

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL
TERRENO Y DE LOS MATERIALES

TESIS DOCTORAL
COMPORTAMIENTO EN FATIGA DE POLIAMIDAS
REFORZADAS CON FIBRA DE VIDRIO CORTA

Autor:

JOSÉ ANTONIO CASADO DEL PRADO

Directores:

D. FEDERICO GUTIÉRREZ-SOLANA SALCEDO

D. JUAN ANTONIO POLANCO MADRAZO

Tesis Doctoral presentada en la Universidad de Cantabria para la
obtención del título de Doctor en Ciencias Físicas

Santander, abril 2001

CAPÍTULO 6

VALIDACIÓN DEL MODELO DE COMPORTAMIENTO EN FATIGA

1 INTRODUCCIÓN

A lo largo del desarrollo de esta Tesis se han distinguido tres estados en el comportamiento en fatiga del material polimérico de poliamida 6.6 reforzada en un 35% en peso con fibra de vidrio corta. La observación de la evolución del daño en el material y el análisis de las propiedades características de estos estados, identificados como I, II y III, han permitido modelizar dicho comportamiento en fatiga en atención a las condiciones globales y locales de deformación y tensión de las probetas ensayadas.

Este comportamiento necesita ser validado para poder ser generalizado como representativo del material ensayado y de otros materiales semejantes, las poliamidas reforzadas con fibra de vidrio en general.

Por ello, en este capítulo se analiza bajo el marco de la modelización realizada, en primer lugar, el comportamiento en fatiga de una poliamida 6 reforzada con un porcentaje en peso menor de fibra de vidrio (25%), para generalizar su aplicabilidad a todos los materiales de PA reforzada recogidos en este trabajo. En segundo lugar, se analiza el comportamiento de piezas moldeadas con la PA reforzada con un 35% de fibra, para generalizar su aplicabilidad al diseño de componentes bajo condiciones de fatiga. Finalmente, en tercer lugar, se analiza el comportamiento de piezas ya fisuradas, en las que el estado de deformación local hace prever algunas condiciones particulares del comportamiento en fatiga que deben ser tenidas en cuenta en el análisis de la integridad estructural de componentes.

2 VALIDACIÓN DEL MODELO DE COMPORTAMIENTO PARA POLIAMIDAS CON OTROS PORCENTAJES DE REFUERZO

Dada la amplia gama existente dentro de la familia de poliamidas técnicas, en este bloque de la Tesis se pretende comprobar si la caracterización de comportamiento dinámico en fatiga realizado específicamente con anterioridad sobre la PA 6.6 reforzada con fibra corta de vidrio es extrapolable al resto de materiales termoplásticos nitrogenados del tipo amida reforzados, que son susceptibles de moldear por inyección en piezas de alta responsabilidad. En concreto, dentro del espectro de poliamidas disponible, es la PA 6 la que, por sus propiedades físico-mecánicas, puede competir con la PA 6.6 en el ámbito de la inyección de piezas de elevada seguridad que garanticen alta resistencia mecánica y una gran estabilidad dimensional.

Asimismo, la posibilidad de modificar la cantidad de refuerzo inorgánico con que se carga al material con el objeto de introducir variaciones en sus propiedades, e

incluso en su precio final, obliga a analizar si este factor condiciona los criterios establecidos que definen el comportamiento de este tipo de material compuesto en relación a su respuesta en fatiga. Por lo tanto, en este apartado se va a analizar el comportamiento dinámico en fatiga del material compuesto de matriz de PA 6, reforzado con un 25% en peso de fibra de vidrio corta, teniendo como referencia el obtenido sobre el material compuesto hasta ahora específicamente analizado, el de matriz de PA 6.6 reforzada con un 35% de fibra de vidrio corta.

2.1 Caracterización del comportamiento en fatiga de la PA 6 + 25% F.V. (PS25)

Para determinar si las características del comportamiento en fatiga del material PS25 son comparables a las establecidas para el material PR35, se procedió a realizar un proceso experimental semejante al realizado para éste. Así, se practicaron ensayos de fatiga con ondas de carga de naturaleza senoidal sobre probetas moldeadas de tracción, variando la amplitud desde el 90% al 30% de la tensión de rotura dinámica a temperatura ambiente. En los ensayos, hasta rotura, se hizo un seguimiento de la evolución de la deformación alcanzada y de la temperatura. Asimismo, una vez alcanzada la rotura se determinó el daño superficial en la zona próxima a la sección de rotura midiendo la rugosidad y se realizó un levantamiento planimétrico y un estudio fractográfico de las superficies de fractura para poder establecer sus condiciones de rotura finales.

2.2 Estados de comportamiento

De los ensayos de fatiga realizados sobre el material PS25, bajo todos los niveles de esfuerzos aplicados, se determinó el nivel máximo de las ondas de deformación experimentadas por el material, obtenidas a través del extensómetro, en función del número de ciclos de ensayo, como señal de respuesta a las ondas de tensión impuestas durante la prueba dinámica.

En el gráfico de la Figura 6.1 se representa en doble eje de ordenadas la evolución de la deformación máxima unitaria experimentada por el material a lo largo de su vida en fatiga para todos los niveles de esfuerzo aplicados, por un lado, y la evolución de la temperatura medida en la probeta durante el ensayo, por el otro. El gráfico de la Figura 6.2 muestra, por su parte, la evolución de la velocidad de deformación obtenida en todos los ensayos realizados.

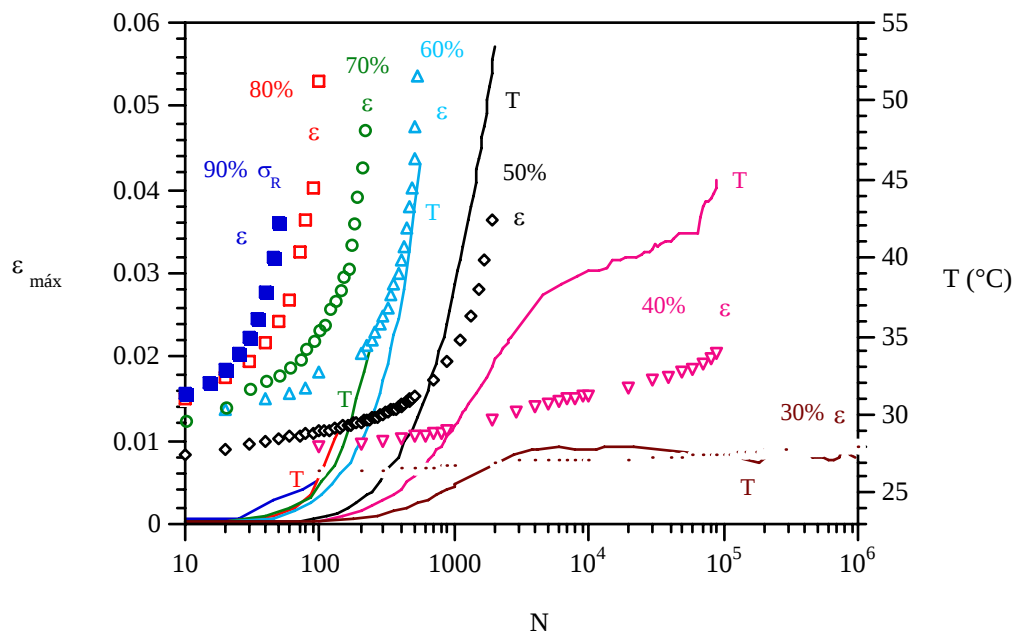


Figura 6.1.- Evolución de la deformación máxima y de la temperatura con el número de ciclos.

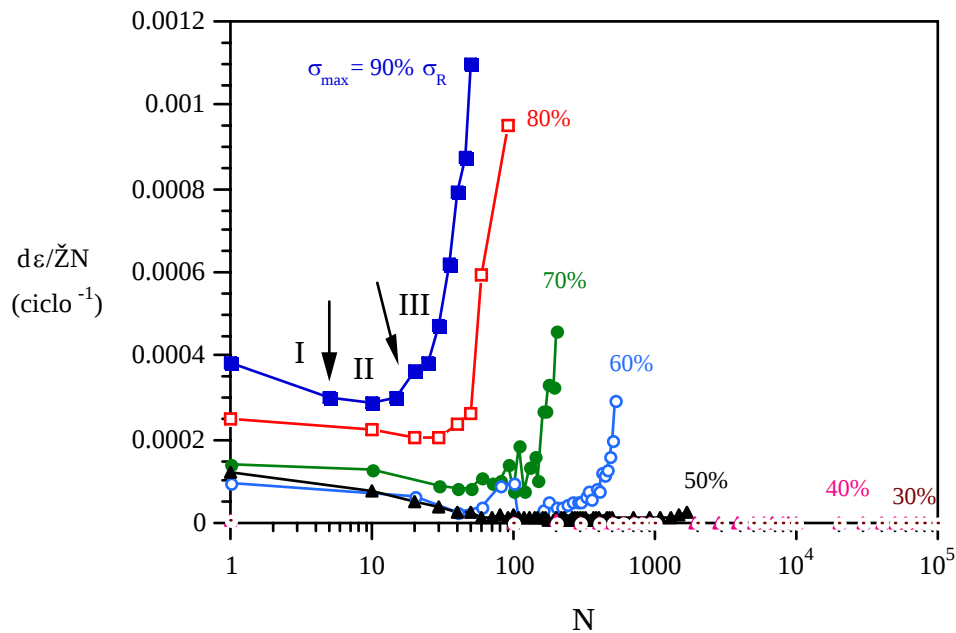


Figura 6.2.- Evolución de la velocidad de deformación con el número de ciclos.

Las curvas del diagrama de la Figura 6.1 muestran un comportamiento mecánico de este material semejante al observado para la PA 6.6 reforzada al 35% (ver Figura 5.2): una evolución siempre creciente de la deformación hasta el instante de rotura o, en otro caso, la estabilidad mecánica y térmica del proceso.

En el gráfico de la Figura 6.2 se puede observar claramente, para los ensayos de mayor amplitud (por encima del 60%), los tres estados de velocidad de deformación que han marcado la modelización del comportamiento realizada. En el primer estado (I) la velocidad de deformación es decreciente ($d^2\epsilon/dN^2 < 0$), en el segundo (II) se mantiene constante ($d^2\epsilon/dN^2 = 0$) y en el tercero (III) pasa a ser fuertemente creciente ($d^2\epsilon/dN^2 > 0$).

Realizando un análisis más exhaustivo resulta factible distinguir, como se hizo con el material PR35, las transiciones entre estados de comportamiento en el material durante el proceso dinámico para cada nivel tensional y, por lo tanto, definir límites de los mismos. En la Tabla 6.1 se presentan los valores de deformación críticos

correspondientes a cada transición (ε_{I-II} y ε_{II-III}), y los instantes (N_{t1} y N_{t2}) para los que se producen.

Tabla 6.1.- Deformaciones críticas

σ_m / σ_r	N_{t1} (ciclos)	ε_{I-II}	N_{t2} (ciclos)	ε_{II-III}
0.90	10	0.016	30	0.023
0.80	20	0.017	50	0.024
0.70	30	0.016	120	0.026
0.60	40	0.015	350	0.027
0.50	325	0.014	1300	0.025
0.40	9900	0.015	-----	-----

La frecuencia de muestreo de la toma de datos empleada en el desarrollo de los ensayos de fatiga con estados tensionales bajos, de larga duración, fue demasiado amplia por lo que no pudo concretarse la deformación correspondiente a la transición de la etapa II a la III para el valor del 40%.

De la misma forma que se observó con anterioridad para el material PR35, se puede apreciar que, independientemente de las condiciones de carga y del grado térmico acusado por el material, la transición de la etapa I a la II se produce cuando se alcanza un valor de deformación concreto, en este caso de $1.55 \pm 0.15\%$.

Asimismo, el inicio de los mecanismos de inestabilidad final en el material se produce cuando se alcanzan valores de deformación de $2.5 \pm 0.20\%$, correspondiente al tránsito de la etapa II a la III. Ambos valores resultan diferentes de los obtenidos para la PA 6.6 (2.2 y 2.8%, respectivamente), por lo que se presentan como característicos de cada material.

2.3 Caracterización superficial y fractográfica del daño

Como consecuencia del mal estado superficial presentado por la mayoría de las probetas ensayadas a fatiga, debido a su necesaria manipulación, posterior a los ensayos, para la observación microscópica de sus superficies de fractura, no fue posible determinar con fiabilidad la rugosidad en la superficie lateral de las mismas.

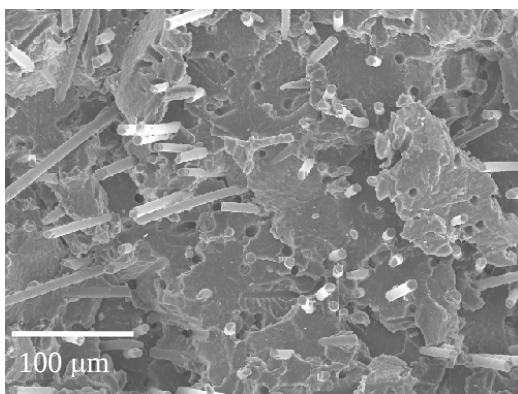
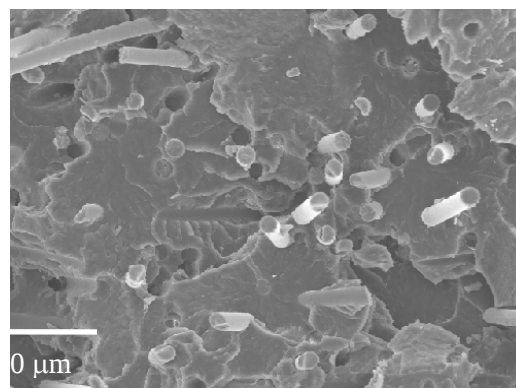
Sin embargo, en la probeta ensayada a fatiga con un esfuerzo máximo del 30% de su tensión de rotura dinámica, que no rompió tras la aplicación de más de un millón de ciclos, pudo ser evaluada su rugosidad. Para caracterizar su estado morfológico interno, indirectamente medible a través de la rugosidad en superficie, se procedió a evaluar, en primer lugar, el citado parámetro en una zona arbitraria a lo largo de su fuste calibrado y en la dirección del eje de la probeta. En una segunda fase se procedió a la rotura de la misma probeta, tras su inmersión previa en nitrógeno líquido y a determinar, de nuevo, su rugosidad en la zona adyacente al plano de la rotura, en la misma dirección que en la primera determinación de la rugosidad.

En la Tabla 6.2 se presentan los valores medios de la rugosidad medidos en cada una de las determinaciones. Se aprecia que, en ambos casos, la rugosidad es similar, estableciendo dicho resultado que no ha existido evolución de daño alguno (síntomas de pseudo-fisuración o *crazing*) en la probeta ensayada, y no rota durante su caracterización en fatiga, puesto que el citado valor es comparable al registrado con una probeta patrón no ensayada.

Tabla 6.2.- Rugosidad de la probeta ensayada al 30% σ_R

RA (μm) zona arbitraria	RA (μm) zona rotura (Nitrógeno)
0.28	0.29

Con objeto de constatar que en el interior de esta probeta, que se había mantenido en estado I, no se habían generado *crazes*, se procedió a metalizar su superficie de fractura, tras llevarla a rotura, para analizar el estado morfológico del material empleando el microscopio electrónico de barrido ya usado en anteriores observaciones. En la Fractografía 6.1a se puede apreciar una vista representativa de la superficie de fractura que muestra un aspecto totalmente frágil, no detectándose la presencia de zonas a partir de las que se pudiera iniciar o se hubiera iniciado ningún proceso de pseudofisuración. En la Fractografía 6.1b se muestra un detalle de la anterior. Por lo tanto, de nuevo se reproduce, y valida, que la iniciación de daño no se establece antes de alcanzar el estado II de comportamiento.

**a) Vista general (x250)****b) Detalle (x450)****Fractografía 6.1.- Superficie de fractura del material ensayado al 30% σ_R .**

Al igual que con el material PR35, se ha caracterizado la evolución de la generación de crazes en el material durante su fatiga, a través de la medida periódica de la rugosidad en una misma probeta. Para ello, se procedió a realizar ensayos simultáneos de fatiga y de rugosidad sobre la misma probeta de la forma descrita en el apartado 5.2.4 de esta Tesis aplicando, en este caso, un esfuerzo máximo del 60% de la tensión de rotura dinámica del material. En la Tabla 6.3 se presenta la evolución de la rugosidad media con el número de ciclos hasta que se produjo la rotura de la probeta.

