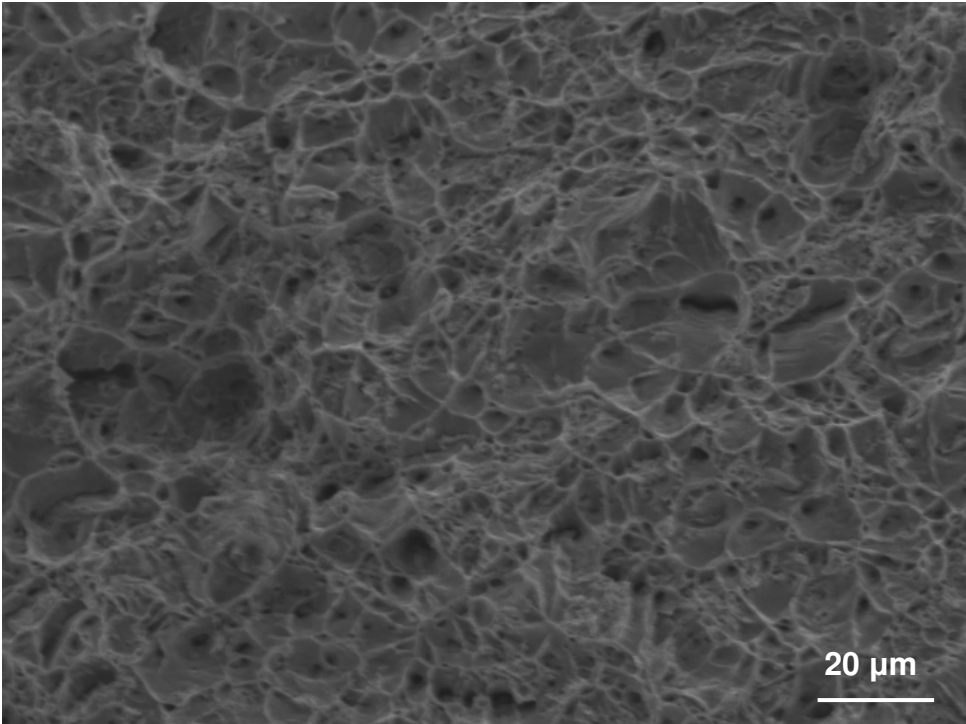


Figura 7.73.- Fractografía de una muestra de tornillo

4.2.2. Caracterización en doblado

Para la caracterización en doblado se empleó el dispositivo que se indica en la Figura 7.74 [112]. Los ángulos aplicados al tornillo, se miden, en todo momento, por medio de un inclinómetro digital.

El ensayo consistió en la consecución de un ángulo remanente de 15° y 30° comprobando que no se producía la rotura en la muestra al doblarse sobre un radio de acuerdo de 40 mm. Al igual que en el caso anterior, se realizó el ensayo sobre una muestra nueva y sobre otra que había permanecido 300 horas en cámara de nieblas salinas.

Tras la aplicación de los 15° no se producen defectos visibles ni en la muestra nueva ni en la corroída. Con los 30° se aprecian pequeñas fisuras tanto en una muestra como en la otra, por lo que en el comportamiento a flexión tampoco se advierte diferencia de comportamiento entre las dos situaciones auditadas. En la Figura 7.75 se muestra el aspecto que presentaban las muestras ensayadas tras el doblado de 30°

