

## 5. NORMAS APLICADAS A LOS ENSAYOS

Los ensayos se han realizado aplicando las correspondientes normas ASTM. Esta normativa ha sido desarrollada por la American Society for Testing and Materials (ASTM, de ahí la denominación) como estándares para la realización de ensayos de materiales estableciendo las condiciones y procedimientos más adecuados para la obtención de buenos resultados. Esta no es la única norma empleada para la realización de ensayos, existiendo otras muchas como por ejemplo las británicas (British Standards) y francesas. Se partirá de la normativa ASTM por su extendido uso a nivel internacional.

Las normas aplicables en cada caso se indican a continuación:

- Ensayos de tracción: E8M – 00
- Ensayos de fatiga: E466 – 96, E739 – 91
- Crecimiento de grieta: E647 – 99, E1820 – 05

La mencionada normativa indica las dimensiones admisibles en las probetas, el procedimiento correcto de ensayo y los instrumentos de medida que se han de utilizar así como el tratamiento de datos que debe realizarse.

### 5.1 Material y diseño de las probetas

Como ya se ha comentado con anterioridad, el material empleado es Aluminio 7075 que es una aleación de aluminio tratable térmicamente muy utilizada en situaciones en las que se requieran una gran resistencia mecánica y ligereza a la vez. Su composición química se muestra en la tabla 5.1-1 (en % en peso):

Tabla 5.1-1. Composición química del AL-7075.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Otros	Al
0.40	0.50	1.20 – 2.00	0.30	2.10 – 2.90	5.10 – 6.10	+Zr 0.20	0.15	Resto

Esta aleación posee un límite elástico y de rotura muy superior al resto de las aleaciones basadas en el aluminio poseyendo también una resistencia a fatiga y dureza superiores, aunque en este caso la diferencia es algo menor. Como elementos negativos nos encontramos una mayor dificultad en el conformado y menor resistencia a la corrosión frente a otras aleaciones de aluminio.

A continuación se muestran las dimensiones de las probetas utilizadas en cada caso, estando las dimensiones en milímetros. Estas han sido elegidas dentro de lo admisible por la norma, estando limitados por el tamaño de las barras de material de partida.

Tracción:

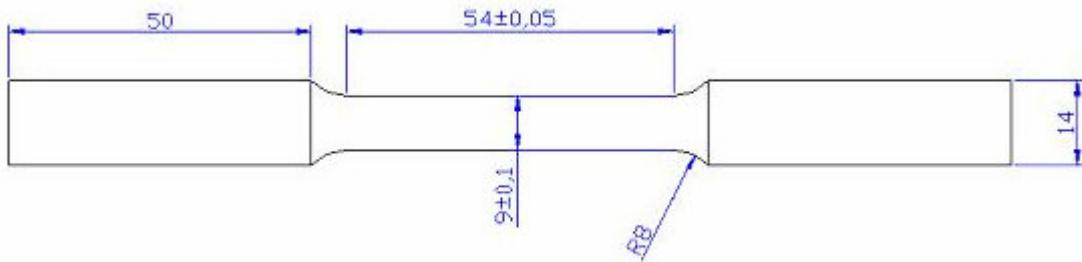


Fig. 5.1-1. Dimensiones de las probetas para ensayo de tracción.



Fig. 5.1-2. Fotografía de una probeta de ensayo de tracción.

Fatiga:

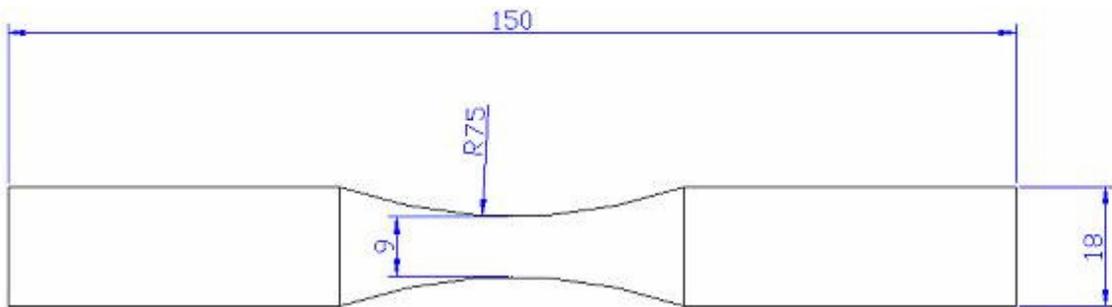


Fig. 5.1-3. Dimensiones de las probetas para ensayos de vida a fatiga.



Fig. 5.1-4. Fotografía de una probeta de ensayos de vida a fatiga.

Crecimiento de grieta:

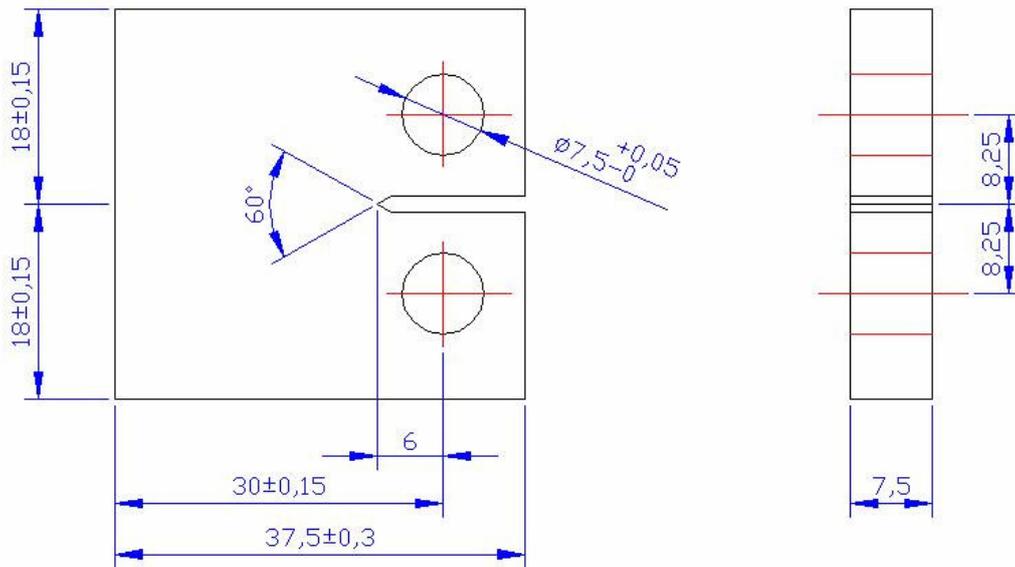


Fig. 5.1-5. Dimensiones de las probetas para ensayos de crecimiento de grieta.

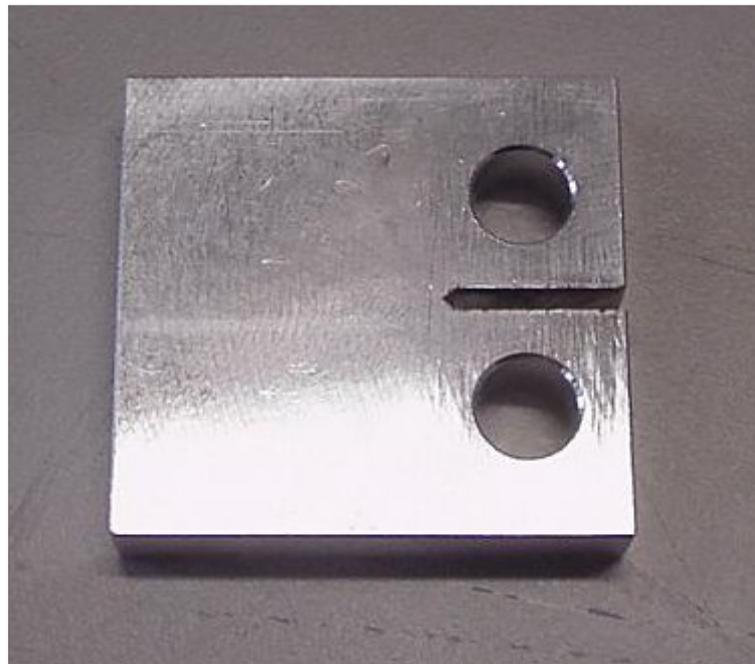


Fig. 5.1-6. Fotografía de una probeta de ensayo de crecimiento de grieta.

También fue preciso diseñar y fabricar unos elementos de cogida (clevis) acordes a las probetas usadas para ensayos de crecimiento de grieta. Estos elementos fueron realizados en acero y se muestran a continuación:



Fig. 5.1-7. Clevis empleado en los ensayos de crecimiento de grieta.