Tabla 6.3.- Valores de RA en cada detención del ensayo de fatiga
para $\sigma_{m\acute{a}x}=0.60\sigma_R$.

N	0	50	100	200	300	500	700	1000	1300	1400
RA (μm)	0.29	0.30	0.29	0.34	0.32	0.33	0.32	0.35	0.40	0.48

La rotura se produjo previamente a la última medición, a los 1400 ciclos. La rugosidad medida, en ese momento, en la zona inmediatamente adyacente a la zona de rotura fue de $0.71\ \mu\text{m}$.

El gráfico de la Figura 6.3 representa la evolución de la rugosidad en la superficie del material en función del número de ciclos aplicado sobre el mismo. De nuevo, al igual que con el material de referencia PR35, el comportamiento se puede ajustar a través de dos tramos lineales, representativos de los estados I y II. En el tramo inicial no se produce daño superficial y éste va progresando de forma lineal en el estado II. Sobre el mismo gráfico se ha representado con un punto lleno el valor de la rugosidad determinada tras la fractura de la probeta en la zona contigua a la de rotura, pudiéndose apreciar que su valor es más elevado debido al proceso inestable local final, caracterizado anteriormente como la etapa III del proceso de fatiga.

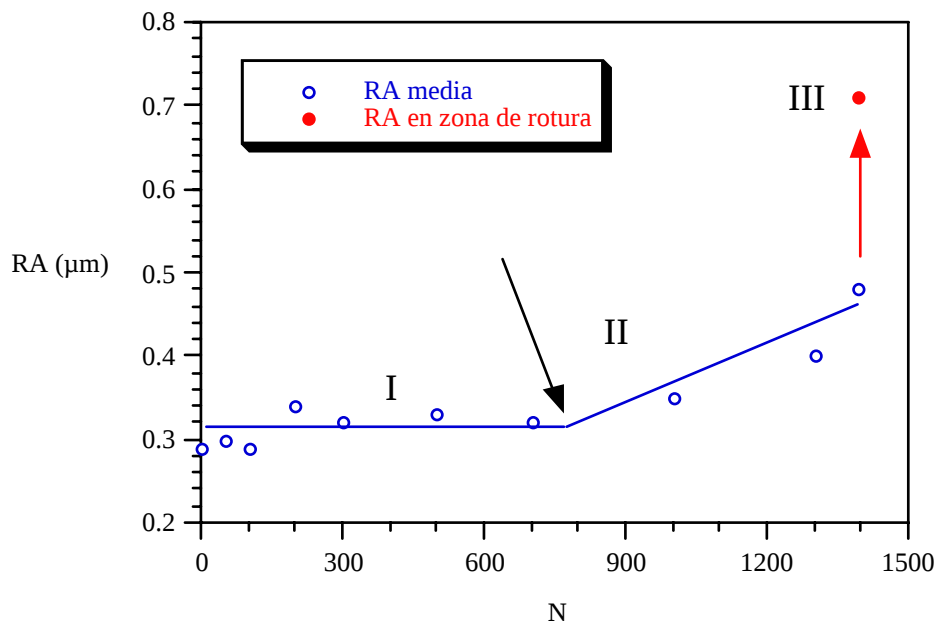


Figura 6.3.- Evolución de la rugosidad frente a N .

2.4 Condiciones de rotura

Para determinar los condicionantes que justifican las roturas observadas tras el ensayo de estas probetas normalizadas, sometidas a fatiga, se analizaron sus superficies fractográficas por medio de técnicas de microfotografía y microscopía electrónica de barrido, considerando los diferentes estados tensionales aplicados. La metodología experimental aplicada fue la misma que la descrita en el apartado 6 del Capítulo 5 de esta Tesis. De esta forma, sobre la superficie de rotura de las probetas se realizó un levantamiento planimétrico de cada una de las superficies de fractura, obtenido a partir de fotografías realizadas a 10 aumentos. Se discretizó la morfología de los distintos tipos de fisura observados para su mejor estudio por superficies de áreas equivalentes. De cada probeta ensayada se determinó el porcentaje de área cohesiva producida en la fatiga por formación de *craze*s, previa a su rotura, A_C , con respecto de la superficie total de la sección recta.

De la misma forma que con el material PR35 caracterizado con anterioridad, el aspecto característico de la superficie de fractura de las probetas del material PS25, ensayadas a fatiga, mostró dos zonas claramente diferenciadas: una zona más oscura producida durante la fatiga (cohesiva con crecimiento estable) y otra zona más clara de rotura (crecimiento inestable). En la Tabla 6.3 se indica para este material el porcentaje de área dañada correspondiente a la zona más oscura (A_C) y la morfología de su desarrollo (E de esquina y P pasante), la temperatura final medida (T_R) y la tensión neta en el ligamento resistente (σ_{neta}) en el momento de la rotura, todo ello en función del esfuerzo máximo aplicado (σ_{max}).

Tabla 6.3.- Resultados de rotura en fatiga (PS25)

σ_{max} / σ_r	σ_{max} (MPa)	A_C (%)	T_R (°C)	σ_{neta} (MPa)	Tipo de zona cohesiva
0.90	126.37	9.95	27	140.33	E
0.80	112.59	4.13	29	124.58	E
0.70	98.43	8.48	34	122.63	P
0.60	84.30	11.87	44	116.46	P
0.50	70.27	10.75	54	93.72	P
0.40	56.24	20.14	45	105.87	P

El gráfico de la Figura 6.4 representa los pares $\sigma_{neta}-\Delta T$ calculados para cada tensión nominal aplicada, en la que se observa una distribución de valores que se pueden ajustar linealmente, en primera aproximación, para los niveles térmicos medidos con un coeficiente de correlación de 0.93.

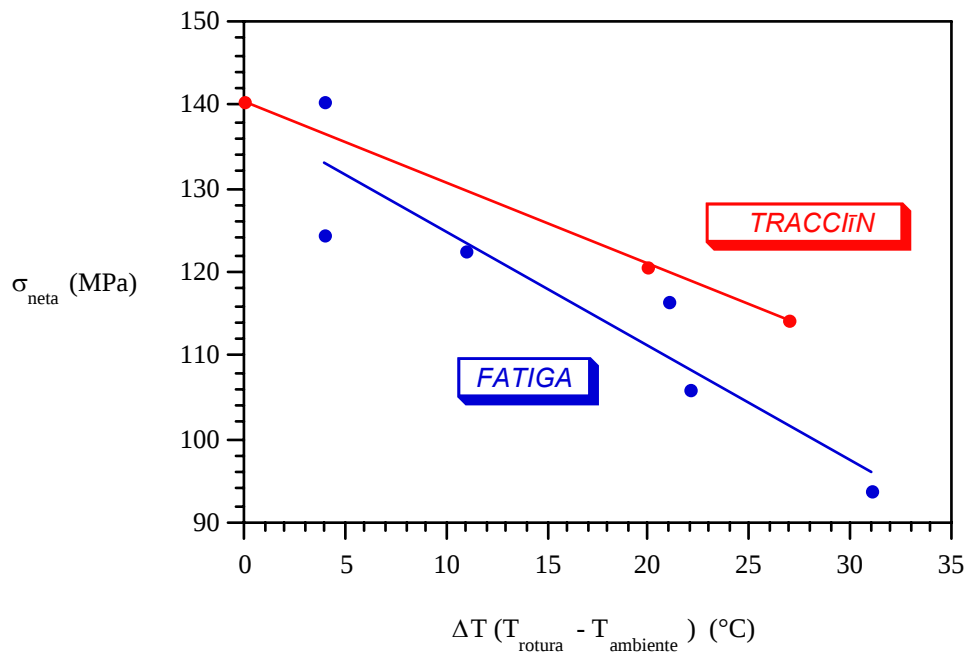


Figura 6.4.- Evolución de σ_{neta} con el incremento térmico. (PS25)

En la misma Figura 6.4 se ha representado la evolución de la tensión neta de rotura dinámica en tracción, en función de la temperatura, mediante un ajuste lineal, con un coeficiente de correlación de 1, obtenido a partir de los ensayos realizados sobre probetas a 23, 43 y 50°C, cuyos resultados de σ_R (T), A_C y σ_{neta} se presentan en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4.- Resultados de rotura en tracción. (PS25)

T_R (°C)	σ_R (T) (MPa)	A_C (%)	σ_{neta} (MPa)
23	140.4	0.00	140.4
43	120.8	9.75	132.58
50	114.2	12.22	128.15

Se observa una diferencia entre las tensiones netas en fatiga y tracción equivalente a la observada para la PA de referencia en la modelización realizada, justificada por las tensiones cohesivas soportadas por las zonas inestables de *crazes* que se van desarrollando en el estado III de comportamiento en fatiga.

Un análisis equivalente al realizado en el apartado 6.3 del capítulo anterior, bajo la hipótesis de que se alcanza la rotura cuando la tensión de pico en el ligamento residual alcanza el valor de la tensión de rotura del material a la temperatura correspondiente, ofrece como resultados de tensión cohesiva (σ_c), transmitida por la zona de *crazes* en el momento de la rotura de las probetas de fatiga, los que figuran en la Tabla 6.5. Estos valores de σ_c se presentan en el gráfico de la Figura 6.5, en función de la temperatura medida en el instante de la rotura y muestran, de nuevo, la coherencia de los mismos con la tensión de rotura de la matriz (50 MPa en esta zona de temperatura [99]) cuando el valor de la temperatura de rotura es superior al de la transición vítrea de este material ($T_g = 32^\circ\text{C}$ [100]), e intermedia entre la de la matriz y la del material compuesto cuando la temperatura es inferior. Esta diferencia se asocia, de nuevo, a la nula o parcial adherencia de las fibras a la matriz en estas dos regiones de temperatura al formar los *crazes*.

Tabla 6.5.- Tensiones cohesivas medidas en rotura

T_R ($^\circ\text{C}$)	27	29	34	44	45	54
σ_c (MPa)	107.31	89.24	68.26	66.10	45.56	46.41

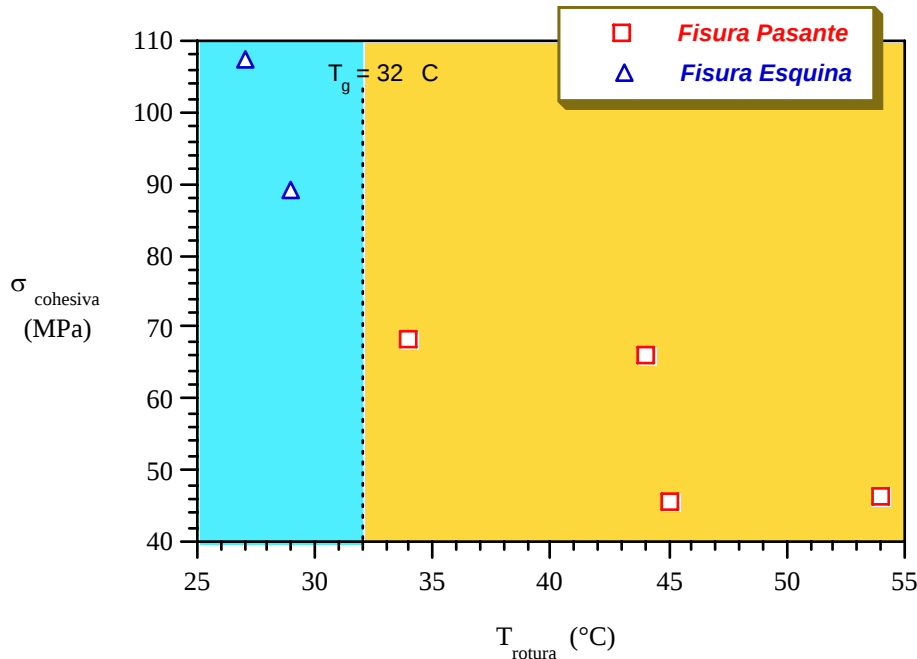


Figura 6.5.- Valores de σ_c en función de la temperatura en la rotura (PS25)

3 APLICACIÓN DEL MODELO DE COMPORTAMIENTO A PIEZAS ACODADAS DE SUJECCIÓN DE VÍA DE FERROCARRIL PARA ALTA VELOCIDAD ESPAÑOLA (AVE)

La motivación de esta Tesis surgió de la necesidad de conocer el comportamiento mecánico de un nuevo material, cuya utilización se prevé masiva en los próximos años, como lo demuestra la demanda generada por el fuerte desarrollo e implantación del sector ferroviario de altas prestaciones a lo largo del territorio español. Con el estudio realizado hasta el momento se ha caracterizado el comportamiento mecánico en fatiga del material de interés. Para su aplicación al diseño es necesario comprobar que esos criterios también permiten caracterizar el comportamiento de cada pieza que se conforme a través de la inyección del propio

material. La continua demanda de mayores velocidades necesarias para que el sector ferroviario pueda competir con el del transporte aéreo, provoca una continua evolución de los diseños de sus componentes de alta responsabilidad. Se han contemplado diversos modelos que, funcionalmente, desarrollan el mismo cometido, si bien difieren en cuanto al tipo de material con que se han inyectado y el diseño que geométricamente las define. En definitiva, su comportamiento condiciona el del conjunto de la sujeción de vía de ferrocarril en la que se encuentra integrada, al ser sometida a los esfuerzos, principalmente de carácter dinámico, que se generan al paso de los vehículos.

Por lo tanto, el objeto de este apartado es comprobar si, independientemente del material y de la geometría del componente considerado, los criterios de funcionamiento y el límite de comportamiento definidos en esta Tesis sobre el material en fatiga continúan manteniendo su validez.

Para poder generalizar los parámetros de control del comportamiento en fatiga establecidos en esta Tesis, este apartado contempla su aplicabilidad al comportamiento de diferentes tipos de placas acodadas de sujeción de vía de ferrocarril para alta velocidad. Entre ellos se considera la actual, consistente en una placa maciza cuya producción resulta cara, dada la excesiva cantidad de materia que posee en relación a sus requisitos, y otras, de nuevo diseño, más aligeradas en peso, que mantienen las prestaciones mecánicas de la anterior. En concreto, se analizan, junto con el modelo actual, las soluciones geométricas cuyo diseño está basado en la sustitución de grandes espesores por estructuras nervadas de diferente sección en la dirección de los esfuerzos que han de soportar [101-104]. Asimismo, la técnica de moldeo por inyección de éstas últimas placas acodadas se lleva a cabo de forma que el refuerzo de fibra corta de vidrio, embebido en la matriz de PA, se dispone en la dirección de sus nervios y, por lo tanto, en la de los esfuerzos que han de soportar. De esta forma, el diseño y la tecnología empleada para producir las placas acodadas aligeradas provoca que se establezca un régimen de trabajo óptimo de las mismas, bajo la condición de isodeformación. Esta

condición de trabajo ideal no es desarrollada por la placa acodada maciza actual, puesto que la inyección del material en ella se produce de forma que el refuerzo se dispone en dirección perpendicular a la de los esfuerzos generados en la vía (condición de isoesfuerzo). De este modo, no se aprovecha totalmente el efecto reforzante de las fibras y, en consecuencia, las prestaciones mecánicas teóricas de la placa no se encuentran optimizadas.

3.1 Material ensayado

En el esquema de la Figura 6.6 se muestra el montaje del sistema de sujeción de vía de ferrocarril de alta velocidad donde se puede observar la disposición y situación de las placas acodadas en el mismo, desde dos perspectivas diferentes.

En las Fotografías 6.1a y 6.1b se aprecia una vista superior e inferior de los dos modelos básicos de placas acodadas analizados. La Fotografía 6.1a muestra la geometría de la placa acodada maciza actual (M0) y la 6.1b presenta una de las placas acodadas aligeradas en peso en diferente cuantía, lo que da lugar a dos modelos (M1 y M2) que difieren geoméricamente, de forma sensible, en la sección de los nervios de que se encuentra dotada. Asimismo, se indica con una flecha sombreada la dirección de los esfuerzos de compresión soportados por las placas en servicio, como consecuencia de la transmisión de los mismos por el carril. Se indica, además, si la fibra de vidrio reforzante del material en la placa acodada se direcciona paralela ($\parallel$) o perpendicularmente ($\perp$) a las cargas dinámicas generadas por el paso de los vehículos.