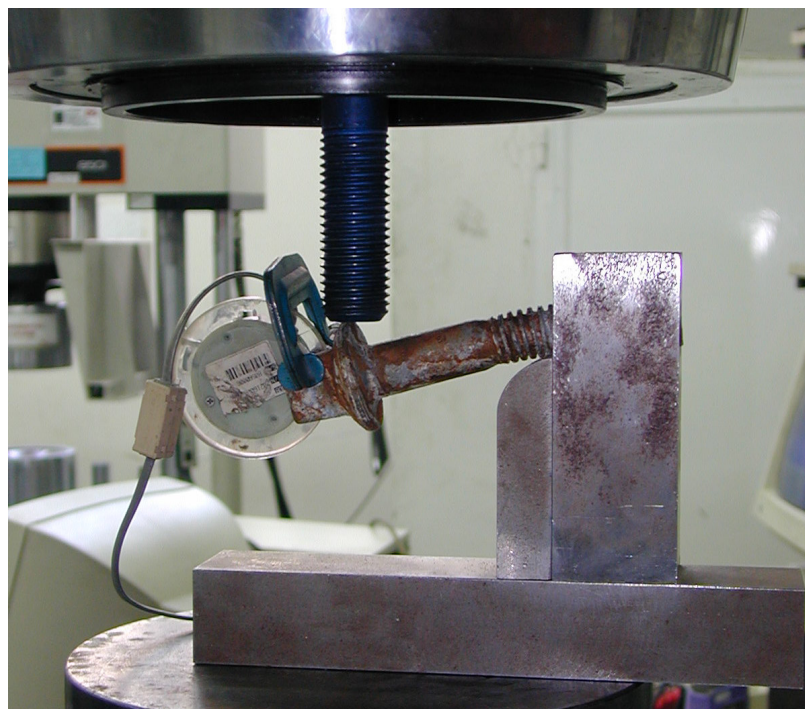


Figura 7.74.- *Dispositivo empleado para la caracterización en doblado*



Figura 7.75.- *Aspecto de las muestras tras el ensayo de doblado*

4.2.3. Caracterización frente al impacto

El rango de temperaturas de trabajo de la sujeción comentado en el apartado anterior suscitó este análisis posterior frente al impacto a fin de determinar la temperatura límite del comportamiento frágil del componente.

Para este análisis se mecanizaron probetas Charpy de la rosca de tres tornillos. Se realizaron ensayos de impacto a diferentes temperaturas, concretamente se estudio el intervalo 20/-20 °C, con un ensayo adicional a 0° C, empleando para ello un péndulo Charpy instrumentado de 300 J de capacidad [114 y 115]. En las Figuras 7.76 a 7.78 se muestra el comportamiento de las muestras en el ensayo Charpy así como el aspecto que presentaban las superficies de fractura tras la rotura.

En la Tabla 7.18 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos Charpy y en la Figura 7.79 se representa la curva de transición de comportamiento dúctil a frágil que ayudará a la determinación de la temperatura de transición.

