

6. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS

6.1 Tracción

A partir de los ensayos de tracción realizados se obtendrán a continuación una serie de parámetros que definen el comportamiento del material bajo estudio al verse sometido a tensiones de tracción. Se realizarán los cálculos para cada ensayo realizado y posteriormente los valores inferidos a partir de éstos.

En primer lugar se va a calcular el límite elástico del material, esto es, la tensión a la que el material deja de comportarse elásticamente y a partir del cual aparecen deformaciones permanentes en la pieza. Se localiza primeramente el punto en el que la deformación deja de ser lineal (B) en la representación tensión-deformación de los datos adquiridos durante el ensayo. Se considerará como módulo de elasticidad del material la pendiente de la recta que une el punto de tensión un 10% de la del punto B y el punto que toma el 60% de B. Esta será la recta OA.

Se traza una recta paralela a OA y que pase por el punto de deformación del 0.2% con tensión nula (recta mn). La tensión del punto de corte entre la recta mn y la curva obtenida a partir del ensayo será la el límite elástico del material. En la siguiente figura se representa lo indicado anteriormente.

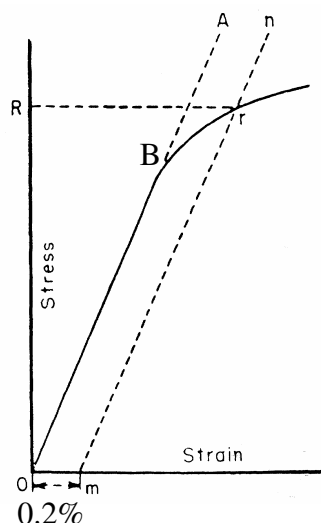


Fig 6.1-1. Valores característicos de la curva de ensayo a tracción.

A continuación debería determinarse la elongación en el punto de fluencia. Sin embargo, en el caso del aluminio, no existe un tramo de fluencia del material sino que el paso de deformación elástica a plástica se realiza a través de una curva suave y continua, tal y como podrá apreciarse en las curvas de los ensayos que se muestran algo más adelante. Por tanto en este caso se tiene 0% YPE.

Seguidamente se calcula la tensión de rotura que es la máxima tensión a la que se ha visto sometido el material durante el ensayo.

Finalmente se calculan el alargamiento tras la rotura de la probeta y la reducción de área. Para el alargamiento se mide la distancia entre puntos tras la rotura. Para ello se unen las dos partes de la probeta por la superficie de rotura usando un instrumento adecuado para ello y midiendo la distancia entre las marcas realizadas antes del ensayo. El alargamiento tras la rotura en tanto por ciento será:

$$\frac{l_f - l_i}{l_i} \times 100 \quad (6.1.1)$$

Donde l_i y l_f son la distancia entre puntos antes y después del ensayo respectivamente. En este caso el alargamiento en rotura no puede ser medido con el extensómetro ya que para ello se requiere que la distancia entre puntos de medida del mismo sea igual a la distancia G , cosa que no ocurre en este caso.

En cuanto a la reducción de área, ésta se calcula midiendo el área después del ensayo y calculando la reducción en tanto por ciento mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{A_i - A_f}{A_i} \times 100 \quad (6.1.2)$$

Donde A_i y A_f son el área de la sección reducida antes y después del ensayo respectivamente. El área inicial se calcula con el diámetro medido antes del ensayo y la final con el diámetro medido después de ensayar la probeta. Para esto, después del ensayo se deben tomar dos medidas del diámetro en la zona de mínima sección alrededor de la fractura de manera que si la sección es elíptica tras la rotura el área se calcula con la siguiente fórmula:

$$\pi \frac{d_{\min} d_{\max}}{4} \quad (6.1.3)$$

Donde $d_{\min}$ y $d_{\max}$ el diámetro mínimo y máximo medidos respectivamente.

La siguiente imagen muestra una probeta empleada en un ensayo de tracción. Se puede observar fácilmente la estricción en la zona de rotura de la probeta en la que se produce una deformación permanente con una reducción de área.

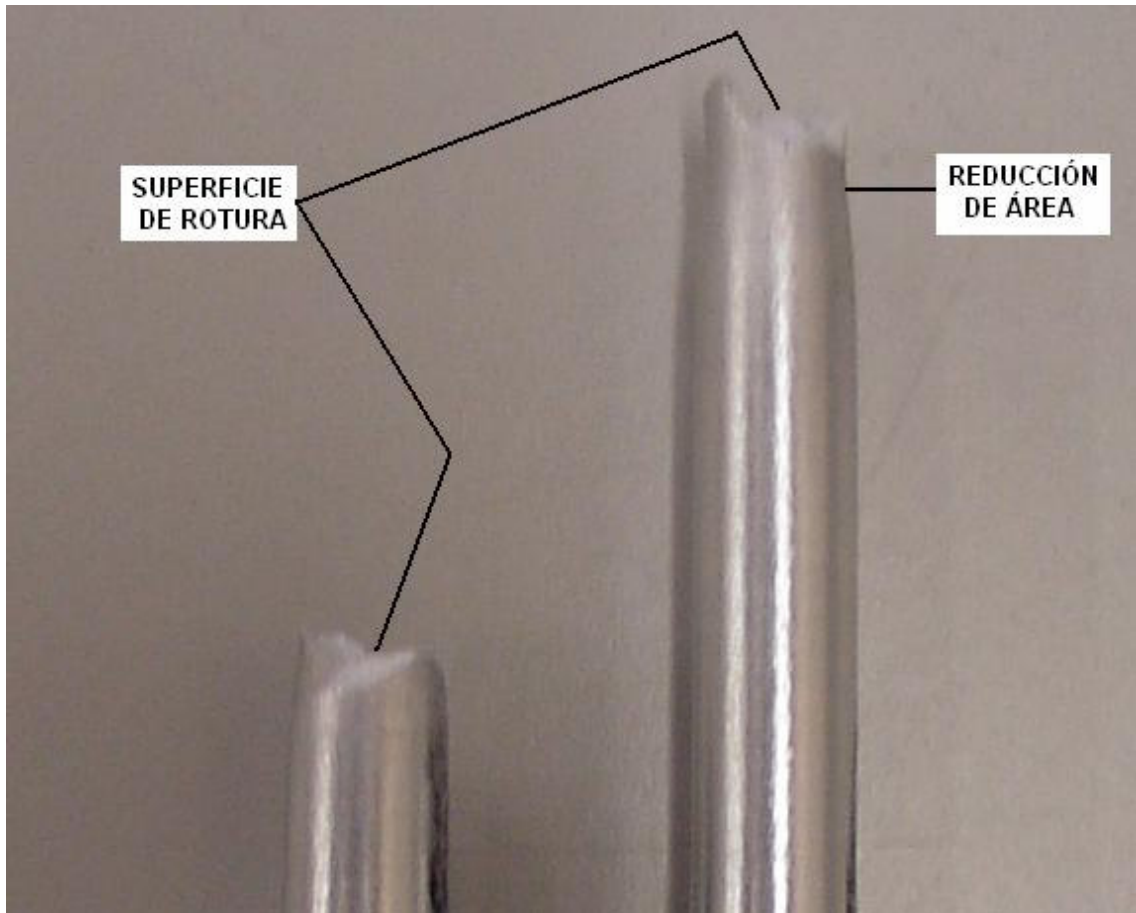


Fig 6.1-2. Reducción de área en las cercanías de la superficie de rotura.

Esta reducción de área provoca un efecto fácilmente observable en la representación de los datos adquiridos durante la realización del ensayo. En la figura 6.1-3 se presenta uno de los ensayos realizados en el que se puede comprobar que poco antes de la rotura la carga aplicada disminuye. Esto no supone que la tensión necesaria se reduzca, de hecho ésta aumenta debido al endurecimiento por deformación al igual que lo hace durante todo el ensayo a partir del límite elástico, lo que realmente ocurre es que el área resistente disminuye rápidamente y por ello, para aumentar la tensión de manera controlada es necesario reducir la carga.

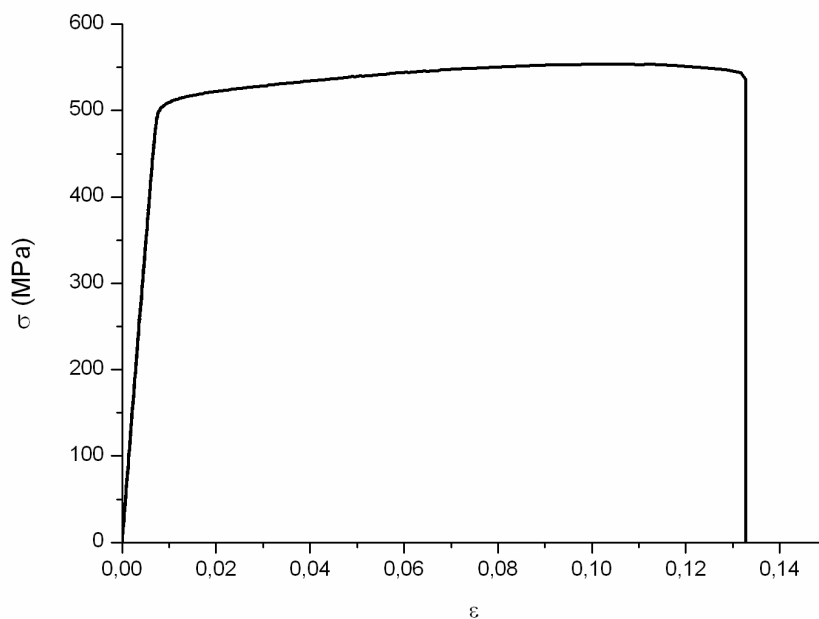


Fig 6.1-3. Curva del ensayo a tracción del aluminio 7075-T651.

Existen por tanto una tensión real y una tensión aparente. La que se muestra es la aparente, es decir, la carga aplicada dividida por el área inicial.

Si bien el cálculo de la tensión por este procedimiento no es totalmente exacto hay que hacer notar que la reducción de área no es significativa durante la mayor parte del ensayo por lo que la tensión aparente y real serán prácticamente iguales. Por otra parte, por encima de la tensión determinada como tensión de rotura (σ_u) comienza el fenómeno de estricción por lo que aunque el material admita una tensión mayor que σ_u , no es en absoluto recomendable llegar hasta ella en la aplicación práctica del material y por tanto en la mayoría de los casos carece de utilidad la determinación de la curva real en ese último tramo.

Ensayo 1

El primer ensayo que se va a analizar fue un ensayo realizado con control por carga aplicando dicha carga a una velocidad de 192 N/s. Las dimensiones de la probeta medidas antes del ensayo se muestran a continuación:

- Diámetro de la sección reducida: $D = 9.02 \text{ mm}$ (Medidas obtenidas: 9.02, 9.02, 9.02)
- Longitud entre puntos: $G = 45 \text{ mm}$

A continuación se muestra la curva obtenida durante el ensayo así como las operaciones que es necesario realizar para los cálculos anteriormente detallados.

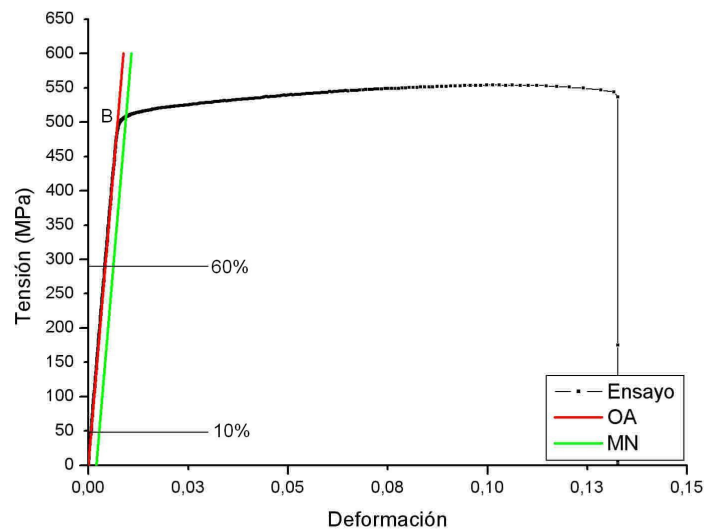


Fig 6.1-4. Curva del primer ensayo.

Donde OA y MN son las líneas auxiliares que se indican en la fig. 6.1-1.

Las dimensiones medidas tras el ensayo son las siguientes:

- Diámetro de la sección reducida: $D = 7.59 \text{ mm}$ (Medidas obtenidas: 7.59, 7.59)
- Longitud entre puntos: $G = 51.13 \text{ mm}$

A partir de los datos anteriores se realizan los cálculos oportunos para la obtención de los parámetros deseados. Estos cálculos se indican a continuación.

Punto B:

$$\sigma = 482.7 \text{ MPa}$$

$$\epsilon = 0.007136$$

Valores al 10% y 60% de la carga en B:

$$\sigma_{10} = 48.27 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{10} = 0.000682$$

$$\sigma_{60} = 289.61 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{60} = 0.004188$$

Módulo de elasticidad:

$$E = \frac{\sigma_{60} - \sigma_{10}}{\epsilon_{60} - \epsilon_{10}} = \frac{289.61 - 48.27}{0.004188 - 0.000682} = 68838 \text{ MPa} = 68.8 \text{ GPa}$$

Límite elástico:

$$\sigma_y = 507 \text{ MPa}$$

La elongación en el punto de fluencia para este material es del 0%, como ya se ha comentado anteriormente.

La tensión de rotura se calcula dividiendo la máxima carga aplicada entre el área de la sección:

$$\sigma_u = \frac{F_{\max}}{A} = \frac{35449}{63.9} = 554.7 \text{ MPa}$$

Alargamiento en rotura:

$$\frac{l_f - l_i}{l_i} \times 100 = \frac{51.13 - 45}{45} \times 100 = 14\% (45 \text{ mm G})$$

Reducción de área:

$$A_i = \pi \frac{d^2}{4} = \pi \frac{9.02^2}{4} = 63.9 \text{ mm}^2$$

$$A_f = \pi \frac{d_{\min} d_{\max}}{4} = \pi \frac{7.59 \times 7.59}{4} = 45.25 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_i - A_f}{A_i} \times 100 = 29\%$$

Ensayo 2

El segundo ensayo, también con control por carga y a la misma velocidad de aplicación se estudia a continuación.

- Diámetro de la sección reducida: D = 9.01 mm (Medidas obtenidas: 9.03, 9.02, 8.99)
- Longitud entre puntos: G = 45 mm

A continuación se muestra la curva obtenida durante el ensayo así como las operaciones detalladas.

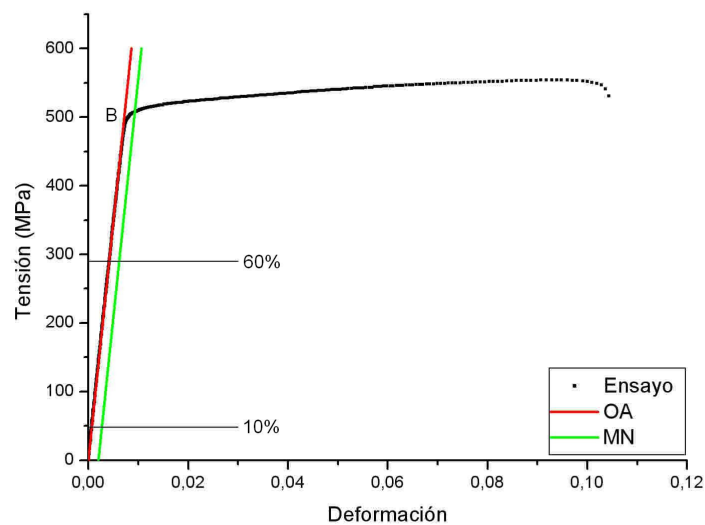


Fig 6.1-5. Curva del segundo ensayo.