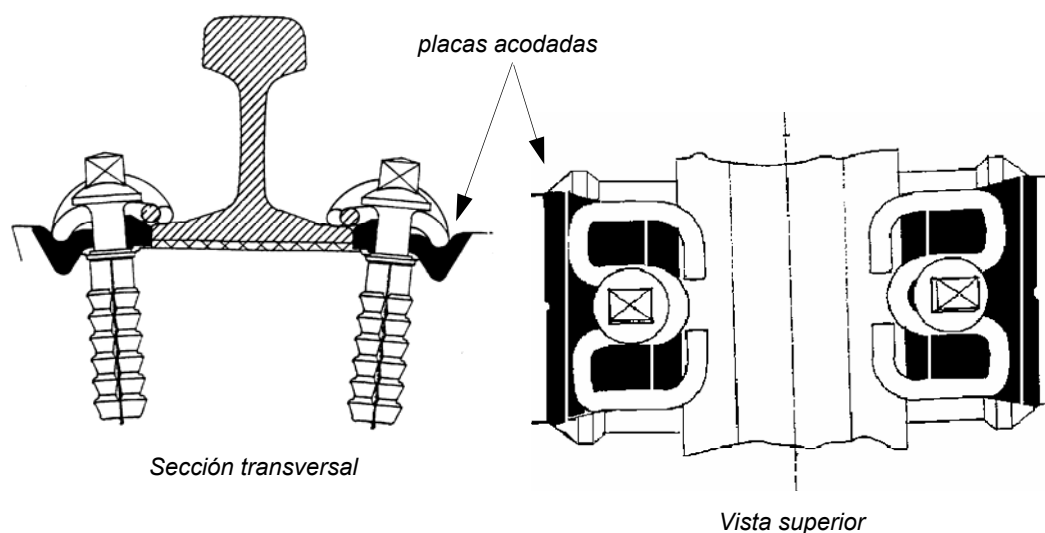
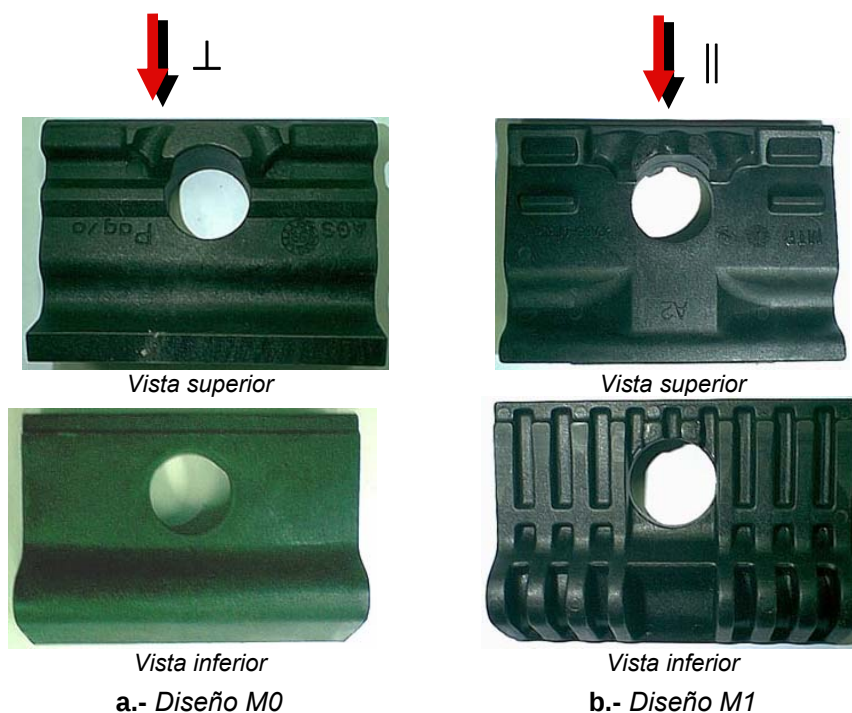


Figura 6.6.- Ubicación de las placas acodadas en el sistema de sujeción.



Fotografía 6.1.- Geometría de placas acodadas.

En la Tabla 6.6 se especifican los códigos alfanuméricos que identifican a los tres tipos de placas acodadas analizadas, indicándose el porcentaje de reducción de su masa, con respecto a la de la placa maciza, obtenido al variar su geometría y su material constituyente, PA 6 ó PA 6.6 con refuerzos del 30 y 35% en peso de fibra de vidrio (% FV). El contenido en humedad de las placas acodadas fue, en todos los casos, del 1.5% en peso.

Tabla 6.6.- Identificación de las placas acodadas

Código	Material	masa (g)	reducción en masa (%)
M0 (6)	PA 6 + 30% FV	174.76	-----
M1 (6)	PA 6 + 35% FV	124.20	28.93
M1 (66)	PA 6.6 + 35% FV	125.13	28.40

M2 (6)	PA 6 + 35% FV	126.99	27.33
M2 (66)	PA 6.6 + 35% FV	128.09	26.70

3.2 Metodología experimental

La técnica experimental de caracterización empleada para determinar el comportamiento en fatiga de las placas acodadas fue la del *método Locati*, que establece una propuesta de ensayo sobre probeta única, como alternativa a la establecida por los diagramas de Wöhler que requiere la realización de varios ensayos para determinar la resistencia a la fatiga de un componente estructural. Este método requiere la aplicación de trenes de ondas de carga, de compresión en este caso, de amplitud (ΔP) constante durante un número determinado de ciclos, transcurridos los cuales se incrementa ΔP en una cantidad preestablecida conservando el resto de los parámetros. Este suceso se repite hasta que se produzca la rotura o deterioro excesivo del componente en análisis.

En este trabajo se aplicaron bloques de fatiga en escalones de 25000 ciclos de onda cuadrada con amplitud constante de fuerza. Este tipo de naturaleza de onda fue seleccionado puesto que, en trabajos previos [15-17], se determinó que los fenómenos dinámicos sufridos por las sujeciones de vía de ferrocarril se asocian a impactos cuya simulación se obtiene reproduciendo formas de ondas cuadradas.

Los ensayos se realizaron a la temperatura ambiente del laboratorio y a la frecuencia de 3 Hz. La fuerza máxima, $P_{\text{máx}}$, escogida para el primer escalón de fatiga fue de 43 kN, incrementándose en 2.5 kN en cada bloque de fatiga hasta alcanzar la rotura. La fuerza mínima del ensayo, $P_{\text{mín}}$, se mantuvo constante e igual a 5 kN. En la Tabla 6.7 se indican los valores de carga de compresión máxima ($P_{\text{máx}}$) y mínima ($P_{\text{mín}}$) a los que fueron sometidas las diferentes muestras durante la realización del ensayo.

Tabla 6.7.- Parámetros del ensayo Locati.

Escalón de	0 a	25 a	50 a	75 a	100 a	125 a	150 a	175 a
Ciclos ($\times 10^3$)	25	50	75	100	125	150	175	200

$P_{\min}$ (kN)	5	5	5	5	5	5	5	5
$P_{\max}$ (kN)	43.0	45.5	48.0	50.5	53.0	55.5	58.0	60.5

El esquema del dispositivo empleado para realizar los ensayos se representa en la Figura 6.7. Esta unidad de carga reproduce exactamente el perfil geométrico del patín del carril y de la traviesa en la que se instala la placa acodada para ensamblarse con el resto de los elementos del conjunto de la sujeción en la vía. Una vez que la placa acodada se coloca en su posición correcta se atornilla con el par de apriete necesario para producir el contacto entre el bucle del clip metálico elástico y la placa acodada, de la misma forma como se produce en las condiciones reales de instalación en servicio.

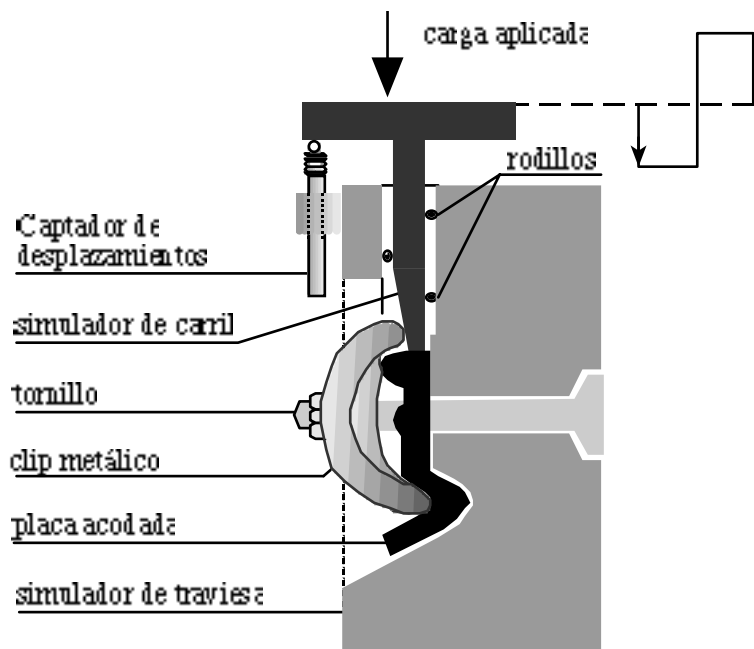


Figura 6.7.- Unidad de aplicación de carga.

Los ensayos se realizaron en una máquina universal de ensayos mecánicos de 250 kN de capacidad dinámica, dotada del software preciso para su control. Las deformaciones de las piezas, con respecto del simulador de la traviesa, se midieron por medio de un captador de desplazamientos de ± 10 mm de carrera, como el indicado en el esquema de la Figura 6.7, siendo registrados con un adecuado sistema de adquisición de datos. El calentamiento generado en las piezas por la acción fluctuante de las cargas fue obtenido por medio de un medidor de

temperatura, introduciendo una resistencia sensitiva entre los nervios de la pieza aislante.

3.3 Resultados

De los ensayos realizados y despreciando la pequeña deformación que experimenta la pieza de transmisión de esfuerzos, se determinaron cada 1000 ciclos la onda de variación de longitud de la pieza (δ) medida por el captador de desplazamientos, correspondiente a su respuesta frente a los distintos escalones de carga aplicados (ΔP). Con estos valores se obtienen sus envolventes, determinadas a partir de los valores de pico ($\delta_{\max}$ y $\delta_{\min}$) adquiridos a lo largo del ensayo. El comportamiento típico es el que se observa en el gráfico de la Figura 6.8 donde, asimismo, se representan los valores de variación de fuerza aplicados en cada escalón de carga.

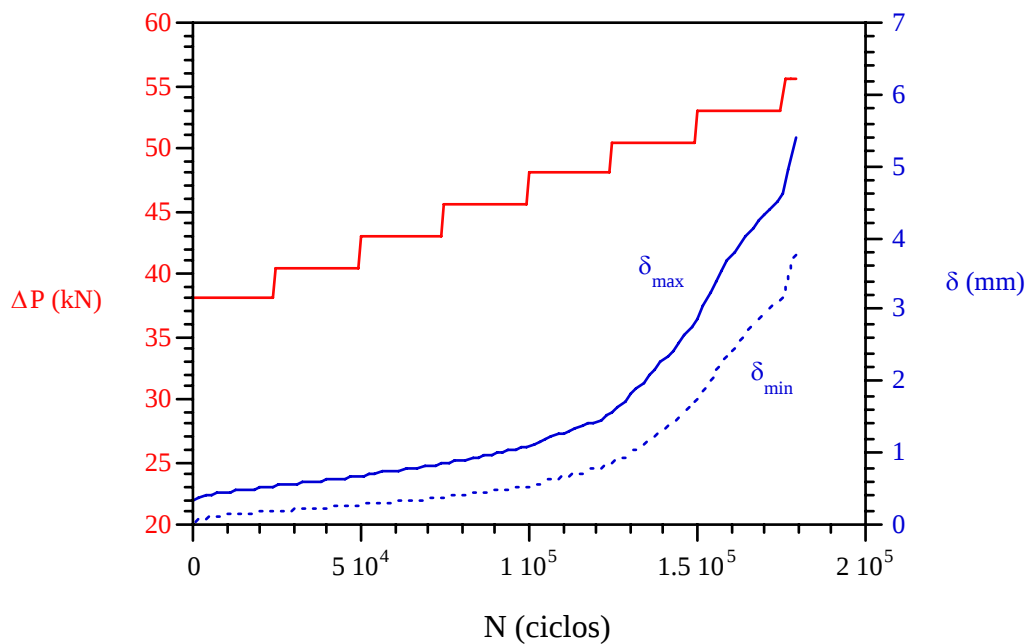


Figura 6.8.- Variación de carga aplicada (ΔP) y variaciones de longitud (δ) medidas a lo largo del ensayo

En el gráfico de la Figura 6.9 se muestra la evolución típica de la temperatura medida en las piezas en función de la variación de la fuerza en cada escalón de carga aplicado a lo largo del ensayo de fatiga.

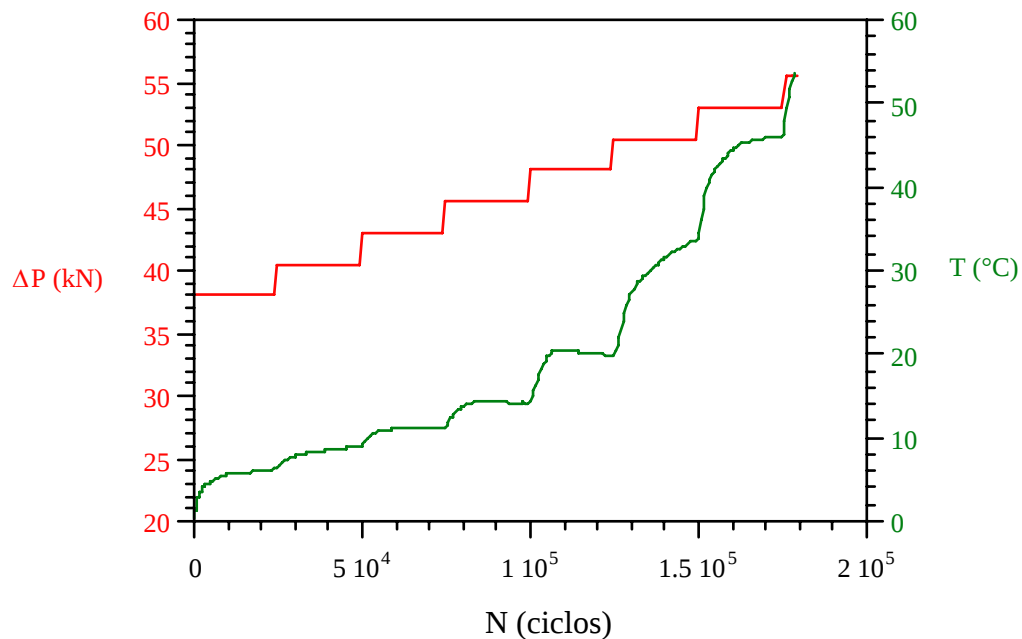


Figura 6.9.- Variación de carga aplicada (ΔP) y evolución de temperatura (T)

En los registros deformación-ciclos (δ - N) se observa la existencia de dos tramos distinguibles, que pueden asociarse a dos comportamientos diferentes ajustables por dos rectas. El punto de corte de las rectas, así definido, se identifica como el valor correspondiente al número de ciclos crítico (N_c) a partir del cual la deformación y la temperatura en el material pierden su estabilidad y crecen rápidamente durante la etapa que precede a la rotura o deterioro excesivo de la pieza ensayada. El valor de deformación crítica se denomina δ_c . De este modo, es posible establecer a partir de las consideraciones previas un nivel de variación de cargas crítico, ΔP_c , que determina el valor de la resistencia a la fatiga del material, gráficamente expresado en la Figura 6.10. Para niveles de variación de esfuerzos superiores a ΔP_c el material desarrolla zonas de propagación inestable que producen el fallo del componente por fatiga mecánica y térmica. El límite de fatiga obtenido según el método Locati, ΔP_c , fue contrastado con el hallado a partir de la curva de Wöhler, verificándose su coincidencia [17].

