

CAPITULO 5

APLICACIONES PRÁCTICAS: CRECIMIENTO DE PEQUEÑAS GRIETAS

5.1. INTRODUCCIÓN

Algunos investigadores, como Ritchie y Lankford (1986) o Miller (1987), han observado que las características del crecimiento a fatiga de pequeñas grietas, desde varios μm hasta longitudes menores de 1 mm, son diferentes de las producidas en grietas grandes para el mismo material: las grietas de pequeño tamaño crecen más rápidamente de lo esperado en base a las predicciones realizadas a partir de los datos obtenidos para grietas grandes. Este comportamiento puede apreciarse en la *figura 5.1*, donde se ha representado la velocidad de crecimiento en función del rango del factor de intensidad de tensiones, ΔK .

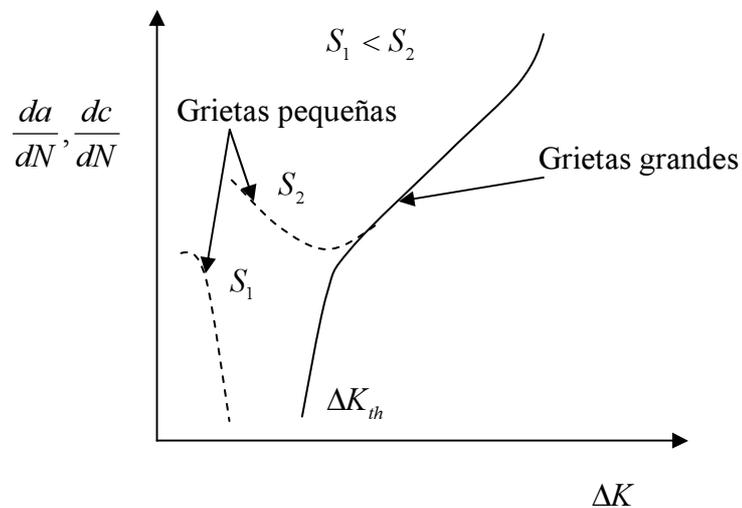


Figura 5.1: Ley de crecimiento bajo cargas de amplitud constante.

La curva continua representa el comportamiento típico de grietas grandes bajo cargas de amplitud constante, obteniendo el rango umbral del factor de intensidad de tensiones mediante ensayos de disminución de la carga. Los resultados experimentales proporcionados para grietas pequeñas se han dibujado con línea discontinua. Estos

resultados muestran que las grietas pequeñas crecen por debajo del rango umbral del factor de intensidad de tensiones para grietas grandes, y pueden llegar a crecer más rápidamente para los mismos valores de ΔK por encima de dicho umbral.

Actualmente se consideran tres posibles explicaciones para el comportamiento de pequeñas grietas: efectos de la plasticidad, efectos metalúrgicos y cierre de grieta.

En los materiales metálicos, las grietas pequeñas normalmente se inician en inclusiones, poros, zonas con imperfecciones en el material o los límites de grano. En todos estos casos, el crecimiento está controlado por las características metalúrgicas del material; factores como la orientación del grano, irregularidades en el material o inclusiones influirán fuertemente sobre el crecimiento de la grieta. Para grietas grandes, la influencia de la microestructura sobre el crecimiento disminuye a medida que el frente de grieta atraviesa una mayor cantidad de granos.

El cierre de grieta por fatiga es considerado otro de los posibles causantes del comportamiento de grietas pequeñas. Al iniciarse éstas en una inclusión o poro, no posee la historia de carga necesaria para generar las deformaciones plásticas en la punta de la grieta y el cierre de la misma no se produce. La transición al cierre de grieta o, más correctamente, el inicio del cierre en los primeros estados de crecimiento, se ha establecido como la principal razón de los efectos en grietas pequeñas.

El modelo de cierre de grieta propuesto por Newman ha demostrado su capacidad para reproducir el comportamiento del crecimiento de grietas pequeñas en una gran variedad de materiales y condiciones de carga y uno de los objetivos de esta investigación es conseguir aplicar el concepto de ΔK_{eff} a grietas pequeñas.

A continuación se realizan tres ensayos con el programa **FASTRAN II** con el objetivo de validar su comportamiento y su capacidad a la hora de representar el comportamiento a fatiga de grietas pequeñas.