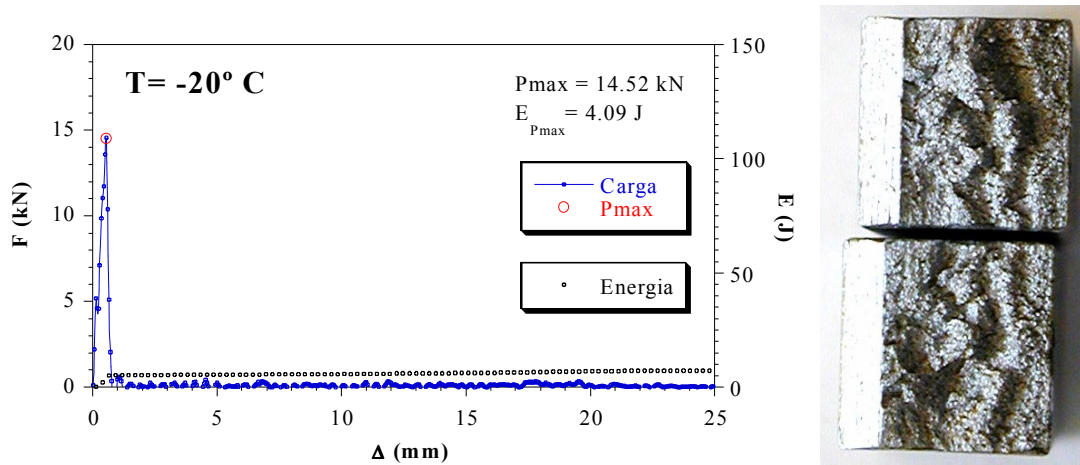


Figura 7.76.- Ensayo de impacto a -20 °C y aspecto de la rotura

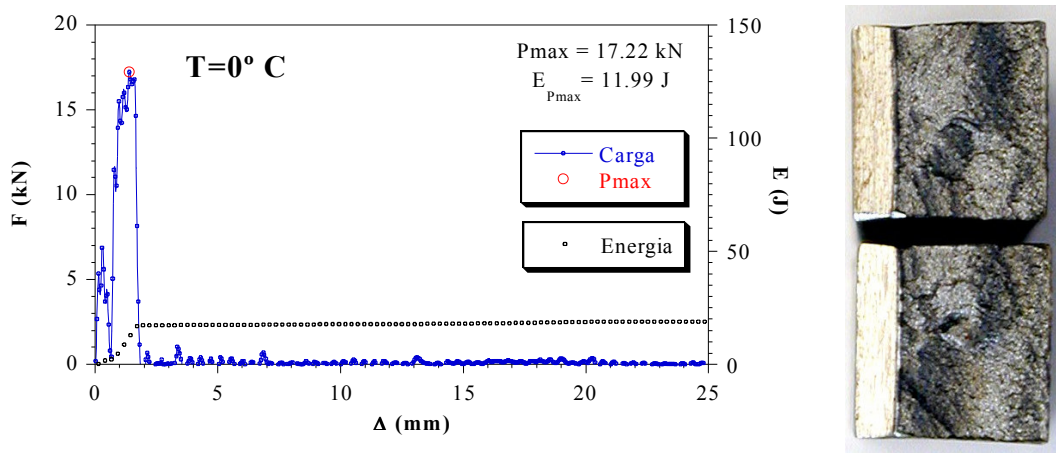


Figura 7.77.- Ensayo de impacto a 0 °C y aspecto de la rotura

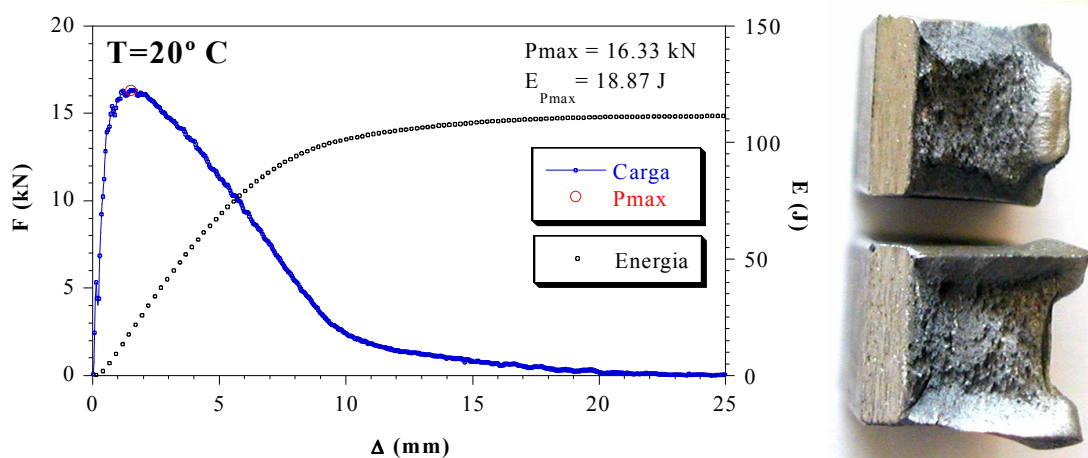


Figura 7.78.- Ensayo de impacto a 20 °C y aspecto de la rotura

Tabla 7.18.- Resultado de los ensayos Charpy

T (°C)	E _T (J)	Área frágil (%)	Área dúctil (%)	Exp lateral (mm)
-20	6.96	100	0	0
0	19.41	95	5	0.47
20	115.62	0	100	1.60

