

1	OBJETO	3
2	ALCANCE	3
3	REFERENCIAS	3
4	DEFINICIONES	4
5	GENERALIDADES	4
6	DESCRIPCIÓN	5
6.1	MÁQUINA DE ENSAYOS.....	5
6.2	ÚTILES PARA LA SUJECIÓN DE PROBETAS.....	5
6.2.1	<i>Probetas C(T) y ESE(T)</i>	5
6.2.2	<i>Probeta M(T)</i>	6
6.3	PROBETAS.....	6
6.3.1	<i>La probeta C(T)</i>	7
6.3.2	<i>La probeta M(T)</i>	7
6.3.3	<i>La probeta con carga excéntrica, ESE(T)</i>	8
7	RECOPIACIÓN DE DATOS PREVIA AL ENSAYO	9
8	REALIZACIÓN DEL ENSAYO	9
8.1	VARIABLES AMBIENTALES A CONTROLAR DURANTE EL ENSAYO.	9
8.2	MEDIDA DE LA LONGITUD DE GRIETA CON EXTENSÓMETRO.	10
8.3	CÁLCULOS INICIALES.....	10
8.3.1	<i>Establecer ΔK inicial del ensayo, ΔK_{inic}</i>	10
8.3.2	<i>Estimación del precrecimiento de grieta, Δa</i>	10
8.3.3	<i>Estimación de la carga durante el ensayo</i>	11
8.3.4	<i>Cálculo de la carga durante el precrecimiento</i>	11
8.4	PREPARACIÓN DE LA PROBETA.	12
8.4.1	<i>Pulido y comprobación del espesor</i>	12
8.4.2	<i>Marcas o pegado de rejilla</i>	12
8.5	MONTAJE DE LA PROBETA EN LA MÁQUINA.	12
8.5.1	<i>Lubricar las mordazas</i>	12
8.5.2	<i>Puesta a cero del controlador de carga</i>	12
8.5.3	<i>Colocación de la probeta</i>	12
8.6	PRECRECIMIENTO DE LA GRIETA.....	12
8.6.1	<i>Determinación de la frecuencia del ensayo</i>	12
8.6.2	<i>Aplicación de la carga</i>	13
8.6.3	<i>Terminación del precrecimiento</i>	14
8.7	COMPROBACIÓN DESPUÉS DEL PRECRECIMIENTO.	14
8.8	ENSAYO.....	14
8.8.1	<i>Carga</i>	14
8.8.2	<i>Frecuencia</i>	15
8.8.3	<i>Ensayo con K creciente para $da/dN > 10^{-8}$ m/ciclo</i>	15
8.8.4	<i>Ensayo con K decreciente para $da/dN < 10^{-8}$ m/ciclo</i>	15
8.9	TERMINACIÓN DEL ENSAYO.....	16
9	REGISTRO DE DATOS POSTERIOR AL ENSAYO	16
9.1	COMPROBACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA GRIETA.	16
9.2	CORRECCIÓN POR CURVATURA DE LA GRIETA.	16

10	CÁLCULOS	17
10.1	DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE GRIETA MEDIANTE EL EXTENSÓMETRO.	17
10.1.1	<i>Corrección de longitud de grieta por rotación</i>	18
10.2	DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CRECIMIENTO.	19
10.2.1	<i>Método del polinomio incremental</i>	20
10.2.2	<i>Método de la secante</i>	20
10.3	DETERMINACIÓN DEL RANGO DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES, ΔK .	20
10.3.1	<i>Probeta C(T)</i>	20
10.3.2	<i>Probeta M(T)</i>	20
10.3.3	<i>Probeta ESE(T)</i>	21
10.4	COMPROBACIÓN DEL TAMAÑO DE LA PROBETA.	21
10.5	DETERMINACIÓN DEL UMBRAL DE CRECIMIENTO DE GRIETA POR FATIGA.....	21
11	CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES	21
12	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	22

PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE VELOCIDAD DE CRECIMIENTO DE GRIETA SOBRE MATERIALES METÁLICOS SEGÚN NORMA ASTM E 647-00

1 OBJETO

Este procedimiento tiene como fin definir un método para la realización de ensayos de velocidad estable de crecimiento de grietas por fatiga, de acuerdo con la Norma ASTM E 647-99, que pretende determinar esta velocidad en función del rango del factor de intensidad de tensiones en el borde de la grieta, midiendo la longitud de grieta mediante el uso de un extensómetro.

2 ALCANCE

El ámbito de aplicación de este procedimiento se limita a probetas del tipo compact, C(T), (Fig. 2), “middle-tension”, M(T), (Fig. 3) o la probeta con grieta en un borde y cargada excéntricamente, ESE(T), (Fig. 4). En adelante se hará referencia a estos tipos de probeta por sus siglas.

Los materiales usados en este método no están limitados por el espesor o resistencia siempre que tengan el espesor suficiente para que no se produzca pandeo y sean lo suficientemente grandes para que el comportamiento durante el ensayo sea predominantemente elástico.

Sin embargo es preferible usar probetas no demasiado pequeñas para facilitar la medida (un valor de $W=50$ mm se ha comprobado que da buenos resultados). Por la misma razón es recomendable no llevar el ancho de la probeta al máximo permitido.

El cierre de grieta y las tensiones residuales pueden afectar a los resultados, aunque estas variables no se incorporan en el cálculo del factor de intensidad de tensiones.

3 REFERENCIAS

Normas ASTM:

- [1] E4 “Practices for Force Verification of Testing Machines”
- [2] E 6-99 “Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing”
- [3] E 8M-00 “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”
- [4] E 399 “Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”
- [5] E 616 “Terminology Relating to Fracture Testing”
- [6] E 1012 “Practice for Verification of Specimen Alignment Under Tensile Loading”
- [7] E 1050 “Definitions of Terms Relating to Fatigue”
- [8] E 1280-01 “Standard Test Methods for Measurement of fracture toughness”

4 DEFINICIONES

Son de aplicación las definiciones generales de las referencias [2],[5] y [7] 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 E-616

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

Máxima carga, P_{max} [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_{max} [$FL^{-3/2}$]: se corresponde con P_{max}.

Mínima carga, P_{min}[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_{min}[$FL^{-3/2}$] : Se corresponde con P_{min} si $R>0$ y es nulo en caso contrario ($R\leq 0$)

Número de ciclos, N.