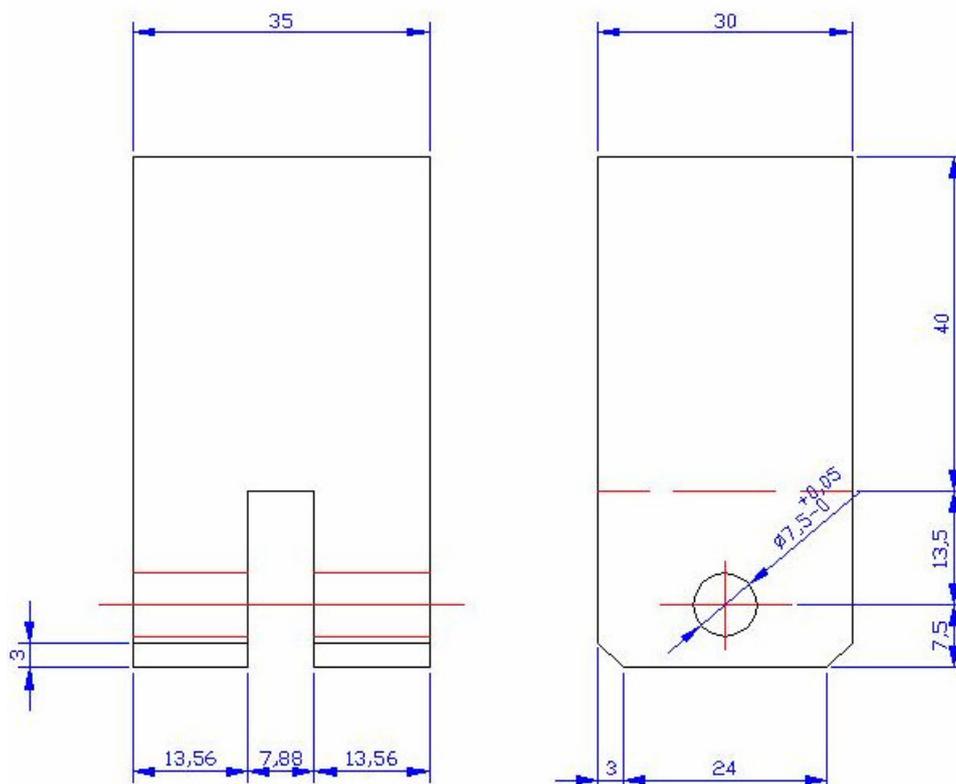


Fig. 5.1-8. Dimensiones de los clevis usados para crecimiento de grieta.

El material de partida para las probetas (aluminio 7075-T651) se encontraba en forma de barras y las probetas se obtuvieron mediante mecanizado. Además, las probetas usadas para ensayos de crecimiento de grieta fueron pulidas en sus caras laterales para facilitar la observación de la grieta en ambas caras. Por su parte, las probetas destinadas a ensayos de fatiga fueron pulidas hasta alcanzar una rugosidad superficial media en torno a

0.2 $\mu$ m. La tabla 5.1-2 muestra las rugosidades medias obtenidas en las probetas (en  $\mu$ m) junto con su código de identificación:

Tabla. 5.1-2. Rugosidad superficial de las probetas para ensayos de vida a fatiga.

	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
178F-04	0.2	1.8
179F-04	0.2	1.2
180-F04	0.2	1.6
181F-04	0.2	1.6
182F-04	0.1	1.6
183F-04	0.3	2.0
184F-04	0.1	1.4
185F-04	0.1	1.4
186F-04	0.2	1.8
187F-04	0.1	1.2
188F-04	0.1	0.8
189F-04	0.2	1.8
190F-04	0.1	0.6
191F-04	0.2	1.8
192F-04	0.2	1.4
193F-04	0.2	1.6
194F-04	0.1	1.4
195F-04	0.1	0.8
196F-04	0.2	2.2
197F-04	0.1	1.0
198F-04	0.1	0.8
199F-04	0.1	1.0
200F-04	0.2	1.6
201F-04	0.2	1.8
202F-04	0.1	1.4
203F-04	0.2	1.8
204F-04	0.1	1.0
205F-04	0.1	1.2
206F-04	0.2	1.4
207F-04	0.2	1.4
208F-04	0.1	1.4

## 5.2 Procedimiento de ensayo

### 5.2.1 Tracción

Con la realización de estos ensayos se pretende determinar el límite de fluencia, elongación en el punto de fluencia, carga de rotura, elongación en rotura y reducción de área de acuerdo a lo establecido por la norma ASTM E8M – 00.

Las probetas deben cumplir, en el caso de probetas cilíndricas, que la longitud inicial entre puntos sea de cinco veces el diámetro. En nuestro caso el diámetro es de 9 mm y la distancia entre puntos (G) de 45 mm, cumpliendo con dicho requisito.

## Conceptos básicos

Serán de aplicación una serie de definiciones que se indican a continuación:

Longitud entre puntos o longitud calibrada, G: longitud original de la porción de probeta cuya deformación o cambio de longitud se va a medir.

Fluencia discontinua: Oscilación o fluctuación observada al principio de la zona de deformación plástica, debido a la fluencia localizada. En algunos materiales puede no aparecer.

Límite inferior de fluencia, LYS: mínima tensión registrada durante la fluencia discontinua, ignorando efectos transitorios.

Límite superior de fluencia, UYS: Primera tensión máxima asociada a la fluencia discontinua.

Elongación en el punto de fluencia, YPE: Se obtiene de la curva tensión – deformación y se define como la diferencia, expresada en porcentaje, entre la deformación que presenta el primer punto de pendiente cero y la deformación correspondiente al punto de transición entre fluencia discontinua y el endurecimiento uniforme.

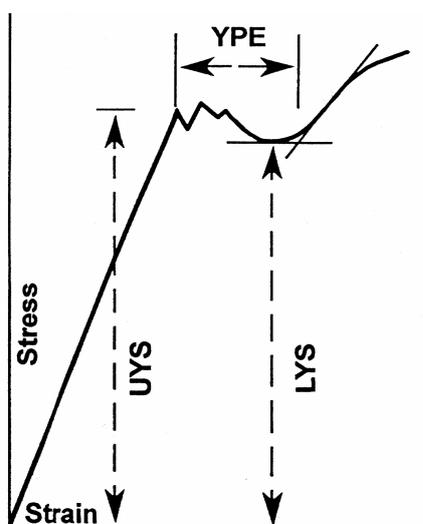


Fig. 5.2.1-1. Puntos característicos de una curva de ensayo de tracción.

El ensayo consiste en someter la probeta a esfuerzo axial aplicando tensiones cada vez mayores, hasta alcanzar la rotura. Durante la realización del ensayo se registran la deformación de la probeta y la carga aplicada, siendo dichos datos los empleados para la determinación de los parámetros buscados.

## Equipo empleado

Estos ensayos fueron realizados con la Máquina Universal de Ensayos MTS 810, empleando unas mordazas adecuadas a las dimensiones de la probeta. La medida de la deformación se obtiene mediante un extensómetro

con una distancia entre puntos de medida de 25 mm. El rango de medida seleccionado para la consola de control será el adecuado a las medidas que se van a obtener, teniendo siempre en cuenta que la adquisición se realiza utilizando un filtro analógico que corta la señal al 60%. Esto supone que la máxima medida adquirida no debe superar el 60% del fondo de escala.



Fig. 5.2.1-2 : Extensómetro empleado en la realización de ensayos de tracción.

La adquisición se realiza mediante un programa escrito en lenguaje de programación LABVIEW, registrando los parámetros medidos durante el ensayo en un archivo de texto para su posterior análisis. Dicha adquisición se realiza tomando los datos suministrados por la máquina a través de la consola de control, pasándolos por un filtro analógico y convirtiendo la señal a una digital mediante una tarjeta de 12 bits preparando los datos para ser usados por el ordenador de adquisición.

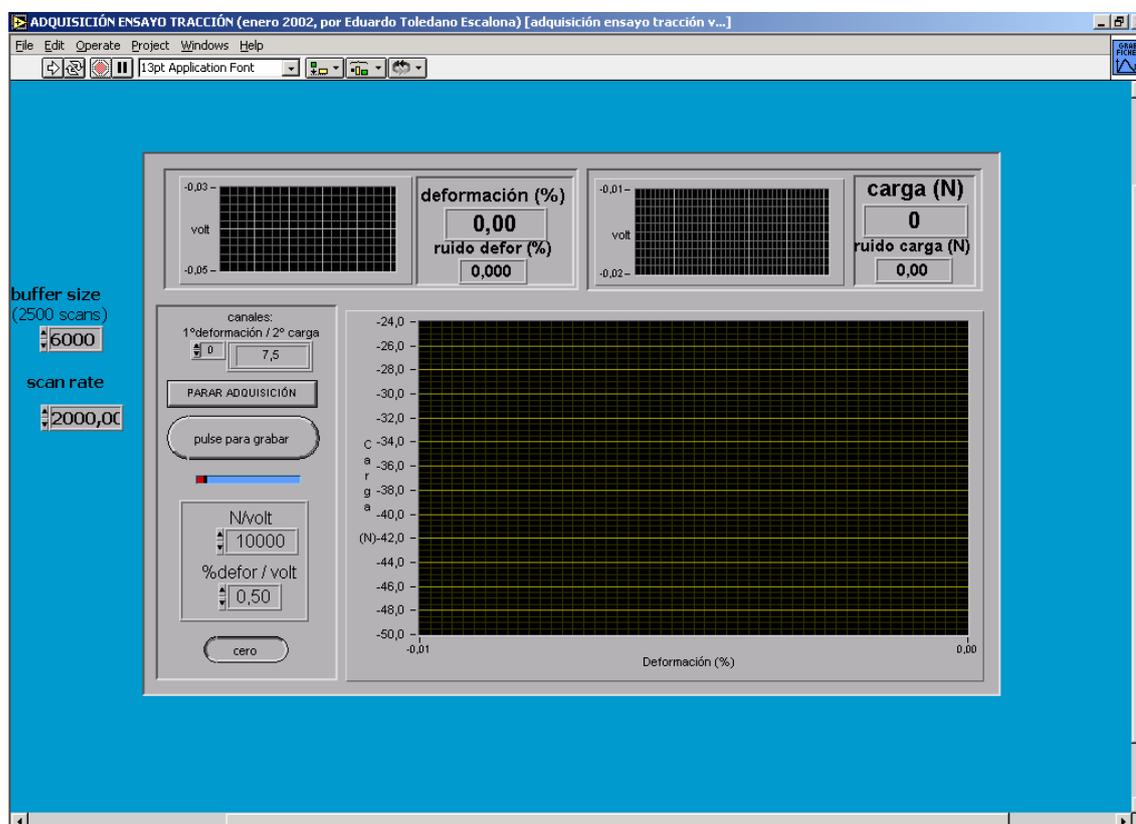
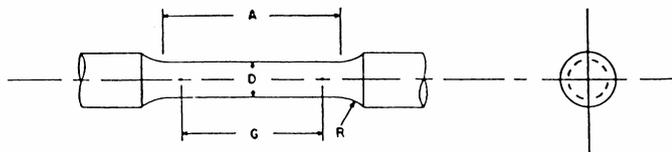