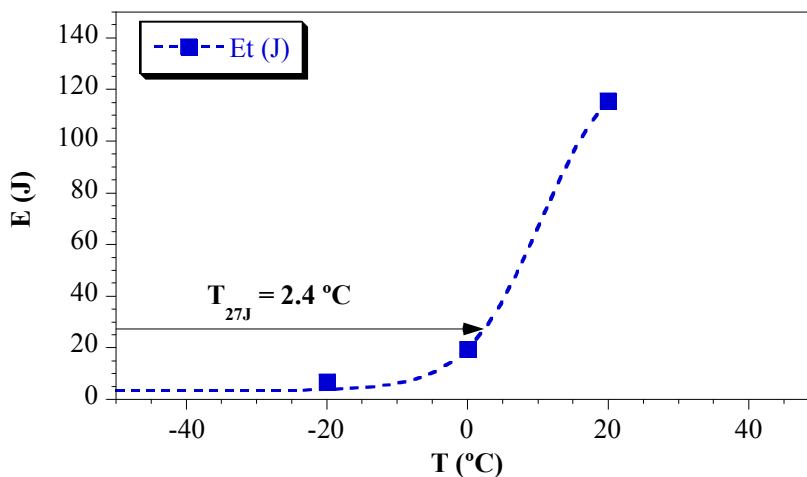


Figura 7.79.- Curva de transición dúctil-frágil

Como se puede observar, tanto por los porcentajes de área frágil o dúctil, como por la expansión lateral, o como por la energía absorbida, se comprueba que tanto la temperatura de 0 °C como la de 20° C bajo cero estarían incluidas dentro de la zona frágil, mientras que para la temperatura de 20° C el comportamiento de la muestra es dúctil, como ya se había comprobado a partir de los ensayos de tracción realizados a temperatura ambiente. Por tanto, atendiendo al criterio de los 27 J [116], podríamos decir que la temperatura de transición se puede encontrar en el intervalo [2.4-10 °C], temperatura fácilmente alcanzable en cualquier punto de la vía.

5. CLIP ELÁSTICO

El clip elástico ha sido el componente de la sujeción menos estudiado en este trabajo. En el capítulo 6 de la presente tesis, se comprobó que el comportamiento mecánico difería muy poco entre los distintos clips analizados, existiendo ligeras diferencias en su comportamiento ante la corrosión, debido, fundamentalmente, a los diferentes recubrimientos utilizados en cada solución.

En este apartado, se intenta analizar la posible pérdida de respuesta mecánica del clip en función del grado de utilización que haya sufrido el mismo.

Para este estudio se emplearon clips nuevos, clips usados bajo condiciones normales y extraordinarias de trabajo y clips sometidos a diferentes tratamientos de deterioro.

El ensayo empleado para el estudio de las propiedades mecánicas consistió en la aplicación de una carga de 15 kN en compresión, mantenida durante 10 s y posterior descarga hasta 0.5 kN, secuencia ésta, que se repitió durante 9 veces más. El esquema del desarrollo del ensayo puede observarse en la Figura 7.80.

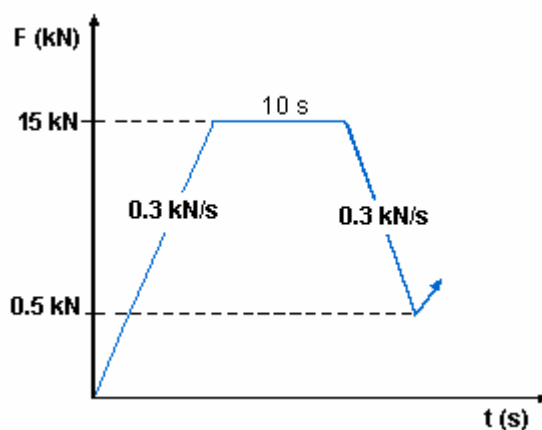


Figura 7.80.- Esquema del primer ciclo del ensayo realizado sobre los clips

En la Figura 7.81, se muestra el ensayo de un clip totalmente deteriorado, así como el dispositivo empleado para la realización del mismo.



Figura 7.81.- *Ensayo de elasticidad realizado sobre el clip tipo A introducido en cámara climática 300 h sin recubrimiento*

La comparación de comportamientos, se realizó empleando clips modelo A sometidos a diferentes condiciones:

- Clip nuevo: no habiendo sido previamente apretado
- Clip usado:
 - apretado 22 veces hasta 250 N·m
 - apretado 3 veces hasta 350 N·m
 - 8 roturas de placa A2 a impacto y 8 a estático
 - 9 roturas de placa A2 en ensayos de fatiga
 - 2.300.000 ciclos aplicados en ensayos de fatiga
- Clip con recubrimiento introducido en cámara climática de nieblas salinas durante 300 horas y con apretado previo a 250 N·m
- Clip sin recubrimiento introducido en cámara climática de nieblas salinas durante 300 horas, sin apretado previo

En la Figura 7.82 se muestra la evolución de los 10 ciclos de carga para los clips de expuestos a los tratamientos reseñados.