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

Umbral de crecimiento de grieta por fatiga, ΔK_{th} [$FL^{-3/2}$] : 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^{-10} 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

5 GENERALIDADES

El ensayo consiste en aplicar una carga cíclica a una probeta con una entalla en la que previamente se ha provocado 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 rango del factor de intensidad de tensiones, ΔK , que se calcula con unas expresiones basadas en el análisis de tensiones elástico-lineal.

6 DESCRIPCIÓN

6.1 Máquina de ensayos

Se utilizará cualquiera de las máquinas de ensayo que estén acreditadas para este ensayo.

La adquisición se realizará con uno de los dos programas disponibles en los laboratorios. Si la utilización del ordenador de adquisición con tarjeta de 12 bits con el programa correspondiente es incapaz de dar resultados adecuados para su análisis será necesaria la utilización del ordenador con tarjeta de adquisición de 16 bits con el programa correspondiente.

En caso de considerarse necesario se puede utilizar un filtro analógico SCXI, esto es recomendable cuando la señal que se desea adquirir es del orden del ruido.

6.2 Útiles para la sujeción de probetas

Si los útiles son proporcionados por el cliente habrá que comprobar que se ajustan a las dimensiones que se indican a continuación según el tipo de probeta. En caso contrario se utilizarán los útiles disponibles en el laboratorio para cada tipo de probeta.

6.2.1 Probetas $C(T)$ y $ESE(T)$.

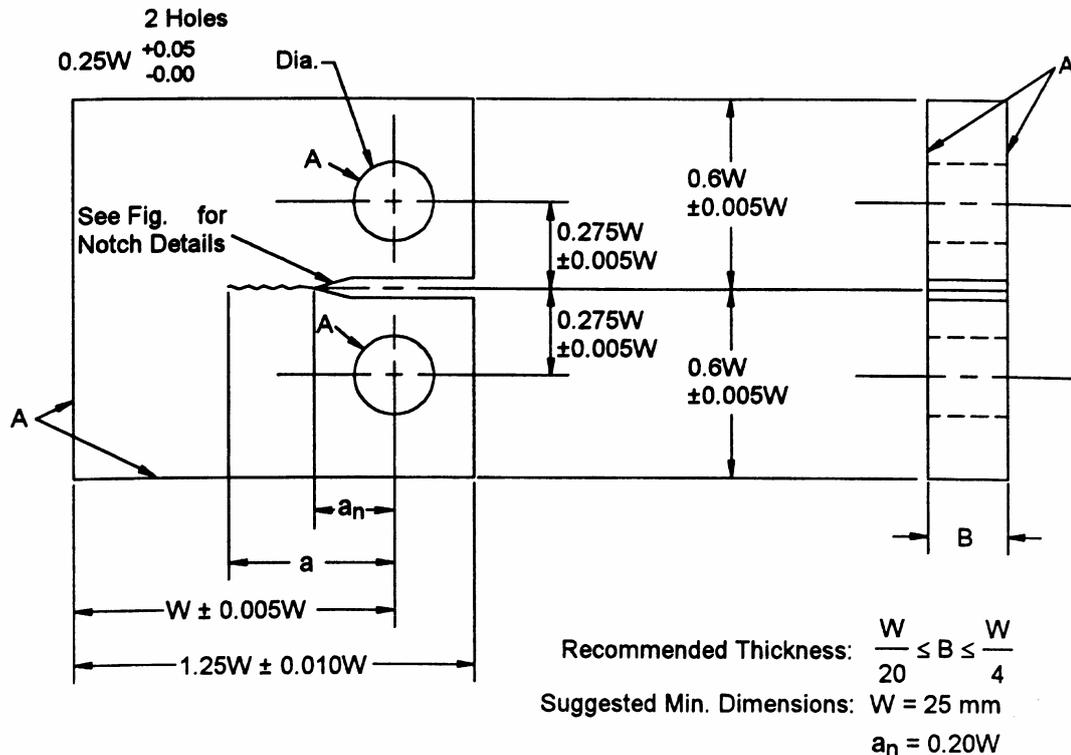
La cogida es una horquilla con pasador (Fig. 1) en la parte superior e inferior de la probeta para permitir la rotación mientras la probeta se carga. Las proporciones y tolerancias de los útiles se muestran en función del ancho, W , y espesor, B , de la probeta (Fig. 1).

Procúrese, asimismo, que la carga aplicada esté centrada para así evitar la aparición de momentos.

6.3.1 La probeta C(T).

Su geometría viene definida en la figura 2. Este tipo de probeta no se usará para un ensayo tracción-compresión. Los detalles de la entalla se muestran en la figura 7.

- 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 $W/2$.



Nota 1. Dimensiones en mm.

Nota 2. Las superficies A deben ser perpendiculares y paralelas en $\pm 0.05 \text{ mm}$.

Nota 3. La intersección de las puntas de la entalla mecanizada con las caras de la probeta deben estar igualmente distantes del borde superior e inferior de la probeta dentro de $0.005W$.

Nota 4. El acabado superficial de los agujeros y bulón debe ser de $R_a = 0.8 \mu\text{m}$ o mejor.

Figura 2. Probeta Compact-Tension, C(T).

6.3.2 La probeta M(T).

Su geometría se muestra en la figura 3.