Las dimensiones medidas tras el ensayo son las siguientes:

- Diámetro de la sección reducida: $D = 7.53 \text{ mm}$ (Medidas obtenidas: 7.49, 7.57)
- Longitud entre puntos: $G = 51.15 \text{ mm}$

A partir de los datos anteriores se realizan los cálculos oportunos para la obtención de los parámetros deseados. Estos cálculos se indican a continuación.

Punto B:

$$\sigma = 489.6 \text{ MPa}$$

$$\epsilon = 0.007311$$

Valores al 10% y 60% de la carga en B:

$$\sigma_{10} = 48.96 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{10} = 0.000639$$

$$\sigma_{60} = 293.75 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{60} = 0.004137$$

Módulo de elasticidad:

$$E = \frac{\sigma_{60} - \sigma_{10}}{\epsilon_{60} - \epsilon_{10}} = \frac{293.75 - 48.96}{0.004137 - 0.000639} = 69989 \text{ MPa} = 70 \text{ GPa}$$

Límite elástico:

$$\sigma_y = 508 \text{ MPa}$$

La elongación en el punto de fluencia para este material es del 0%, como ya se ha comentado anteriormente.

La tensión de rotura se calcula dividiendo la máxima carga aplicada entre el área de la sección:

$$\sigma_u = \frac{F_{\max}}{A} = \frac{35449}{63.9} = 554.7 \text{ MPa}$$

Alargamiento en rotura:

$$\frac{l_f - l_i}{l_i} \times 100 = \frac{51.15 - 45}{45} \times 100 = 14\% (45 \text{ mm G})$$

Reducción de área:

$$A_i = \pi \frac{d^2}{4} = \pi \frac{9.01^2}{4} = 63.8 \text{ mm}^2$$

$$A_f = \pi \frac{d_{\min} d_{\max}}{4} = \pi \frac{7.49 \times 7.57}{4} = 44.53 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_i - A_f}{A_i} \times 100 = 30\%$$

Ensayo 3

El tercer ensayo, fue realizado con control por desplazamiento, a la velocidad de aplicación obtenida previamente.

- Diámetro de la sección reducida: D = 9.023 mm (Medidas obtenidas: 9.03, 9.01, 9.3)
- Longitud entre puntos: G = 45 mm

A continuación se muestra la curva obtenida durante el ensayo así como las operaciones detalladas.

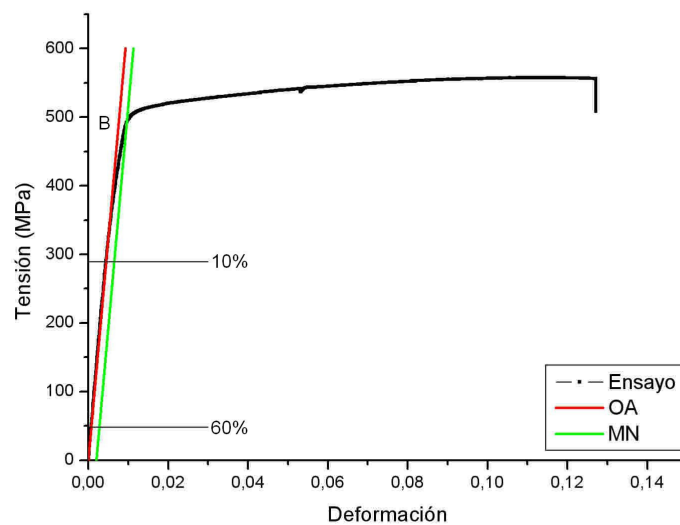


Fig 6.1-6. Curva del tercer ensayo.

Las dimensiones medidas tras el ensayo son las siguientes:

- Diámetro de la sección reducida: $D = 7.53 \text{ mm}$ (Medidas obtenidas: 7.49, 7.5)
- Longitud entre puntos: $G = 52.64 \text{ mm}$

A partir de los datos anteriores se realizan los cálculos oportunos para la obtención de los parámetros deseados. Estos cálculos se indican a continuación.

Punto B:

$$\sigma = 482.1 \text{ MPa}$$

$$\epsilon = 0.009086$$

Valores al 10% y 60% de la carga en B:

$$\sigma_{10} = 48.21 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{10} = 0.000689$$

$$\sigma_{60} = 289.24 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{60} = 0.004399$$

Módulo de elasticidad:

$$E = \frac{\sigma_{60} - \sigma_{10}}{\epsilon_{60} - \epsilon_{10}} = \frac{289.24 - 48.21}{0.004399 - 0.000689} = 64965 \text{ MPa} = 65 \text{ GPa}$$

Límite elástico:

$$\sigma_y = 492 \text{ MPa}$$

La elongación en el punto de fluencia para este material es del 0%.

La tensión de rotura se calcula dividiendo la máxima carga aplicada entre el área de la sección:

$$\sigma_u = \frac{F_{\max}}{A} = \frac{35693}{63.9} = 558.2 \text{ MPa}$$

Alargamiento en rotura:

$$\frac{l_f - l_i}{l_i} \times 100 = \frac{52.64 - 45}{45} \times 100 = 17\% (45 \text{ mmG})$$

Reducción de área:

$$A_i = \pi \frac{d^2}{4} = \pi \frac{9.023^2}{4} = 63.9 \text{ mm}^2$$

$$A_f = \pi \frac{d_{\min} d_{\max}}{4} = \pi \frac{7.43 \times 7.57}{4} = 44.17 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_i - A_f}{A_i} \times 100 = 31\%$$

Se puede observar que los resultados de este último ensayo difieren de los anteriores tanto en el módulo de Young como en el límite elástico, siendo sin embargo esta diferencia mínima para la tensión de rotura. Esto se debe a que los anteriores ensayos fueron realizados controlados por carga y este último por deformación.

Los ensayos con control por carga definen mejor la zona de comportamiento elástico y lineal y, por tanto, el límite elástico y módulo de Young. Por lo contrario, los ensayos con control por deformación son menos precisos en esta zona de la curva pero más exactos en el endurecimiento por deformación y sobre todo al determinar la zona de fluencia.

Basándose en lo ya comentado no se tendrán en cuenta los valores obtenidos en este último ensayo para el límite elástico y módulo de Young dado que se apartan notablemente de los anteriores que sabemos que son más exactos.

Resultados finales

Partiendo de los resultados previamente calculados, se pueden obtener los valores que se desean obtener como característicos del material. A continuación se muestran dichos resultados globales:

Tabla 6.1-1. Resultados de los ensayos de tracción.

	E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	Alargamiento en rotura ⁽¹⁾	Reducción de área
Ensayo 1	68,8	507	554.7	14 %	29 %
Ensayo 2	70	508	554.7	14 %	30 %
Ensayo 3	-	-	558.2	17 %	31 %
MEDIA	69,4	507,5	556	15 %	30 %

(1) Medido sobre una longitud $G = 45$ mm.

En el caso de la elongación en rotura la medida de la que se parte es la longitud de la distancia G antes y después del ensayo. Como ya se ha dicho con anterioridad no es posible determinar esta elongación mediante el extensómetro debido a que la longitud entre puntos de medida del mismo es menor que la distancia G al inicio del ensayo. Sin embargo se puede comprobar que en el primer ensayo, en el que la rotura se dio entre los puntos de medida del extensómetro, la elongación en rotura medida por el mismo coincide con la medida a partir de la probeta rota.

Estos valores están sometidos a un cierto margen de error y unas incertidumbres que es importante conocer y que se calculan a continuación. La desviación estándar de los resultados presentados anteriormente es la indicada a continuación:

- Valor medio de la fuerza máxima aplicada en los ensayos:

$$\mu = 35530.33 \text{ N}$$

- Desviación estándar:

$$S_q = \sqrt{\frac{\sum (x_i - F_{media})^2}{n-1}} = 140.8 \text{ N} \quad (6.1.4)$$

Donde n es el número de ensayos realizados y por tanto igual a tres en este caso.

- Incertidumbre de la célula de carga:

$$I_{\text{célula de carga}} = 0.5 \% \text{ FS} \quad (6.1.5)$$

$$\text{FS} = 100 \text{ kN} \quad (6.1.6)$$

Donde FS es el fondo de escala. Es necesario tomar éste aunque sea mucho mayor que la máxima carga que va a aplicarse (unos 35 kN), dado que el siguiente fondo de escala que es posible tomar es de 50 kN. Teniendo en cuenta que debido al filtro la máxima medida que se puede adquirir es del 60% del fondo de escala esto supondría que no se pueden adquirir cargas por encima de 30 kN, siendo por tanto incapaz de adquirir la última parte de la curva. En conclusión es necesario usar un fondo de escala de 100 kN que permite medidas de hasta 60 kN.

$$Icélula^* = \frac{Icélula_{FS}}{100} = 500N \quad (6.1.7)$$

- A continuación se va a calcular la incertidumbre de la carga de rotura, presentándose además todos los cálculos necesarios para llegar hasta dicho valor.

$$v_{ef} = \frac{s_y^4}{\sum_{i=1}^n \frac{s_{xi}^4}{v_i}} = \frac{\left(\sqrt{\left(\frac{Icélula^*}{2} \right)^2 + \frac{1}{n} S_q^2} \right)^4}{\frac{\left(\frac{S_q^2}{n} \right)^2}{n-1}} = 218.74 \quad (6.1.8)$$

Con el valor obtenido para v_{ef} se entra en la siguiente tabla con el valor más cercano por defecto:

Tabla 6.1-2. Valor de K en función de v_{ef}

v_{ef}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
K	13.97	4.5	3.3	2.9	2.7	2.5	2.4	2.4	2.3	2.1	2.1	2

Obtenemos por tanto un valor de 2.1 para k.

$$U_{cargarotura} = k \sqrt{\left(\frac{Icélula^*}{2} \right)^2 + \frac{1}{n} S_q^2} = 262.88N \quad (6.1.9)$$

$$\text{I carga de rotura} = \frac{U_{cargarotura} \times 100}{F_{media}} = 0.74\% \quad (6.1.10)$$

- Las medidas dimensionales realizadas también llevan asociadas una cierta incertidumbre:

El valor medio del diámetro de las distintas probetas: $D_{medio} = 9.018 \text{ mm}$.

Desviación estándar:

$$S_q = \sqrt{\frac{\sum (x_i - D_{medio})^2}{n-1}} = 0.0068 \quad (6.1.11)$$

Donde n es el número de probetas (3). Por otra parte, la incertidumbre del calibre es $I_{calibre} = 0.056 \text{ mm}$.

Se calcula nuevamente v_{ef} y se obtiene el valor de k de la tabla 6.1-2:

$$v_{ef} = \frac{s_y^4}{\sum_{i=1}^n \frac{s_{x_i}^4}{v_i}} = \frac{\left(\sqrt{\left(\frac{I_{calibre}}{2} \right)^2 + \frac{1}{n} S_q^2} \right)^4}{\frac{\left(\frac{S_q^2}{n} \right)^2}{n-1}} = 5379.45 \quad (6.1.12)$$

$$k = 2.1$$

$$U_{dimensional} = k \sqrt{\left(\frac{I_{calibre}}{2} \right)^2 + \frac{1}{n} (S_q)^2} = 0.028 mm \quad (6.1.13)$$

$$I_{medidas dimensionales} = \frac{U_{dimensional} \times 100}{D_{medio}} = 0.31\% \quad (6.1.14)$$

$$I_{elongación en rotura, redondeo al 0.2\%} = 1.33\% \quad (6.1.15)$$

$$I_{reducción del área, redondeo al 1\%} = 3.33\% \quad (6.1.16)$$

- Incertidumbre en el cálculo del límite elástico:

En primer lugar se calcula la incertidumbre asociada al área:

$$U_{área} = \pi \frac{D_{medio} \times U_{dimensional}}{2} = 0.397 mm^2 \quad (6.1.17)$$

$$A_{media} = \frac{\pi D_{medio}^2}{4} = 63.87 mm^2 \quad (6.1.18)$$

$$\sigma_{media} = \frac{F_{media}}{A_{media}} = 556.29 MPa \quad (6.1.19)$$

$$l_{extensómetro} = 3.5 \mu m$$

$$Valor nominal Le = 25 mm$$

$$I_{extensómetro}^* = \frac{l_{extensómetro}}{Le} = 0.00014 mm/mm \quad (6.1.20)$$

$$U_{límite elástico} = \frac{1}{A_{media}} \sqrt{\left(\frac{I_{célula}^*}{2} \right)^2 + (\sigma_{media} U_{área})^2 + \left(E_t A_{media} \frac{l_{extensómetro}^*}{2} \right)^2}$$

$$\frac{1}{63.87} \sqrt{\left(\frac{0.5}{2} \right)^2 + (556.29 \cdot 0.397)^2 + \left(7174 \cdot 63.87 \frac{0.00014}{2} \right)^2} = 3.9 MPa$$

E_t : Módulo de Young tangente en el punto de cedencia.

Ulímite elástico = 3.9 MPa

Límite elástico = 502 MPa

$$\frac{Ulímiteelástico \times 100}{Límiteelástico} = 0.8\% \quad (6.1.21)$$

$$I \text{ límite elástico} = \left(2 \frac{Ulímiteelástico \times 100}{Límiteelástico} \right) = 1.6\% \quad (6.1.22)$$

- Incertidumbre en el cálculo de la tensión de rotura:

$$U_{tensión} = \frac{1}{A_{media}} \sqrt{\left(\frac{Icélula^*}{k} \right)^2 + \sigma_{media}^2 U_{área}^2} = 5.1 MPa \quad (6.1.23)$$

$$\frac{U_{tensión} \times 100}{\sigma_{media}} = 0.4\% \quad (6.1.24)$$

$$I \text{ tensión de rotura} = \left(2 \frac{U_{tensión} \times 100}{\sigma_{media}} \right) = 0.8\% \quad (6.1.25)$$

Adicionalmente se puede obtener la curva de Ramberg-Osgood. Ésta última se obtiene aproximando por mínimos cuadrados las curvas del ensayo de tracción para obtener una expresión del tipo:

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K} \right)^{1/n} \quad (6.1.26)$$

$$\varepsilon_a = \ln \left(1 + \frac{\Delta l}{l_o} \right) \quad (6.1.27)$$

$$\sigma_a = \frac{F}{A_0} \left(1 + \frac{\Delta l}{l_o} \right) \quad (6.1.28)$$

Donde σ_a y ε_a son las llamadas tensión y deformación verdaderas, E es el módulo de Young, A_0 es el área inicial. l_o es la longitud inicial y Δl es el incremento de longitud.

Realizando un ajuste por mínimos cuadrados se obtienen los siguientes valores para los parámetros K y n:

$$K = 696$$

$$n = 0.06$$

A continuación se representa el la ecuación de Ramberg-Osgood junto a los ensayos precedido por la representación conjunta de las curvas de tensión-deformación ingenieriles y reales. Nótese que sólo se han tenido en cuenta dos de los ensayos realizados para el ajuste. Esto se debe a que el ensayo con control por deformación representa peor el comportamiento elástico lineal.