En la Tabla 6.8 se indica, para cada modelo de pieza analizada, los niveles de deformación y de carga críticos obtenidos en los ensayos de fatiga realizados. Este último es el que determina el límite de endurencia del material inyectado en la pieza.

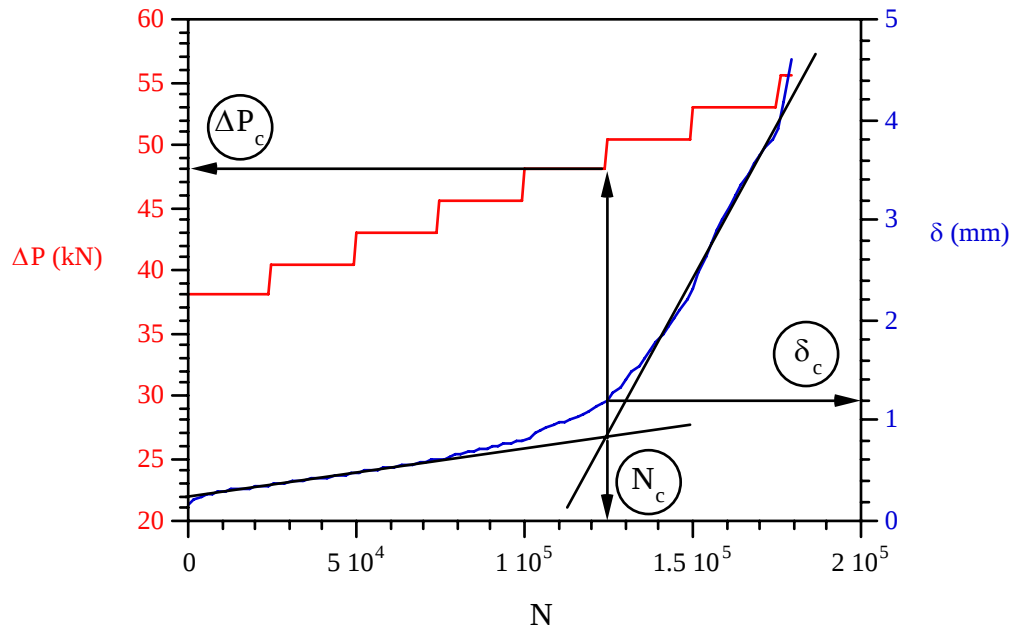


Figura 6.10.- Determinación del límite de fatiga o endurencia (ΔP_c)

Tabla 6.8.- Parámetros críticos.

Código	δ_c (mm)	ΔP_c (kN)
M0 (6)	1.14	48.00
M1 (6)	1.33	38.00
M1 (66)	1.10	43.00
M2 (6)	1.10	43.00
M2 (66)	1.12	50.50

3.4 Análisis del comportamiento en fatiga

Para poder realizar un análisis en el marco de la modelización establecida en esta Tesis sobre el material inyectado en probeta normalizada, se procedió a valorar una medida de deformación de las placas acodadas en base a la longitud de referencia, mostrada en la Figura 6.11, y obtenida del plano de RENFE que especifica su geometría [105], y a la medida aportada por el captador de desplazamientos empleado en los ensayos de fatiga realizados sobre las placas acodadas.

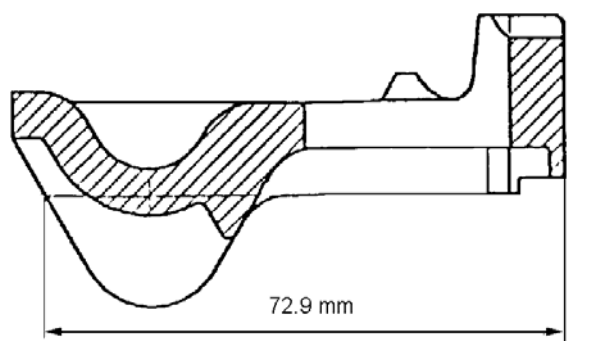


Figura 6.11.- Base de medida para determinar deformaciones en placa acodada

Atendiendo a este criterio de medida de deformación, en los gráficos de las Figuras 6.12 a 6.15 se ha representado la evolución del valor máximo de la envolvente de las ondas de deformación ($\varepsilon_{\text{máx}}$) de las diferentes placas acodadas ensayadas, identificadas como M0(6), M1(66), M2(6) y M2(66), así como la correspondiente velocidad de deformación ($d\varepsilon/dN$), todo ello en función del número de ciclos aplicado (N) en cada escalón del ensayo Locati.

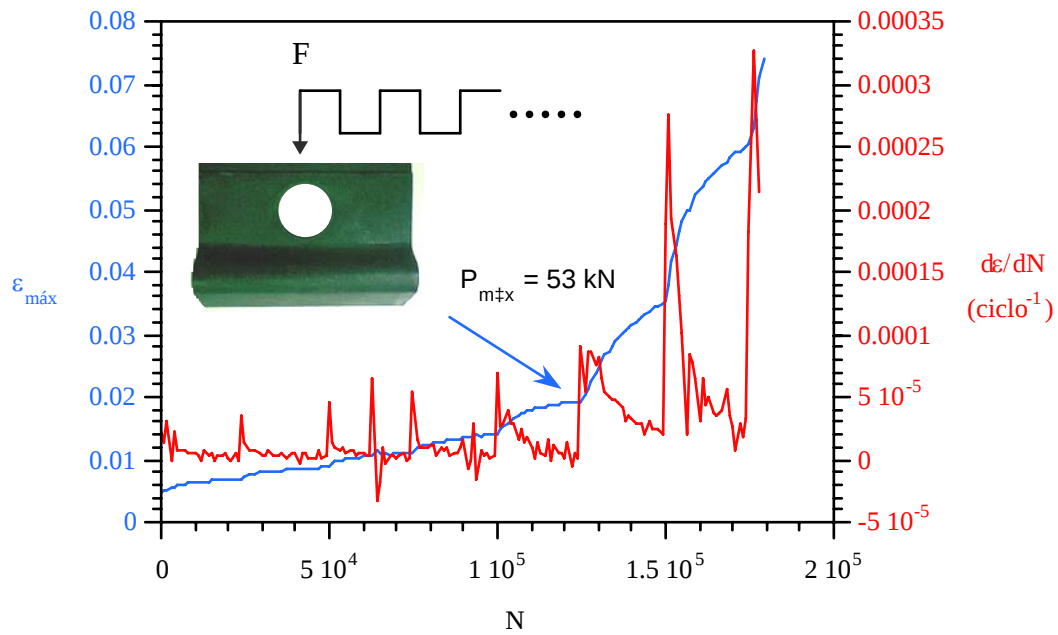


Figura 6.12.- Deformación máxima y velocidad de deformación, M0(6)

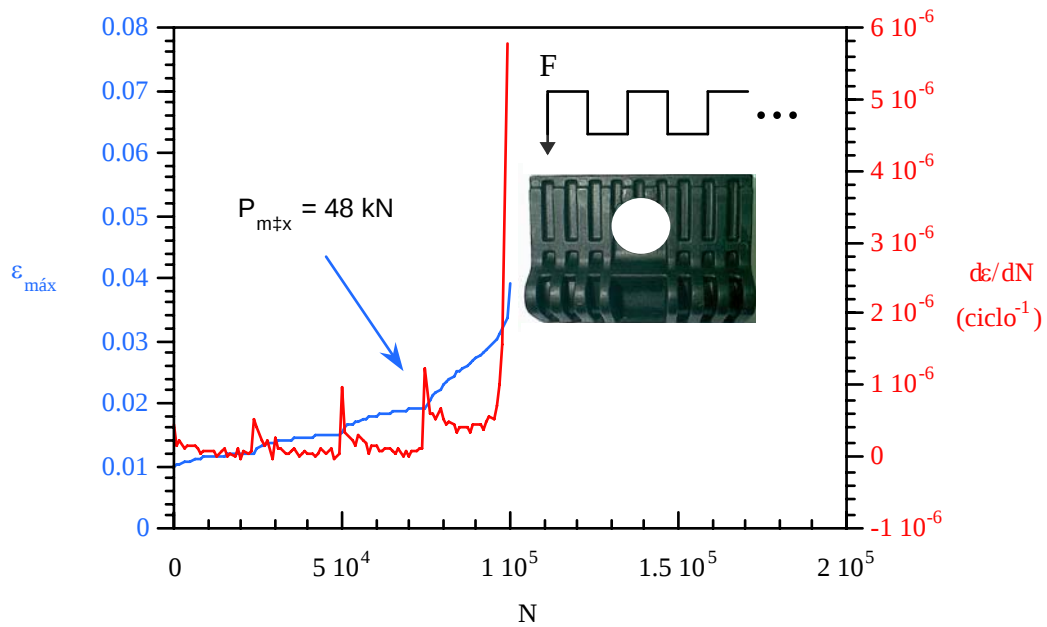


Figura 6.13.- Deformación máxima y velocidad de deformación, M1(66)

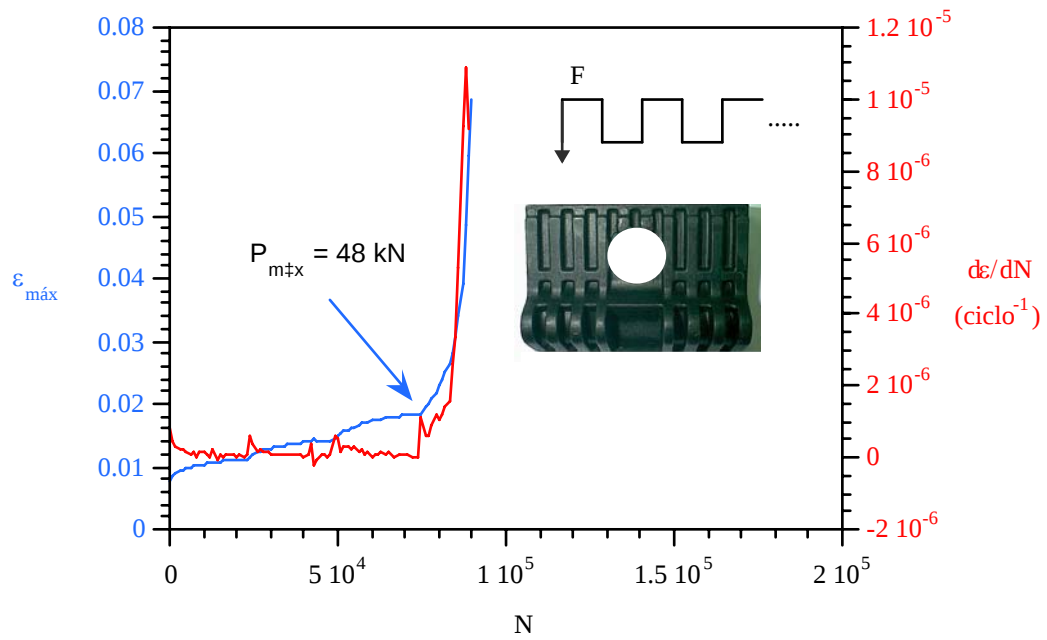


Figura 6.14.- Deformación máxima y velocidad de deformación, M2(6)

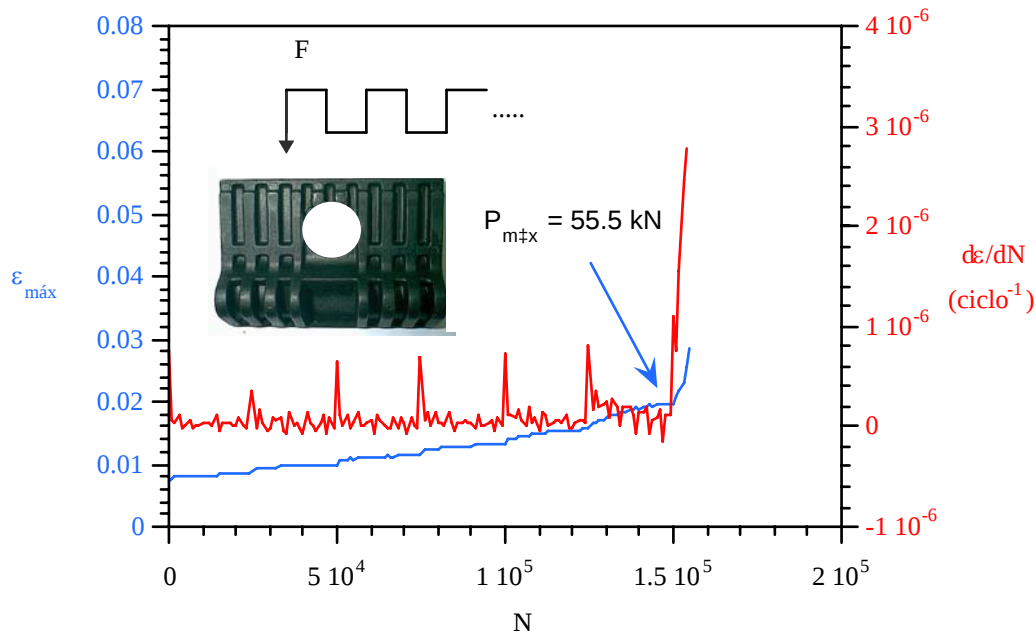


Figura 6.15.- Deformación máxima y velocidad de deformación, M2(66)

En todos los casos se observa que, en cada escalón de carga dado, la deformación crece de forma continua aunque la velocidad de deformación se estabiliza e incluso muestra una tendencia a decrecer, de tal forma que esta última tiende a ser igual, o incluso menor, a medida que se van aplicando los distintos escalones de carga, a pesar del incremento en la carga máxima.

Este comportamiento se rompe a partir de un determinado escalón para el cual, aunque la velocidad de deformación se estabilice, lo hace para valores mayores a los que lo hacía en escalones previos, indicando ya un posible efecto de daño en el material que hace superar los mecanismos propios de fluencia pura del estado I de la modelización desarrollada. En todos los gráficos se ha indicado con una flecha el instante, o comienzo de escalón de ondas de carga, para el cual la velocidad de deformación no es capaz de recuperar el valor de su nivel en los primeros trenes de ondas, una vez transcurridos los primeros ciclos de carga en cada escalón sobre la placa acodada. Asimismo, se ha indicado, en cada uno de ellos, la fuerza máxima

correspondiente a dicho escalón de carga, en el que se supone que se inician mecanismos de daño conducentes al fallo final.

En la Tabla 6.9 se muestra, para cada uno de los casos analizados, el valor de la deformación existente en ese punto considerado como crítico (ε_C) y el valor de la fuerza máxima donde se originan los mecanismos de daño ($P_{m\acute{a}x}$). Con él se alcanza el inicio de la zona de fluencia acelerada que conduce a la inestabilidad del sistema.

Tabla 6.9.- Valores de ε_C y $P_{m\acute{a}x}$ para los distintos modelos de placa acodada.

Placa acodada	ε_C	$P_{m\acute{a}x}$ (kN)
M0 (6)	0.0196	53.0
M1 (66)	0.0193	48.0
M2 (6)	0.0186	48.0
M2 (66)	0.0197	55.5

La diferencia entre los valores de ΔP_C indicados en la Tabla 6.8, que determinan la resistencia a fatiga de cada componente analizado, y de $P_{m\acute{a}x}$ se establece en 5 kN, que se corresponde con el valor de la fuerza mínima estipulada para los escalones de carga aplicados en todos los ensayos de fatiga realizados.

Los valores de deformación crítica, ε_C , son prácticamente constantes con independencia del modelo y del material de la matriz. Los valores encontrados, $1.93 \pm 0.05\%$, se sitúan en el entorno próximo de aquél que fue determinado con las probetas normalizadas empleadas en esta Tesis, para la primera de las transiciones del comportamiento dinámico, a partir de cual tenía lugar la nucleación homogénea de la pseudo-fisuración o *crazing* en el material (2.2% para la misma cantidad de refuerzo). En la Tabla 6.9, se pone de manifiesto que los resultados hallados de deformación crítica, ε_C , se muestran aparentemente poco dependientes tanto de la

geometría de las muestras, piezas compactas o nervadas, como de la matriz, sea PA 6 ó 6.6.