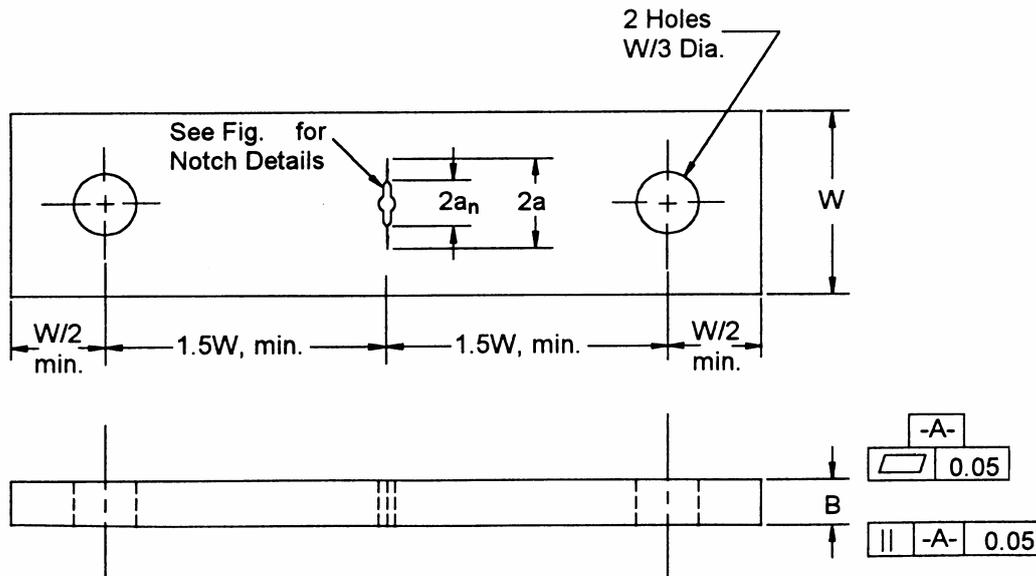
- La entalla mecanizada, $2a_n$, debe estar centrada con respecto a la línea media con una tolerancia de $\pm 0.001W$.
- El espesor de la probeta está limitado por $B \leq W/4$ aunque se recomiendan las de espesor $B \leq W/8$.
- Si el útil de sujeción es una mordaza u otro dispositivo que no permita holguras, para hacer ensayos tracción-compresión, entonces la mínima distancia entre los puntos de agarre es $1.2W$.
- Si el útil de sujeción es una horquilla con varios pasadores y $W > 75 \text{ mm}$, la distancia mínima entre los puntos donde se aplica la carga es $1.5W$.

- Si el útil de sujeción es una horquilla con un pasador y $W < 75\text{mm}$, la distancia mínima entre los puntos donde se aplica la carga es $3W$, tal como se muestra en la figura 3.

6.3.3 *La probeta con carga excéntrica, ESE(T).*

Su geometría se muestra en la figura 4. Este tipo de probeta no se usará para un ensayo tracción-compresión.

- 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 $W/2$.



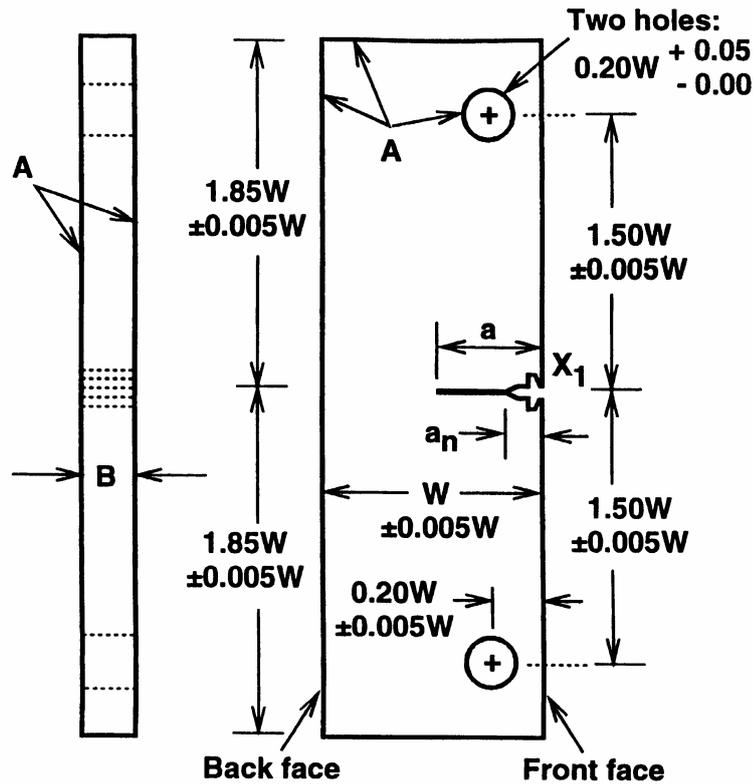
Nota 1. Dimensiones en mm.

Nota 2. La entalla mecanizada, $2a_n$, debe estar centrada dentro de $\pm 0.001W$.

Nota 3. Para probetas con $W > 75\text{mm}$ se recomienda una cogida con varios agujeros.

Nota 4. El acabado superficial de los agujeros y bulón debe ser de $R_a = 0.8\mu\text{m}$ o mejor.

Figura 3. Probeta Middle-Tension, M(T).



Nota 1. Dimensiones en mm.

Nota 2. Las superficies A deben ser perpendiculares y paralelas en $\pm 0.002 W$.

Nota 3. La intersección de la entalla mecanizada con las caras de la probeta deben ser equidistantes del borde superior e inferior de la probeta dentro de $0.005W$.

Nota 4. El acabado superficial de los agujeros y bulón debe ser de $R_a = 0.8\mu\text{m}$ o mejor.

Figura 4. Probeta de carga excéntrica y grieta en el borde, ESE(T).

7 RECOPIACIÓN DE DATOS PREVIA 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, σ_{YS} .
- Tensión de rotura del material, σ_{ULT} .

8 REALIZACIÓN DEL ENSAYO

8.1 Variables ambientales a controlar durante el ensayo.

Estas variables se registrarán al principio, final y periódicamente durante el ensayo.

- Temperatura.
- Humedad relativa.

8.2 Medida de la longitud de grieta con extensómetro.

Se recomienda una medida de la grieta por un procedimiento distinto del óptico, debido a que la presencia de un ambiente húmedo puede dificultar la medida de la misma.

La expresión del apartado 10.2 relaciona la medida del extensómetro (que también se registra de forma continua) con la longitud de grieta.

La longitud de la grieta para las probetas C(T) y ESE(T) es el valor medio de las medidas en las dos caras. En las probetas M(T) es la media entre cuatro medidas. Todo esto es válido si no es necesaria la corrección por rotación (ver 10.2.1)

8.3 Cálculos iniciales.

8.3.1 Establecer ΔK inicial del ensayo, ΔK_{inic} .

Si no se establece un valor de este parámetro en el contrato con el cliente, se obtendrá de ensayos anteriores que se hayan hecho con ese material. En caso contrario se utilizará la tabla 1 escogiendo el material más parecido al que se va a ensayar. Los valores de la tabla están calculados para un $R = 0$.

Tabla 1. Rango ΔK para distintos materiales.