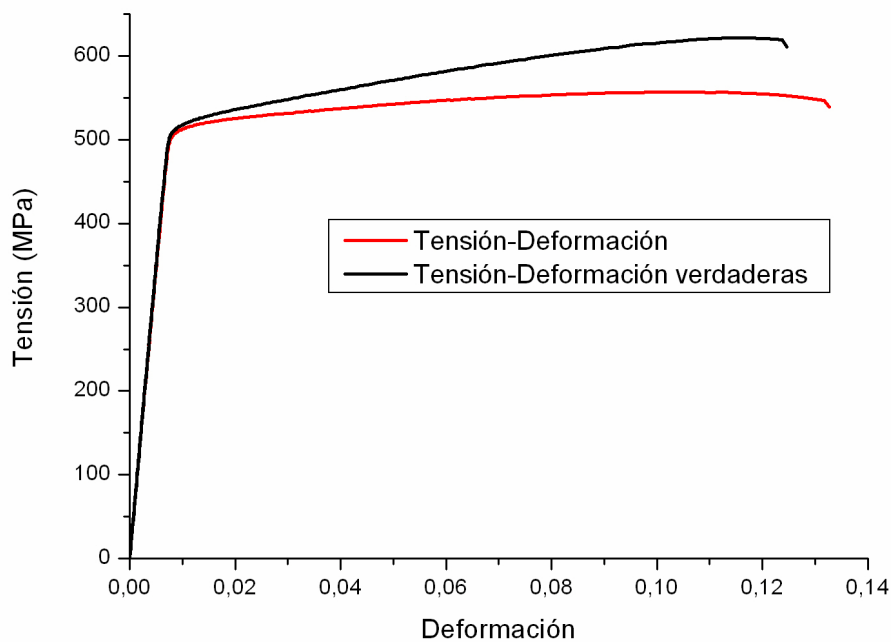


Fig 6.1-7. Tensión y deformación verdaderas del primer ensayo.

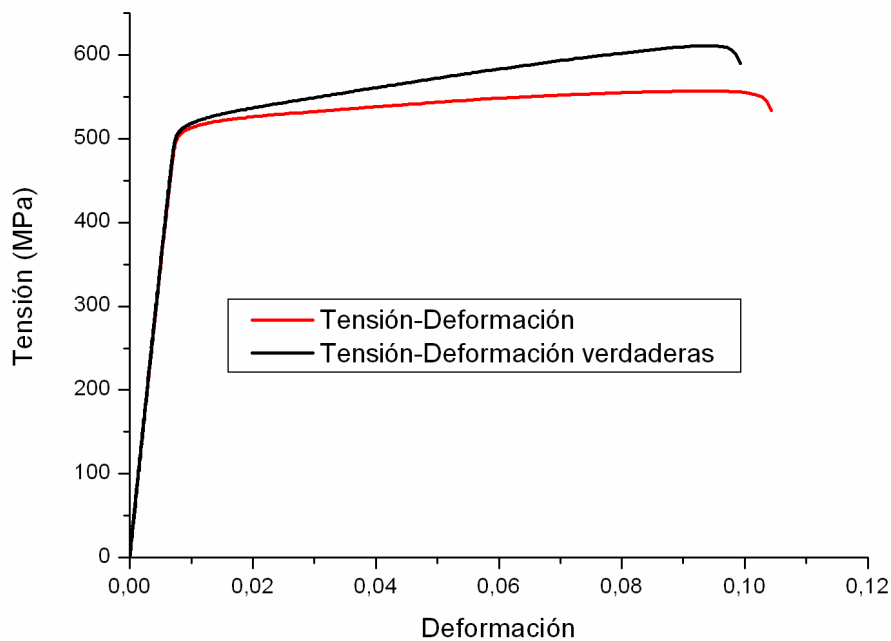


Fig 6.1-8. Tensión y deformación verdaderas del segundo ensayo.

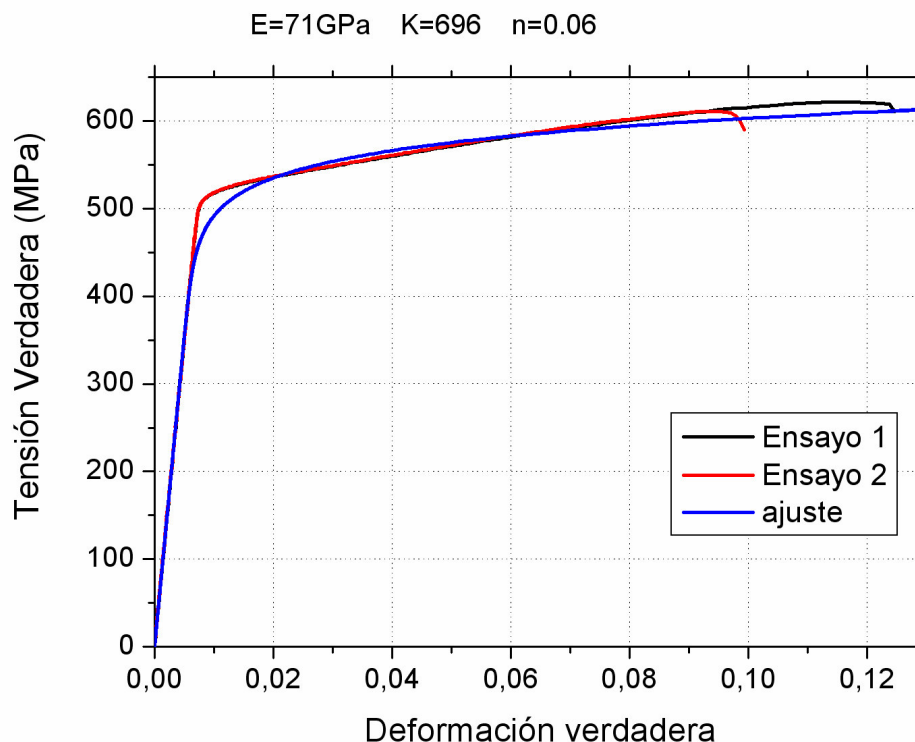


Fig 6.1-9. Ajuste de acuerdo a la ecuación de Ramberg-Osgood.

Se puede comprobar que la ecuación de Ramberg-Osgood aproxima con bastante exactitud la forma de la curva de comportamiento a tracción del material siendo el límite elástico el único punto en el que la diferencia es significativa.

6.2 Fatiga

Siguiendo el procedimiento de ensayo descrito en apartados anteriores se obtuvo el número de ciclos soportados por cada probeta hasta su rotura. La tabla 6.2-1 muestra el código de identificación de cada pieza junto al nivel de carga a que fue sometida y la vida de la probeta. Los datos que aparecen en rojo son ensayos que han sido descartados durante el estudio de los resultados.

Tabla 6.2-1. Resultados de los ensayos de vida a fatiga.

	Nivel de Carga	Ciclos	Carga (KN)	Tensión (MPa)
178F-04	III	58350	15000	235.78
179F-04	II	23550	20000	314.38
180-F04	II	26370	20000	314.38
181F-04	III	74460	15000	235.78
182F-04	IV	1553250	11000	172.91
183F-04	II	23520	20000	314.38
184F-04	II	23010	20000	314.38
185F-04	III	8820	15000	235.78
186F-04	IV	2525700	11000	172.91
187F-04	I	7530	25000	392.97
188F-04	IV	656010	11000	172.91
189F-04	I	4680	25000	392.97
190F-04	III	82020	15000	235.78
191F-04	III	79950	15000	235.78
192F-04	III	22950	15000	235.78
193F-04	I	7470	25000	392.97
194F-04	III	62340	15000	235.78
195F-04	III	80610	15000	235.78
196F-04	II	25185	20000	314.38
197F-04	I	7500	25000	392.97
198F-04	III	100740	15000	235.78
199F-04	IV	2505390	11000	172.91
200F-04	IV	43650	11000	172.91
202F-04	IV	2396220	11000	172.91
203F-04	I	8190	25000	392.97
204F-04	II	22860	20000	314.38
205F-04	II	19080	20000	314.38
207F-04	IV	2388420	11000	172.91
208F-04	III	187560	15000	235.78

El estudio de los datos obtenidos experimentalmente se ha hecho de acuerdo a lo establecido en el apartado E739 – 91 de la norma ASTM.

Es interesante pararse un momento a observar la superficie de rotura en los diferentes casos de carga. A continuación se van a mostrar en detalle imágenes de la superficie de rotura en varios casos.



Fig. 6.2-1. Superficie de rotura de la probeta 199F-04 (173 MPa Aplicados).



Fig. 6.2-2. Superficie de rotura de la probeta 208F-04 (236 MPa Aplicados).



Fig. 6.2-3. Superficie de rotura de la probeta 179F-04 (314 MPa Aplicados).



Fig. 6.2-4. Superficie de rotura de la probeta 193F-04 (393 MPa Aplicados).

Las imágenes se han ordenado de menor a mayor tensión aplicada. En las dos primeras se puede observar cómo la iniciación de grieta se da en una pequeña zona del borde y ésta va extendiéndose por toda la superficie, haciéndolo en mayor medida cuanto menor es la carga, hasta que se produce la rotura. En las dos últimas imágenes por el contrario se observa cómo se inician grietas alrededor de gran parte de la sección creciendo éstas muy poco antes de que se produzca la rotura.

Como paso previo al análisis estadístico se ha de decidir qué ensayos no deben ser tenidos en cuenta debido a una desviación excesiva respecto al resto de los ensayos realizados. Esto se hace calculando el cociente Q de Dixon para los valores de las series.

$$Q = |\text{valor sospechoso} - \text{valor más cercano}| / (\text{mayor valor} - \text{menor valor}) \quad (6.2.1)$$

Si el valor de Q supera el valor crítico de la tabla adjunta para $P = 0.05$, se rechaza el ensayo.

Tabla 6.2-2. Coeficientes de la Q de Dixon.

Tamaño de la muestra	Valor crítico de Q ($P = 0.05$)
4	0.831
5	0.717
6	0.621
7	0.570
8	0.524
9	0.429
10	0.464

Siguiendo este criterio los ensayos correspondientes a las probetas 189F-04 y 200F-04 fueron desechados. Hay que considerar que en este caso al realizar los cálculos se utilizan los logaritmos de los valores ya que es en la representación logarítmica en la que el resultado puede ser expresado en forma de una recta. Por esta razón, al aplicar la Q de Dixon a los resultados

se ha hecho empleando los logaritmos de los valores y no estos directamente.

En la siguiente figura se representan todos los ensayos realizados indicando los ensayos descartados en rojo.

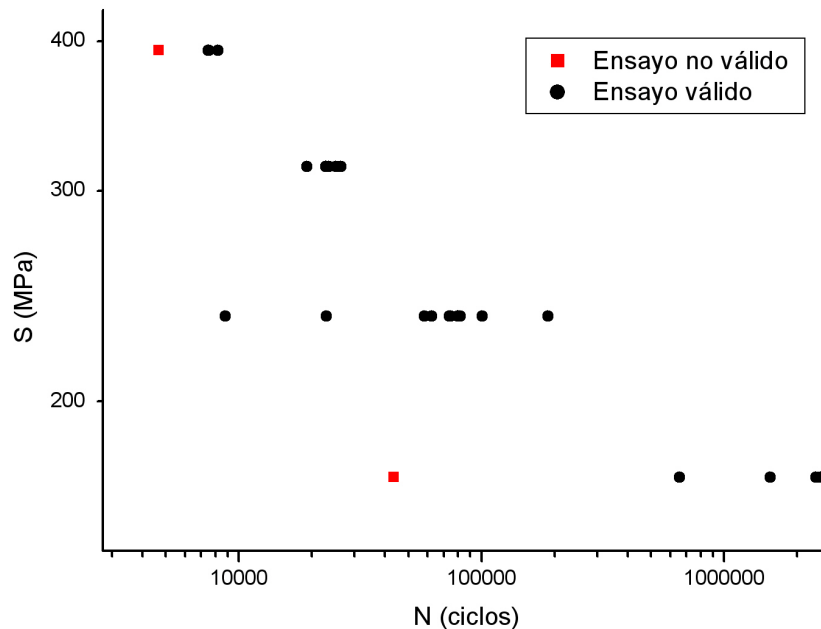


Fig. 6.2-5. Representación de los resultados de los ensayos de vida a fatiga.

Una vez decidido qué ensayos serán empleados en la determinación de la curva S-N se pasa al cálculo de la misma. La forma de la ecuación que relaciona la tensión a que se somete la pieza frente a la vida de la misma tiene la forma

$$\log(N) = A + B(\log(S)) \quad (6.2.2)$$

Del ajuste por mínimos cuadrados a un recta de los valores obtenidos experimentalmente se obtienen los coeficientes $A = 20.1942$ y $B = -6.36885$. Las fórmulas aplicadas se muestran a continuación:

$$\hat{A} = \bar{Y} - \hat{B}\bar{X} \quad (6.2.3)$$

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \quad (6.2.4)$$

Donde “^” significa estimador, “-” es la media media, k es el número de ensayos realizados y $X_i = \log S_i$, $Y_i = \log N_i$. La expresión usada para estimar la varianza de la distribución normal para $\log N$ es

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{k-2} \quad (6.2.5)$$

Donde $\hat{Y}_i = \hat{A} + \hat{B}X_i$. Se puede definir adicionalmente un intervalo de confianza de la curva S-N a partir de la expresión que aparece a continuación, donde F_p es un factor que se obtiene de tablas estadísticas en función de número de ensayos realizados.

$$\hat{A} + \hat{B}X \pm \sqrt{2F_p} \sigma \left[\frac{1}{k} + \frac{(X - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \right] \quad (6.2.6)$$

En la figura 6.2-2 se han representado los ensayos junto con la recta de regresión obtenida a partir de ellos y el intervalo de confianza del 95%.

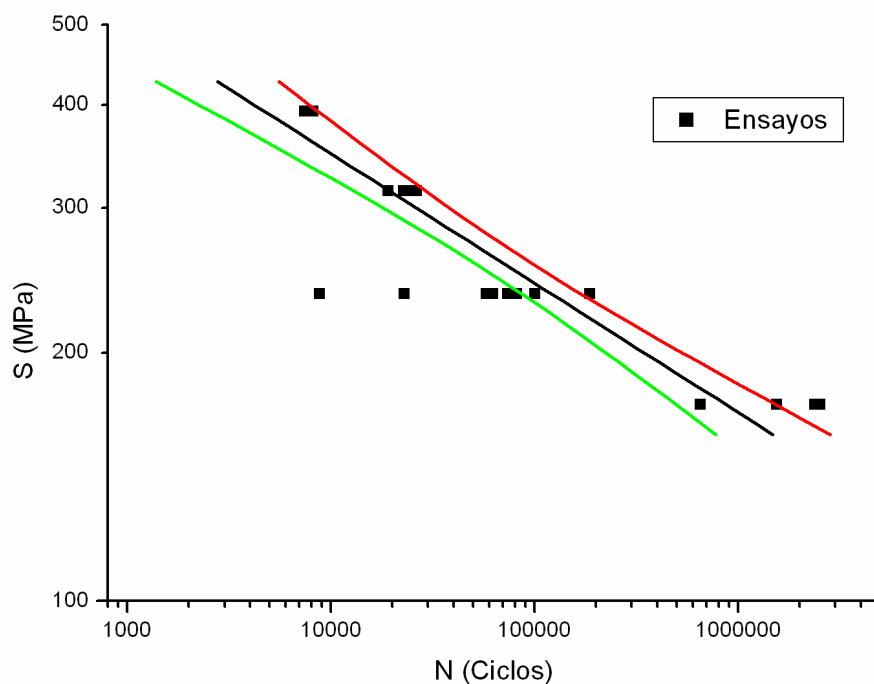


Fig. 6.2-6. Interpolación de resultados e intervalos de confianza.

La expresión de la recta de regresión es la que se muestra a continuación:

$$S = 1480.77 N^{-0.157}$$

Conviene hacer notar que los intervalos de confianza se obtienen de un análisis puramente estadístico de los resultados. Por ello es interesante tener en cuenta que realmente la dispersión de resultados es mucho menor

a tensiones elevadas a pesar de que en la curva teórica el intervalo se ensancha en ese mismo extremo de la curva.