En todos los casos la evolución térmica en las piezas siguió una pauta paralela a la de su deformación, como muestra, de modo representativo, el gráfico de la Figura 6.16 correspondiente a la placa M0(6). Se observa cómo la temperatura se estabiliza, con independencia de que esté por encima o por debajo de la de transición vítrea, T_g , hasta que se llega al punto de inicio de daño, en cuyo escalón ya no se produce la estabilización térmica. Este resultado muestra la fuerte dependencia entre el comportamiento mecánico de las placas, y los efectos térmicos asociados al proceso de la fatiga, destacándose, en particular, la correspondencia observada entre estabilidad mecánica y térmica en los escalones anteriores a la situación crítica.

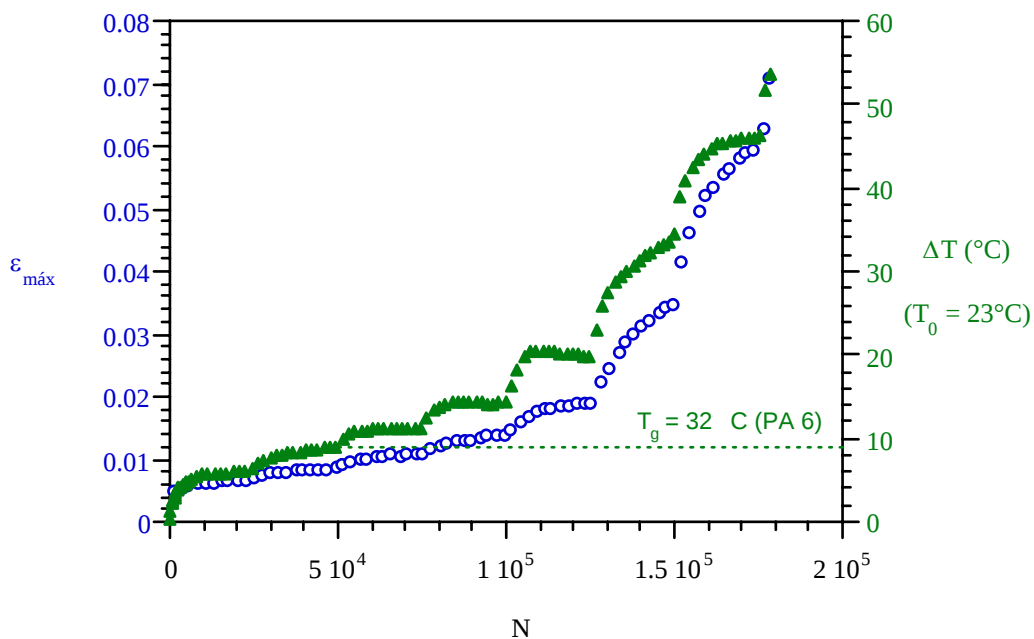


Figura 6.16.- Deformación máxima y temperatura superficial de la placa M0(6).

En el gráfico de la Figura 6.17 se presenta un detalle del escalón de carga en el que se produce la inestabilidad del sistema que precede a la rotura o deformación excesiva de la placa acodada M1(66). En este caso, se puede apreciar, el tramo primero de la curva de fluencia transitoria donde la velocidad de deformación en la placa es decreciente (indicado como I en la figura), el tramo segundo (II) donde la velocidad de deformación permanece prácticamente constante, pero mayor que cero, y el tercer tramo (III) de fluencia acelerada, caracterizado por un importante crecimiento de la velocidad de deformación en la placa acodada, que precede a su inestabilidad final.

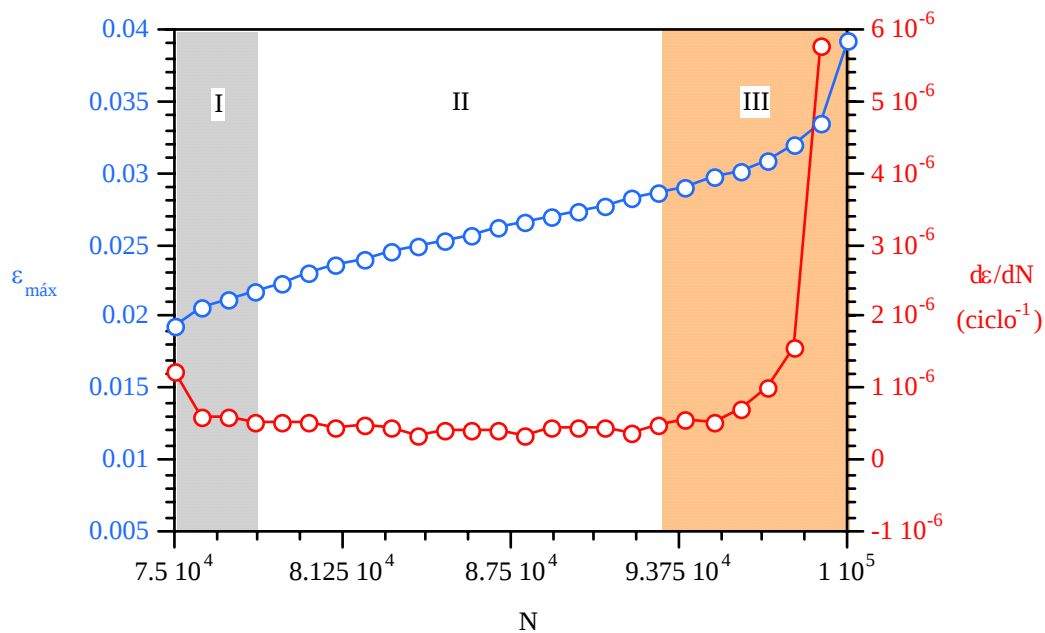


Figura 6.17.- Etapas de fluencia-fatiga, M1(66)

3.5 Aplicación: Estudio del efecto de la frecuencia

La fuerte dependencia térmica, en el comportamiento mecánico del material con que son inyectadas las placas acodadas, impone la necesidad de analizar el efecto de la frecuencia de aplicación de las cargas sobre las mismas, que incide directamente en la velocidad de calentamiento. Para ello se realizaron ensayos de fatiga convencional o continuada, sobre las placas acodadas aligeradas M2(66), con $\Delta P = 45$ kN ($P_{\max} = 50$ kN), a las frecuencias de 3, 5 y 8 Hz. En el gráfico de la Figura 6.18 se representan los valores máximos de las ondas de deformación medidos junto con la evolución térmica obtenida en cada caso. Por otro lado, en el gráfico de la Figura 6.19 se presenta la evolución de la velocidad de deformación, junto con la de la propia deformación, para cada una de las frecuencias analizadas.

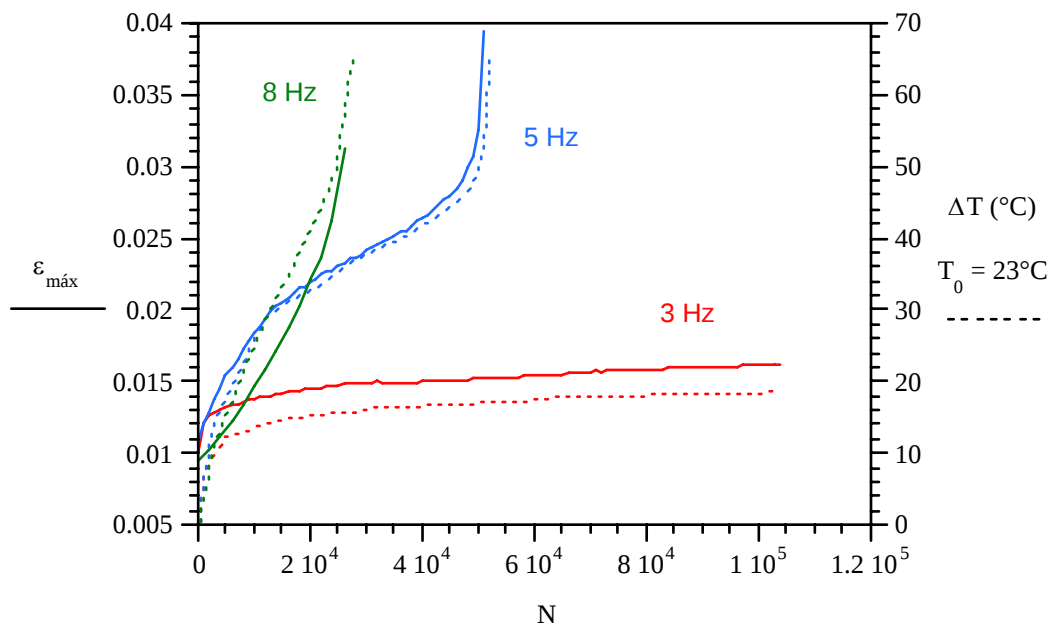


Figura 6.18.- Efecto de la frecuencia y evolución térmica, M2(66).

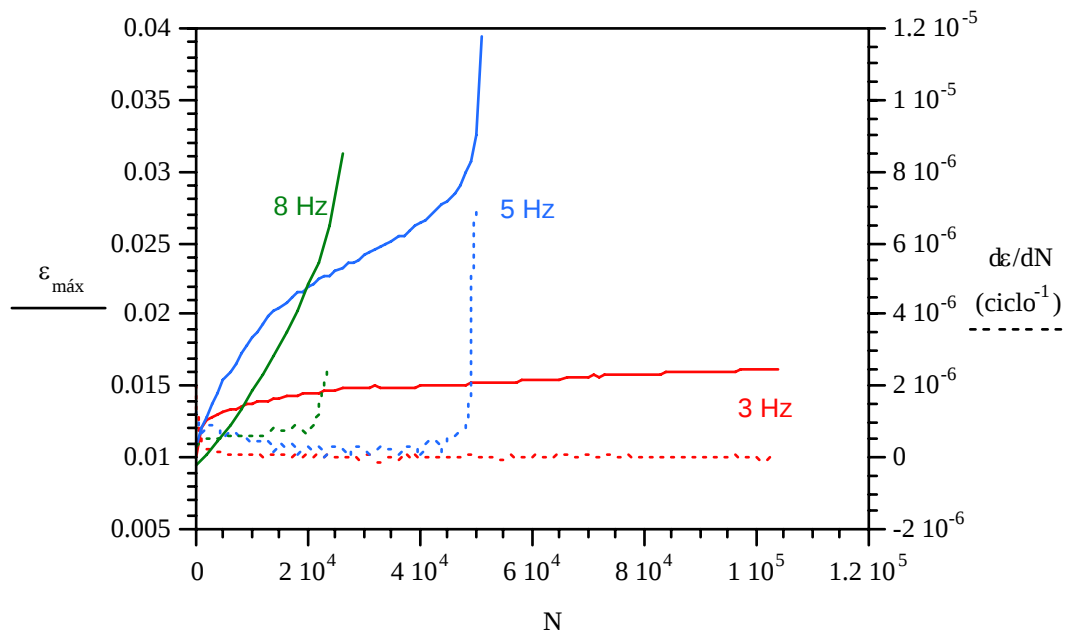


Figura 6.19.- Efecto de la frecuencia y evolución de la velocidad de deformación, $M2(66)$.

Los diagramas muestran que, para la frecuencia más baja, los niveles de deformación se mantienen constantes, coincidiendo con una estabilización de temperatura durante todo el ensayo, de acuerdo con lo previamente obtenido de que para esta frecuencia, 3 Hz, $\Delta P_C = 50.5$ kN. En este caso, la deformación máxima y constante registrada por la placa acodada, $\delta_{\max} = 0.0162$, no alcanzó el valor correspondiente al de las condiciones críticas y, por lo tanto, mantuvo intactas sus prestaciones mecánicas a lo largo de la duración de la prueba, corroborándose de este modo los resultados desarrollados a lo largo de esta Tesis.

Sin embargo, cuanto más elevada es la frecuencia del ensayo mayor es la velocidad de calentamiento, incidiendo en una velocidad de crecimiento de deformación mayor que conduce a las condiciones críticas en un número de ciclos más bajo. En estos casos, los tres tramos del comportamiento general del acoplamiento entre los fenómenos de fatiga y fluencia aparecen, si bien lo hacen en instantes diferentes pero para temperaturas próximas. En la Tabla 6.10 se indican los valores de deformación crítica que establecen el tránsito entre las etapas de la modelización realizada (ε_{I-II} y ε_{II-III}). Se puede apreciar que, de nuevo, sólo en aquellos casos en los que la deformación alcanza los valores próximos a los definidos con anterioridad como críticos, se produce el daño generalizado, primero, y la inestabilidad a escala local, posteriormente.

Tabla 6.10.- Deformaciones críticas a diferentes frecuencias.

Placa acodada	ε_{I-II}	ε_{II-III}
M2 (66)		
3 Hz	-----	-----
5 Hz	0.021	0.027
8 Hz	0.017	0.025

4 APLICACIÓN DEL MODELO DE COMPORTAMIENTO A PROBETAS ENTALLADAS

El comportamiento en fatiga modelizado corresponde a probetas sin defectos previos. Su aplicabilidad al establecimiento de criterios macroestructurales de diseño de componentes ante procesos de fatiga se ha comprobado en el apartado anterior, con independencia de la presencia o no de elementos nervados en su definición morfológica que, en cualquier caso, no han justificado una variación en los micromecanismos observados hasta rotura.

Sin embargo, al venir limitados los diferentes estados de comportamiento en fatiga por valores críticos de deformación, y al ser ésta amplificada localmente por la presencia de zonas entalladas definidas en el diseño o de defectos de fabricación, el comportamiento global de estas piezas o componentes puede verse afectado por la evolución local de micromecanismos de fisuración del fondo de las entallas o defectos.

4.1 Proceso experimental

Para comprobar esta situación se han ensayado a las temperaturas de 23, 28, 33, 38 y 43 °C probetas de tracción, como las anteriores, del material PR35 (poliamida 6.6 reforzada con un 35% en peso de fibra corta de vidrio), previamente entalladas. Para producir las entallas de un modo controlado sobre las probetas de tracción se empleó una cuchilla afilada cuyo avance en el seno del material se estableció a partir de la lectura de un comparador incorporado al elemento de carga que lo provocaba. Bajo estas condiciones controladas, se dotó a las probetas de entallas de profundidad próxima a los 2 mm.

El nivel tensional aplicado sobre las probetas se mantuvo constante a lo largo de cada prueba, bajo un esfuerzo máximo de 41.7 MPa y uno mínimo de 8.3 MPa,

correspondientes al 25 y 5% de la tensión de rotura dinámica del material a temperatura ambiente en probeta sin entallar. La aplicación de los esfuerzos se realizó a la frecuencia de 5 Hz.

Las probetas fueron ensayadas con los parámetros mencionados en una cámara climática con un tiempo de atemperamiento mínimo, previo al comienzo de los ensayos, de 45 minutos para asegurar una total homogeneidad en la temperatura de la probeta a ensayar.

Durante la realización de los ensayos se registró la evolución de la deformación y de la temperatura en el material en cada instante, empleando los métodos y elementos de medida usados en anteriores determinaciones.

4.2 Resultados y análisis del comportamiento en fatiga

En los gráficos de las Figuras 6.20 y 6.21 se muestran en doble eje de ordenadas los registros de la evolución de la deformación y de la temperatura en función del número de ciclos aplicado, así como la deformación y la velocidad de deformación correspondiente frente al mismo parámetro, para el nivel térmico inferior considerado en el estudio. Los resultados completos se presentan en los gráficos de las Figuras X.1 a X.8 del Anexo X de esta Tesis.