Material	ΔK (MPa m ^{0.5})	Material	ΔK (MPa m ^{0.5})
Acero 4340	10	Al 2024	6
Acero inoxidable	18	Al 7075	6
Acero martensítico	7	Inconel 706 (Ni)	20
Acero ferrítico	12	Low Carbon Astroloy (Ni)	30
		Aleación Titanio	13

Con estos valores de ΔK , obtenemos mediante las expresiones del apartado 10.3 la carga necesaria para obtener una velocidad de crecimiento de grieta de 10^{-8} m/ciclo.

En caso de no conocer estos valores es necesario la realización previa de un ensayo que permita determinarlos teniendo en cuenta el valor de K_{IC} (que deberá ser siempre superior a la carga inicial estimada) y las explicaciones de 8.8.4.

8.3.2 Estimación del precrecimiento de grieta, Δa .

La longitud que se hará precrecer la grieta será al menos el mayor valor entre: $W/16$, $0.1B$ y 1mm (figura 5).

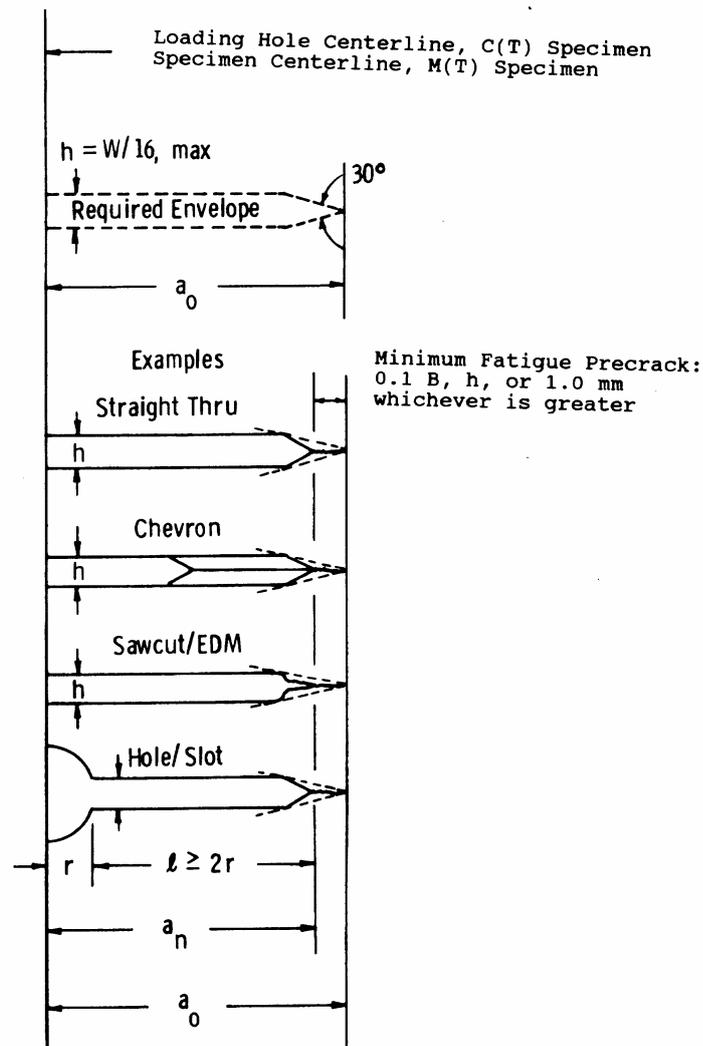


Figura 5. Detalles de las entallas.

8.3.3 Estimación de la carga durante el ensayo.

Utilizando las expresiones del apartado 10.3 con ΔK_{inic} y como longitud de grieta $a_n + \Delta a$ se obtendrá la carga inicial del ensayo, ΔP_{inic} . Las cargas máxima y mínima son:

$$\left. \begin{aligned} P_{\max} &= \frac{\Delta P_{inic}}{1-R} \\ P_{\min} &= P_{\max} \cdot R \end{aligned} \right\} R \geq 0 \quad \left. \begin{aligned} P_{\max} &= \Delta P_{inic} \\ P_{\min} &= P_{\max} \cdot R \end{aligned} \right\} R < 0$$

8.3.4 Cálculo de la carga durante el precrecimiento.

Ésta será un 0.9 veces la carga estimada para el ensayo.

8.4 Preparación de la probeta.

8.4.1 Pulido y comprobación del espesor.

Se pulirán las caras de la probeta en caso de que se vaya a medir la longitud de grieta ópticamente. Después del pulido se hará una comprobación del espesor, *B*.

8.4.2 Marcas o pegado de rejilla.

Se harán marcas en la probeta o se pegarán rejillas fotográficas de precisión para facilitar la medida de la grieta por medios ópticos.

8.5 Montaje de la probeta en la máquina.

8.5.1 Lubricar las mordazas.

8.5.2 Puesta a cero del controlador de carga.

8.5.3 Colocación de la probeta.

Se coloca la probeta en la máquina de ensayo con los útiles que le correspondan para el tipo de probeta que se va a ensayar.

8.5.4 Puesta a cero del controlador del extensómetro.

8.6 Precrecimiento de la grieta.

El objetivo del precrecimiento de grieta es que haya una grieta inicial del tamaño y forma apropiado para asegurar que la entalla mecanizada no ejerce ninguna influencia en el cálculo de *K*; a partir de ahí se inicia el ensayo propiamente dicho.

8.6.1 Determinación de la frecuencia del ensayo.

Se aplica estáticamente la máxima y mínima carga que se va a aplicar durante el precrecimiento y se registra el desplazamiento. Con dichos valores se calcula la amplitud del mismo. La frecuencia de la carga durante el precrecimiento será el 50% de la máxima que permite la máquina que se esté utilizando para el desplazamiento registrado según la figura 8.