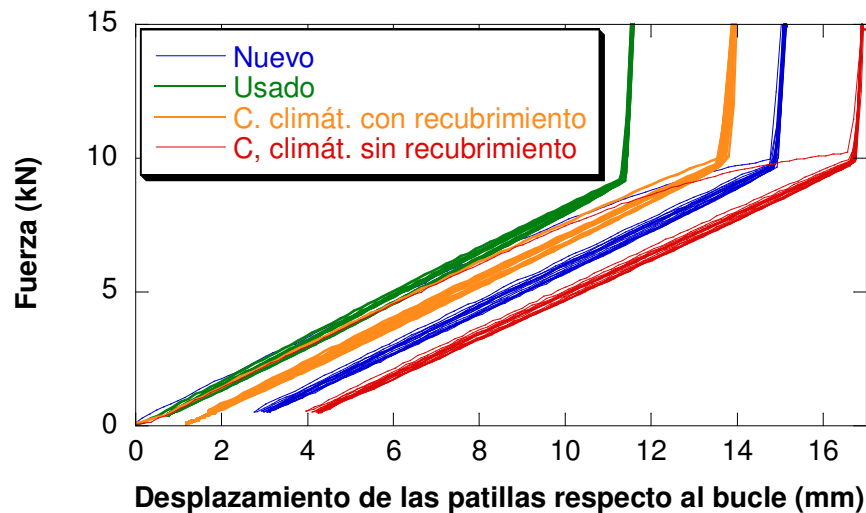


Figura 7.82.- Ciclos de carga sobre clip tipo A

Se comprueba, de nuevo, la diferencia de comportamiento entre el primer ciclo y el resto. El clip usado es el único en el que no se aprecia esta diferencia, comportándose de forma anelástica desde el primer ciclo, ya que, debido a los sucesivos aprietes y esfuerzos sufridos, el clip se ha deformado plásticamente y ha sufrido, por tanto, un endurecimiento. En el resto de casos, en el primero de los ciclos se aprecia una cierta deformación plástica. En el clip que solamente había sufrido un apriete esta deformación es menor, puesto que ya había sufrido una deformación plástica previa que le había conferido un cierto endurecimiento. Los clips que no habían sido previamente apretados, el nuevo y el de cámara climática sin recubrimiento, muestran un primer ciclo con mayor flexibilidad, es decir, que la deformación conseguida con la misma carga es mayor y, también, generan una mayor deformación permanente. Además, en el caso del clip de la cámara climática sin recubrimiento, la flexibilidad es mayor que en el nuevo, posiblemente debido a la pérdida de sección neta como consecuencia del proceso de corrosión. En todos los casos los ciclos siguientes no presentan deformaciones plásticas.

Para comprobar la posible diferencia existente entre el resto de ciclos, en la Figura 7.83 se muestra un detalle del último de los diez ciclos de carga aplicados sobre los cuatro clips.