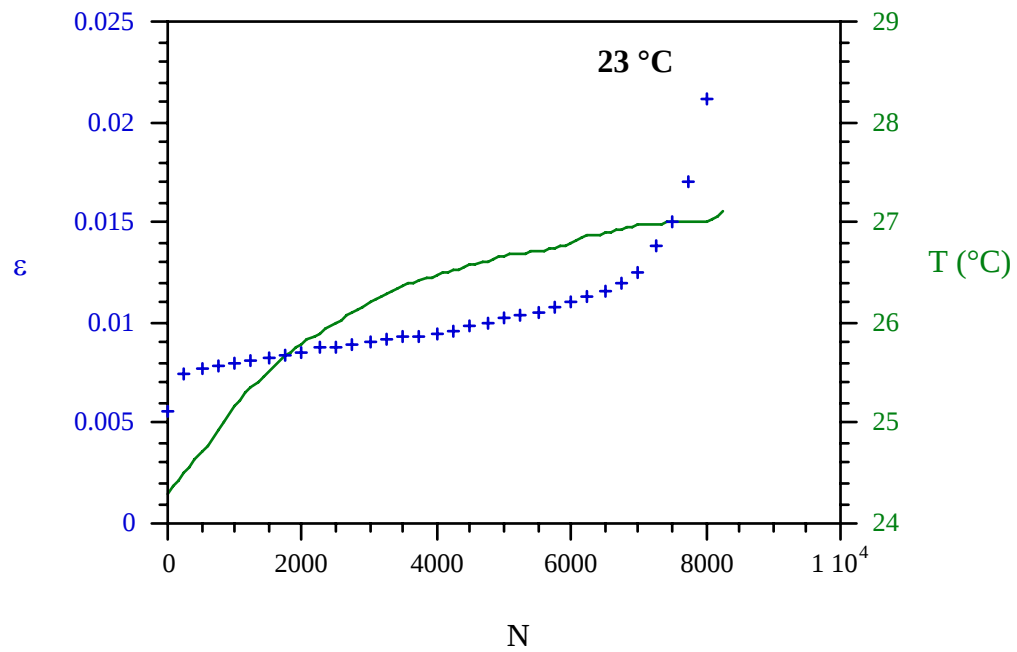


Figura 6.20.- Evolución de la deformación y temperatura para el ensayo de 23°C

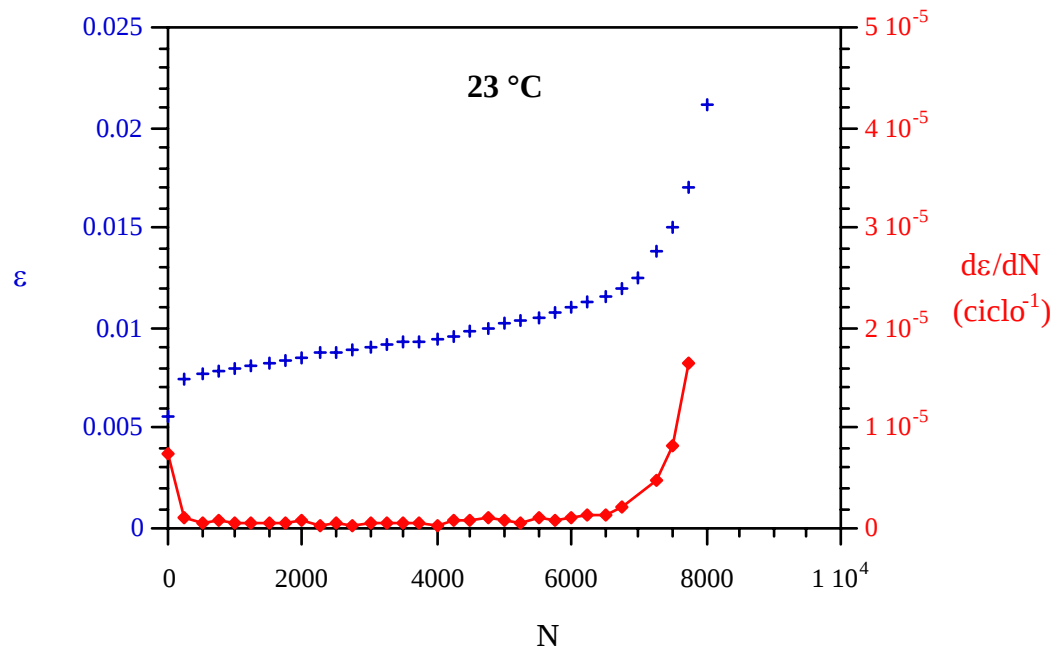


Figura 6.21.- Evolución de la deformación y velocidad de deformación para el ensayo de 23°C

Se puede apreciar que, en cada caso, y a tenor de la forma de las curvas de la velocidad de deformación con el número de ciclos aplicado, existe un acoplamiento inicial acusado del efecto mecánico de la fatiga con el de la fluencia, semejante al de las probetas sin entalla. De esta forma, se pueden distinguir, de nuevo, tres estados de comportamiento diferenciado en el material con sus correspondientes transiciones entre ellos, que se producen cuando el material presenta una determinada deformación crítica.

En la primera zona se aprecia una clara disminución en la velocidad de deformación del material, marcando la etapa de fluencia-fatiga transitoria. A continuación, tras una primera transición (I-II), se alcanza la segunda etapa de comportamiento estacionario, en la que el material se deforma con una velocidad prácticamente constante hasta alcanzar las condiciones de deformación críticas para las que se produce la segunda transición (II-III), que precede a la etapa tercera caracterizada por presentar un comportamiento mecánico de deformación acelerado, precursor de su rotura inminente.

En la Tabla 6.11 se indican, para cada ensayo, los valores de los niveles de deformación alcanzados por el material que determinan las transiciones en las tres zonas observadas, pudiéndose apreciar que, para condiciones de entalla equivalentes, existen niveles de deformación limitadores en el comportamiento del material prácticamente costantes. Así, los valores límites quedan condicionados por el tamaño del defecto o entalla presente, independientemente del nivel térmico ambiental que rodea al mismo, apenas variable durante los ensayos, ya que en ningún caso supera incrementos de 5°C.

Tabla 6.11.- Deformaciones de transición y ciclos a rotura.

T ensayo (°C)	ϵ_{I-II}	ϵ_{II-III}	N _{rotura}
23	0.0085	0.0110	8650
28	0.0070	0.0080	25000*

33	0.0100	0.0125	3700
38	0.0090	0.0120	3500
43	0.0105	0.0125	1300

* Tamaño de entalla inferior

De esta manera, el efecto de la temperatura, se reduce al acortamiento del tiempo necesario para que se alcancen los niveles de deformación críticos para los que se producen las transiciones en el comportamiento mecánico del material, considerando tamaños de defectos o fisuras iguales o equivalentes, y, en consecuencia, hace que se reduzca la vida en fatiga de un modo acusado, como se indica en la cuarta columna de la Tabla 6.11. Esta situación es propiciada por el incremento de flexibilidad asociada al aumento de la temperatura de trabajo del material.

4.3 Condiciones de rotura

Las observaciones realizadas sobre la superficie de rotura de las probetas ensayadas, a través de las imágenes obtenidas con microscopio electrónico de barrido, ponen de manifiesto la existencia de 4 zonas claramente diferenciables. En la Figura 6.22 se muestra un esquema de la sección representativa de las probetas rotas, en la que se incluye la identificación numérica de cada una de las zonas distinguibles en la superficie, según el orden de su generación, conforme a la dirección de avance de la grieta, de derecha a izquierda.

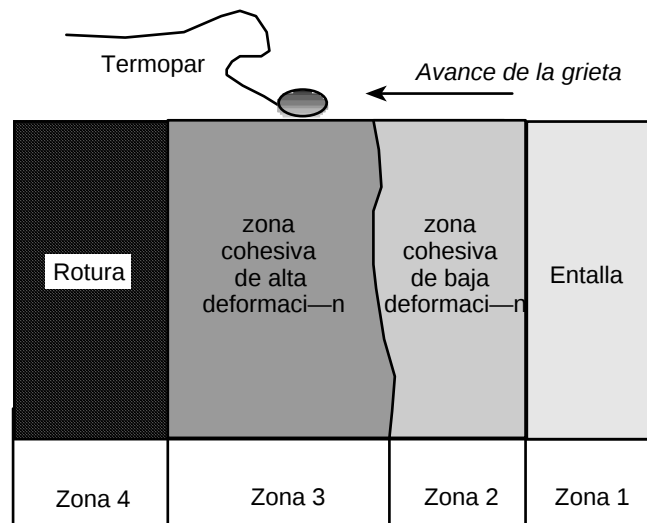
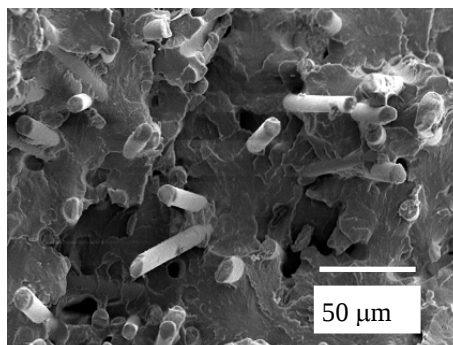
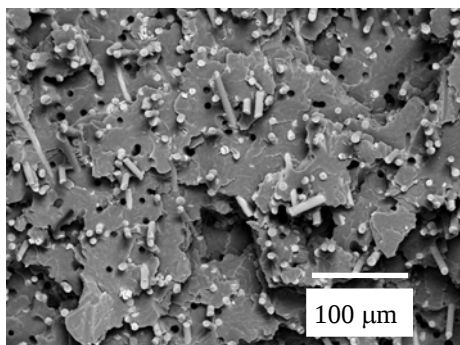


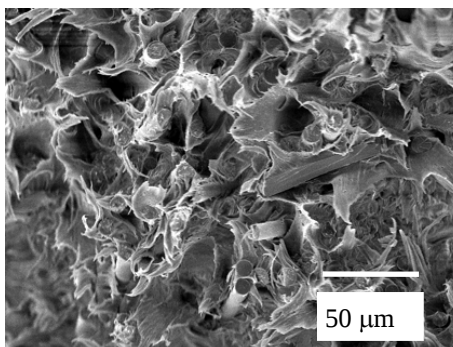
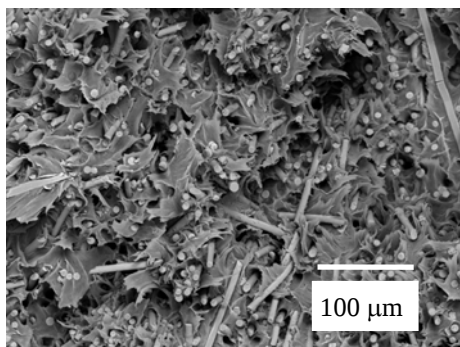
Figura 6.22.- Esquema del avance de la grieta.

En las microfractografías de la Figura 6.23 realizadas desde una posición cenital, a 200 aumentos (izquierda) y a 500 aumentos (derecha), se aprecia el aspecto que ofrece la morfología de la sección recta de las regiones de cada una de las zonas que se han diferenciado en el esquema anterior. La zona 1, que presenta una morfología de aspecto liso, se corresponde con la entalla practicada en la probeta con la cuchilla finamente afilada. La zona 2, que corresponde al proceso inicial de daño, se establece bajo mecanismos de fatiga, durante los cuales no se han producido incrementos de temperatura significativos (ver el gráfico de la Figura 6.20 de este capítulo y los de las Figuras X.1, X.3, X.5 y X.7 del Anexo X de esta Tesis), lo que justifica su baja deformación. La zona 3 se identifica como la región en la que los mecanismos de *crazing* se manifiestan de forma más acusada. Estos mecanismos se encuentran propiciados por unas condiciones de deformación local por encima de las críticas para su nucleación y formación, que se alcanzan por los efectos locales propios de la existencia de una fisura a los que deben añadirse el incremento térmico asociado al proceso de fatiga. Al avanzar el frente de esta zona se alcanza la situación crítica de tensión de pico en la zona sana inmediata, por lo que se genera la rotura final, en cuyo instante se desarrolla la morfología de rotura

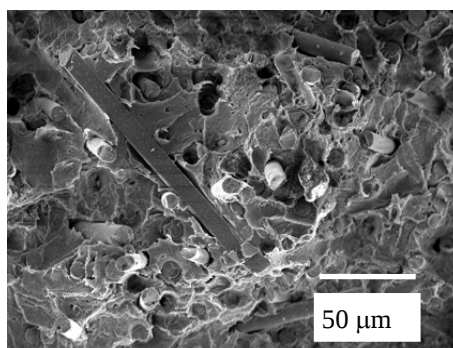
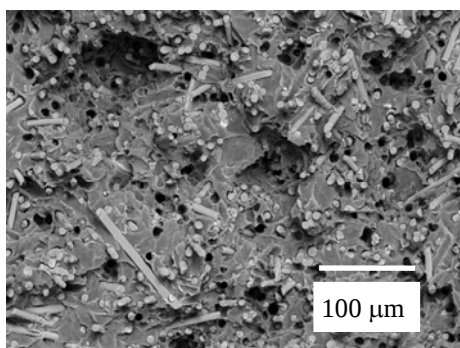
de las zonas 2 y 3 (*crazes*) y la característica de este material en el proceso de rotura frágil último de las probetas, que se observa en la zona 4.



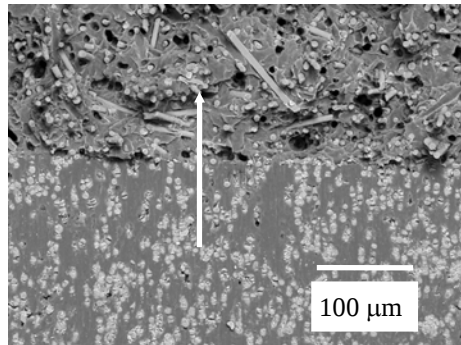
Zona 4



Zona 3



Zona 2



Zona 1

Figura 6.23.- *Morfología de la superficie de fractura en las 4 zonas.*

Un estudio del estado tensional de estas probetas en el instante de la rotura, semejante al realizado en el apartado 6 del capítulo 5 y en el apartado 2.4 de éste, si bien, en este caso, contemplando una zona entallada (zona 1), incapaz de transmitir carga, además de una zona cohesiva (zona 2 + zona 3) y un ligamento (zona 4), se recoge en el apartado IX.4 del Anexo IX de esta Tesis.

Con la formulación desarrollada se puede deducir el valor de las tensiones cohesivas medias, transmitidas por la zona cohesiva (zona 2 + zona 3), considerando el mismo criterio previamente establecido para la rotura en esta Tesis, es decir, que la tensión de pico alcance la tensión propia de rotura del material para la temperatura en que se encuentra la probeta. Teniendo en cuenta las condiciones fractográficas, de acuerdo con el esquema de la Figura 6.24, las de sollicitación y las térmicas de las probetas en el instante de la rotura, que se recogen en la Tabla 6.12, se obtienen unas tensiones cohesivas, cuyos valores se recogen, también, en la última columna de dicha tabla, y se representan en función de la temperatura de rotura en el gráfico de la Figura 6.25.

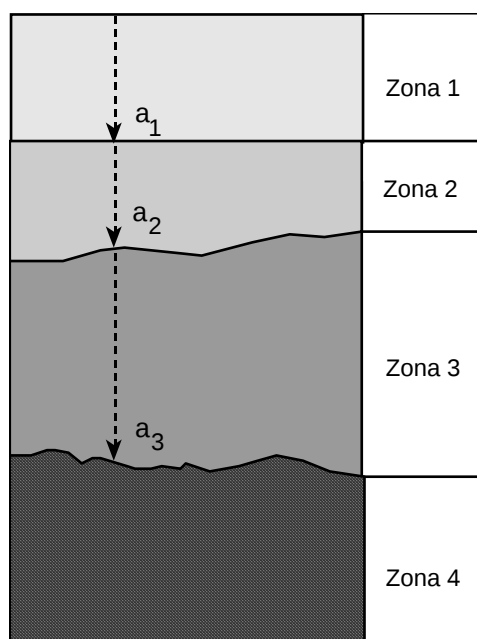
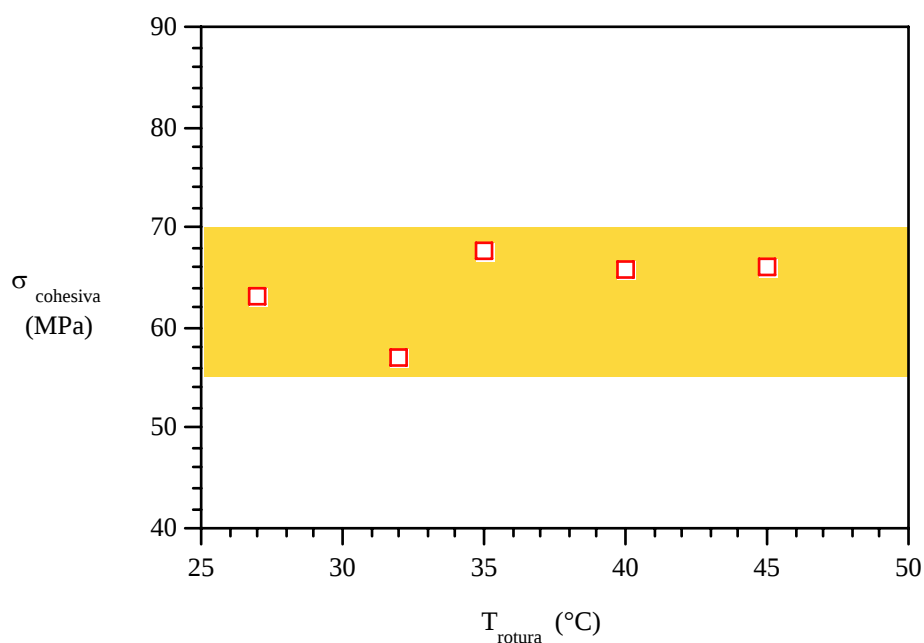


Figura 6.24.- Longitudes de fisura medidas.