5.2. MATERIALES

Se han utilizado dos aleaciones de aluminio de alta resistencia usadas comúnmente en estructuras aeronáuticas: la aleación de Aluminio 7075-T6 y la aleación de aluminio LC9cs. La *tabla 5.1* proporciona la composición química nominal de estas dos aleaciones.

Elemento	7075-T6	LC9cs
Al	89.3	88.95
Cr	0.2	0.2
Cu	1.6	1.6
Fe	0.2	0.5
Mn	0.2	0.15
Mg	2.6	2.5
Si	0.1	0.5
Ti	0.1	--
Zn	5.7	5.6

Tabla 5.1: *Composición química (% en peso).*

Las propiedades mecánicas de las dos aleaciones, proporcionadas por la American Society for Tensile and Materials (ASTM), son las siguientes:

Material	Espesor (mm)	Límite de rotura (MPa)	Límite elástico (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
7075-T6	2.3	575	520	70.000
LC9cs	2	538	481	66.400
LC9cs (núcleo)	1.8	575	514	69.200
Propiedades en la dirección longitudinal				

Tabla 5.2: *Propiedades mecánicas.*

Como se aprecia en la tabla, la diferencia más significativa entre los dos materiales es el comportamiento de la superficie, mientras que los núcleos poseen propiedades similares. Esto se debe a que la aleación LC9cs tiene una capa de clad de entre 50 y 70 μm ,

compuesta principalmente por Al y Zn, para mejorar la resistencia a la corrosión. Ésta es la causa de las diferentes propiedades mecánicas de ambos materiales.

La microestructura típica de ambos materiales es similar, presentando una muy parecida distribución de inclusiones en el núcleo de las aleaciones. El tamaño medio de grano en las direcciones longitudinal, transversal y del espesor, puede verse en la *figura 5.3*.

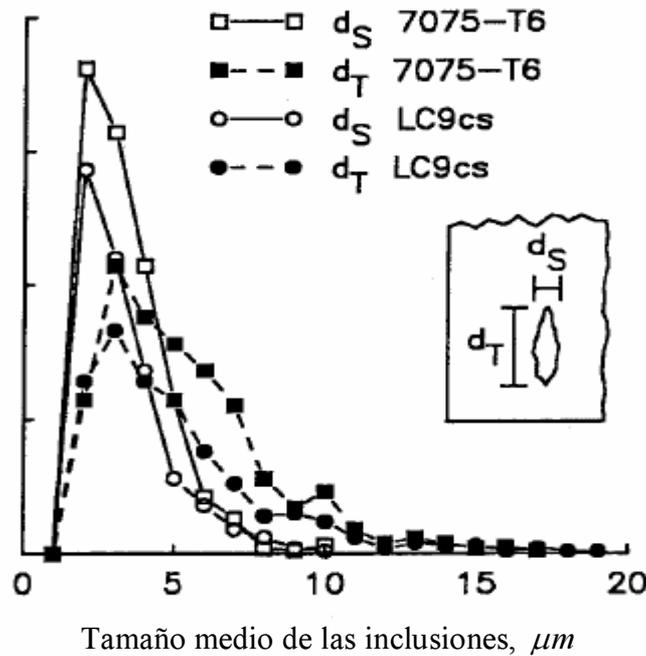


Figura 5.2: Distribución del tamaño de las inclusiones en las aleaciones.