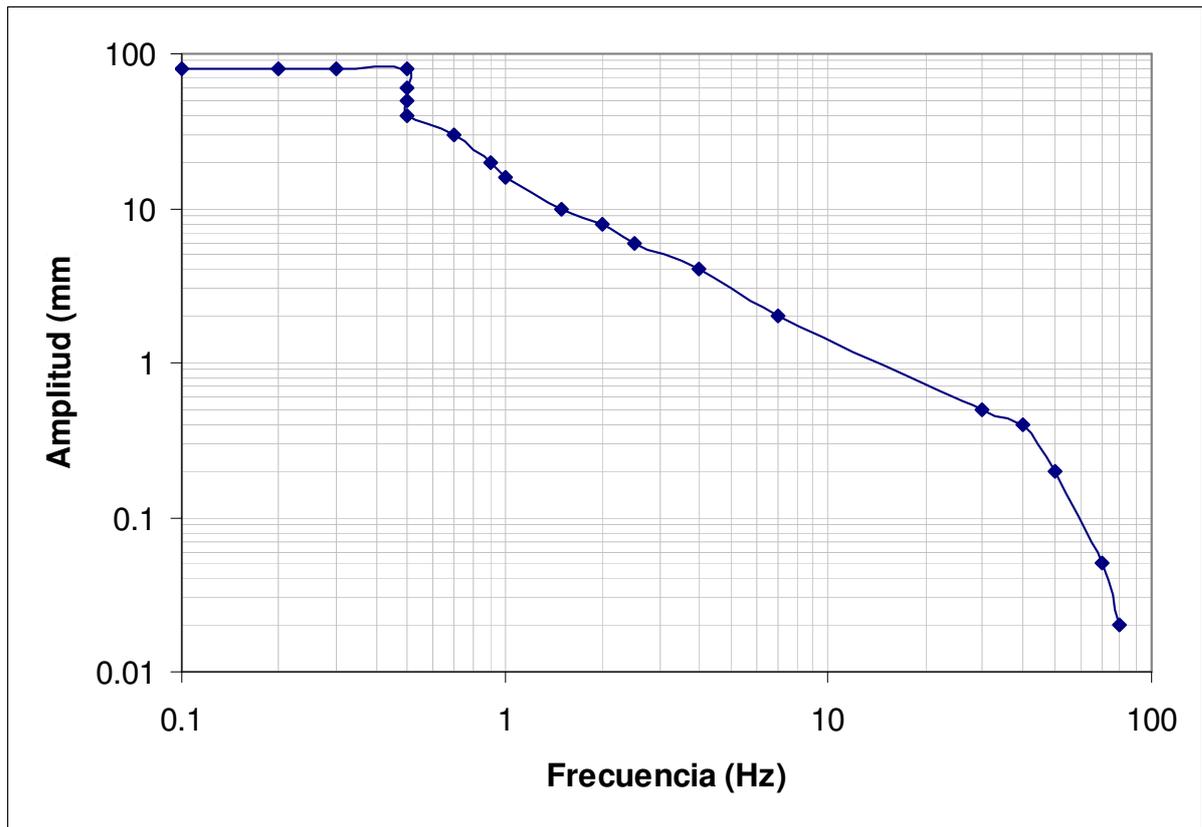


Figura 8. Amplitud y frecuencias máximas aplicables en la MTS 810.

Téngase en cuenta que durante el precrecimiento se aplicarán cargas superiores a las previamente calculadas, por lo que la frecuencia aplicable podría ser menor. Por tanto, es útil realizar el cálculo de la frecuencia con cargas mayores.

8.6.2 Aplicación de la carga.

- Se aplican la carga y frecuencia previamente establecidas.
- Si transcurridos 10000 ciclos no se ha iniciado la grieta se aumentará la carga un 20%, esto se repetirá hasta que aparezca la grieta. Puede ser interesante realizar incrementos de carga menores o esperar un mayor número de ciclos procurando así iniciar la grieta con la carga más reducida posible.
- En cuanto aparezca la grieta la carga se irá disminuyendo 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 durante el escalón de carga. Esto se repite hasta llegar a las cargas aplicadas inicialmente. Al variar la carga puede ocurrir que la longitud de grieta medida por el extensómetro varíe sin que esto ocurra realmente. Hay que estar atento a este posible efecto y comprobar la longitud de grieta por medios visuales al finalizar el precrecimiento.

- El K_{\max} final obtenido en el precrecimiento no debe ser superior al calculado para el ensayo.

8.6.3 Terminación del precrecimiento.

Se termina cuando se llega al menos a la distancia previamente establecida y se ha reducido hasta la carga inicial del precrecimiento.

8.7 Comprobación después del precrecimiento.

- Cuando se termina el precrecimiento se mide la longitud de la grieta por ambos lados con una precisión de el valor más alto entre 0.1mm y 0.002 W . Para probetas con $W > 127\text{mm}$ la precisión será de 0.25mm.
- Las grietas medidas en las dos caras de la probeta no deben diferir en más de 0.25 B . Para la probeta tipo M(T) se debe cumplir además que las longitudes de las dos grietas (para cada una usar la media entre las longitudes medidas en ambas caras) no difieran en más de 0.025 W .

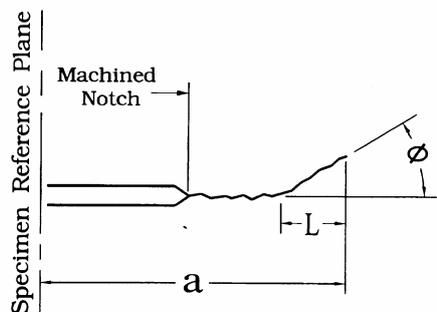
Una posible y frecuente causa de esa diferencia es una aplicación no centrada de la carga; por lo tanto, es importante una correcta colocación de la probeta y de los clevis.

- El plano de la grieta no debe desviarse más de 20° con respecto al plano de simetría sobre una distancia de 0.1 W , tal como se muestra en la figura 9.

Para facilitar la comprobación de esta condición se recomienda trazar unas marcas a una distancia 0.1 $W \cdot \text{tg}20^\circ$ de la línea media.

Compruébese, en caso de sobrepasar dichas marcas, que las distancia comprendida entre el último punto en el que la grieta estuvo en la línea media y el punto a partir del cual se sobrepasan dichas marcas no es inferior a 0.1 W .

Si no se cumple alguna de estas condiciones el ensayo debe darse por no válido según la norma ASTM E-647.



Valid if $\phi \leq 10^\circ$
Report if $10^\circ < \phi \leq 20^\circ$
Invalid if $\phi > 20^\circ$ for $L \geq 0.1W$

Figura 9. Límites del crecimiento de grieta fuera del plano.

8.8 Ensayo.

8.8.1 Carga.

La carga será 1.11 veces la aplicada durante el precrecimiento.

8.8.2 Frecuencia.

Se utiliza el mismo criterio que en el precrecimiento.