Fig. 5.2.1-3 : Programa de adquisición para ensayos de tracción.

### Acciones previas al ensayo

Antes de comenzar el ensayo se procede a tomar una serie de medidas de la probeta a fin de garantizar la validez de ésta como objeto de ensayo. En este caso se trata de probetas cilíndricas de diámetro 9 mm. En la siguiente figura se muestran las especificaciones de la norma respecto a dichas probetas.



	Dimensions, mm				
	Standard Specimen	Small-Size Specimens Proportional To Standard			
	12.5	9	6	4	2.5
G—Gage length	62.5 ± 0.1	45.0 ± 0.1	30.0 ± 0.1	20.0 ± 0.1	12.5 ± 0.1
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2	9.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	4.0 ± 0.1	2.5 ± 0.1
R—Radius of fillet, min	10	8	6	4	2
A—Length of reduced section, min (Note 2)	75	54	36	24	20

Fig. 5.2.1-4. Dimensiones admisibles para probetas de ensayos de tracción.

Para estas probetas se deben verificar las medidas A, D y R. El diámetro de la sección reducida (D) es medido en tres puntos, anotando estos valores y considerando el valor medio como diámetro. Además se comprueba en cada caso que la sección reducida no presente irregularidades tales como entallas o marcas que puedan provocar una variación en la medida realizada.

Una vez comprobada la validez de la probeta por sus dimensiones se marca la distancia inicial entre puntos. Esto se hace tintando con rotulador indeleble la probeta y marcando después sobre esta la distancia G indicada por la norma, que en este caso es de 45 mm. Este marcado se realiza con la ayuda de una plantilla calibrada de la longitud indicada y con una punta de trazar de acero. Esta longitud es anotada junto al resto de medidas tomadas para el ensayo.

Considerando las medidas tomadas anteriormente se calcula la sección inicial usando para ello el diámetro de la probeta medido. Una vez hecho esto se monta la probeta en la máquina de ensayos y se comprueba que para carga nula sobre la probeta la máquina de ensayos da una medida de carga nula también.

### Realización del ensayo

Es en este momento cuando se puede iniciar el ensayo. Es conveniente, sin embargo, que la máquina no esté fría al iniciar el ensayo y para ello debe llevar en funcionamiento al menos quince minutos antes de iniciar el ensayo. Esto es aplicable a todos los ensayos, tanto de tracción como de otro tipo, que se realicen.

Se han realizado tres ensayos, dos de ellos con control por carga y uno más en control por desplazamiento. En cualquier caso la velocidad de aplicación

de la carga viene limitada por la norma debiendo situarse entre 1.15 y 11.5 MPa/s para control por carga y entre 0.05 y 0.5 metros por metro de longitud de la sección reducida y por minuto para control por desplazamiento.

En el caso bajo estudio, y dado que la probeta tiene una sección nominal de 64 mm<sup>2</sup> la carga quedará entre 73.6 y 736 N/s. Se empleó una velocidad de carga de 3 MPa/s, bastante reducida pero alejada del valor extremo, obteniendo una velocidad de 192 N/s para control por carga. En control por desplazamiento, para conseguir un velocidad de 0.1 metros por metro de longitud de sección reducida y por minuto sería necesaria una velocidad de separación de las mordazas de 0.09 milímetros por segundo. Finalmente se aplicó una velocidad de 0.1 milímetros por segundo.

La realización del ensayo propiamente dicho consta de una serie de pasos: se sitúa la probeta sujetando con las mordazas las cabezas de la misma y se fija el extensómetro. Una vez definidos todos los parámetros tanto en programa de adquisición como en el control de la máquina se pone en marcha el programa de adquisición y se aplica la carga. La carga se aplica con la velocidad prefijada hasta la rotura de la probeta.



Fig. 5.2.1-5. Probeta rota durante ensayo de tracción, vista lateral.



Fig. 5.2.1-6. Probeta rota durante ensayo de tracción, vista frontal.

Una vez finalizado el ensayo se anotan la carga de rotura, la medida de  $G$  tras la rotura de la probeta y el diámetro mínimo de la zona de rotura. Además se debe comprobar que la probeta haya roto dentro de la zona entre las dos marcas de  $G$ . Si la rotura se produce fuera de esta zona o a menos del 25% de la distancia  $G$  tras la rotura, la elongación puede ser anormalmente baja y no representativa e igualmente ocurre con la reducción de área.

Tanto el proceso de fluencia como la elongación en rotura pueden ser medidos a través del extensómetro. En el primer caso la condición es que la distancia entre puntos de medida nominal del extensómetro sea menor o igual que la medida  $G$ , siendo éste el caso que nos ocupa. Sin embargo para medir la elongación en rotura se debería cumplir que la distancia entre puntos de medida nominal del extensómetro fuera igual a  $G$ , lo que no se cumple en este caso, por lo que la elongación en la rotura no se podrá determinar por medio del extensómetro.

Esta última condición se impone debido a que si la probeta rompe por un punto situado dentro de las marcas situadas a una distancia  $G$  y lo suficientemente lejos de los extremos pero fuera de la longitud cubierta por el extensómetro, el ensayo sería válido pero la medida dada por el extensómetro sería errónea ya que no tendría en cuenta la deformación durante el proceso de estiramiento que supone precisamente un gran incremento en la elongación en rotura.

### 5.2.2 Fatiga

El procedimiento de ensayo seguido, que será descrito a continuación, se basa en la norma ASTM, E 466 – 96 y en la ASTM E 739 – 91 para la presentación de resultados. El fin de estos ensayos es la determinación de la vida a fatiga de materiales metálicos sometidos a carga axial cíclica de amplitud constante en función del número de ciclos de carga.

La carga aplicada durante el ensayo es monoaxial cíclica de amplitud constante, como ya se ha comentado, controlando la fuerza aplicada. Además la carga debe ser lo suficientemente reducida para que las deformaciones sean predominantemente elásticas durante el ensayo. Dicha carga se aplica hasta el fallo de la probeta, obteniéndose así la vida a fatiga de la probeta bajo dichas cargas.

#### Conceptos básicos

En primer lugar se detallan una serie de términos de importancia en la realización de estos ensayos:

Tensión máxima,  $S_{max}$ : Máxima tensión del ciclo de carga

Tensión mínima,  $S_{min}$ : Mínima tensión del ciclo de carga

Tensión media,  $S_m$ : Definida como  $S_m = 0.5(S_{max} + S_{min})$

Tensión alterna,  $S_a$ : Definida como  $S_a = 0.5(S_{max} - S_{min})$

Coefficiente de asimetría de la carga,  $R$ : Es el cociente  $R = S_{min} / S_{max}$

## Equipo empleado

Una vez definidos los conceptos fundamentales que intervienen en los ensayos de fatiga se va a describir el equipo empleado para la realización de los ensayos. La máquina de ensayos empleada ha sido, como en los demás casos, la máquina universal de ensayos MTS 810 conectada a su consola de control y ésta a su vez a un ordenador mediante un conector BNC-2110 de National Instruments. La tarjeta de adquisición es de doce bits, convirtiendo los datos adquiridos para que puedan ser usados por el programa de adquisición empleado que está escrito en lenguaje de programación LABVIEW.

## Acciones previas al ensayo

Las probetas utilizadas son de tipo cilíndrico, esto es, con sección transversal circular, y de radio continuo entre las secciones de agarre.