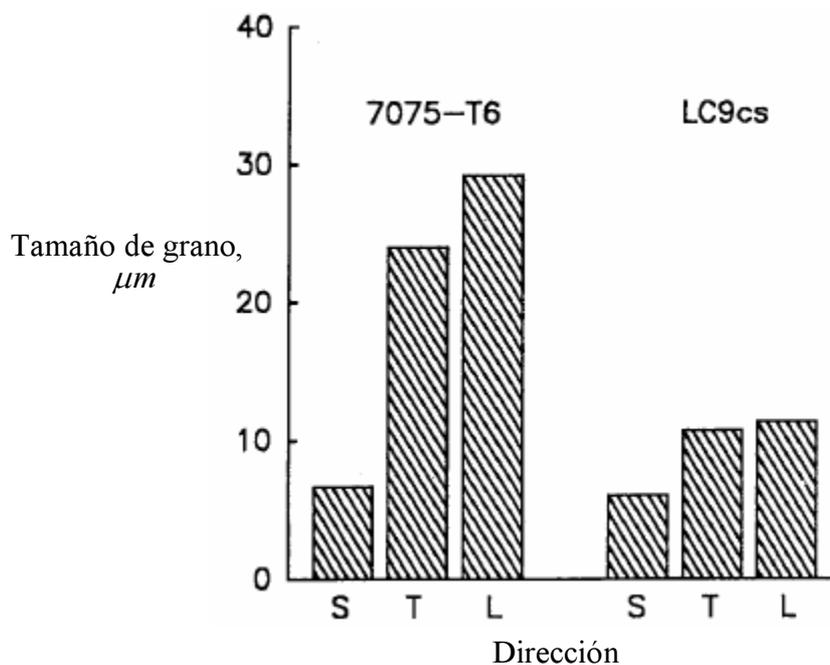


Figura 5.3: Tamaño medio de grano.

En las direcciones transversal y longitudinal, el tamaño de grano en la aleación 7075-T6 es aproximadamente el doble que en la aleación LC9cs.

5.3. ESPECÍMENES

Para los test de fatiga y crecimiento de pequeñas grietas se han utilizado probetas tipo SENT, seleccionadas para reproducir la iniciación y crecimiento de grietas que aparecen en estructuras aeronáuticas a partir de defectos o discontinuidades en el material.

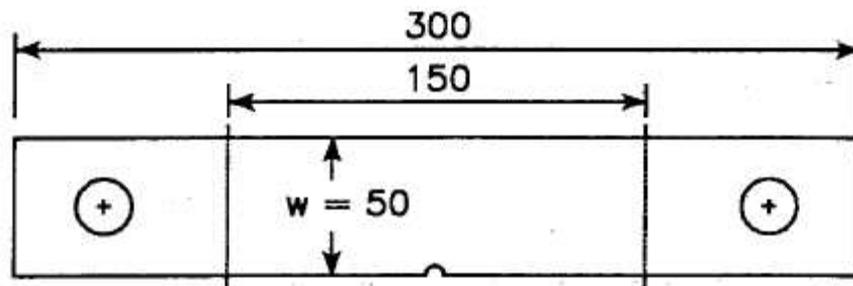


Figura 5.4: *Probeta tipo SENT.*

5.4. ENSAYO I

5.4.1. Descripción de la probeta

En este primer ensayo se ha utilizado una probeta tipo SENT como la mostrada en la *figura 5.5*. La probeta es rectangular con un agujero semicircular practicado en uno de sus lados.

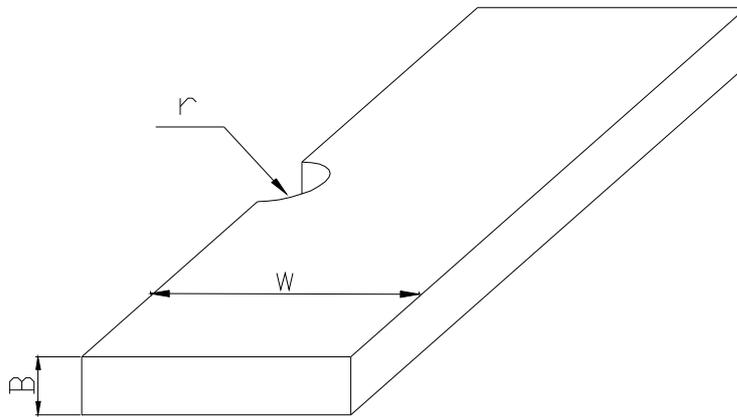


Figura 5.5: *Probeta tipo SENT.*

Las dimensiones de la probeta son las siguientes:

Tipo de probeta	w	B	r	K_T	Material
SENT	50 mm.	2.3 mm.	3.18 mm.	3.15	Aluminio 7075 – T6

Tabla 5.3: *Dimensiones de la probeta.*

La probeta ha sido fabricada con la aleación de aluminio 7075 – T6, cuyas propiedades se relacionan a continuación:

Aleación de Aluminio	Límite elástico	Límite de rotura	Módulo de elasticidad
7075 – T6	520 MPa.	575 MPa.	70.000 MPa.