8.8.3 Ensayo con K creciente para $da/dN > 10^{-8}$ m/ciclo.

- Se aplica la carga determinada anteriormente y no se varía hasta que finalice el ensayo.
- Si se disponen de varias probetas para obtener la curva $da/dN-\Delta K$ y si la grieta llega al límite de la longitud para la que este ensayo es válido (apartado 10.4) y no se ha cubierto todo el rango de variación de ΔK objeto de los ensayos, se harán más ensayos comenzando cada uno con un ΔK que sea el valor medio entre el inicial y final del ensayo anterior de ΔK hasta completar todo el rango de la curva $da/dN-\Delta K$ que se quiera medir.
- Si en el primer ensayo la velocidad inicial resultó ser mayor de 10^{-8} m/ciclo se hará otro ensayo comenzando con un ΔK inicial que se obtendría de prolongar con una recta los datos obtenidos en los ensayos anteriores y escoger el valor para $da/dN = 10^{-8}$ m/ciclo.

Si durante el ensayo se hace una parada muy larga, 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.

8.8.4 Ensayo con K decreciente para $da/dN < 10^{-8}$ m/ciclo.

- Inicialmente se aplica la carga necesaria para que la velocidad de crecimiento de grieta sea de 10^{-8} m/ciclo (véase apartado 8.8.1).
- Se van disminuyendo las cargas hasta llegar al valor mínimo de ΔK que se quiera medir o hasta que se haya alcanzado la velocidad de crecimiento de grieta deseada.
- Una vez llegado a este punto se incrementan las cargas y se mantienen constantes para obtener valores de comparación con un K creciente.
- No se recomienda el ensayo con K decreciente para velocidades de crecimiento de grieta superiores a 10^{-8} m/ciclo.
- La variación de la carga con la longitud de grieta debe hacerse de manera gradual con objeto de:
 - excluir resultados incoherentes que pueden ser debidos a la reducción del factor de intensidad de tensiones o a efectos transitorios.
 - permitir la toma de cinco puntos (da/dN , ΔK), igualmente espaciados aproximadamente, por década de velocidad de crecimiento de grieta.

Lo impuesto anteriormente se consigue limitando el gradiente K normalizado:

$$C = \left(\frac{1}{K} \right) \left(\frac{dK}{da} \right) > -0.08mm^{-1}$$

Dicha condición se impone de forma incremental y sustituyendo K por el valor medio entre K_i y K_{i+1} :

$$C = \frac{1}{\left(\frac{K_i + K_{i+1}}{2} \right)} \cdot \frac{K_{i+1} - K_i}{\Delta a} > -0.08mm^{-1}$$

Así, a partir de un K_i se calcula el K correspondiente a una carga menor: K_{i+1} , pudiendo despejar Δa , cuyo valor representa cuánto hay que dejar crecer la grieta antes de volver a disminuir la carga.

Todo esto puede conseguirse disminuyendo la carga en escalones del 10% cada vez que la grieta crezca 0.5 mm hasta llegar al valor mínimo que se quiera medir o hasta que pasen 50000 ciclos sin que la grieta crezca la medida anterior (en ese caso estaremos cerca del umbral de crecimiento ΔK_{th}). A continuación se incrementan las cargas en un 10% y se mantienen constantes hasta el fin del ensayo.

8.9 Terminación del ensayo.

El ensayo se termina con la rotura de la probeta.

9 REGISTRO DE DATOS POSTERIOR AL ENSAYO

9.1 Comprobación de la geometría de la grieta.

Igual que en el apartado 8.7.

- Las grietas medidas en las dos caras de la probeta no deben diferir en más de $0.25B$. Para la probeta tipo M(T) se debe cumplir además que las longitudes de las dos grietas (para cada una usar la media entre las longitudes medidas en ambas caras) no difieran en más de $0.025W$. Esta condición debe imponerse en el comienzo de la rotura inestable.
- El plano de la grieta no debe desviarse más de 20° con respecto al plano de simetría sobre una distancia de $0.1W$, tal como se muestra en la figura 9 y de acuerdo con el criterio comentado en el precrecimiento.

Estas condiciones deberán verificarse visualmente aunque la longitud de la grieta se mida por otros medios. Si no se cumple alguna de estas condiciones el ensayo debe darse por no válido según la norma ASTM E-647.

9.2 Corrección por curvatura de la grieta.

Al terminar el ensayo se medirá sobre la superficie de fractura en dos lugares distintos la longitud de la grieta utilizando tres puntos (en el centro y a mitad de camino entre los bordes y el centro) y calculando la media (figura 10). Los dos lugares son el final del precrecimiento y el final del ensayo, los cuales deberán estar distanciados uno del otro al menos el mayor entre $0.25W$ y B . En cada uno de estos sitios habrá que comprobar que cada una de las tres medidas no difiere de la media en más del 10%. La diferencia entre los valores obtenidos de esta forma y el valor registrado durante el ensayo será la corrección por curvatura.

Si alguna de estas dos correcciones implica una variación de más del 5% en el cálculo del factor de intensidad de tensiones, utilizarla para analizar todos los datos registrados. Para corregir los datos intermedios utilizar una interpolación lineal entre los dos valores de la corrección obtenidos.

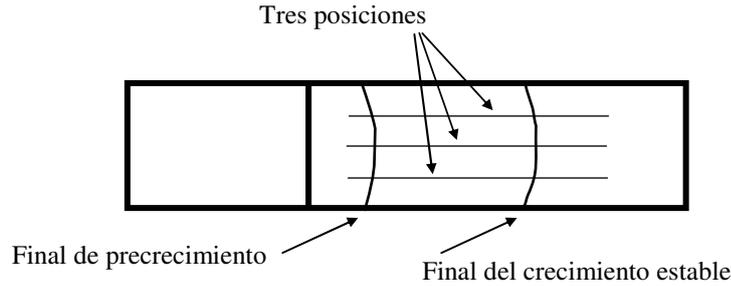


Figura 10. Corrección por curvatura.

Puede ocurrir que no sea posible la medición de estas longitudes por falta de medios apropiados. En este caso la medición de la longitud de la grieta puede servir para no tener en cuenta un ensayo si la grieta crece más de lo permitido por una cara que por la otra. Sin embargo la medida de la longitud final al ser aproximada sólo servirá como dato orientativo para comprobar la validez de la longitud de grieta registrada por medio del extensómetro.