Determinación de la tensión media

Adicionalmente a los ensayos de fatiga se tomó una probeta no ensayada a la que se le adhirieron dos galgas extensométricas en la zona donde la sección de la pieza es menor y opuesta la una a la otra. Esta probeta se conectó a un equipo de extensometría y se cargó a distintos niveles de carga en la máquina de ensayo repitiendo el proceso para varias orientaciones de la probeta.

La finalidad de estas pruebas era determinar la existencia de algún tipo de desalineamiento en la máquina o defecto de fabricación en las piezas que introdujera tensiones adicionales durante los ensayos. A continuación se presentan las mediciones obtenidas junto con una fotografía explicativa de la disposición de las bandas en cada caso correspondiéndose las fig.6.2-7, fig.6.2-8 y 6.2-9 con las tablas 6.2-3, 6.2-4 y 6.2-5 respectivamente.

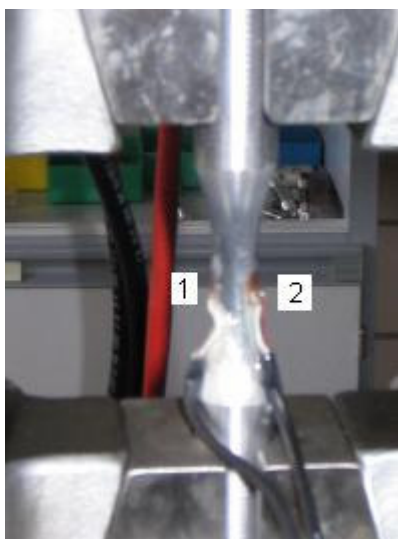


Fig. 6.2-7. Posición de las bandas extensométricas.

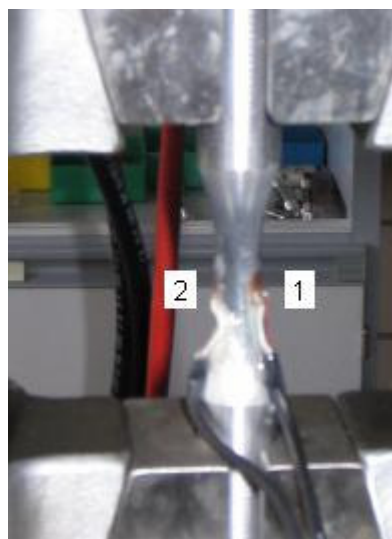


Fig. 6.2-8. Posición de las bandas extensométricas.

Tabla 6.2-3. Resultados de la prueba de extensometría.

Banda 1	Banda 2	Carga	Diferencia
1,1	3,13	Mordaza	-2,03
-1,28	0,85	0	-2,13
-0,59	1,51	998	-2,1
0,79	2,84	3003	-2,05
2,2	4,16	5002	-1,96
-1,28	0,85	0	-2,13
-3,51	-1,25	Mordaza	-2,26
-1,35	0,88	6	-2,23
-0,65	1,57	1004	-2,22
0,03	2,26	2000	-2,23
0,73	2,95	3002	-2,22

Tabla 6.2-4. Resultados de la prueba de extensometría.

Banda 1	Banda 2	Carga	Diferencia
0,9	-0,56	Mordaza	1,46
1,59	0,11	1002	1,48
2,97	1,48	3007	1,49
4,34	2,86	5006	1,48
0,9	-0,55	1	1,45
0,82	-0,64	Mordaza	1,46
1,52	0,05	1005	1,47
2,2	0,73	200	1,47
2,89	1,42	3006	1,47
3,58	2,1	4002	1,48
4,26	2,8	5003	1,46

1,44	3,64	4007	-2,2
2,14	4,33	5002	-2,19
2,84	5,02	6001	-2,18
2,14	4,33	5003	-2,19
1,45	3,63	4003	-2,18
0,75	2,95	3006	-2,2
0,05	2,26	2002	-2,21
-0,63	1,58	1002	-2,21
-1,33	0,89	5	-2,22

4,96	3,49	6002	1,47
4,27	2,8	5001	1,47
3,58	2,11	4002	1,47
2,89	1,43	3009	1,46
2,2	0,74	2000	1,46
1,52	0,05	1000	1,47
0,84	-0,62	0	1,46

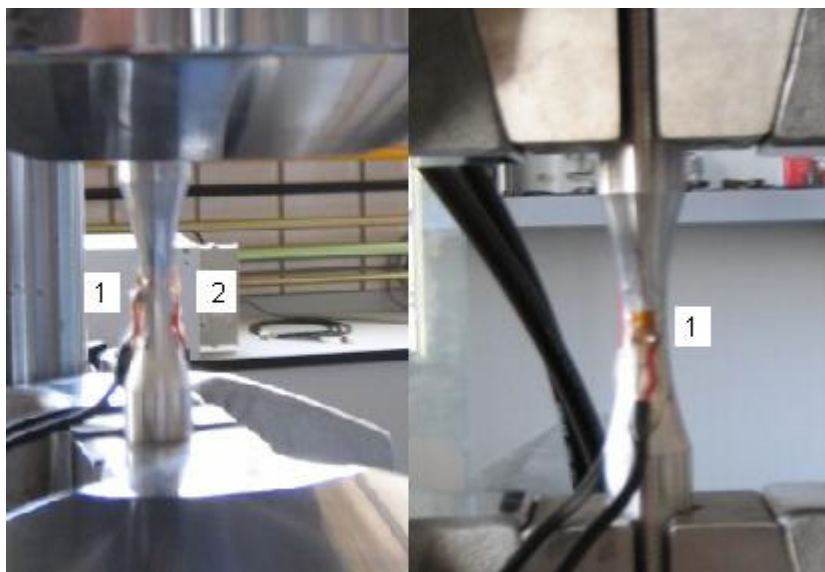


Fig. 6.2-9. Posición de las bandas extensométricas

Tabla 6.2-5. Resultados de la prueba de extensometría

Banda 1	Banda 2	Carga	Diferencia
2,18	-2,48	Mordaza	4,66
2,3	-2,38	1	4,68
2,97	-1,69	1001	4,66
4,32	-0,31	3004	4,63
5,67	1,06	5001	4,61
2,28	-2,35	3	4,63
2,17	-2,36	Mordaza	4,53
2,23	-2,3	2	4,53
2,92	-1,62	1004	4,54
3,61	-0,93	2007	4,54
4,29	-0,24	3000	4,53
4,98	0,43	4003	4,55
5,66	1,13	5000	4,53
6,35	1,82	6000	4,53
5,67	1,14	5005	4,53
4,98	0,46	4008	4,52
4,28	-0,22	3006	4,5
3,59	-0,9	2003	4,49
2,9	-1,59	1003	4,49
2,21	-2,27	1	4,48

Banda 1	Banda 2	Carga	Diferencia
0,96	-3,58	Mordaza	4,54
2,11	-2,35	8	4,46
2,77	-1,64	992	4,41
4,1	-0,21	3005	4,31
5,44	1,21	5000	4,23
2,04	-2,28	5	4,32
0,97	-3,81	Mordaza	4,78
2,29	-2,46	5	4,75
2,96	-1,75	1005	4,71
3,63	-1,04	2009	4,67
4,3	-0,33	2999	4,63
4,99	0,4	4034	4,59
5,64	1,09	5002	4,55
6,31	1,81	6005	4,5
5,63	1,1	4998	4,53
4,94	0,41	4005	4,53
4,25	-0,27	3009	4,52
3,55	-0,96	1998	4,51
2,87	-1,65	1001	4,52
2,18	-2,34	8	4,52

Los datos reflejados en las tablas son los voltios registrados en cada banda, la carga en N y la diferencia de deformación entre una banda y otra. Del hecho de que la diferencia de deformaciones dependa de la orientación de la probeta en la máquina se deduce que las tensiones que aparecen son debidas a una falta de alineamiento en la máquina, ya que de ser debidas a un defecto en la probeta la deformación aparecería independientemente de la orientación de ésta.

Por otra parte, podemos observar que las deformaciones que se dan en los dos primeros casos son sensiblemente inferiores a las que se producen en el tercero. Podemos calcular las tensiones máximas que aparecerían a partir de la deformación en el tercer caso.

Si consideramos la diferencia entre las medidas tomadas entre las dos bandas y calculamos la media de todas las medidas tenemos que ésta toma un valor de 4.5435 V. Teniendo en cuenta que 0.289 V supone 100 $\mu\epsilon$, la diferencia de deformación entre las dos bandas sería de 1572.145 $\mu\epsilon$ y por tanto, la deformación en una de las bandas es de 786.0727 $\mu\epsilon$. La tensión resultante sería por tanto $\sigma = E \cdot \epsilon = 71000 \cdot 786.145 \cdot 10^{-3} = 55.81$ MPa.

De los resultados obtenidos se deduce que existía una falta de alineamiento que producía una tensión media de flexión en una de las caras de la probeta de unos 55 MPa en el caso más desfavorable.

A partir de la tensión media ya conocida que aparece en la probeta podemos corregir los datos de los ensayos determinando la tensión efectiva a que es sometida la pieza realmente. Esto puede hacerse aplicando la corrección mediante la parábola de Gerber o la recta de Goodman.

Aplicando la corrección con la parábola de Gerber se obtienen los resultados que se muestran a continuación junto a la expresión que define dicha parábola.

$$S_a = \sigma_a \left(1 - \frac{S_m^2}{\sigma_u^2} \right) \quad (6.2.7)$$

Donde σ_u es la tensión última de rotura.

Tabla 6.2-6. Corrección mediante la parábola de Gerber.

Nivel de carga	Tensión Alterna Efectiva σ_a (MPa)
I	396.65
II	317.32
III	237.99
IV	174.53

Por otra parte, aplicando la recta de Goodman:

$$S_a = \sigma_u \left(1 - \frac{S_m}{\sigma_u} \right) \quad (6.2.8)$$

Donde σ_u es la tensión última de rotura.

Tabla 6.2-7. Corrección mediante la recta de Goodman.

Nivel de carga	Tensión Alternativa Efectiva σ_a (MPa)
I	434.80
II	347.84
III	269.88
IV	191.31

Los valores teóricos de la tensión alterna se muestran a continuación:

Tabla 6.2-8. Valores teóricos de la tensión alterna..

Nivel de carga	Tensión Alternativa σ_a (MPa)
I	392.97
II	314.38
III	235.78
IV	172.91

A partir de estas correcciones se puede volver a definir la recta de regresión. En la siguiente imagen se muestran la recta obtenida originalmente junto a las dos correcciones.

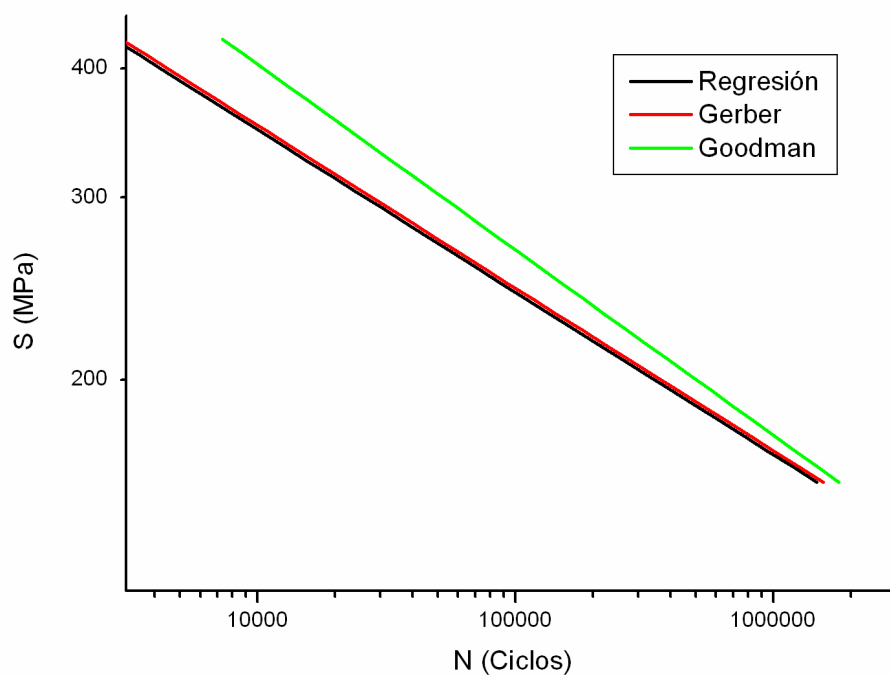


Fig. 6.2-10. Interpolación y correcciones.

Tal y como se muestra, la parábola de Gerber da como resultado una corrección pequeña, obteniéndose una vida ligeramente superior a la inicialmente considerada. Por su parte la recta de Goodman da mayor importancia a la existencia de una tensión media obteniéndose, para un mismo nivel de carga, una vida teóricamente mucho mayor.

Se considerará la curva obtenida mediante la corrección por la parábola de Gerber como resultado final ya que, teniendo en cuenta la corrección por tensión media es más conservadora que la recta de Goodman. La expresión de dicha curva es:

$$S = 1498.76N^{-0.157}$$

Presentando esta expresión en la forma más tradicional:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (6.2.9)$$

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = 1671.07(2N_f)^{-0.157}$$

En este caso, a diferencia de los ensayos de tracción en los que se introducen gran número de cálculos y variables, el resultado es el número de ciclos que soporta la probeta y la única incertidumbre está asociada al indicador de la carga siendo por tanto:

$$\text{Incertidumbre} = \text{Icélula de carga} = 0.5 \% \quad (6.2.10)$$

$$FS = \pm 20 \text{ kN (Niveles de carga I y II)}$$

$$FS = \pm 50 \text{ kN (Niveles de carga III y IV)}$$

$$Icélula^* = \frac{IcélulaxFS}{100} = 0.1\% \text{ (Niveles I y II)} \quad (6.2.11)$$

$$Icélula^* = \frac{IcélulaxFS}{100} = 0.25\% \text{ (Niveles III y IV)} \quad (6.2.12)$$

Donde el valor de la incertidumbre de la célula de carga viene dado en tanto por ciento respecto a la carga aplicada.

6.3 Crecimiento de grieta

Siguiendo el procedimiento descrito en 5.2.3 se obtuvieron los resultados que serán analizados a continuación. Las probetas fueron ensayadas en un rango de cargas tal que permitiese estudiar la evolución de la velocidad de crecimiento de grieta en un amplio rango de valores del factor de intensidad en tensiones (ΔK).

No obstante, debido a limitaciones técnicas no fue posible la realización de ensayos con un nivel de tensiones lo suficientemente bajo como para determinar el umbral de crecimiento de grieta. El problema fundamental en este sentido es que dichos ensayos hubiesen tenido una duración excesivamente prolongada de haber sido realizados a las frecuencias que admite la máquina de ensayo disponible.

En cualquier caso, tal y como se mostrará a continuación, el rango de valores obtenidos es bastante amplio y permite observar ciertos comportamientos característicos del material. Además los resultados de los ensayos han sido en general coherentes, lo que supone una mayor fiabilidad de los mismos.

A continuación se muestran los valores de las cargas empleadas así como el factor de intensidad en tensiones inicial a que fue sometida cada probeta así como el coeficiente de asimetría y las cargas máxima y mínima que fueron aplicadas durante el ensayo:

Tabla 6.3-1. Condiciones de carga de los ensayos realizados.

$\Delta K_{Inc}(MPa\sqrt{m})$	$\Delta P_{Inc}(N)$	R	$P_{max}(N)$	$P_{min}(N)$
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

En función del nivel de carga aplicado se observan algunas diferencias en la probeta tras finalizar el ensayo. En las siguientes imágenes se muestran probetas ensayadas ordenadas de menor a mayor carga aplicada.



Fig. 6.3-1. Probeta número 10.



Fig. 6.3-2. Probeta número 6.