Tabla 6.12.- Longitudes de fisura determinadas por MEB y tensiones cohesivas.

$T_{\text{rotura}} (^{\circ}\text{C})$	a_1 (mm)	Longitud de la zona cohesiva $\Delta a = a_3 - a_1$ (mm)	Área de la zona cohesiva (mm^2)	σ_c (MPa)
27	1.94	5.08	20.32	63.24
32	1.50	6.25	25.00	57.15
35	2.09	5.34	21.36	67.77
40	2.01	5.58	22.32	65.92
45	2.01	6.53	26.12	66.09

**Figura 6.25.-** Valores de σ_c en función de la temperatura en la rotura.

En este caso, el efecto de la concentración de tensiones, que produce la presencia de la entalla, asociado con estados térmicos locales acusados y no detectables con los elementos de medida disponibles, reduce fuertemente, e incluso anula, la capacidad resistente de las fibras, generándose, en consecuencia, la respuesta cohesiva del material de la matriz en todo el rango de temperaturas analizado. De esta forma, se obtiene una zona de tensiones cohesivas de valor medio

prácticamente constante con la temperatura del ensayo, en el rango de 60 a 70 MPa, coincidente con el valor de la tensión de rotura de la matriz.

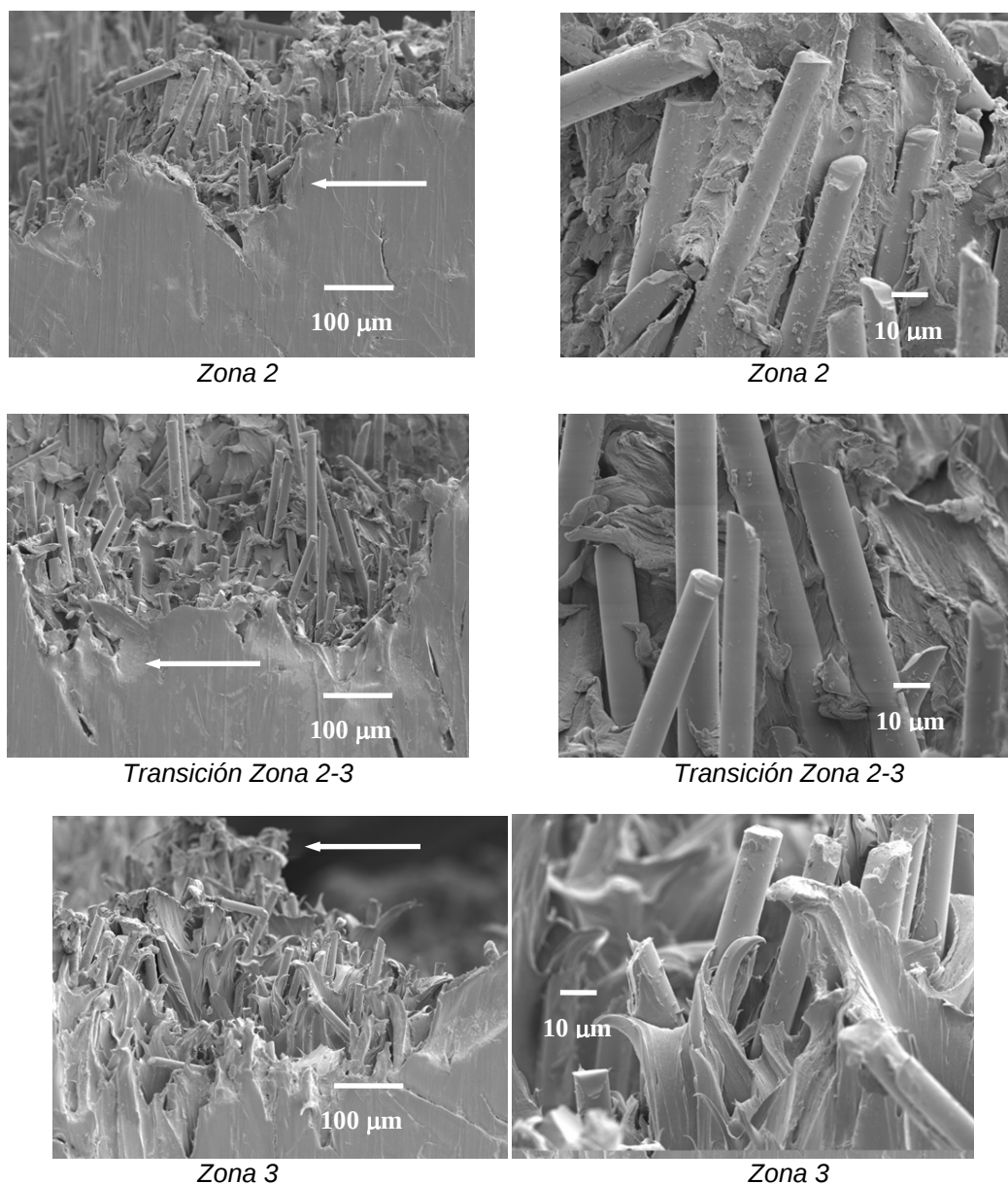
Por tanto, se establece que el efecto de la presencia de entallas produce una primera zona de fisuración cohesiva, dañada bajo mecanismos de rotura de baja deformación, que desencadenan un proceso último de generación de *crazes*, de mayor deformación, cuya extensión global establece las condiciones propias de una rotura última frágil del ligamento residual. Es decir, la parte final del proceso de fatiga se asocia a mecanismos idénticos a los observados y modelizados para este material a lo largo de la Tesis.

4.4 Medida e identificación de los mecanismos de daño

La diferente morfología de las cuatro regiones o zonas, observadas en el análisis fractográfico, también puede apreciarse de forma visual desde un ángulo lateral inclinado, revelándose el distinto grado de deformación de la matriz, así como el diferente grado de adherencia de los constituyentes fibra-matriz de unas zonas a otras. De esta forma, en las microfractografías de la Figura 6.26 se presenta el aspecto de la morfología de la superficie de fractura de la probeta ensayada a 23°C, representativa del resto, y donde se muestran las diferentes regiones encontradas, y de alguna de las transiciones de unas zonas a otras a 250 aumentos, siendo la dirección de avance de la grieta de derecha a izquierda. Asimismo, de cada fractografía se presenta un detalle a 1000 aumentos.

Se puede observar, como era esperable en atención al comportamiento modelizado para el material, que es en la zona 3 en la que aparece, de forma más acusada, una banda de daño superficial, indicativa de la nucleación de *crazes*, próxima a la superficie final de rotura en la misma. Por ello, el estudio se ha complementado con ensayos de caracterización de la rugosidad superficial lateral de las probetas en cada una de las cuatro diferentes zonas, morfológicamente diferenciadas, encontradas a lo largo de la sección de rotura. La técnica empleada para determinar la rugosidad en la superficie lateral de las probetas fue la misma que la descrita en

el apartado 5.2.2 del capítulo 5 de esta Tesis, si bien, en esta ocasión, se determinó el parámetro RA en dos direcciones perpendiculares, es decir, en la dirección del eje de la probeta, paralela a la dirección del esfuerzo aplicado, y en la perpendicular a éste. La rugosidad se determinó con una medida única, debido a las limitaciones impuestas por el tamaño de las probetas, en cada una de las diferentes zonas, como se indica en los esquemas a y b de la Figura 6.27.



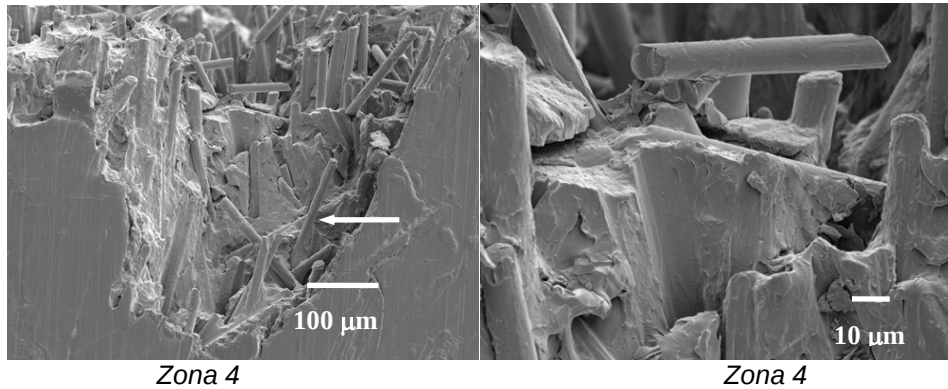


Figura 6.26.- Fractografía de la probeta ensayada a 23 °C.
Dirección de avance de la fisura

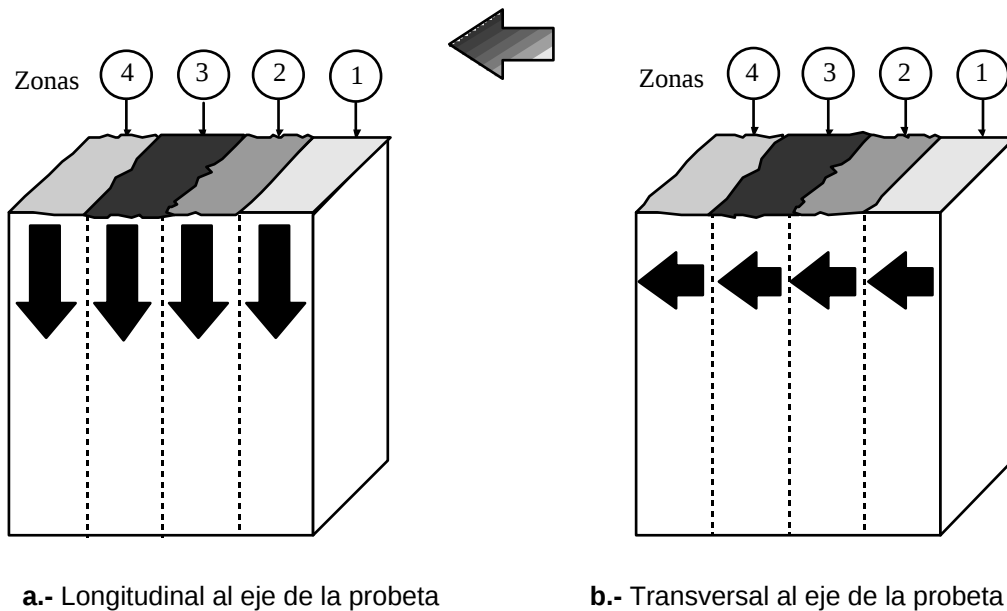


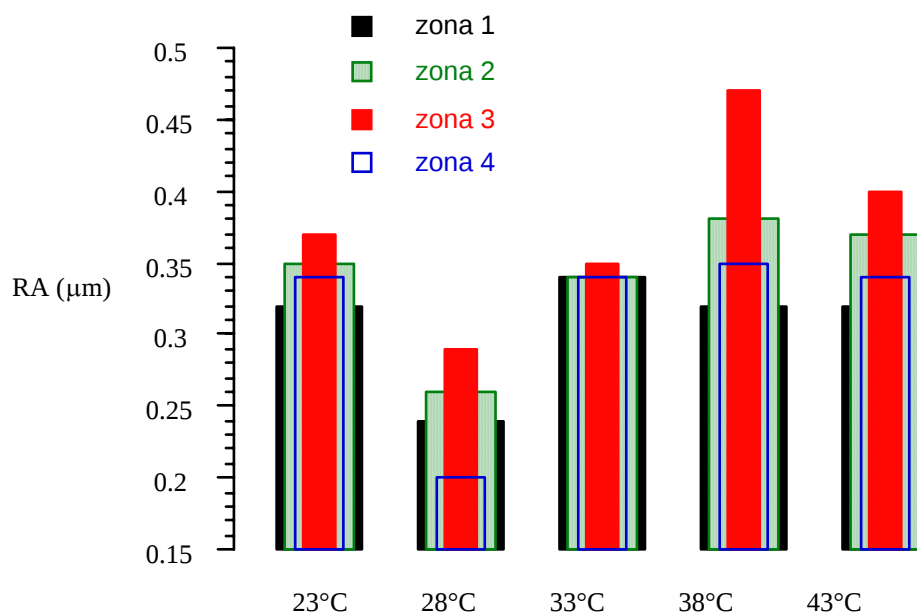
Figura 6.27.- Esquema de las zonas de muestreo de la rugosidad.

Las cortas longitudes de muestreo existentes para determinar la rugosidad de las probetas en el segundo caso (b), obligó a llevar a cabo un cambio en el rango de la longitud de palpación y, por lo tanto, en la calibración del rugosímetro, de tal forma que los parámetros empleados se reflejan en la Tabla 6.13, en comparación con los correspondientes al método previamente usado en esta Tesis (a).

Tabla 6.13.- *Parámetros de palpación para determinar la rugosidad.*

Parámetro	Caso a	Caso b
recorrido del palpador (mm)	5.6	1.75
velocidad del palpador (mm/s)	0.5	0.1
longitud eliminada en cada extremo (mm)	0.8 (x2)	0.25 (x2)
distancia evaluada (mm)	4	1.25

Los resultados correspondientes a la rugosidad longitudinal se presentan en forma de diagrama de barras en la Figura 6.28, indicándose, para cada temperatura ambiental de ensayo de fatiga, la rugosidad correspondiente a cada una de las zonas diferenciadas.



Fi

Figura 6.28.- *Rugosidad longitudinal bajo la superficie de rotura. Caso a.*

Desde el punto de vista cualitativo la rugosidad parte de un valor de referencia, coincidente con el encontrado en la zona 1, bajo la entalla, por la que no pasan las

líneas de fuerza aplicadas durante el ensayo de fatiga. Este valor en la mayor parte de los casos se sitúa en torno a $0.30\ \mu\text{m}$, semejante a los valores de referencia del material encontrados previamente en otros procesos experimentales de esta Tesis. La concentración de deformaciones que durante el ensayo afecta a las demás zonas, da lugar a una rugosidad mayor que la de referencia. La diferencia apenas es apreciable para la zona cohesiva de baja deformación (zona 2) y la de rotura (zona 4). La rugosidad alcanza un valor máximo en la región cohesiva de alta deformación de la muestra (zona 3), en la que la generación de *crazes* o pseudo-grietas llega a manifestarse en la superficie lateral. Este comportamiento es semejante al esperado, si bien, los valores medios obtenidos en esta zona cohesiva alcanzan valores menores a los observados en el material sin entalla una vez desarrollada toda la capacidad de nucleación de *crazes*, estado de comportamiento II, previo a la rotura. La diferencia, $0.35\text{-}0.45\ \mu\text{m}$ de estas probetas frente a $0.50\text{-}0.60\ \mu\text{m}$ de las probetas normalizadas, se puede justificar a través de la situación localizada del daño en las probetas entalladas frente a la distribución uniforme del mismo de las no entalladas.