10 CÁLCULOS

10.1 Determinación de la longitud de grieta mediante el extensómetro.

La medida del extensómetro y la longitud de grieta están relacionados por la expresión

$$\alpha = \frac{a}{W} = C_0 + C_1 u_x + C_2 u_x^2 + C_3 u_x^3 + C_4 u_x^4 + C_5 u_x^5$$

$$u_x = \left\{ \left[\frac{EvB}{P} \right]^{1/2} + 1 \right\}^{-1}$$

Válido para $0.2 \leq a/W \leq 0.975$

Donde :
 v: medida dada por el extensómetro
 E: módulo de la elasticidad
 B: espesor de la probeta
 P: carga aplicada
 a: longitud de la grieta
 W: anchura de la probeta

Y los coeficientes c_i toman distintos valores según la posición del extensómetro

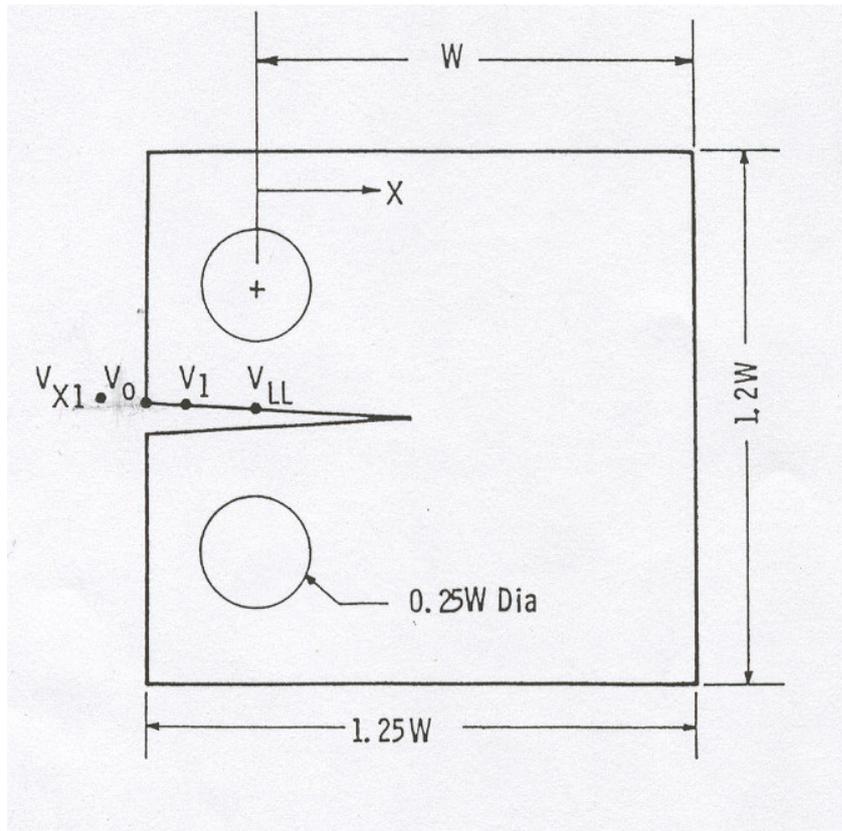


Tabla 2. Valores de los coeficiente c_i en función de la posición del extensómetro

Punto de medida	X/W	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
V_{x1}	-0.345	1.0012	-4.9165	23.057	-323.91	1798.3	-3513.2
V_0	-0.250	1.0010	-4.6695	18.460	-236.82	1214.9	-2143.6
V_1	-0.1576	1.0008	-4.4473	15.400	-180.55	870.92	-1411.3
V_{LL}	0	1.0002	-4.0632	11.242	-106.04	464.33	-650.68

En caso de que el punto donde se realiza la medida no se corresponde con ninguno de los valores recogidos en la tabla, se realizará el método de interpolación oportuno. Deberá indicarse una cota del error cometido.

10.1.1 Corrección de longitud de grieta por rotación

Cuando aparecen grandes deformaciones en la probeta, para obtener una buena aproximación de la longitud instantánea de la grieta es necesario utilizar una corrección por rotación. En esta situación, para ensayos con probetas C(T), la longitud de grieta es:

$$\alpha = \frac{a}{W} = C_0 + C_1 u_{LL} + C_2 u_{LL}^2 + C_3 u_{LL}^3 + C_4 u_{LL}^4 + C_5 u_{LL}^5$$

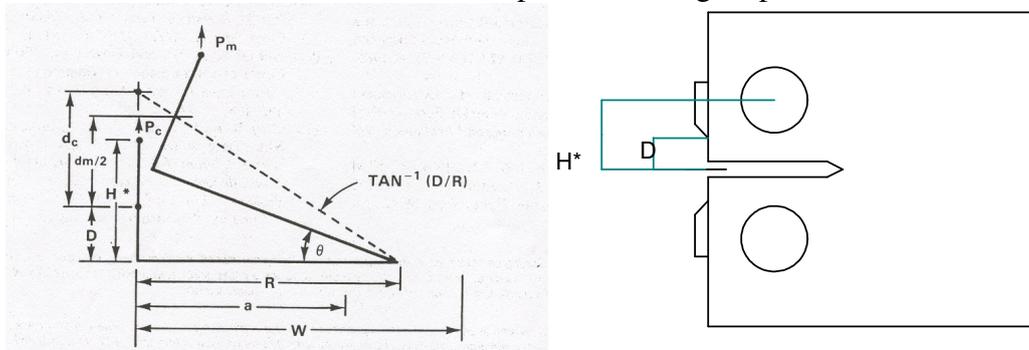
siendo los coeficientes c_i los mismos que en el caso anterior y:

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

$$C_c = \frac{v/P}{\left[\frac{H^*}{R} \sin \theta - \cos \theta \right] \left[\frac{D}{R} \sin \theta - \cos \theta \right]}$$

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

- donde:
- 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.
 - θ : 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.



Sólo debe considerarse esta corrección si el error máximo cometido es superior al 1%. En ningún caso tendrá que considerarse para las probetas ESE(T) y M(T), al ser en ellas la rotación prácticamente despreciable.