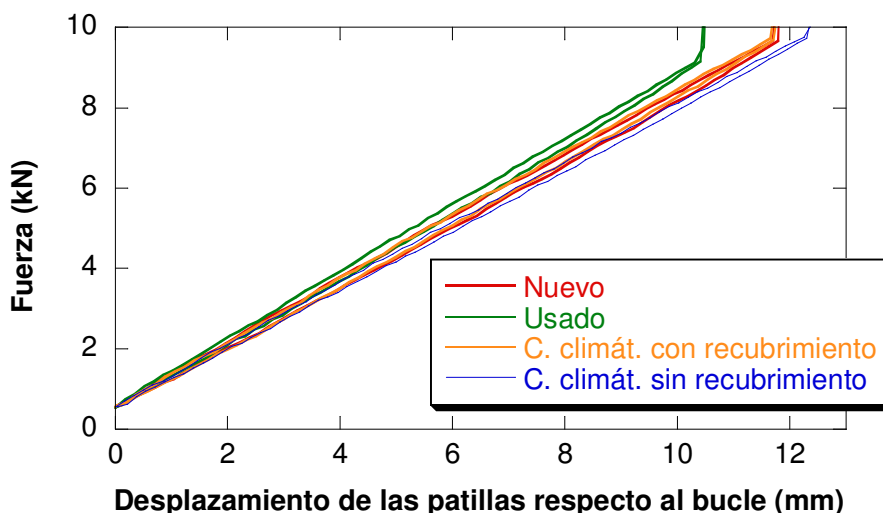


Figura 7.83.- Detalle del último ciclo de carga sobre clip tipo A

La mayor rigidez corresponde al clip usado y la mayor flexibilidad al clip de la cámara climática sin recubrimiento, justificado, posiblemente, por la ya comentada pérdida de sección resistente. En cuanto al clip nuevo y al de cámara climática con recubrimiento la diferencia entre ellos es mínima, situándose su comportamiento en una situación intermedia entre los anteriores, con lo que se comprueba la correcta funcionalidad del recubrimiento anticorrosivo.

Por tanto, para un desplazamiento constante del bucle del clip respecto a las patillas del mismo, se comprueba que la mayor fuerza generada por este (fuerza de apriete) correspondería a un clip usado, siendo incluso mayor la diferencia, si se compara con el primero de los ciclos de un clip nuevo.

Se realizó el mismo análisis sobre los otros dos tipos de clip, ensayando, en este caso uno nuevo y otro previamente apretado y sometido a 300 horas de cámara climática de nieblas salinas. En las Figuras 7.84 y 7.85 se representa la evolución de los diez ciclos y una comparativa del último de ellos para el clip tipo B,

respectivamente. En la las Figuras 7.86 y 7.87 se realiza el mismo análisis para el clip tipo C.