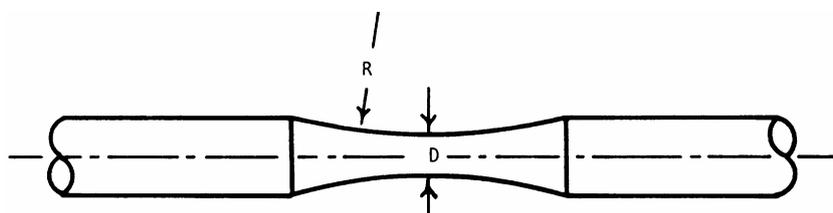


Fig. 5.2.2-1. Probeta cilíndrica de radio continuo.

Antes de la realización de ninguna medida se pulen las probetas para eliminar las estrías producidas por el mecanizado (torneado en este caso). Esto es importante ya que la rugosidad superficial afecta de manera importante a los ensayos de fatiga. La rugosidad superficial obtenida tras el pulido se ha indicado ya anteriormente (Tabla 5.1-10).

Una vez que las piezas están listas para ensayar se mide el diámetro en el punto donde éste es menor, la longitud de la zona de radio constante y se comprueba que el radio de curvatura sea mayor o igual que el especificado.

Para probetas cilíndricas de radio continuo las dimensiones de la misma deben satisfacer ciertas relaciones:

- El diámetro mínimo de la sección de estudio debe encontrarse entre 5.08 y 25.4 mm. En el caso presente es de 9 mm.
- El radio de curvatura de la sección reducida debe ser al menos 8 veces el diámetro mínimo de la probeta. En este caso esto implica que debe ser de al menos 72 mm, siendo de 75 mm y cumpliendo, por tanto, esta condición también.
- La longitud de la sección reducida debe ser de, al menos, 3 veces el diámetro mínimo. Esto supone que debe ser de al menos 27 mm, siendo de 51 mm.
- Además, el área de la sección de agarre debe ser al menos 1,5 veces la de la sección mínima de estudio. La sección mínima es de  $63,61 \text{ mm}^2$  y la de agarre es de  $243 \text{ mm}^2$ . Por tanto también se cumple este criterio.

### Realización del ensayo

Un factor importante a tener en cuenta en la realización de ensayos de vida a fatiga es los niveles de carga aplicados. Estos deben cubrir un rango de valores suficientemente amplio y el número de ensayos realizado debe ser suficientemente alto para ser representativo. Hay que considerar que los ensayos de vida a fatiga suelen sufrir una importante dispersión de resultados y por tanto el número de ensayos que es necesario realizar es mucho mayor que, por ejemplo, en el caso de ensayos de tracción.

Las cargas que se aplicarán se dividirán en varios niveles y con  $R = -1$ , esto es, cargas centradas en cero. Se harán ensayos en cuatro niveles de carga que serán:

Tabla 5.2.2-1. Niveles de carga en los ensayos de vida a fatiga.

Nivel de carga	Carga máxima (N)	Carga mínima (N)
I	25.000	-25.000
II	20.000	-20.000
III	15.000	-15.000
IV	11.000	-11.000

En todos los casos la forma de la señal será una senoide. La tensión alterna a la que es sometida la probeta en cada caso es:

Tabla 5.2.2-2. Tensión media en los distintos niveles de carga.

Nivel de carga	Tensión Alterna (MPa)
I	392,97
II	314,38
III	235,78
IV	172,91

Tanto el orden en que se ensayan las probetas como el nivel de carga asignado a cada una de ellas se determina aleatoriamente.

Otro dato importante a la hora de realizar los ensayos es la frecuencia a la que estos son realizados. Esta frecuencia se determina cargando la probeta estáticamente con la máxima carga a que será sometida durante el ensayo y a la carga mínima. Se anota el desplazamiento del pistón y con este dato se entra en la figura que se muestra a continuación.

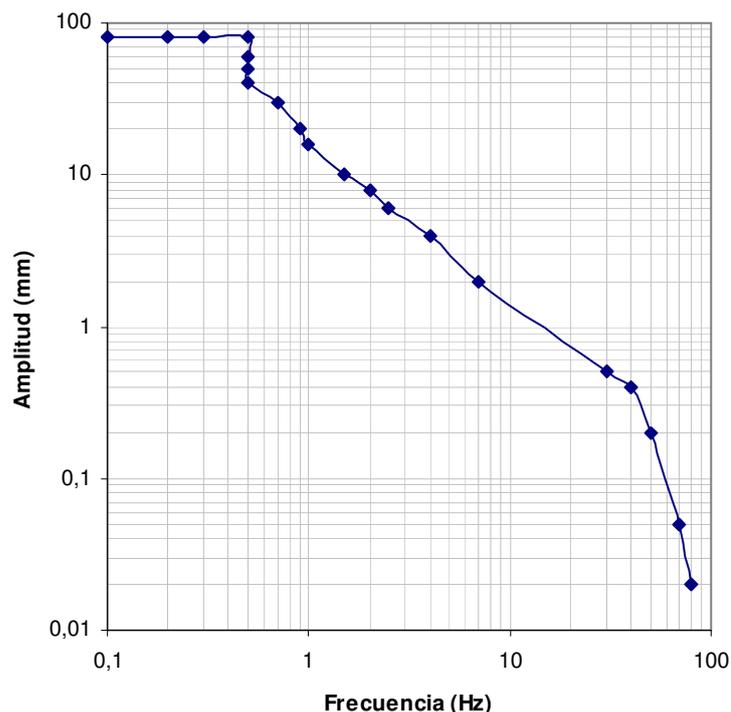


Fig. 5.2.2-2. Curva para la obtención de la frecuencia máxima.

La frecuencia de ensayo no debe superar el 50% de la frecuencia obtenida mediante la figura.

Tal y como ya se ha comentado anteriormente, las probetas empleadas para los ensayos de vida a fatiga son pulidas antes de ser ensayadas y la rugosidad superficial es medida. Esto es necesario debido a que la rugosidad superficial afecta significativamente a la vida a fatiga. Además, antes de ser ensayada se debe observar las probetas comprobando la ausencia de ralladuras o marcas que puedan afectar al resultado del ensayo. En caso de observarse tales irregularidades en la superficie la probeta debe ser rechazada.

Una vez la probeta está lista para ser ensayada se pone a cero la máquina y se coloca la probeta entre los útiles de sujeción. Se pone a cero el contador del número de ciclos y se establecen los parámetros necesarios en el programa de adquisición y de control de la máquina. En este caso hay que indicar cada cuantos ciclos se desea registrar los datos y dibujarlos en pantalla (15 y 150 respectivamente) así como los canales que se van a emplear en la adquisición y las cargas máxima y mínima para que los puntos que caigan excesivamente alejados de los valores teóricos del ensayo sean registrados en archivos aparte. El ensayo se realiza en control por carga y se comprueba que los niveles de carga sean adecuados mediante el programa de adquisición.

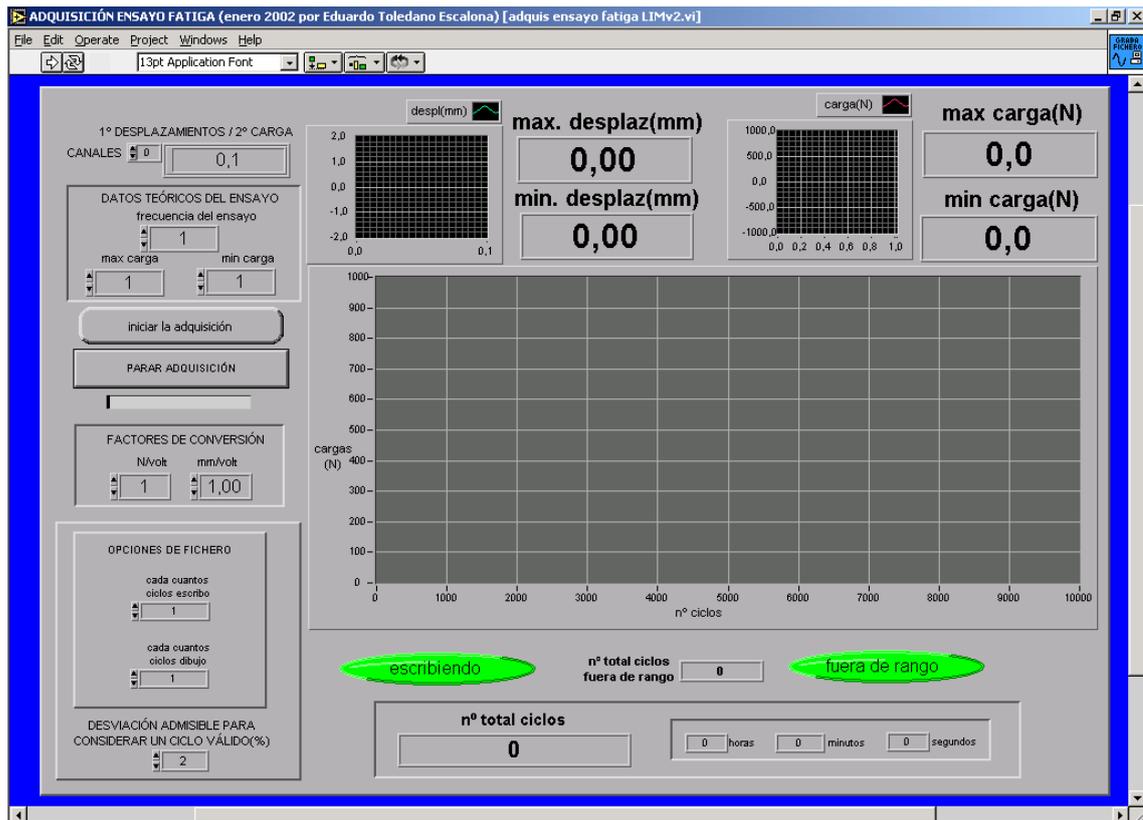


Fig. 5.2.2-3. Programa de adquisición para ensayos de tracción.