Los resultados encontrados para la rugosidad de las probetas en la dirección transversal al eje de las mismas, de acuerdo con el esquema propuesto en la Figura 6.27b, presentan la misma tendencia que los valores anteriores, si bien, debido a la recalibración efectuada en el rugosímetro, los valores absolutos de RA se reducen en un factor promedio de 1.55. Los valores de rugosidad encontrados, en este caso, se recogen en el diagrama de barras de la Figura 6.29 en el que se representa el correspondiente valor en cada una de las cuatro zonas para cada una de las temperaturas de ensayo contempladas. En él se puede apreciar, además de la misma valoración cualitativa de las medidas longitudinales, que el aumento de la temperatura en el material, principalmente cuando sobrepasa el valor de la temperatura de transición vítrea, T_g , produce una tendencia al incremento en la rugosidad del mismo, aún cuando las diferencias no son lo suficientemente importantes como para poder diferenciarlas de la dispersión propia de las medidas realizadas. Esta tendencia es particularmente observable en la zona 3, en la que se

produce la mayor formación y posterior crecimiento de *craze*s característica de una deformación muy acusada.

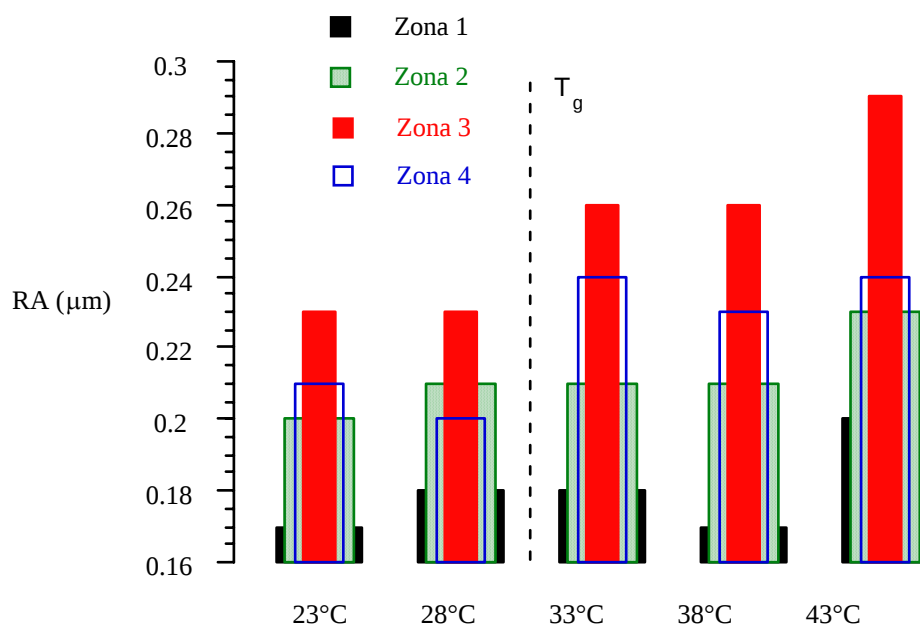


Figura 6.29.- Evolución de la rugosidad con la temperatura. Caso b.

Esta falta de coincidencia entre la rugosidad del material cuando alcanza el estado II modelizado, en el que se nuclean los *crazes*, y el de las zonas cohesivas, 2 y 3, de las probetas entalladas abre cierta incertidumbre sobre la correspondencia entre los tres estados de comportamiento, también observados en éstas últimas (Figura 6.21), y las zonas diferenciadas por su apariencia fractográfica, es decir, entalla y otras tres zonas.

Para tratar de establecer adecuadamente la correlación se han realizado a temperatura ambiente ensayos de fatiga, en las mismas condiciones anteriores de frecuencia y variación de carga, interrumpidos tras la aplicación de diferentes números de ciclos, 100, 500, 1000, 2000 y rotura, produciéndose ésta última a 8661 ciclos. El gráfico de la figura 6.30 muestra las curvas de deformación y la evolución térmica de cada probeta. En el gráfico de la Figura 6.31 se muestran las curvas de deformación y de la velocidad de deformación de la probeta llevada a rotura, con indicación de los tres estados I, II y III modelizados en función de la pendiente de la función $d\varepsilon/dN$.

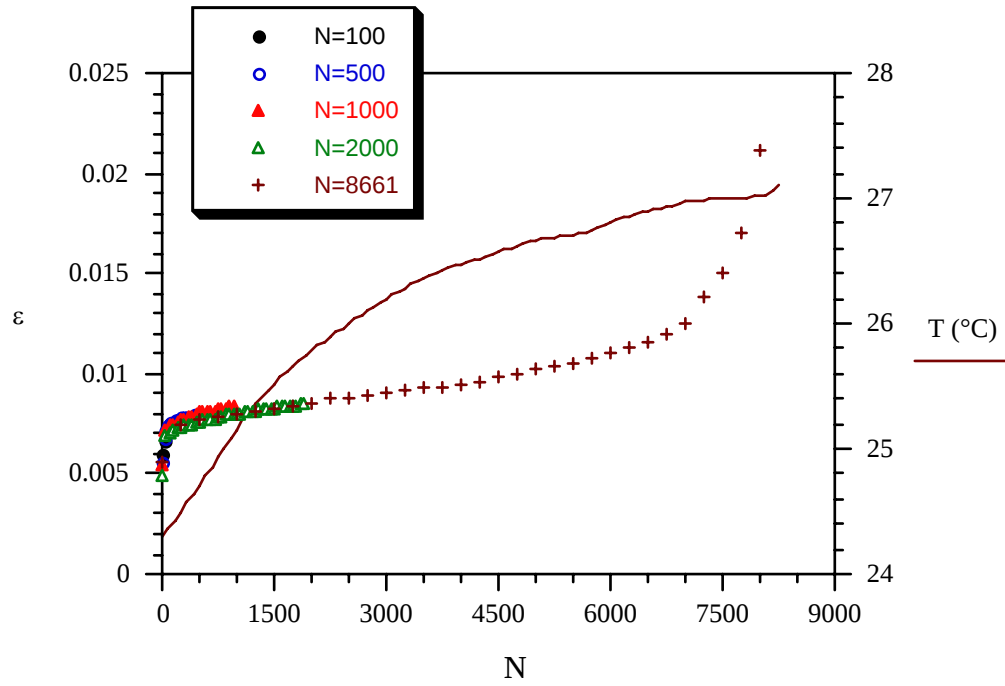


Figura 6.30.- Evolución de la deformación y de la temperatura.

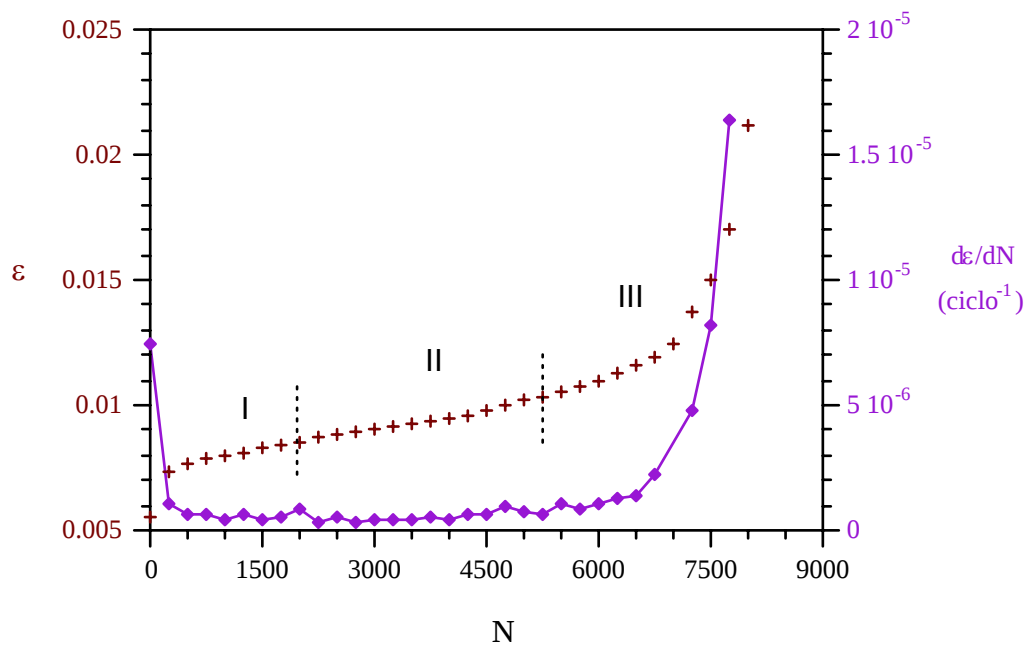
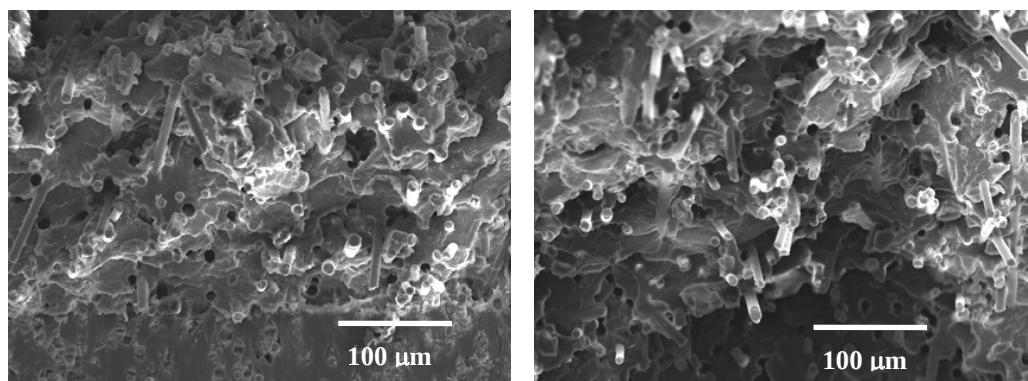


Figura 6.31.- Evolución de la deformación y de la velocidad de deformación.

Como se puede apreciar todas las probetas ensayadas con interrupción, excepto la llevada a 2000 ciclos, se detuvieron en el estado de comportamiento I. Al llevarlas a rotura en nitrógeno líquido sólo se identificaron mecanismos de rotura con baja deformación, como se puede apreciar en la fractografía de la Figura 6.32a, tomada a 250 aumentos, correspondiente a la probeta ensayada con 500 ciclos en una zona contigua a la entalla, y en la de la Figura 6.32b, tomada a los mismos aumentos, en una zona alejada de la entalla sin observarse zonas cohesivas por formación de crazes.



a.- zona de rotura por fatiga

b.- zona de rotura a baja temperatura

Figura 6.32.- Morfología de rotura de la probeta ensayada con 500 ciclos.

Sin embargo, la probeta llevada a 2000 ciclos, con una pequeña entrada en el estado II de comportamiento, ofrece ya al romperse en nitrógeno líquido una zona de rotura con desgarramientos de la matriz, propia de las zonas cohesivas de *crazing*, como se puede observar en la fractografía de la Figura 6.33, tomada a 250 aumentos. Finalmente, la probeta llevada a rotura desarrolló todas las zonas descritas para las probetas ensayadas con entalla anteriormente reseñadas.

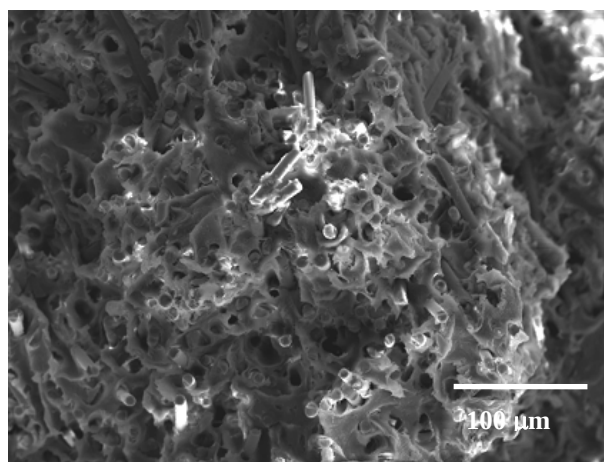


Figura 6.33.- Fractografía de la probeta ensayada con 2000 ciclos.

De acuerdo con lo anterior, el gráfico de la Figura 6.34 muestra, a partir de la evolución de la rigidez o módulo de elasticidad aparente, E_{ap} , de las probetas con el número de ciclos aplicados en cada caso, que la ensayada con 2000 ciclos se detiene previamente a la inestabilidad final. De todo ello, se puede asumir que alcanzada una cierta deformación, función de la longitud de entalla, a nivel local se tiene la deformación crítica para que el material alcance la nucleación acusada de mecanismos de *crazing*, los cuales se ponen de evidencia cuando se lleva bruscamente la probeta a rotura. Es decir, a partir del comportamiento en estado II, los mecanismos de daño acusados por *crazing* aparecen, generando una zona cohesiva como prolongación de la entalla preexistente.

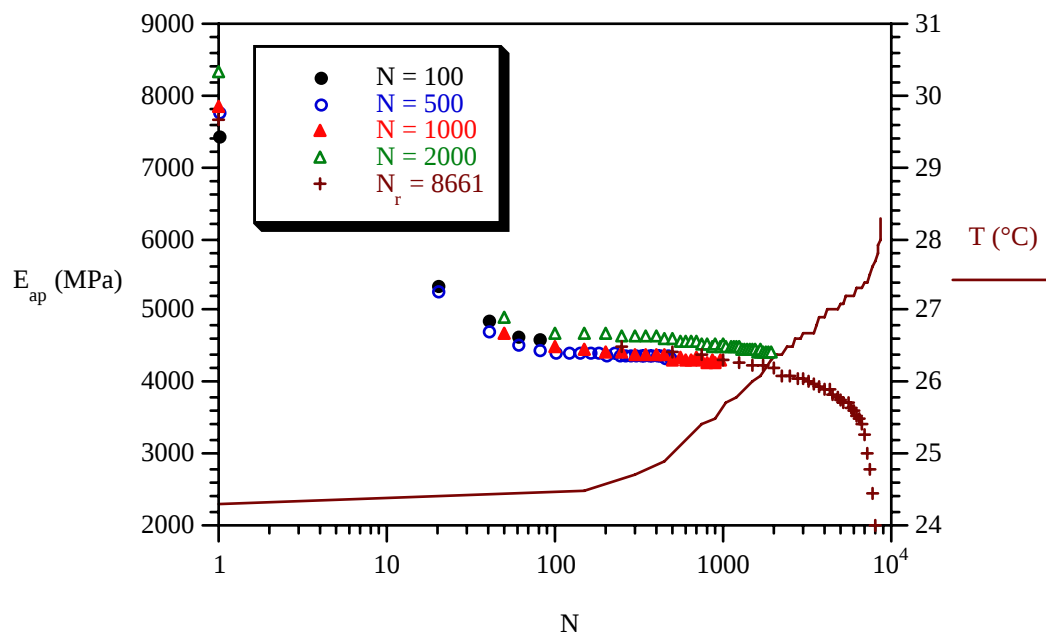


Figura 6.34.- Evolución de la rigidez de las probetas ensayadas.

5 CONSIDERACIONES FINALES

El estudio de los resultados obtenidos en este capítulo y su análisis han servido para contrastar y corroborar la bondad de la modelización del comportamiento en fatiga del material en estudio desarrollada a lo largo de esta Tesis, y poder hacerla extensible a condiciones de utilidad diversas.

Por un lado, se ha constatado que la aplicación del modelo de comportamiento establecido se puede generalizar de modo óptimo a todo tipo de materiales de características similares al estudiado, es decir, cualquier tipo de poliamida técnica o de ingeniería, reforzada con porcentajes de fibra de vidrio variables que, por sus características afines, sirvan para desempeñar una función mecánica de elevada responsabilidad.

Asimismo, se ha comprobado que el modelo propuesto se adapta adecuadamente al comportamiento en fatiga de componentes estructurales inyectados con el citado material, útiles en aplicaciones de ámbito ingenieril. A partir de las consideraciones propuestas con este modelo, que predice el comportamiento dinámico del material ante diferentes estados de sollicitación dinámica, es posible deducir conclusiones y criterios aplicables al diseño de los componentes y a la selección de los materiales que los conforman.

Finalmente, se ha verificado que el modelo de comportamiento en fatiga se puede aplicar para justificar los diferentes mecanismos de fisuración y daño exhibidos por el material cuando presenta defectos derivados de su empleo, propios del proceso de su fabricación o de condiciones de diseño que precisen entallas, ángulos vivos, agujeros o cualquier otro tipo de geometría que, potencialmente, pueda actuar como concentrador de tensiones.