Fig. 6.3-3. Probeta número 8.



Fig. 6.3-4. Probeta número 9.

Se observa la presencia de un crecimiento de grieta estable que se da a lo largo del plano de simetría de la pieza que contiene la entalla y un crecimiento inestable final. Cuanto mayor sea la carga aplicada más violento es este crecimiento inestable pasando de una rotura producida prácticamente en el mismo plano del crecimiento de la grieta a otra casi perpendicular al mismo al aumentar la carga.

En la siguiente imagen se muestra la superficie de rotura en la que se pueden diferenciar fácilmente el crecimiento estable e inestable de la grieta.

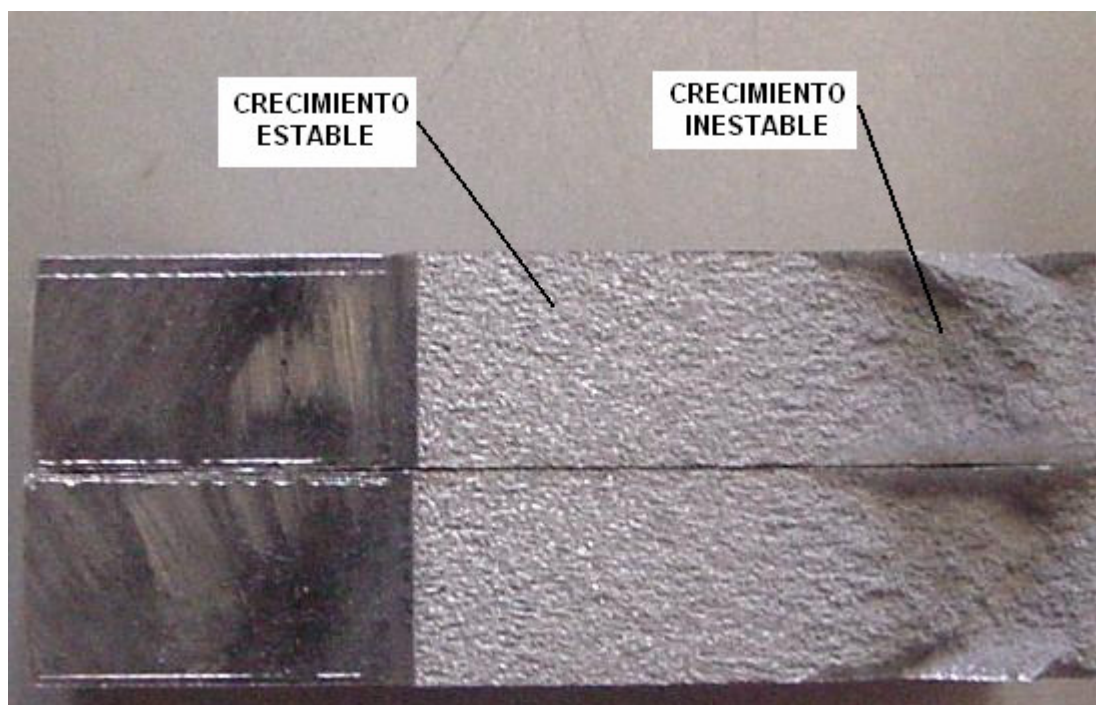


Fig. 6.3-5. Superficie de rotura.

Otro aspecto que puede apreciarse en las imágenes anteriores es que la longitud final de grieta disminuye conforme aumenta la carga aplicada ya que de este modo se adelanta la rotura (al aumentar la carga se tiene un factor de intensidad en tensiones mayor para una misma longitud de grieta).

Como ya se explicó en el procedimiento de ensayo, la longitud de la grieta por ambas caras debe ser medida tanto al final del precrecimiento como tras la rotura de la probeta. A continuación se muestran las longitudes de las grietas en todas las probetas por ambas caras en los dos puntos indicados. Es importante recordar que la longitud de la grieta tras el precrecimiento debe ser de, al menos, 7.5 mm y que la diferencia entre ambas caras no debe superar los 1.875 mm en ningún momento.

Tabla 6.3-2. Longitud de la grieta tras precrecimiento y final.

Ensayo	L ₁	L ₂	L ₁ (final)	L ₂ (final)
1	8.40	7.60	21.61	20.88
2	7.75	7.85	18.8	18.88
3	8.70	7.90	20.00	18.54
4	8.10	7.50	16.07	16.31
5	9.00	7.52	16.18	15.85
6	7.98	8.76	15.13	14.30
7	8.03	7.80	22.41	22.64
8	8.20	7.61	24.36	24.63
9	9.27	7.68	25.24	25.24
10	7.60	9.42	24.50	23.54

Efectivamente se puede comprobar que la longitud de grieta en ambas caras nunca llega a diferir en 1.875 mm.

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos mencionados se calcula la velocidad de crecimiento de grieta (da/dN) en función del factor de intensidad en tensiones (ΔK). Esto se puede hacer por dos métodos diferentes que se pasa a describir a continuación:

- Método del polinomio incremental: se dividen los datos obtenidos en bloques de $(2n+1)$ puntos donde n puede tomar como valores 1, 2, 3 ó 4. Estos bloques de datos se ajustan a una parábola por mínimos cuadrados de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\hat{a}_i = b_0 + b_1 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right) + b_2 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right)^2 \quad (6.3.1)$$

Donde b_0 , b_1 y b_2 son los parámetros de la regresión realizada en el rango $a_{i-n} \leq a_i \leq a_{i+n}$. El valor $\hat{a}_i$ es la longitud de grieta obtenida mediante la regresión para N_i . Los parámetros $C_1 = 0.5(N_{i-n} + N_{i+n})$ y $C_2 = 0.5(N_{i+n} - N_{i-n})$ se introducen para escalar los valores usados evitando así dificultades al determinar los parámetros de la regresión.

Los valores de la velocidad de crecimiento de grieta se obtendrían mediante la derivada de la expresión anterior y el de ΔK se obtiene utilizando el valor de $\hat{a}_i$ como longitud de grieta. Dicha derivada toma la siguiente forma:

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_{\hat{a}_i} = b_1 / C_2 + 2b_2 (N_i - C_1) / C_2^2 \quad (6.3.2)$$

En principio fue este el método que se deseó emplear en el análisis de los resultados. Sin embargo este método resulta problemático cuando la frecuencia de adquisición es muy elevada (como es este caso) y supone la eliminación arbitraria de gran número de puntos para poder utilizarlo.

La causa de estos problemas es que, tal y como se puede observar en la fig. 5.2.3-1, incluso utilizando filtros el ruido en la señal hace que puntos muy próximos vean muy alteradas sus posiciones relativas especialmente para valores bajos de ΔK , donde la longitud de la grieta crece mucho más lentamente y que es precisamente la zona más interesante.

Esto supone que debido al reducido número de puntos empleados en la regresión la aparición de algún valor discordante lleva a una gran alteración en el resultado de la misma. Dado que se están usando puntos muy próximos es muy frecuente la aparición de este tipo de resultados incoherentes.

Por esta razón el análisis de los resultados se ha hecho mediante el método de la secante que se describe a continuación.

- Método de la secante: este método consiste en determinar la velocidad de crecimiento de grieta como la diferencia de la longitud de grieta entre esos dos puntos dividido entre el número de ciclos de diferencia, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\bar{a} = 0.5(a_{i+j} + a_i) \quad \left(\frac{da}{dN} \right)_{\bar{a}} = \frac{a_{i+j} - a_i}{N_{i+j} - N_i} \quad K(\bar{a}) \quad (6.3.3)$$

Donde j es el intervalo entre los puntos considerados. En primer lugar, y para disminuir las desviaciones en los valores adquiridos, se filtran nuevamente los puntos obtenidos dando a cada punto el valor medio de los indicados por los puntos adquiridos 300 ciclos antes y después del mismo. Esto es:

$$a_i = \frac{\sum_{k=-20}^{k=20} a_{i+k}}{41} \quad (6.3.4) \quad P_i = \frac{\sum_{k=-20}^{k=20} P_{i+k}}{41} \quad (6.3.5)$$

El sumatorio incluye los puntos entre -20 y +20 dado que, al haber 15 ciclos de diferencia entre los puntos registrados, esto supone tomar puntos desde 300 ciclos antes hasta 300 ciclos después del punto que se considere.

El siguiente paso es calcular la longitud de grieta aproximada y la velocidad de crecimiento de grieta. Es en este punto donde se le da un valor a j. Para ensayos que cubran un rango no muy amplio de velocidades de crecimiento de grieta basta con buscar un valor de j que produzca una curva bien definida. Si este valor es demasiado bajo la diferencia relativa entre puntos muy cercanos dará resultados incoherentes pero si es demasiado elevado la velocidad de crecimiento será superior a la real. Por esto es conveniente ir ajustando el valor de j con cantidades decrecientes deteniéndose cuando se tenga un resultado suficientemente bueno.

Para ensayos que comprendan velocidades de crecimiento de grieta en un rango muy amplio de valores es necesario ajustar el valor de j por tramos. Para puntos situados al inicio de la curva con valores de da/dN reducidos se deben considerar intervalos amplios ya que la diferencia entre la longitud de grieta de los puntos considerados debe ser suficiente para hacer inapreciable el efecto del ruido. Para los puntos finales de la curva se pueden hacer dichos intervalos mucho más cortos ya que la longitud de grieta crece muy rápidamente.

En el caso que nos ocupa se han dividido las curvas para su estudio en diferente número de tramos en función del rango de velocidades cubierto. Los puntos de transición entre los distintos intervalos se han

situado en los puntos con ΔK tomando los valores 4, 5, 5.8 y 10 dando lugar a cinco intervalos. El número de j considerado ha sido de 5000, 3000, 1200, 600 y 5 respectivamente.

Los valores indicados podrían parecer un tanto aleatorios a priori. Sin embargo han sido establecidos mediante el criterio ya indicado anteriormente y situando las transiciones en los puntos en los que una aproximación comienza a fallar y empieza a funcionar la siguiente. Esto es fácil de determinar representando las diferentes aproximaciones. Se puede observar que existe una zona en la que dos aproximaciones consecutivas se superponen con cierta exactitud. Por debajo de ese valor de ΔK una de las aproximaciones comienza a dar como resultado valores erráticos y por encima del mismo la otra aproximación sufre un aumento muy rápido de la velocidad de crecimiento de la grieta.

Una vez obtenida la curva que se desea estudiar (da/dN frente a ΔK) se representan todas las obtenidas conjuntamente, se desechan las que se aparten en exceso y se aproximan las curvas mediante mínimos cuadrados a una expresión determinada.

A continuación se van a presentar los resultados de todos los ensayos mostrándose tanto la representación de la longitud de grieta frente al número de ciclos como la curva que se desea obtener que es la de velocidad de crecimiento de grieta (da/dN) frente a factor de intensidad en tensiones (ΔK).

Ensayo 1

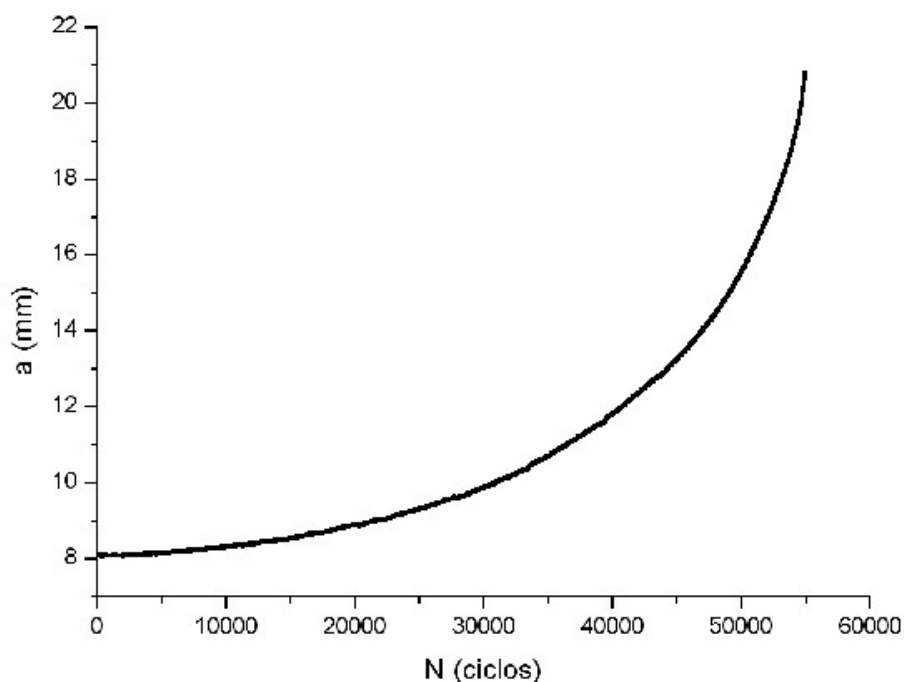


Fig. 6.3-6. Curva de longitud de grieta frente a número de ciclos para el primer ensayo.

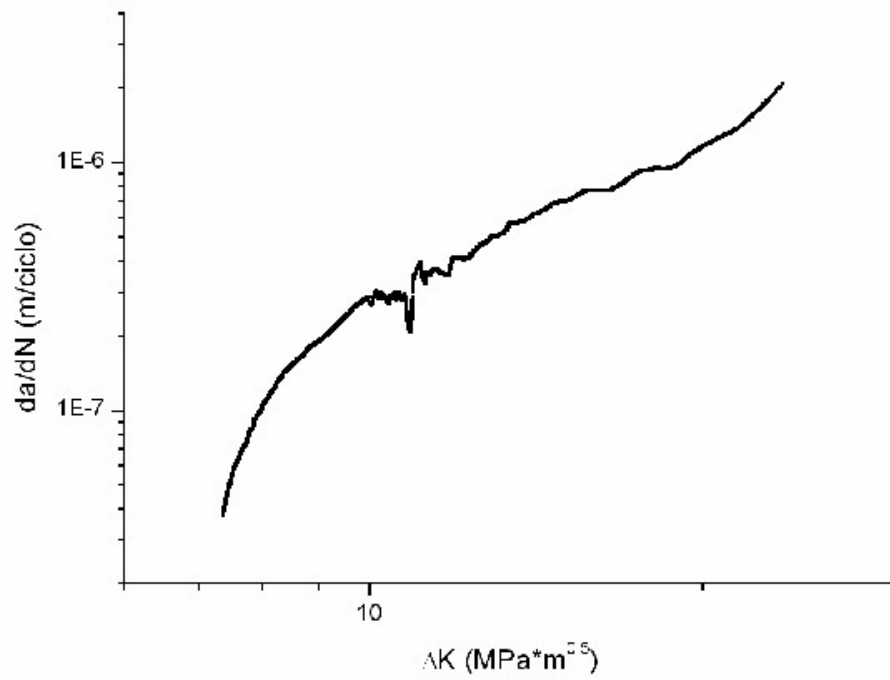


Fig. 6.3-7. Curva de velocidad de crecimiento de grieta frente a factor de intensidad en tensiones para el primer ensayo.