El ensayo finaliza con la rotura de la probeta. Una vez finalizado el ensayo se anota el número de ciclos de duración del mismo.



Fig. 5.2.2-4. Probeta rota durante un ensayo de vida a fatiga, vista lateral.



Fig. 5.2.2-5. Probeta rota durante un ensayo de vida a fatiga, vista frontal.

### 5.2.3 Crecimiento de grieta

La finalidad de los ensayos realizados es la de determinar la velocidad de crecimiento de grieta en función del factor de intensidad de tensiones en el

borde de la grieta, actuando siempre de acuerdo a lo establecido en la Norma ASTM E 647-99. El tipo de probeta utilizado en este caso ha sido compact, C(T).

### Conceptos básicos

Es importante establecer una serie de definiciones que se indican a continuación:

Ciclo: bajo amplitud de carga constante, variación de la carga desde el mínimo hasta el máximo y otra vez al mínimo.

Coefficiente de asimetría, R:  $R = P_{\min}/P_{\max}$

Gradiente K normalizado, C:  $C = (1/K) \cdot dK/da$  [ $L^{-1}$ ]

Ensayo con K creciente: ensayo en el cual el valor de C es positivo

Ensayo con K decreciente: ensayo en el cual el valor de C es negativo

Factor de intensidad de tensiones, K: ver ASTM E-616

Longitud de grieta, a [L]: medida de la dimensión plana principal de una grieta

Máxima carga, P<sub>max</sub> [F]: el máximo valor de la carga aplicada en un ciclo; a tracción se considera positivo y a compresión negativo.

Máximo factor de intensidad de tensiones, K<sub>max</sub> [ $FL^{-3/2}$ ]: se corresponde con P<sub>max</sub>.

Mínima carga, P<sub>min</sub>[F]: mínimo valor de la carga aplicada en un ciclo. Cargas a tracción se consideran positivas mientras que a compresión se consideran negativas.

Mínimo factor de intensidad de tensiones, K<sub>min</sub>[ $FL^{-3/2}$ ]: Se corresponde con P<sub>min</sub> si R>0 y es nulo en caso contrario (R≤0)

Número de ciclos, N.

Rango de carga, ΔP [F]:  $\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$

Umbral de crecimiento de grieta por fatiga, ΔK<sub>th</sub> [ $FL^{-3/2}$ ]: valor asintótico de ΔK para el cual da/dN se acerca a cero. Para la mayoría de los materiales, una definición útil, si bien arbitraria, es aquel valor de ΔK correspondiente a una velocidad de crecimiento de grieta de 10<sup>-10</sup> m/ciclo

Velocidad de crecimiento de grieta por fatiga, da/dN: expresa la tasa de crecimiento de la longitud de grieta en términos de incremento de longitud

Una vez definidas las variables manejadas se pasa a describir el procedimiento seguido durante la realización de los ensayos. El ensayo consiste en aplicar una carga cíclica a una probeta con una entalla en la que previamente se ha generado una grieta (*precrecimiento*). La longitud de la grieta se mide durante el crecimiento de la misma, obteniéndose a partir de ella la velocidad de crecimiento de grieta. Esta velocidad se representa en función del factor de intensidad de tensiones,  $\Delta K$ , que se calcula con unas expresiones basadas en el análisis de tensiones elástico-lineal.

### **Equipo empleado**

La máquina de ensayos utilizada en todos los ensayos ha sido la máquina universal de ensayo MTS-810. Los datos proporcionados por ésta son transferidos a un ordenador que realiza la adquisición de datos y los almacena para su posterior uso. Inicialmente la adquisición se realizó utilizando un conector BNC-2110 de National Instruments para el paso de datos de la consola de control de la máquina al ordenador. Un primer análisis de los resultados obtenidos en los ensayos condujo a la utilización de un filtro analógico elíptico para reducir los niveles de ruido en la señal dado que éstos eran del mismo rango que la medida, distorsionándola en exceso.

El citado filtro produce, sin embargo, un efecto no deseado que es la reducción del rango de tensiones de  $\pm 10$  V original a  $\pm 6$  V. Esto supone que la señal de salida es cortada. Dado que el extensómetro alcanzaba medidas próximas al fondo de escala esto supondría perder datos. Por tanto fue necesario el aumento del fondo de escala de 0,8 a 4 mm. Esto supondría obtener una señal más limpia gracias al filtro pero con una importante pérdida de resolución.

El nuevo problema se solventó utilizando una tarjeta de adquisición de 16 bits en lugar de la normalmente empleada de 12. Esto significa que la medida adquirida por la tarjeta como una señal analógica es necesario convertirla en una señal digital para su lectura por el ordenador de adquisición. Para ello se divide el fondo de escala en tantos intervalos como sea posible. Esto, en el caso de una tarjeta de 16 bits supone que se pueden representar  $2^{16}-1$  números diferentes (esto es, se pueden considerar 65535 posibles valores). Teniendo en cuenta que el rango de medida es de  $\pm 5$  V, tal y como se estableció en el programa de adquisición, esto significa que el rango de medida queda dividido en intervalos de 0.15 mV que es la resolución. Por tanto, la diferencia entre el valor analógico y el valor digital finalmente considerado será siempre menor o igual a 0.075 mV. Siguiendo el mismo razonamiento se obtiene que la resolución para una tarjeta de 12 bits sería de 2.4 mV.

Esto significa que en la medida de la señal del extensómetro aparece un error debido a la conversión analógico-digital de la misma que, considerando el fondo de escala de  $\pm 4$  mm, sería inferior o igual a 0.03  $\mu\text{m}$ . En el caso de la carga, con un fondo de escala de  $\pm 10.000$  N, el error es inferior o igual a 0.076 N.

Adicionalmente se introdujo un filtro digital tipo Butterworth de sexto orden en el propio programa de adquisición. A continuación se presenta en una figura una muestra de los datos obtenidos en dos ensayos realizados con la misma carga y coeficiente de asimetría, uno de ellos realizado con filtro y el otro sin él. El ensayo filtrado incluye tanto el filtro analógico como el digital, ambos con una frecuencia de corte de 60 Hz.

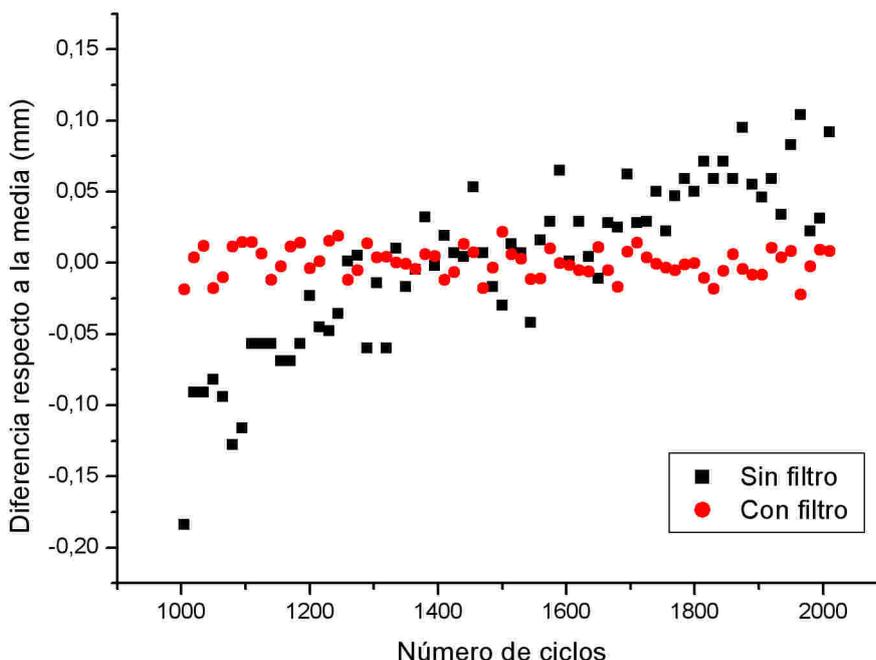


Fig. 5.2.3-1. Resultados con y sin utilización de filtros.

Exactamente lo que se muestra en la anterior figura es la variación respecto a la longitud media de la grieta obtenida durante la realización del ensayo al inicio del mismo, esto es, cuando se puede considerar que para un número de ciclos no muy elevado la longitud de grieta es constante. La dispersión que se observa en el ensayo sin filtro es mucho mayor que la obtenida finalmente con la aplicación de los filtros.