10.2 Determinación de la velocidad de crecimiento.

Ésta se obtiene del número de ciclos vs. longitud de grieta. Si el ensayo era de K creciente se pueden utilizar dos métodos: el método de la secante y el del polinomio incremental, aunque se utilizará éste último mientras no se diga lo contrario. Si el ensayo era de K decreciente se utilizará el método de la secante. En cualquier caso nunca se calculará una velocidad de crecimiento de grieta utilizando puntos que incluyan una variación de la carga. Los cálculos se harán con el programa de ordenador correspondiente.

10.2.1 Método del polinomio incremental.

Se ajusta a una parábola por mínimos cuadrados un bloque de $(2n+1)$ puntos donde n puede valer 1,2,3 ó 4. Mientras no se diga lo contrario se utilizará un $n = 3$. La forma de la ecuación es:

$$\hat{a}_i = b_0 + b_1 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right) + b_2 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right)^2$$

donde b_0 , b_1 y b_2 son los parámetros de regresión realizada con el bloque de $(2n+1)$ puntos y $C_1 = 0.5(N_{i-n} + N_{i+n})$ y $C_2 = 0.5(N_{i+n} - N_{i-n})$. La velocidad de crecimiento para N_i se obtiene de la derivada de la ecuación anterior:

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_{a_i} = b_1 / C_2 + 2b_2 (N_i - C_1) / C_2^2$$

El valor de ΔK asociado a esta velocidad es el calculado usando el ajuste, \hat{a}_i , para N_i .

10.2.2 Método de la secante.

La velocidad de crecimiento es la pendiente de la recta que une dos puntos consecutivos. Para una longitud definida como la media entre dos medidas consecutivas se calcula la velocidad de crecimiento y también el factor de intensidad de tensiones.

$$\bar{a} = 0.5(a_{i+1} + a_i) \quad \left(\frac{da}{dN} \right)_{\bar{a}} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad K(\bar{a})$$

Tanto si se usa el método del polinomio incremental como si es el de la secante, es importante hacer notar que si se toman puntos muy cercanos pueden darse resultados incoherentes.

En consecuencia se debe reducir el número de puntos empleados en el análisis hasta que se compruebe la desaparición de este efecto.

10.3 Determinación del rango del factor de intensidad de tensiones, ΔK .

10.3.1 Probeta C(T).

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{1.5}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

donde $\alpha = a/W$

Esta expresión es válida para $a/W \geq 0.2$.

10.3.2 Probeta M(T).

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{BW} \sqrt{\pi a \sec \frac{\pi a}{W}}$$

Esta expresión es válida para $2a/W < 0.95$. Según la definición de ΔK hay que tener en cuenta que:

$$\Delta P = P_{max} - P_{min} \quad \text{para } R > 0$$

$$\Delta P = P_{max} \quad \text{para } R < 0$$

10.3.3 Probeta ESE(T).

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \sqrt{a/W} \frac{1.4 + a/W}{\sqrt{(1 - a/W)^3}} \cdot 3.97 - 10.88 a/W + 26.25 (a/W)^2 - 38.9 (a/W)^3 + 30.15 (a/W)^4 - 9.27 (a/W)^5$$

Esta fórmula es válida para $0 < a/W < 1$

10.4 Comprobación del tamaño de la probeta.

Para que los resultados sean válidos según esta norma es necesario que el comportamiento sea predominantemente elástico, y para ello se deben cumplir las siguientes restricciones:

- Para las probetas C(T) y ESE(T) $(W - a) \geq (4/\pi)(K_{max} / \sigma_{YS})^2$
donde $(W-a)$ es el ligamento sin grieta, ver figura , y σ_{YS} es el límite de fluencia (0.2%) medido a la misma temperatura a la que se hace el ensayo.
- Para la probeta M(T) se requiere que $(W - 2a) \geq 1.25 P_{max} / (B \sigma_{YS})$

Para materiales en los que se cumple que $(\sigma_{ULT} / \sigma_{YS}) \geq 1.3$ donde σ_{ULT} es la tensión de rotura, es posible sustituir σ_{YS} por una tensión de fluencia definida por

$$\sigma_{FS} = (\sigma_{YS} + \sigma_{ULT}) / 2$$

10.5 Determinación del umbral de crecimiento de grieta por fatiga.

Calcular el mejor ajuste a una línea recta de $\log da/dN$ frente a $\log \Delta K$ utilizando un mínimo de 5 puntos igualmente espaciados entre las velocidades 10^9 y 10^{10} m/ciclo. El valor de ΔK del ajuste que se corresponda con una velocidad de 10^{10} m/ciclo será el umbral de crecimiento, ΔK_{th} .

11 CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES

El cálculo de incertidumbres en este tipo de ensayos supone un tratamiento matemático complejo ya que aparecen expresiones recursivas que lo dificultan. Una medida aproximada de la incertidumbre puede darse considerando una serie de puntos registrados a lo largo del ensayo y calcular la incertidumbre de la medida para esos puntos.

Esto no es exacto pero permite establecer de manera aproximada el rango de valores en que se encuentra el error cometido.

12 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Como regla general y salvo que el cliente solicite un modelo distinto, el informe del ensayo incluirá los siguientes datos:

Fecha de recepción de la muestra.

Fecha de realización del ensayo.

Código de identificación y tipo de material y propiedades mecánicas.

Tipo de probeta y sus dimensiones, B y W .

Figuras de la probeta y útiles de cogida si la probeta era del tipo M(T).

Precisión con la que se mide la longitud de la grieta.

Orientación del plano de la grieta según la figura (NORMA E 399).

Valores terminales de R , ΔK y a en el precrecimiento de la grieta.

Cargas aplicadas y frecuencia.

Temperatura y humedad nominales durante el ensayo.

Método para obtener los datos de velocidad de crecimiento y valores de la corrección por curvatura de la longitud de grieta.

Dibujo de la curva con $\log \Delta K$ en la abscisa y $\log da/dN$ en la ordenada. Los puntos que incumplan el requerimiento de tamaño (10.5) deben ser identificados y se deberá indicar si se ha utilizado σ_{YS} o σ_{FS} .

Si el ensayo era con K decreciente indicar C y el valor inicial de K y a . También si los datos fueron verificados con K creciente. Indicar el valor del umbral de crecimiento, la ecuación de la recta obtenida en la regresión lineal y el valor de velocidad de crecimiento más bajo utilizado para su cálculo.

Se mostrarán en una tabla los siguientes valores: a , N , ΔK y da/dN .