Ensayo 2

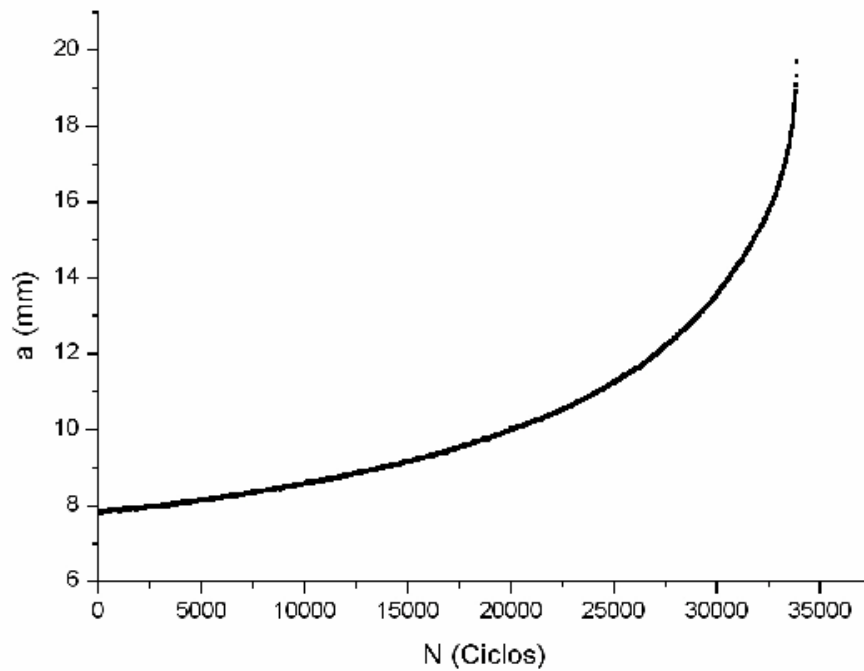


Fig. 6.3-8. Curva de longitud de grieta frente a número de ciclos para el segundo ensayo.

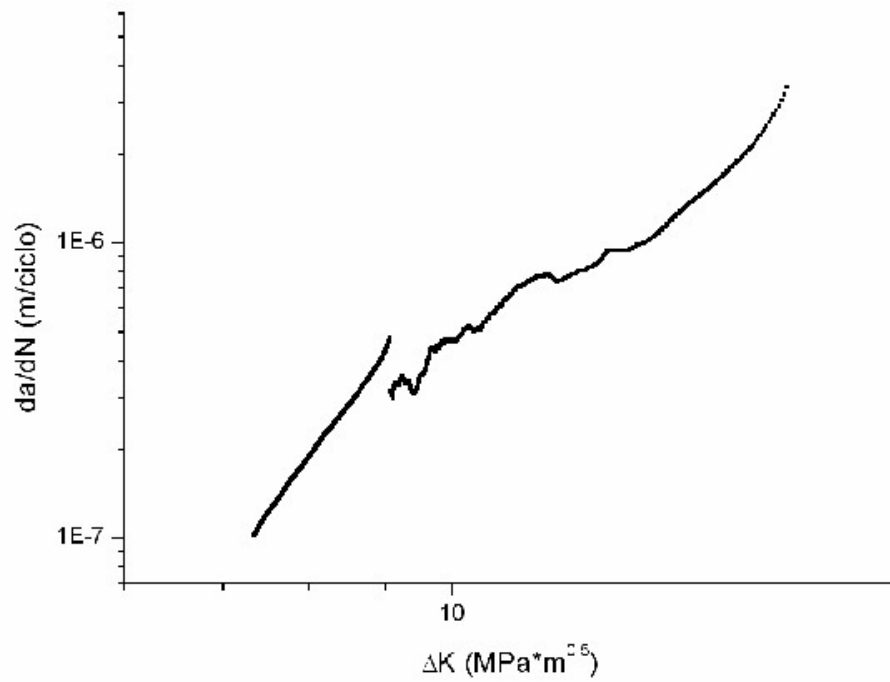


Fig. 6.3-9. Curva de velocidad de crecimiento de grieta frente a factor de intensidad en tensiones para el segundo ensayo.

Ensayo 3

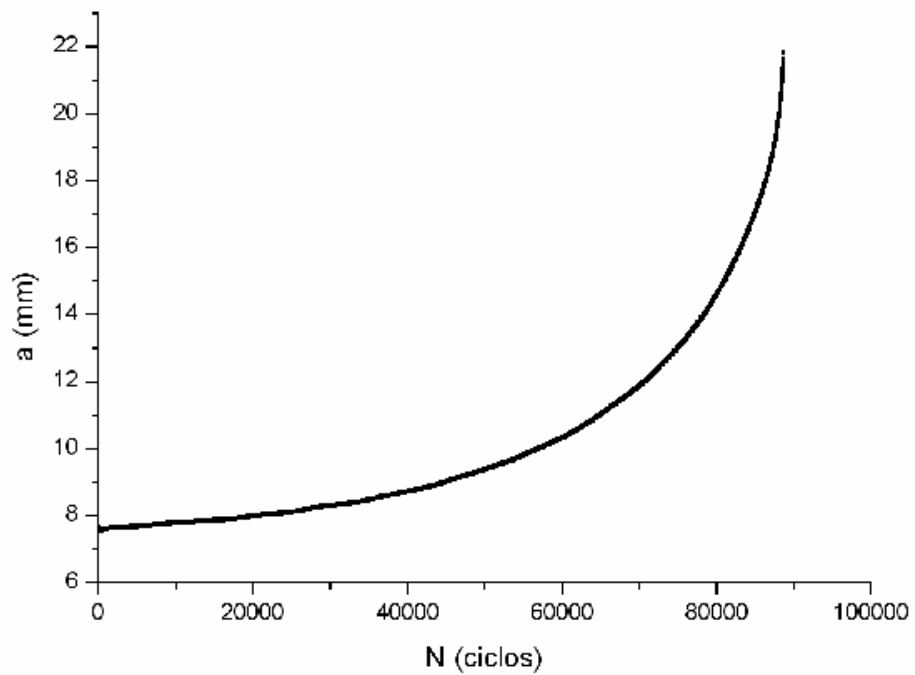


Fig. 6.3-10. Curva de longitud de grieta frente a número de ciclos para el tercer ensayo.

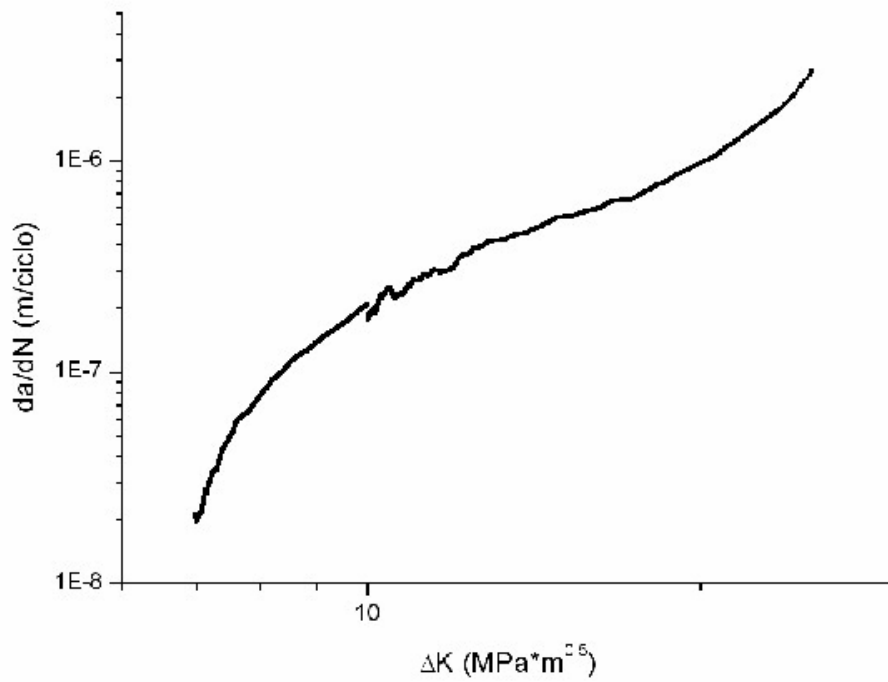


Fig. 6.3-11. Curva de velocidad de crecimiento de grieta frente a factor de intensidad en tensiones para el tercer ensayo.

Ensayo 4

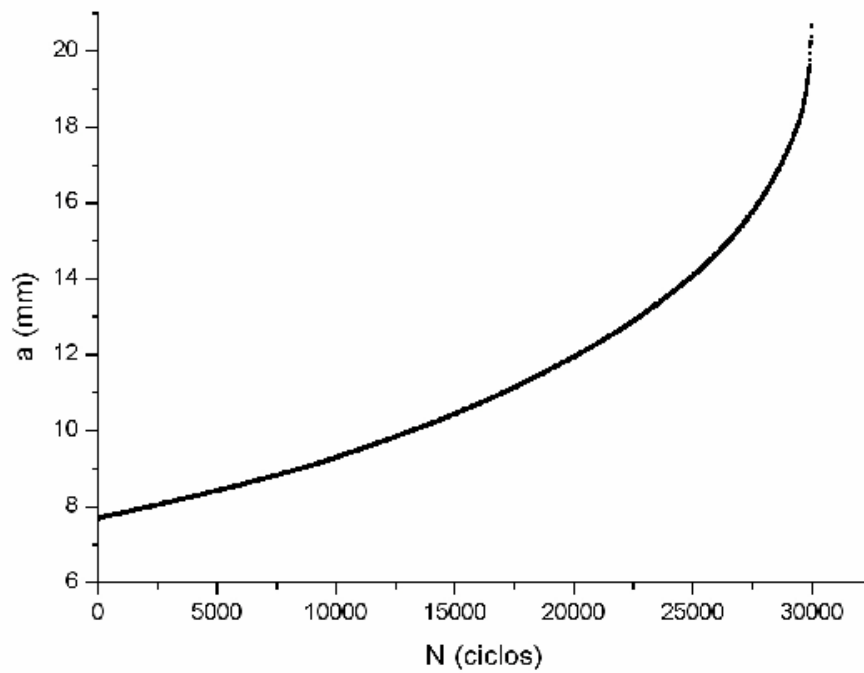


Fig. 6.3-12. Curva de longitud de grieta frente a número de ciclos para el cuarto ensayo.

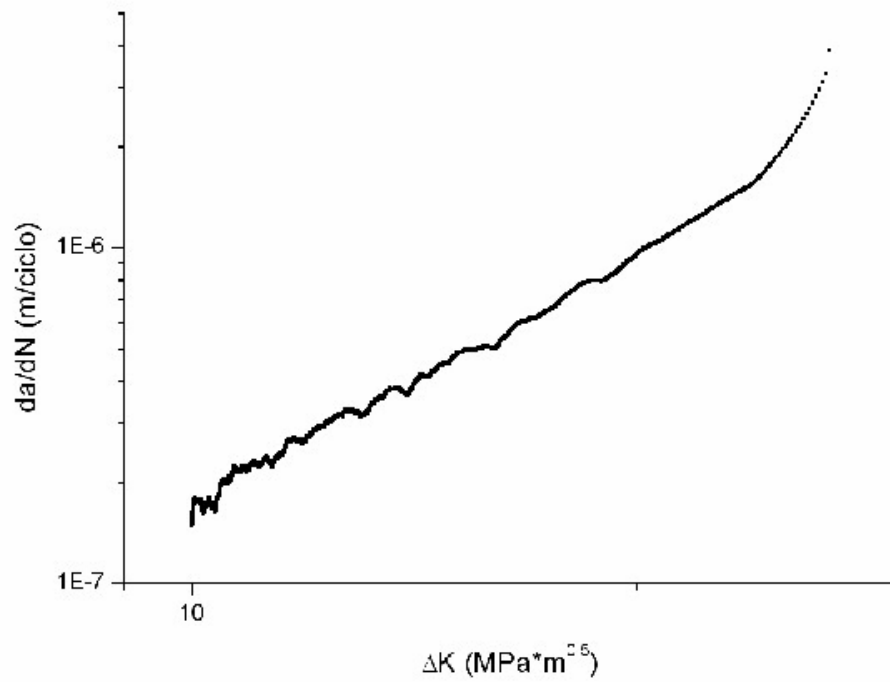


Fig. 6.3-13. Curva de velocidad de crecimiento de grieta frente a factor de intensidad en tensiones para el cuarto ensayo.

Ensayo 5

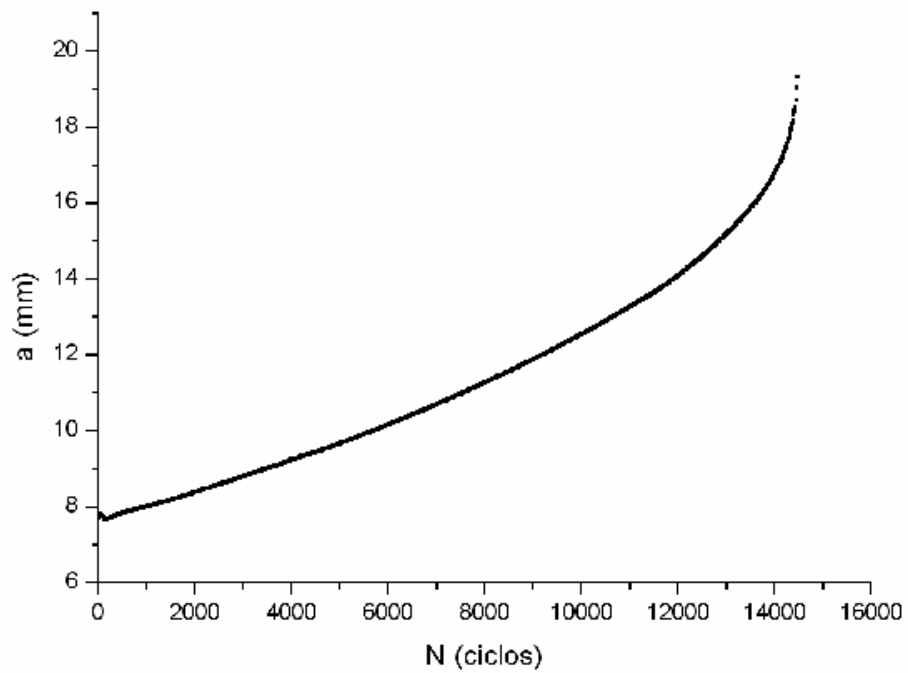


Fig. 6.3-14. Curva de longitud de grieta frente a número de ciclos para el quinto ensayo.

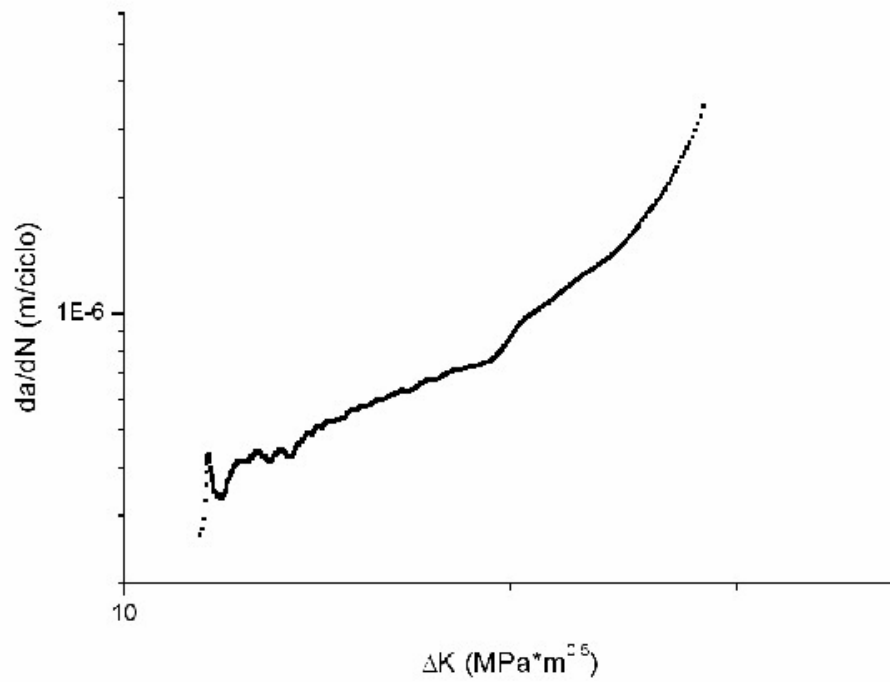


Fig. 6.3-15. Curva de velocidad de crecimiento de grieta frente a factor de intensidad en tensiones para el quinto ensayo.