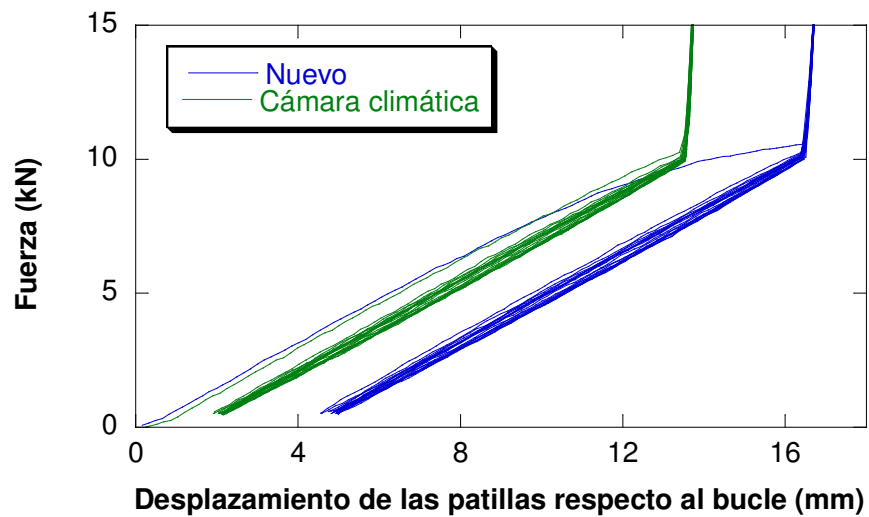


Figura 7.84.- Ciclos de carga sobre clip tipo B

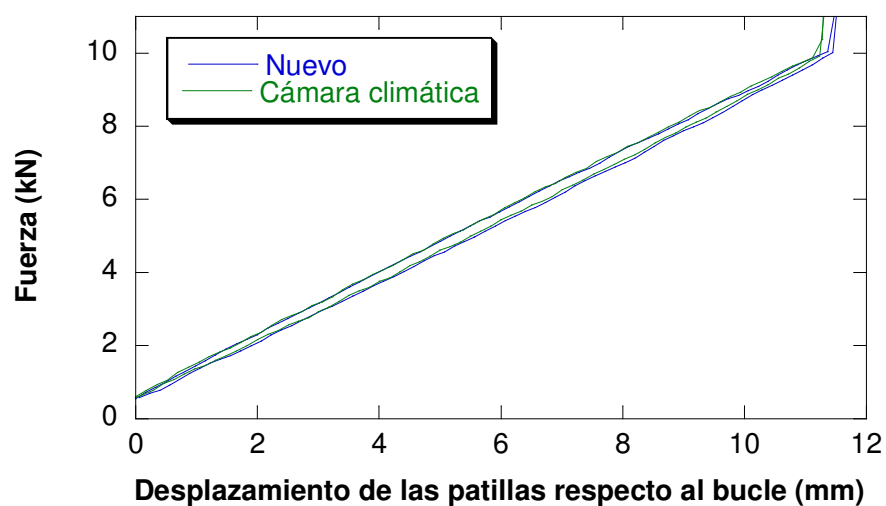


Figura 7.85.- Detalle del último ciclo de carga sobre clip tipo B

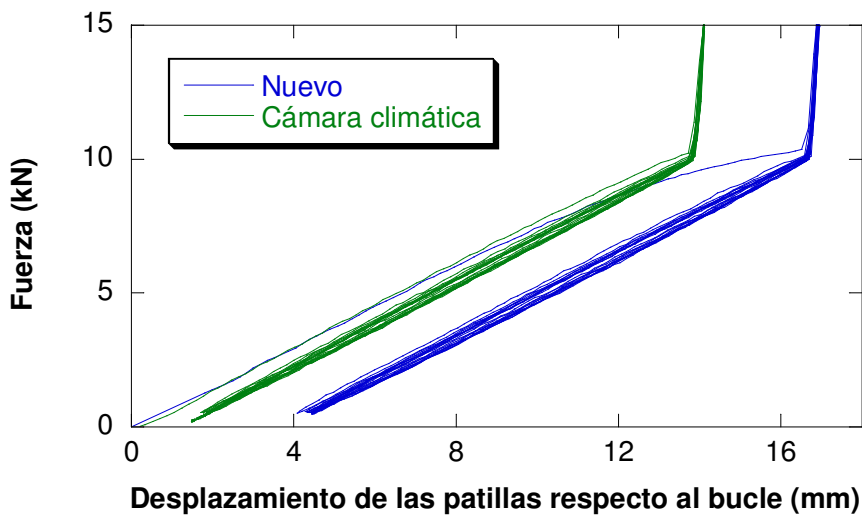


Figura 7.86.- Ciclos de carga sobre clip tipo C

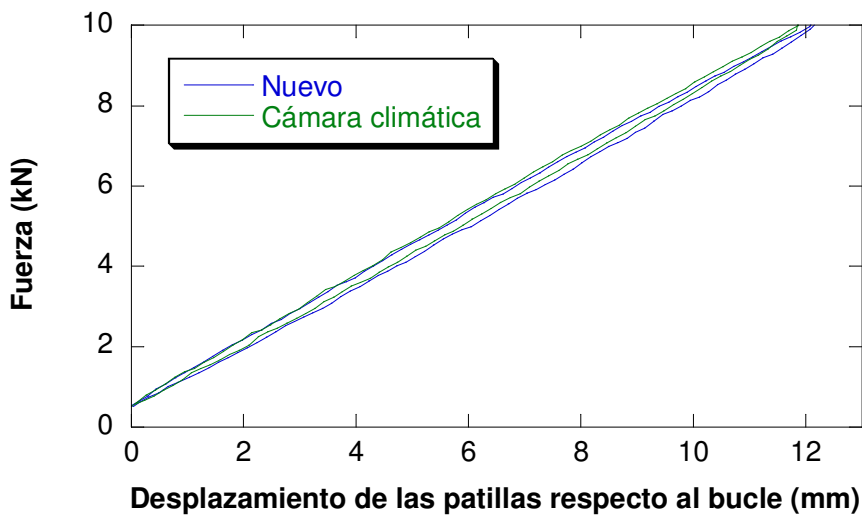


Figura 7.87.- Detalle del último ciclo de carga sobre clip tipo C

Con los dos tipos de clip se obtuvo el mismo resultado que con el primero, es decir, diferencia en el primero de los ciclos debido al endurecimiento sufrido por el clip de la cámara en el primero de los aprietes, y coincidencia en el último de los diez ciclos, corroborando la efectividad de la protección anticorrosión en ambos casos.