Otra parte importante del equipo empleado son los útiles de cogida. Tienen la forma de una horquilla con pasador en la parte superior e inferior de la probeta para permitir la rotación mientras la probeta se carga. Las proporciones y tolerancias de los útiles se indican en la norma en función del ancho,  $W$ , y espesor,  $B$ , de la probeta. Debe procurarse, asimismo, que la carga aplicada esté centrada para así evitar la aparición de momentos.

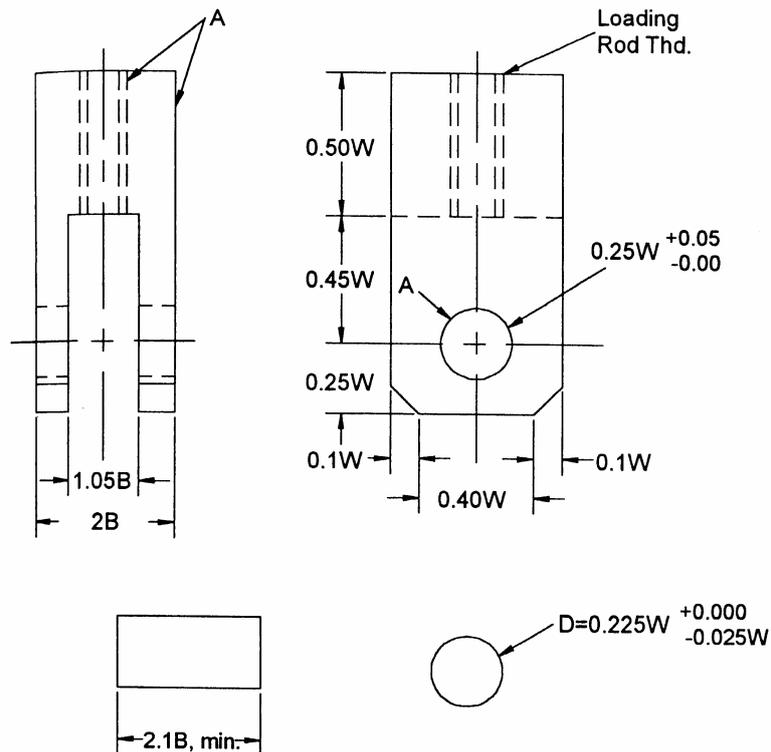


Fig. 5.2.3-2. Dimensiones admisibles para clevis usados en ensayos de crecimiento de grieta.

En las siguientes imágenes se muestra el conjunto montado y listo para ensayar.



Fig. 5.2.3-3. Detalle del montaje.



Fig. 5.2.3-4. Detalle del montaje.

### Acciones previas al ensayo

La geometría de la probeta viene definida en la figura siguiente y debe cumplir, además, los criterios mencionados a continuación.

- El tamaño de la entalla mecanizada,  $a_n$ , debe ser al menos  $0.2W$ .

- Se recomienda que el espesor de la probeta esté en el intervalo:  $W/20 \leq B \leq W/4$  aunque se permiten espesores mayores o iguales a  $W/2$ .

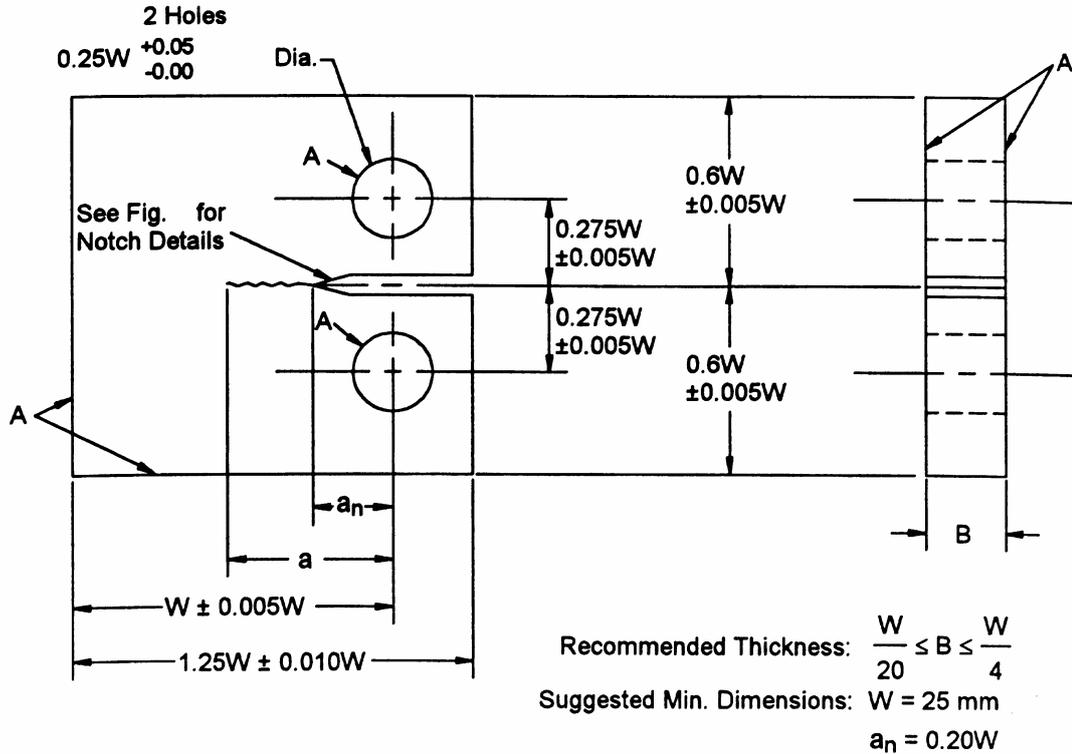


Fig. 5.2.3-5. Dimensiones admisibles en probetas de ensayos de crecimiento de grieta.

Previamente al ensayo se debe tomar nota de los siguientes parámetros:

- Ancho de la probeta,  $W$
- Espesor de la probeta,  $B$
- Longitud de la entalla mecanizada,  $a_n$ .
- Tensión de fluencia del material,  $\sigma_{YS}$ .
- Tensión de rotura del material,  $\sigma_{ULT}$ .

Durante el ensayo deben controlarse tanto temperatura como humedad tomando estos valores al inicio y al final del ensayo así como en varios instantes a lo largo de la realización de este.

### Cálculo de la longitud de la grieta

La medida de la longitud de grieta se realiza mediante un extensómetro, estando ambas variables (la longitud de grieta y la medida del extensómetro) relacionadas mediante las siguientes fórmulas, en las que se incluye una corrección por rotación:

$$\alpha = a/W = C_0 + C_1 u_{LL} + C_2 u_{LL}^2 + C_3 u_{LL}^3 + C_4 u_{LL}^4 + C_5 u_{LL}^5 \quad (5.2.3.1)$$

$$u_{LL} = \frac{1}{[BEC_c]^{1/2} + 1} \tag{5.2.3.2}$$

$$C_c = \frac{\nu/P}{\left[ \frac{H}{R} \operatorname{sen} \theta - \cos \theta \right] \left[ \frac{D}{R} \operatorname{sen} \theta - \cos \theta \right]} \tag{5.2.3.3}$$

$$\theta = \operatorname{sen}^{-1} \left[ \frac{\left( \frac{d_m}{2} + D \right)}{(D^2 + R^2)^{1/2}} \right] - \tan^{-1} \left( \frac{D}{R} \right) \tag{5.2.3.4}$$

Donde los coeficientes C que aparecen en la expresión para el cálculo de la longitud de grieta dependen de la posición donde se tome la medida del extensómetro. La norma proporciona la siguiente tabla:

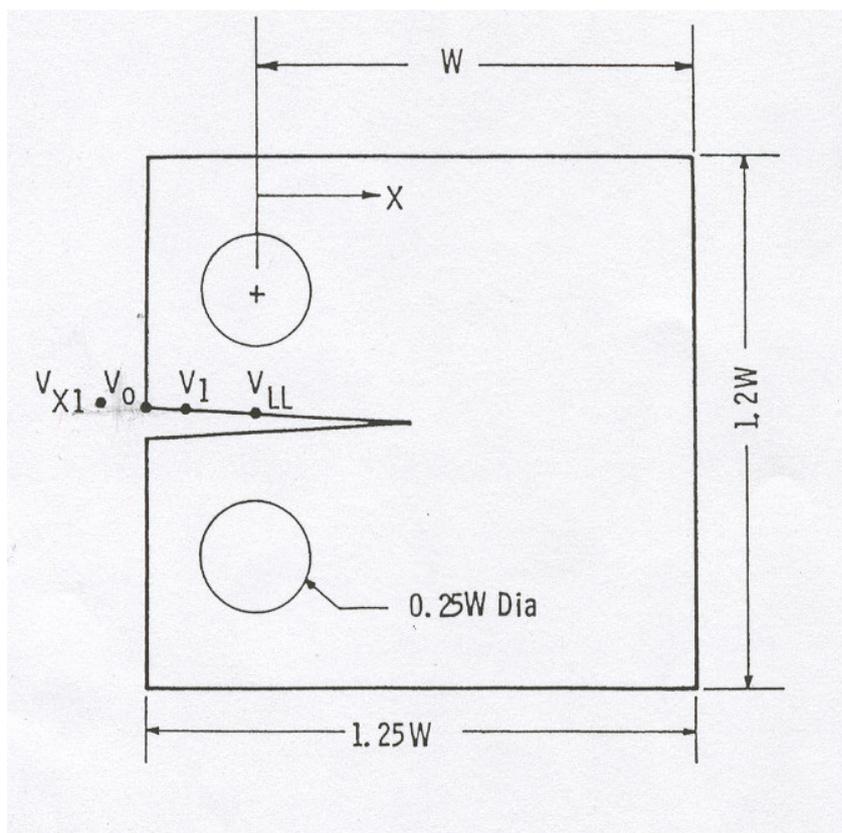


Fig. 5.2.3-6. Dimensiones características de probetas tipo C(T).