Ensayo 6

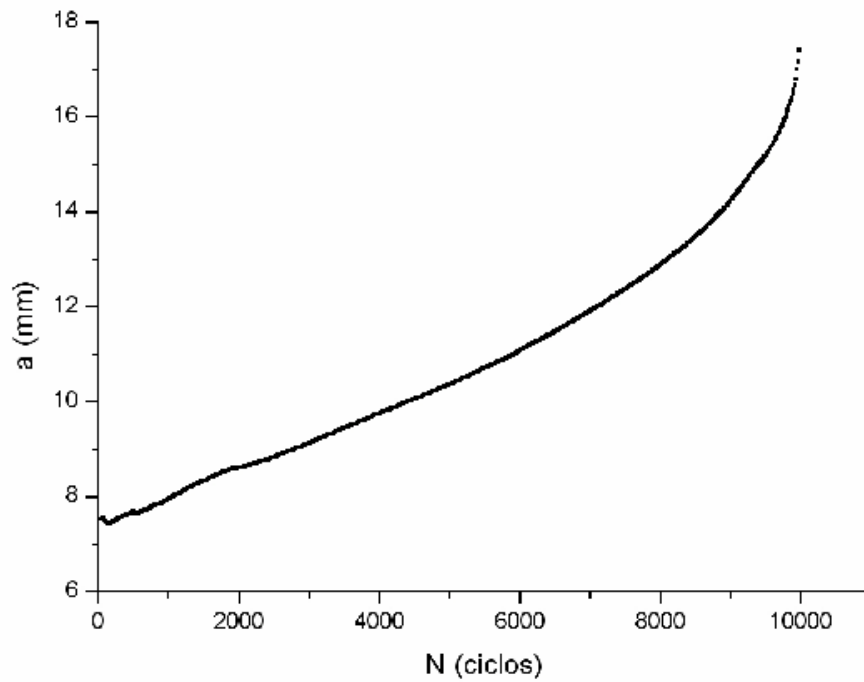


Fig. 6.3-16. Curva de longitud de grieta frente a número de ciclos para el sexto ensayo.

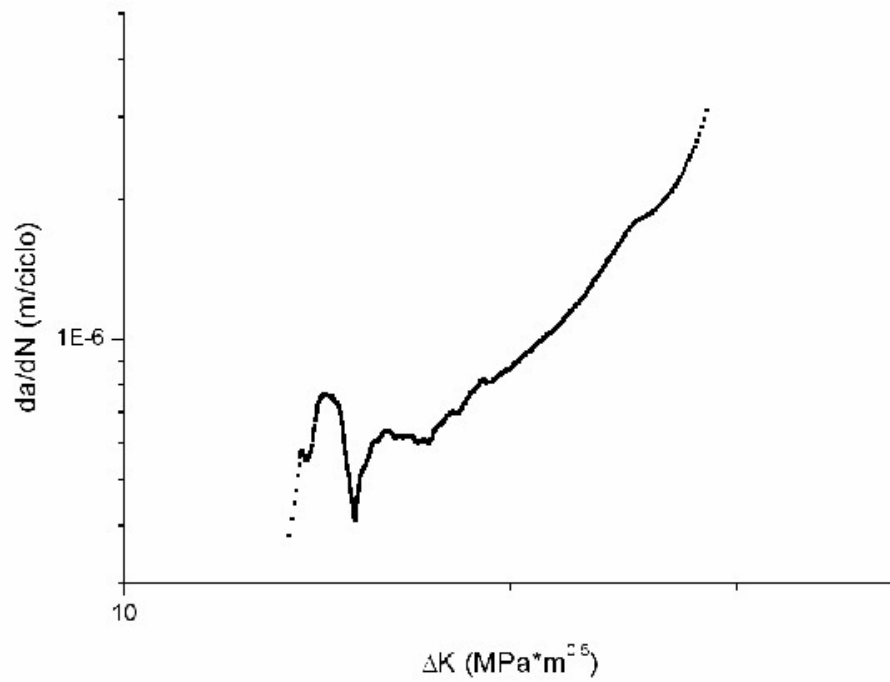


Fig. 6.3-17. Curva de velocidad de crecimiento de grieta frente a factor de intensidad en tensiones para el sexto ensayo.

Ensayo 7

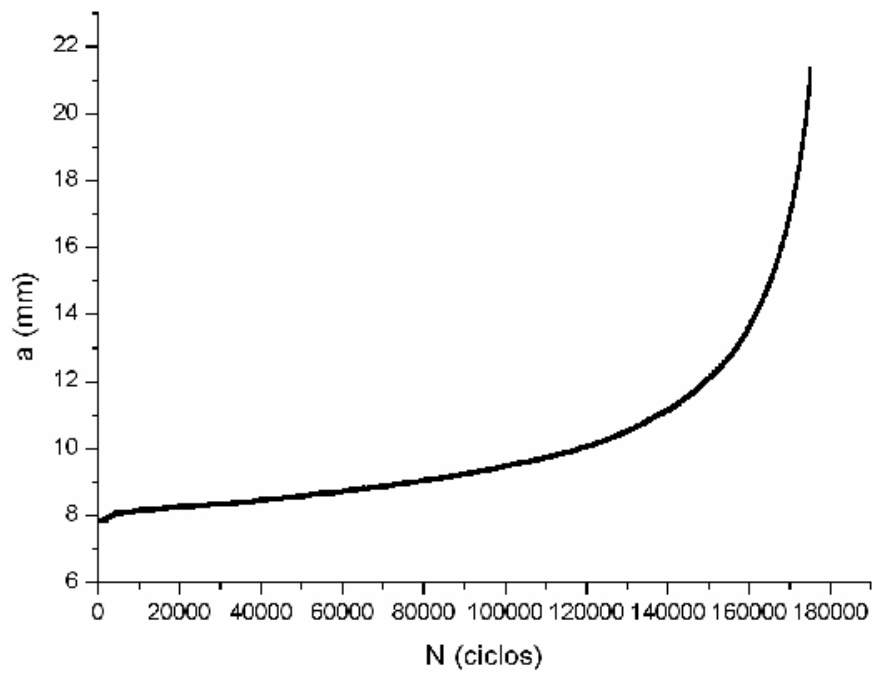


Fig. 6.3-18. Curva de longitud de grieta frente a número de ciclos para el séptimo ensayo.

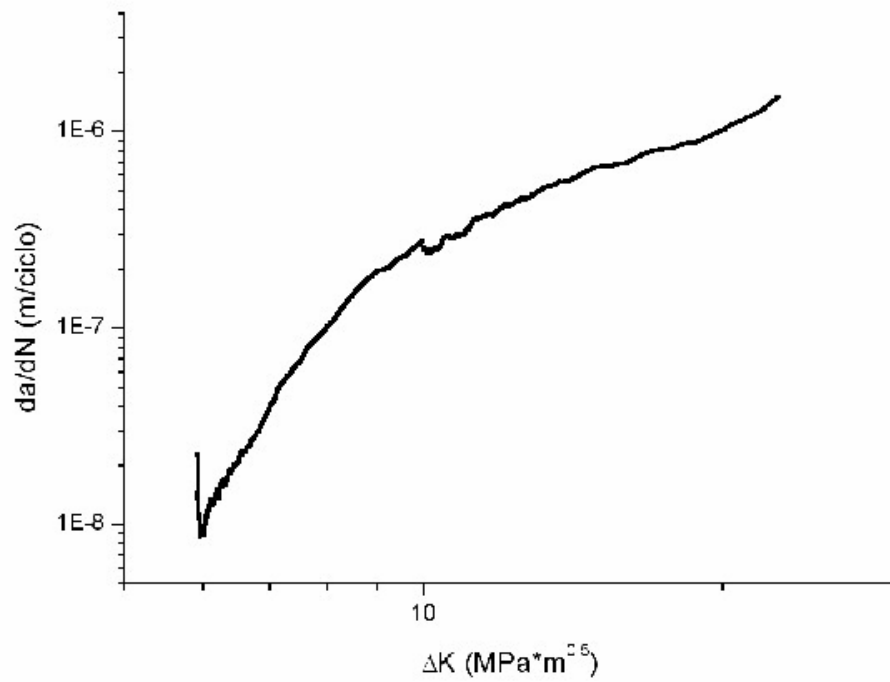


Fig. 6.3-19. Curva de velocidad de crecimiento de grieta frente a factor de intensidad en tensiones para el séptimo ensayo.

Ensayo 8

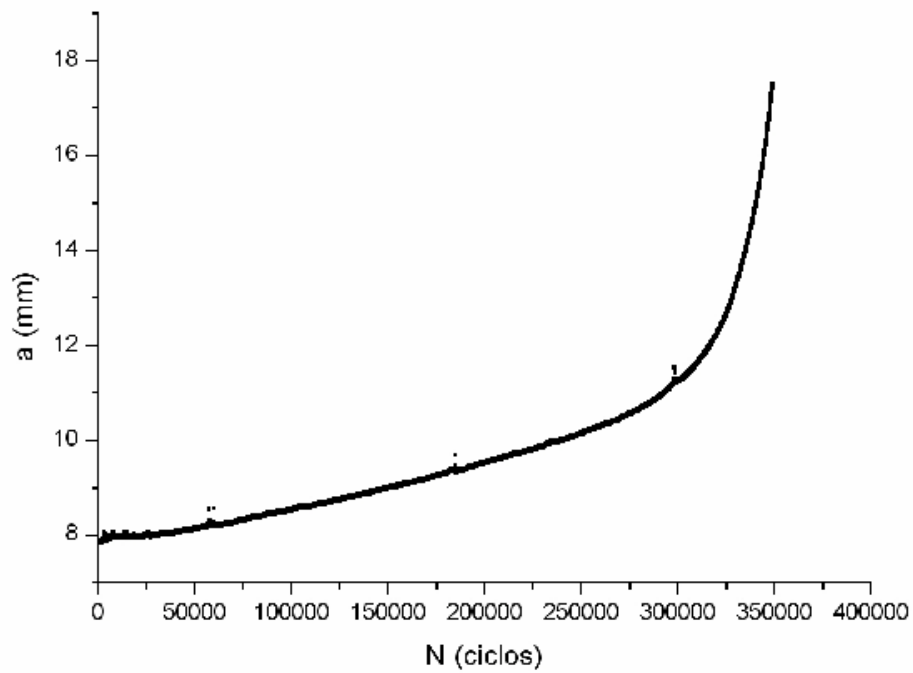


Fig. 6.3-20. Curva de longitud de grieta frente a número de ciclos para el octavo ensayo.

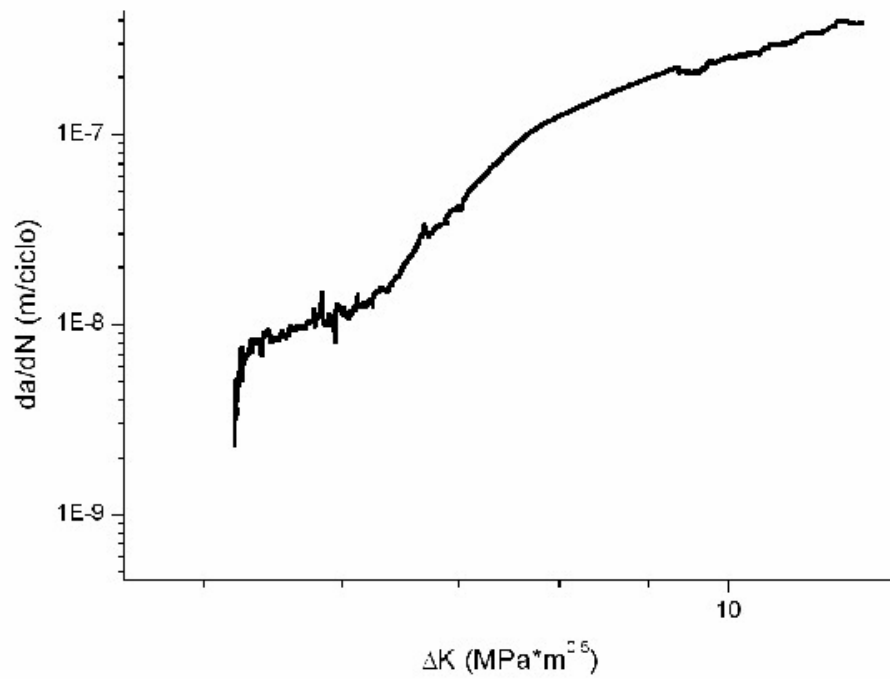


Fig. 6.3-21. Curva de velocidad de crecimiento de grieta frente a factor de intensidad en tensiones para el octavo ensayo.

Ensayo 9

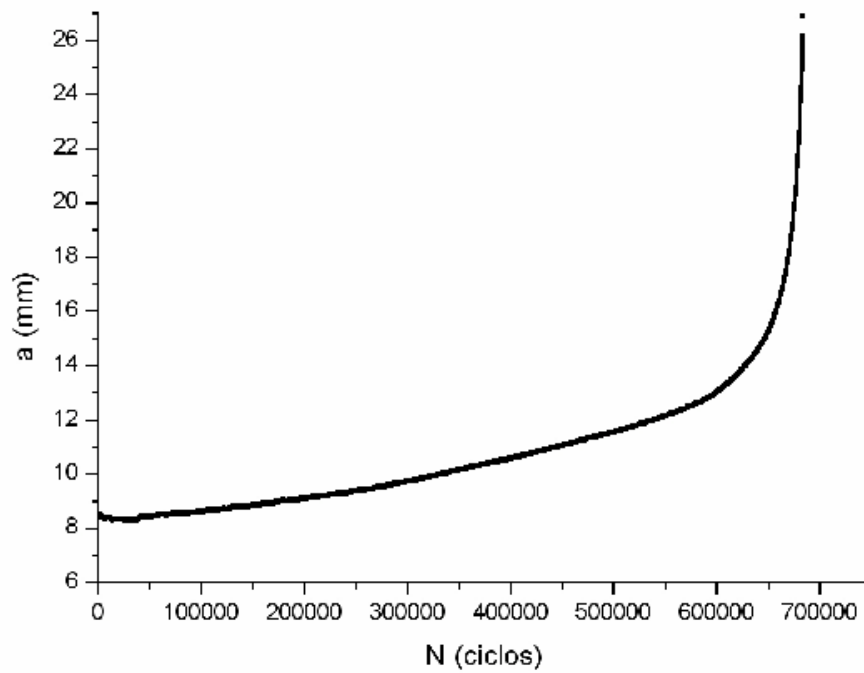


Fig. 6.3-22. Curva de longitud de grieta frente a número de ciclos para el noveno ensayo.