Tabla 5.4: *Propiedades del material.*

5.4.2. Descripción de la carga utilizada

La carga utilizada está formada por ciclos de amplitud constante con una relación de carga $R = -1$ y una carga máxima $S_{\max} = 80\text{MPa}$ como se muestra en la *figura 5.6*.

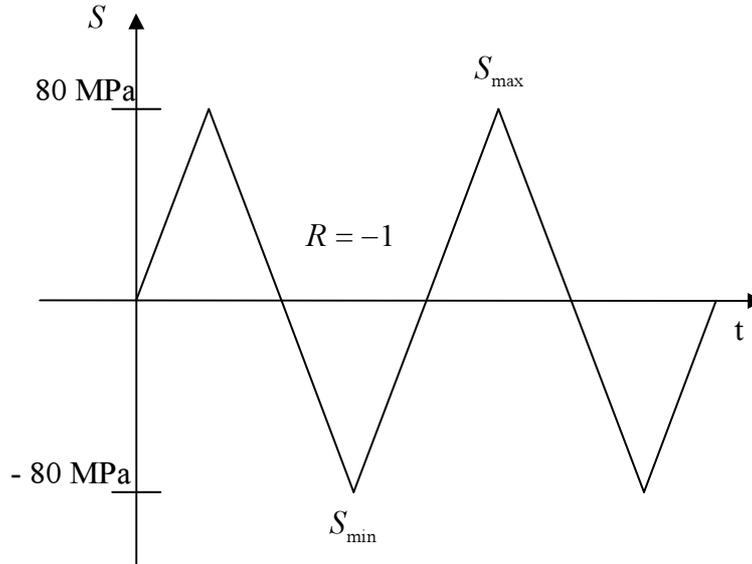


Figura 5.6: Carga aplicada durante el ensayo.

5.4.3. Características iniciales de la grieta

La longitud inicial de la grieta, $6\mu\text{m}$, igual tanto en la dirección longitudinal como en la transversal, $a_i = c_i = 6\mu\text{m}$, se ha seleccionado con dimensiones similares a las de inclusiones o poros de la aleación, lugares donde se inician las grietas por fatiga. Teniendo en cuenta la isotropía del material se ha considerado que la grieta crece a igual velocidad en ambas direcciones.

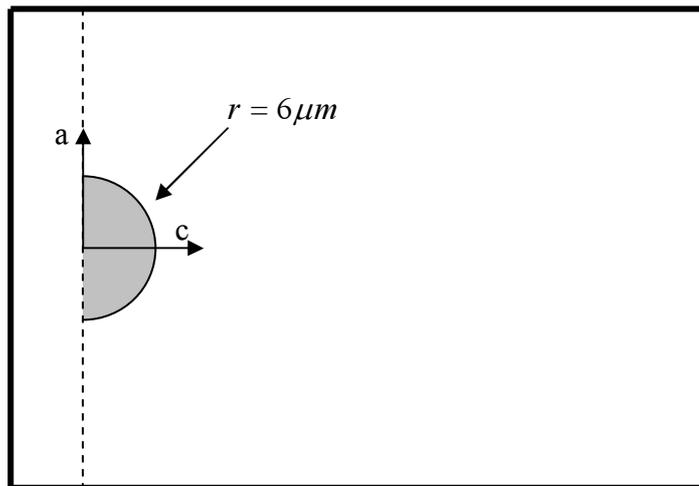


Figura 5.7: Dimensiones iniciales de la grieta.

5.4.4. Velocidad de crecimiento de la grieta

Para este ensayo se utilizarán las medidas realizadas para la velocidad de crecimiento de grietas en probetas SENT de aluminio 7075 – T6 en función del rango efectivo del factor de intensidad de tensiones. Los valores se proporcionan al programa en forma de tabla.

Relación entre $\frac{dc}{dN}$ y ΔK_{eff}					
$\frac{da}{dN}, \frac{dc}{dN}$ (m / ciclo)	$1e^{-11}$	$1e^{-9}$	$1e^{-8}$	$1e^{-7}$	$1e^{-6}$
ΔK_{eff} (MPa · m ^{1/2})	0.8	1.5	3.5	7	16

Tabla 5.5: Relación entre la velocidad de crecimiento y ΔK_{eff} .