Tabla 5.2.3-1. Coeficientes para el cálculo de la longitud de grieta mediante extensómetro.

Punto de medida	X/W	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
V <sub>x1</sub>	-0.345	1.0012	-4.9165	23.057	-323.91	1798.3	-3513.2
V <sub>0</sub>	-0.250	1.0010	-4.6695	18.460	-236.82	1214.9	-2143.6
V <sub>1</sub>	-0.1576	1.0008	-4.4473	15.400	-180.55	870.92	-1411.3
V <sub>LL</sub>	0	1.0002	-4.0632	11.242	-106.04	464.33	-650.68

Por tanto, conocida la posición del extensómetro y la geometría de la probeta se pueden conocer estos coeficientes. En el caso concreto que nos ocupa la posición de medida no coincide con ninguna de las dadas por la norma por lo cual se han obtenido los coeficientes por interpolación cuadrática a partir de la tabla anterior obteniendo los siguientes valores.

Tabla 5.2.3-2. Coeficientes interpolados para el cálculo de la longitud de grieta mediante extensómetro.

X/W	C0	C1	C2	C3	C4	C5
-0.335	1.0011	-4.8896	22.504	-313.34	1725.96	-3339.62

Los demás parámetros que aparecen en el cálculo de la longitud de grieta se indican a continuación:

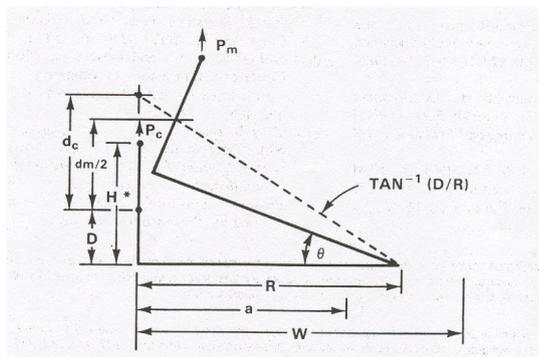


Fig. 5.2.3-7. Parámetros que aparecen en el cálculo de longitud de grieta

$v$ : medida dada por el extensómetro.

$E$ : módulo de la elasticidad.

$B$ : espesor de la probeta.

$P$ : carga aplicada.

$H^*$ : medida inicial de la mitad de la distancia entre puntos de carga.

$R=(W+a)/2$  donde  $a$  es la longitud de grieta: radio de rotación de la línea central de grieta.

$D$ : mitad de la distancia inicial entre puntos de medida de desplazamiento.

$\theta$ : ángulo de rotación de sólido rígido sobre la línea media de la sección sin romper.

$D_m$ : medida del desplazamiento total en la línea de carga.

$C_c$ : flexibilidad elástica de la probeta, corregida por rotación.

### Cálculo de la carga aplicada

El valor de  $\Delta K_{Inc}$  ( $Mpam^{0.5}$ ) se establece en cada ensayo de manera que se cubran el rango de valores deseados. Con estos valores de  $\Delta K$ , se obtiene la carga necesaria mediante las expresiones que se muestran a continuación:

$$\Delta K_{inc} = \frac{\Delta P_{mic}}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (5.2.3.5)$$

$$\alpha = a / W \tag{5.2.3.6}$$

$$P_{\max} = \frac{\Delta P_{\text{inc}}}{(1 - R)} ; P_{\min} = P_{\max} R \tag{5.2.3.7}$$

$$P_{\max \text{ prec}} = 0.9 P_{\max} ; P_{\min \text{ prec}} = 0.9 P_{\min} \tag{5.2.3.8}$$

Las expresiones arriba indicadas indican como obtener tanto  $\Delta P_{\text{Inc}}$  como  $P_{\max}$  y  $P_{\min}$ , así como las cargas que deben aplicarse durante el precrecimiento. Esta carga de precrecimiento toma un valor del 90% de la empleada durante el ensayo. El precrecimiento consiste en iniciar la grieta y hacerla crecer como mínimo hasta una determinada longitud, que en este caso es 7.5 mm. Esta cantidad es la mayor entre  $0.1B$ ,  $h$  y  $1.0\text{mm}$ , sumado a la longitud de la entalla que es de 6 mm. En el caso que nos ocupa  $0.1B = 0.75 \text{ mm}$  y  $h = 1.5 \text{ mm}$ .

En la siguiente tabla se indican los valores adoptados para  $\Delta K_{\text{Inc}}$  en los ensayos y  $\Delta P_{\text{Inc}}$  obtenido para dicho valor. Los valores de  $\Delta K_{\text{Inc}}$  se fueron decidiendo conforme se fueron obteniendo resultados de ensayos anteriores con el fin de obtener una curva para el rango de valores de  $\Delta K$  lo más amplio posible.

Tabla 5.2.3-3. Cargas aplicadas.

$\Delta K_{\text{Inc}}(\text{MPam}^{0.5})$	$\Delta P_{\text{Inc}}(\text{N})$	R	$P_{\max}(\text{N})$	$P_{\min}(\text{N})$
6	1821	0.01	1840	18
6	1821	0.01	1840	18
6	1821	0.01	1840	18
8	2430	0.01	2450	25
10	3035	0.01	3066	31
12	3640	0.01	3680	37
5	1518	0.01	1533	15
4.5	1365	0.01	1380	14
3.5	1063	0.01	1074	11
3	910	0.01	920	10

### Preparación de la probeta

Es necesario preparar la probeta antes de realizar el ensayo. En primer lugar es conveniente pulir los laterales de la misma a fin de facilitar la medida de la longitud de la grieta por ambas caras al finalizar el precrecimiento. Además, es necesario pulir y limpiar con disolvente la cara frontal de la probeta ya que en ella se adhieren dos pequeñas piezas cuya utilidad es servir de punto de sujeción del extensómetro. Es por tanto importante que estas piezas se sitúen lo más centradas posible respecto al plano medio de la entalla y separadas las distancia que el extensómetro requiera (12 mm en este caso). La posición de las piezas antes mencionadas se muestra en la siguiente figura.

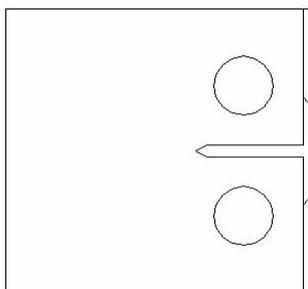


Fig. 5.2.3-8. Disposición de los elementos para la sujeción del extensómetro.

Al montar la probeta en la máquina se lubricarán las mordazas en caso de ser necesario y a continuación se hace la puesta a cero del controlador de carga y se monta la pieza con los útiles construidos con ese fin. A continuación se sitúa el extensómetro y se pone a cero.

También es necesario fijar los parámetros con los que trabajará el programa de adquisición: cada cuantos ciclos se registra la medida, cada cuantos se representa (15 y 150 respectivamente), la frecuencia de ensayo y los canales por los que se adquiere la medida.