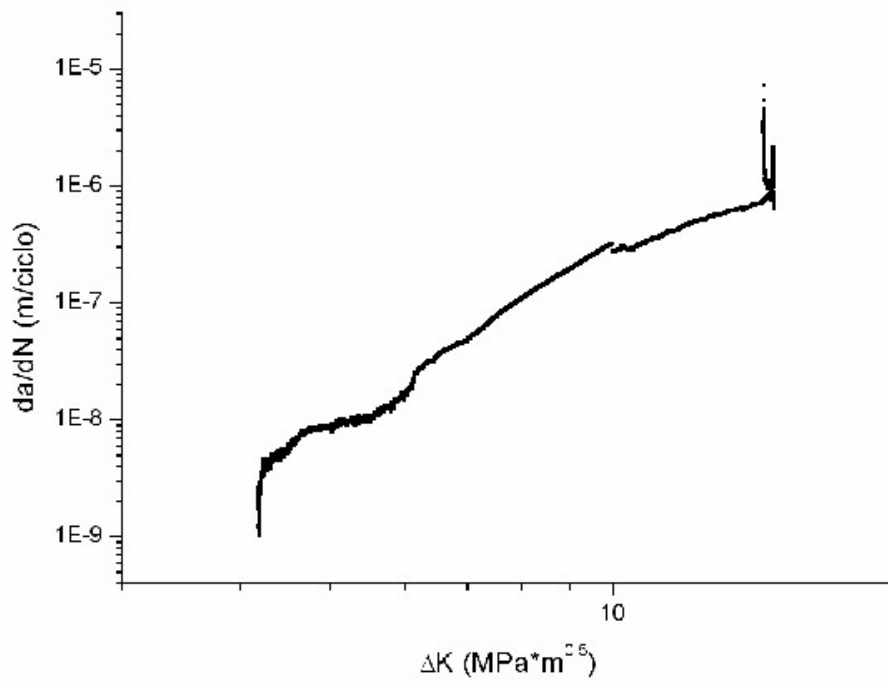


Fig. 6.3-23. Curva de velocidad de crecimiento de grieta frente a factor de intensidad en tensiones para el noveno ensayo.

Ensayo 10

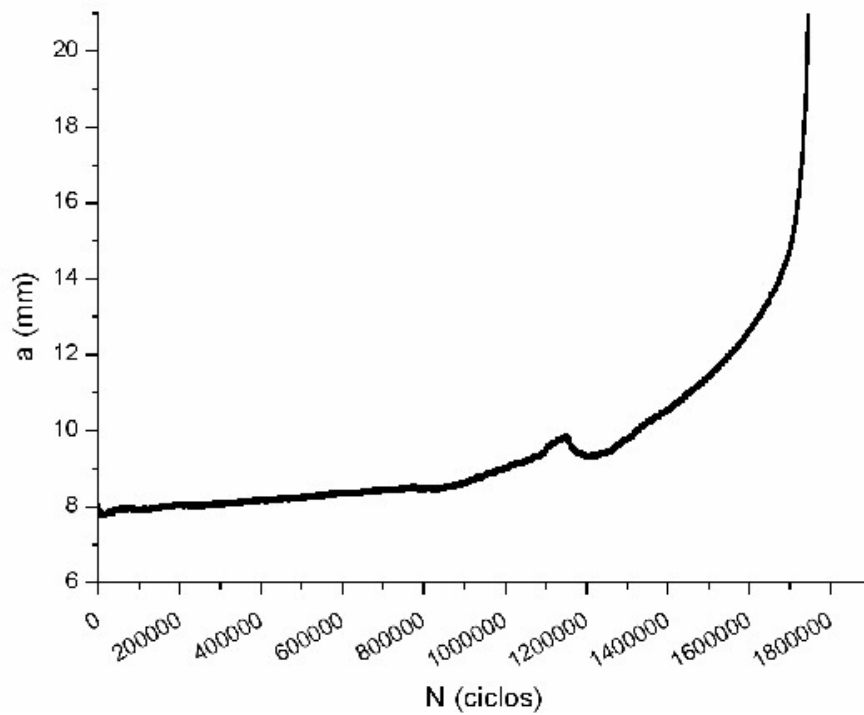


Fig. 6.3-24. Curva de longitud de grieta frente a número de ciclos para el décimo ensayo.

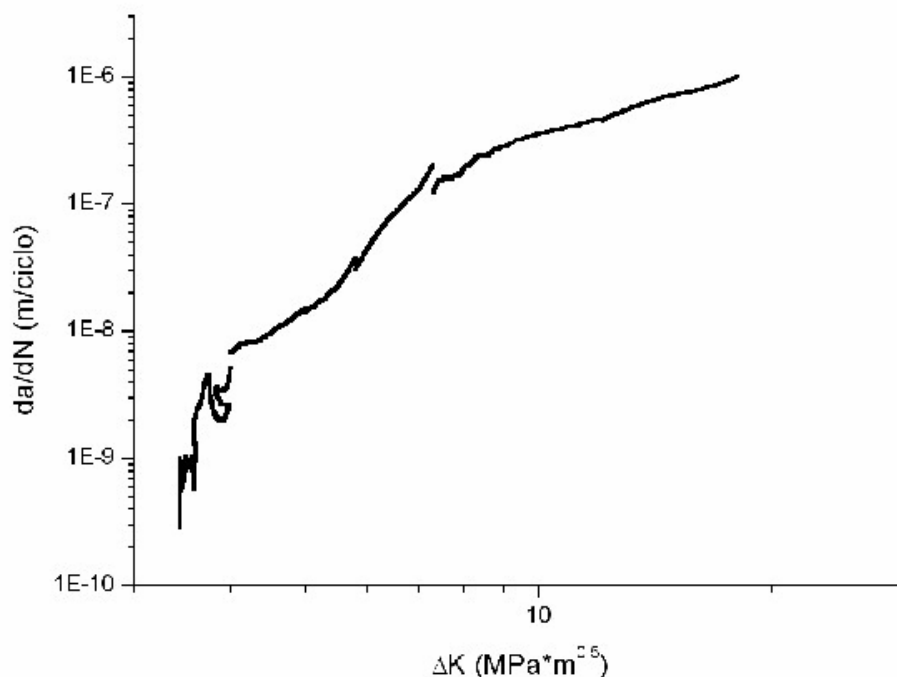


Fig. 6.3-25. Curva de velocidad de crecimiento de grieta frente a factor de intensidad en tensiones para el décimo ensayo.

En las figuras anteriores se muestran los ensayos realizados y las curvas de velocidad de crecimiento de grieta. Para el cálculo de la recta de regresión se partirá de estas últimas curvas eliminando los tramos excesivamente irregulares en las mismas. Esto supone eliminar puntos del inicio y final de ciertas curvas en la mayoría de los casos ya que, como puede observarse en las representaciones anteriores, se pueden dar resultados incoherentes especialmente al acercarse a valores del factor de intensidad en tensiones reducidos.

Hay que hacer notar que en el ensayo número diez aparece una irregularidad en forma de pico de longitud de grieta que se debería a un error en la medida ya que no es posible que la longitud de grieta disminuya. Esto da lugar a resultados incoherentes en la curva de velocidad de crecimiento de grieta siendo necesario descartar los datos afectados por esta irregularidad.

A continuación se representan todos los ensayos en una misma figura:

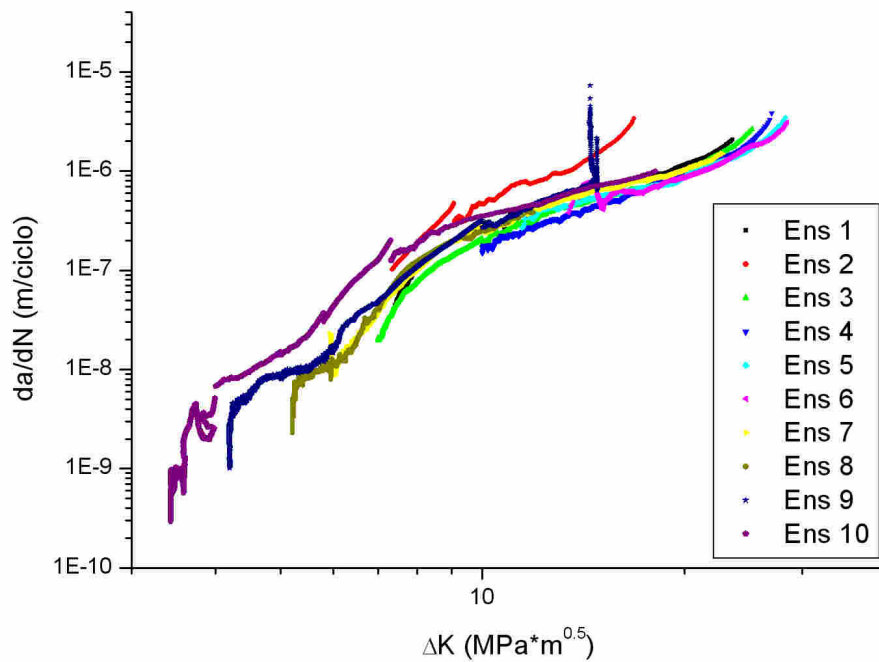


Fig. 6.3-26. Representación conjunta de la velocidad de crecimiento de grieta obtenida para cada ensayo.

Se puede comprobar que el ensayo número 2 se aleja notablemente del resto de ensayos. Por esta razón se desechó el ensayo mencionado y la regresión se hizo empleando los otros nueve restantes. A continuación se muestran estos ensayos en una representación conjunta una vez eliminados los extremos de las curvas cuya forma no estaba bien definida:

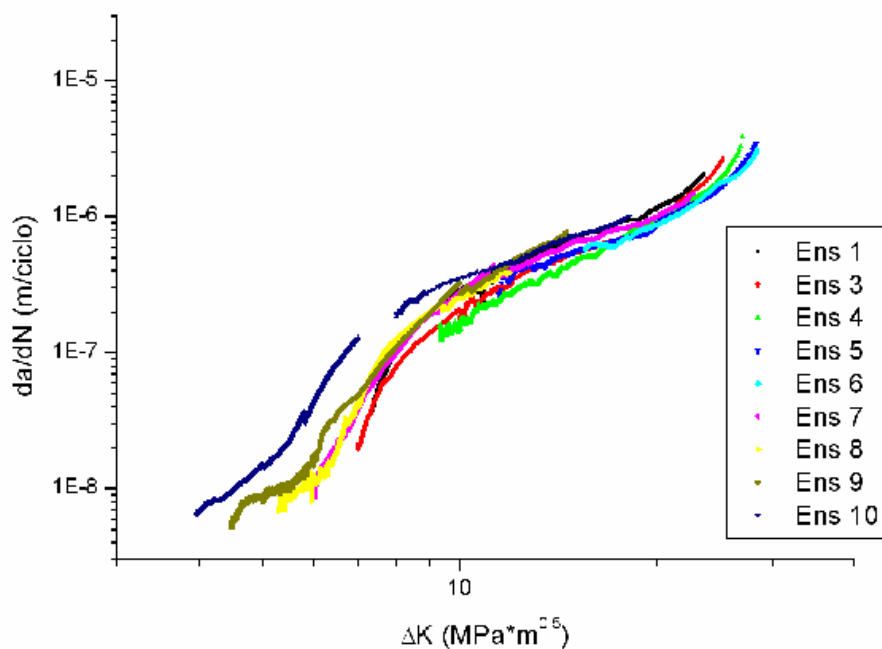


Fig. 6.3-27. Representación conjunta de las velocidades de crecimiento de grieta de los distintos ensayos.

Como ya se ha comentado, es a partir de estas curvas de donde se obtiene la recta de regresión que aproxima la velocidad de crecimiento de grieta en función del factor de intensidad en tensiones (ΔK). Dicha aproximación se hará de acuerdo a la ecuación de Paris:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^n \quad (6.3.6)$$

Aproximando la longitud total de las curvas mediante mínimos cuadrados obtenemos los siguientes coeficientes para la ecuación de Paris:

$$C = 1.874 \cdot 10^{-11}$$

$$n = 3.8785$$

Ahora bien, considerando la forma de las curvas, se puede observar que aparece un cambio muy claro de pendiente. Esto conduce a realizar la aproximación por mínimos cuadrados en dos etapas que representen el comportamiento antes y después de dicho cambio de pendiente. De hecho, las curvas que alcanzan valores menores de ΔK inducen a pensar que para valores algo menores aparece otro cambio de pendiente y por tanto que podría representarse la evolución de la velocidad de crecimiento de grieta mediante tres tramos.

Puesto que no se dispone de datos con ΔK lo suficientemente bajo, la aproximación se hará en dos tramos: uno para ΔK bajos (aproximadamente para $\Delta K = 9$ o menor) y otro para ΔK altos (para $\Delta K = 9$ o mayor). Los coeficientes de la ecuación de Paris para dichas rectas se muestran a continuación:

- $\Delta K < 9$

$$C = 2.1649 \cdot 10^{-13}$$

$$n = 6.1624$$

- $\Delta K > 9$

$$C = 1.4073 \cdot 10^{-9}$$

$$n = 2.1975$$

Para uso general sería aplicable la aproximación por una sola recta para determinar la velocidad de crecimiento de grieta, ya que dará una velocidad aproximada durante todo el crecimiento, mientras que para un estudio en detalle en el que se conoce el valor de ΔK es preferible usar la aproximación en dos tramos. A continuación se representan las tres rectas de regresión junto a los ensayos realizados:

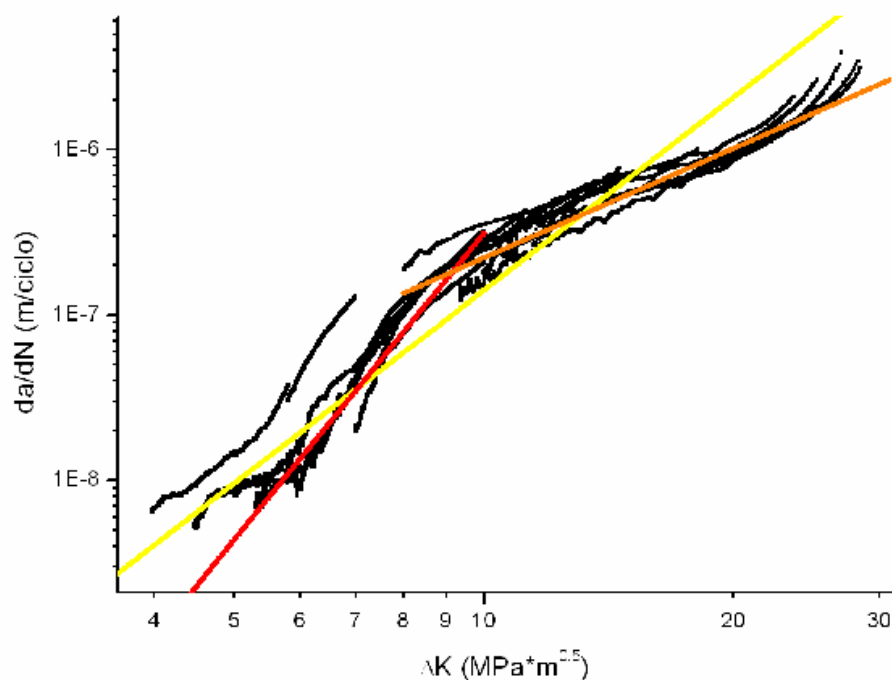


Fig. 6.3-28. Rectas de regresión de los datos de velocidad de crecimiento de grieta.

En amarillo se puede observar la recta de regresión para todo el intervalo y en rojo y naranja las rectas para valores bajos y altos de ΔK respectivamente.

En lo respectivo al error cometido en la medida y posteriores cálculos, en esta ocasión resulta más complicado que en los anteriores. De hecho lo que aquí se presenta es un cálculo aproximado para dar una idea del error cometido en el cálculo de la longitud de grieta. Para ello se ha calculado el error cometido en tres puntos tomando estos como representativos del comportamiento general, considerando que la expresión de la longitud de grieta en función de la medida del extensómetro es correcta.

A continuación se presentan la longitud de grieta de los puntos en los que se ha evaluado el error junto con el propio error y la incertidumbre.

Tabla 6.3-3. Incertidumbre calculada.

a (mm)	U_a (mm)	I_a (%)
8.000	0.0272	0.34
9.167	0.0267	0.29
12.073	0.0254	0.21

De los datos presentados se pueden obtener dos conclusiones. La primera es que el error cometido se halla por debajo del 0.5 % y la segunda es que conforme mayor es la longitud de la grieta menor es el error cometido en el cálculo.