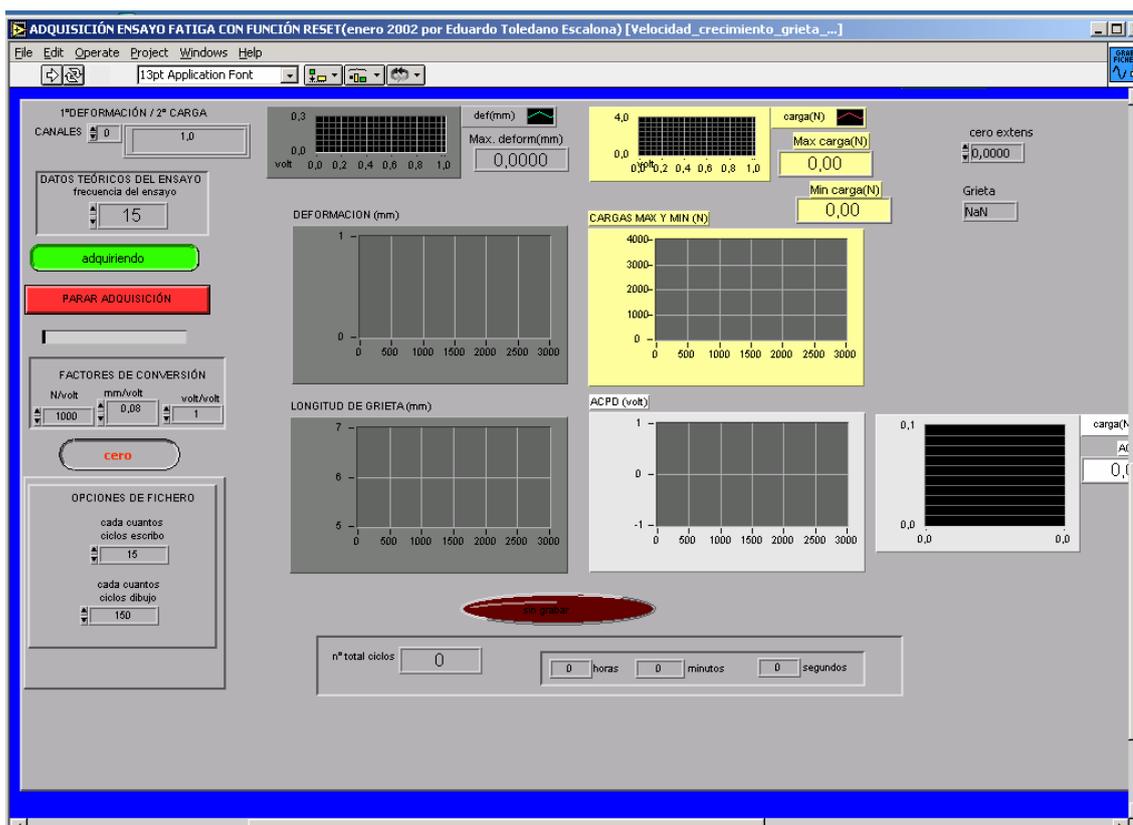


Fig. 5.2.3-9. Programa de adquisición para ensayos de velocidad de crecimiento de grieta.

La frecuencia de realización del ensayo se calcula aplicando estáticamente la carga máxima y mínima que serán aplicados durante el precrecimiento y tomando nota del desplazamiento del pistón. Con el desplazamiento registrado se determina la frecuencia máxima que se aplicará durante el precrecimiento que será la mitad de la indicada por la curva de

desplazamiento sin carga de la máquina. Hay que tener en cuenta sin embargo, que es posible que se alcancen cargas mayores a la inicialmente calculada para el precrecimiento por lo que puede ser útil calcular esta frecuencia máxima para otras cargas y no acercarse demasiado al límite calculado.

### **Precrecimiento**

En el precrecimiento se aplica inicialmente la carga establecida previamente. Si ocurriera que una vez transcurrido 10.000 ciclos no se ha iniciado la grieta se aumenta la carga un 20%, repitiendo la operación tantas veces como sea necesario. A veces se ha esperado una mayor cantidad de ciclos o se han dado saltos menores en la carga a fin de iniciar la grieta con la carga más baja posible.

Una vez iniciada la grieta se va disminuyendo la carga en escalones del 10%, dejando que la grieta crezca al menos  $\frac{3}{\pi} \left( \frac{K'_{\max}}{\sigma_{YS}} \right)^2$  entre cada dos

disminuciones, para evitar la zona plástica creada por la carga anterior, donde  $K_{\max}$  es el máximo factor de intensidad en tensiones en el último nivel de carga aplicado. Esto se repite hasta llegar a las cargas aplicadas inicialmente, asegurándose de que el  $K_{\max}$  no es superior al calculado para el ensayo.

El precrecimiento finaliza cuando se alcanza una longitud de grieta mayor de la establecida y se reduce la carga hasta la inicial de precrecimiento. En este momento es necesario realizar una serie de comprobaciones. Se mide la longitud de grieta por ambos lados de la probeta con una exactitud de el valor más alto entre 0.1 mm y  $0.002W = 0.06$  mm. Una vez medidas, sus longitudes no deben diferir en más de  $0,75B = 1.875$  mm. En este caso la medida de la longitud de grieta por ambas caras se realizó mediante microscopio óptico.

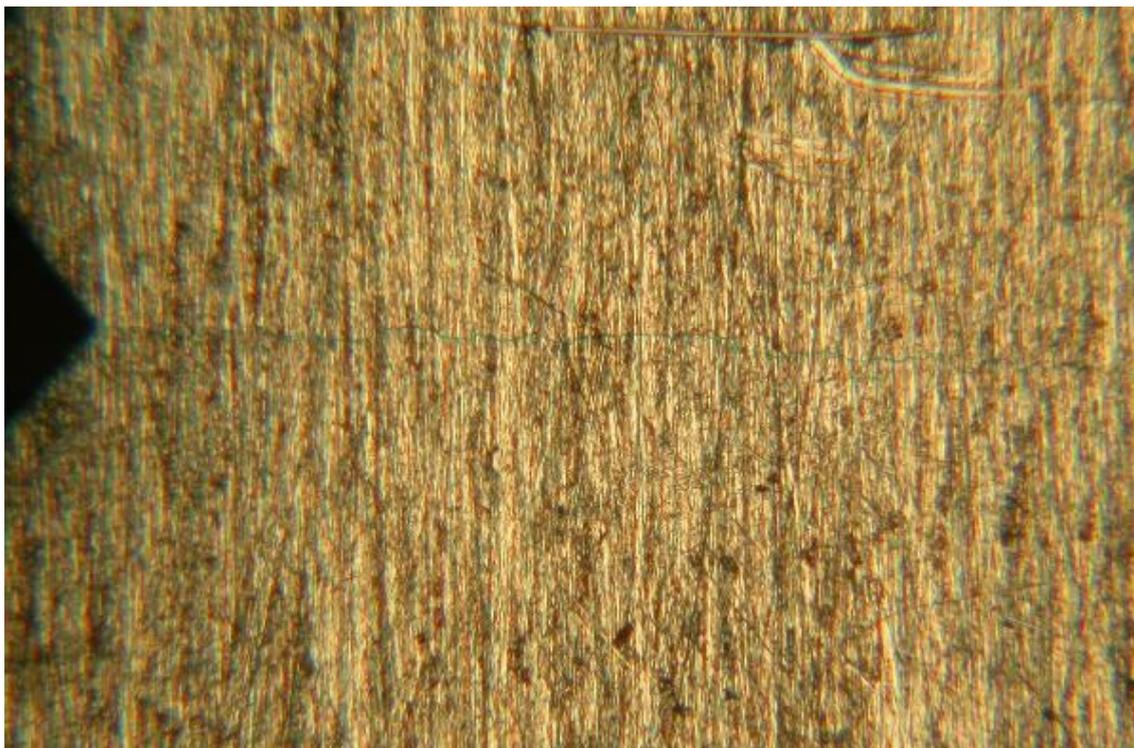


Fig. 5.2.3-10. Grieta en una de las caras de la probeta tras el precrecimiento vista con microscopio óptico.

Además el plano de la grieta no debe desviarse más de  $20^\circ$  con respecto al plano de simetría sobre una distancia de  $0,1W$ . Esto se comprueba trazando inicialmente unas marcas a  $0.1W \cdot \text{tg}20^\circ$  de la línea media. Se comprueba que la distancia entre el último punto sobre la línea media y aquel a partir del cual se sobrepasan las marcas no es inferior a  $0.1W$ .

En caso de no cumplirse alguna de las comprobaciones anteriores debe darse el ensayo por no válido de acuerdo a la norma.

Es importante hacer notar que durante el precrecimiento es posible que la aplicación de la carga se detenga durante un determinado tiempo. En este caso es probable que los resultados obtenidos inmediatamente después de la parada sean poco coherentes (como velocidades de crecimiento negativas o una velocidad de crecimiento menor) en cuyo caso deben ser descartados. Por tanto es necesario prestar especial atención al comportamiento después de una parada para detectar cualquier anomalía.

Puede ocurrir en algún caso que al aumentar o reducir la carga produciendo una variación importante la longitud de grieta calculada varíe cuando realmente esto no ocurre. Esto hace que sea importante la medida de la longitud de grieta tras el precrecimiento por otros medios.

### **Realización del ensayo**

Una vez realizado el precrecimiento y comprobado que la grieta ha crecido dentro de los límites permitidos se pasa al ensayo propiamente dicho. Este se hará con la carga y frecuencia previamente determinadas.

Si durante el ensayo se hace una parada es posible que se produzca un transitorio al reanudar el ensayo. Los datos deben ser descartados si la velocidad de crecimiento después de la parada es menor que antes de pararlo.

El ensayo termina con la rotura de la probeta. En este momento han de hacerse nuevas comprobaciones sobre la geometría de la grieta con el fin de determinar la validez del ensayo. Estas comprobaciones consisten en que las medidas de la grieta en las dos caras de la probeta no difieran en más de  $0.025W$  (midiendo al comienzo del crecimiento inestable de la grieta) y que la grieta no se desvíe más de  $20^\circ$  respecto al plano de simetría en una distancia de  $0.1W$ , del mismo modo que se establecía para el precrecimiento. El cumplimiento de estos requisitos, que deben ser comprobados visualmente, es indispensable para considerar válido el ensayo.



Fig 5.2.3-11. Probeta rota tras ensayo de crecimiento de grieta, vista lateral



Fig 5.2.3-12. Probeta rota tras ensayo de crecimiento de grieta, vista frontal.

Además se comprueba que el comportamiento sea predominantemente elástico, lo cual se verifica vigilando que se cumpla que  $(W - a) \geq (4/\pi)(K_{\max} / \sigma_{YS})^2$ , donde  $\sigma_{YS}$  es el límite de fluencia.