En la *figura 5.8* vemos gráficamente, realizando una interpolación lineal, la representación de los valores proporcionados en la tabla.

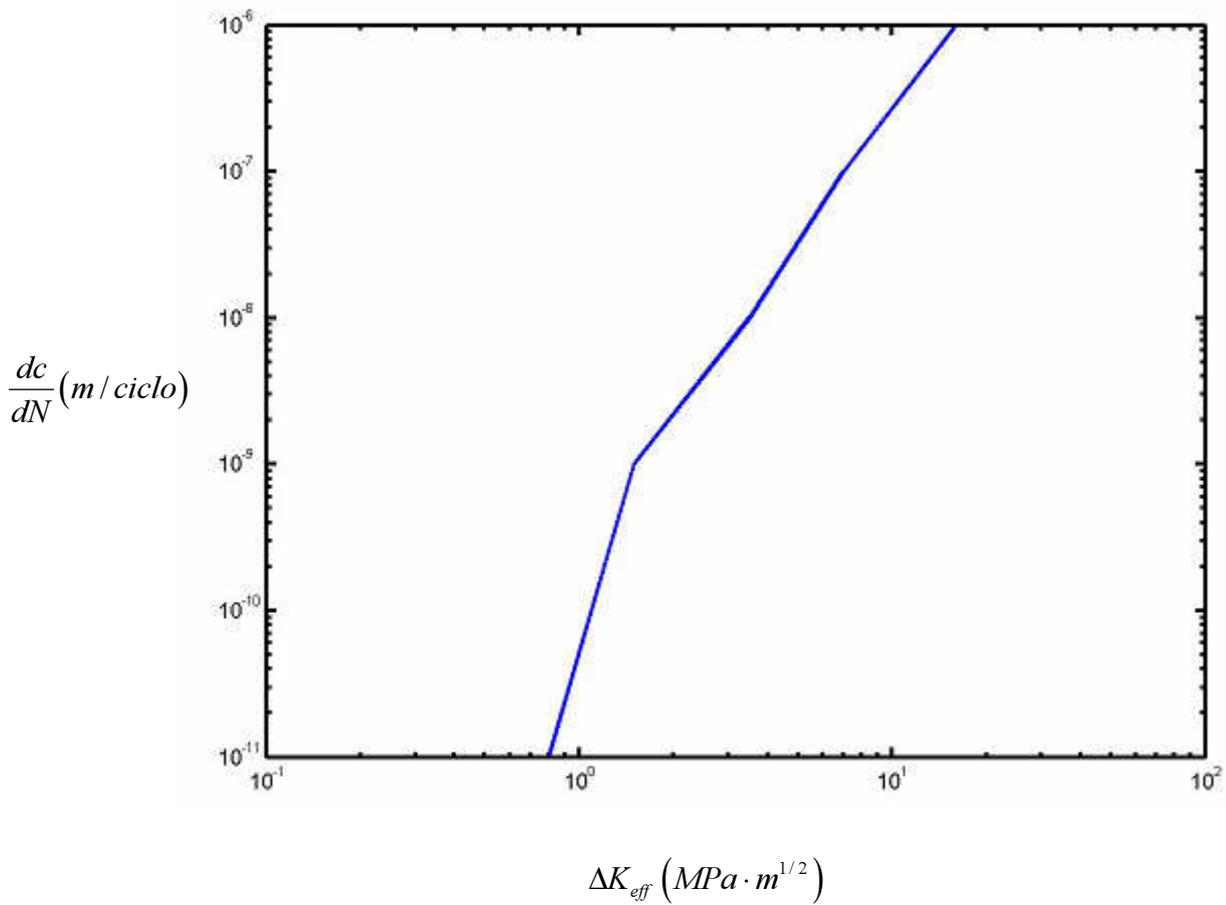


Figura 5.8: *Velocidad de crecimiento en función de ΔK_{eff} .*

5.4.5. Archivo de entrada y resultados obtenidos

En el archivo de entrada proporcionado al programa se han definido todas las características anteriormente descritas. La figura siguiente muestra el archivo de entrada de este primer ensayo.

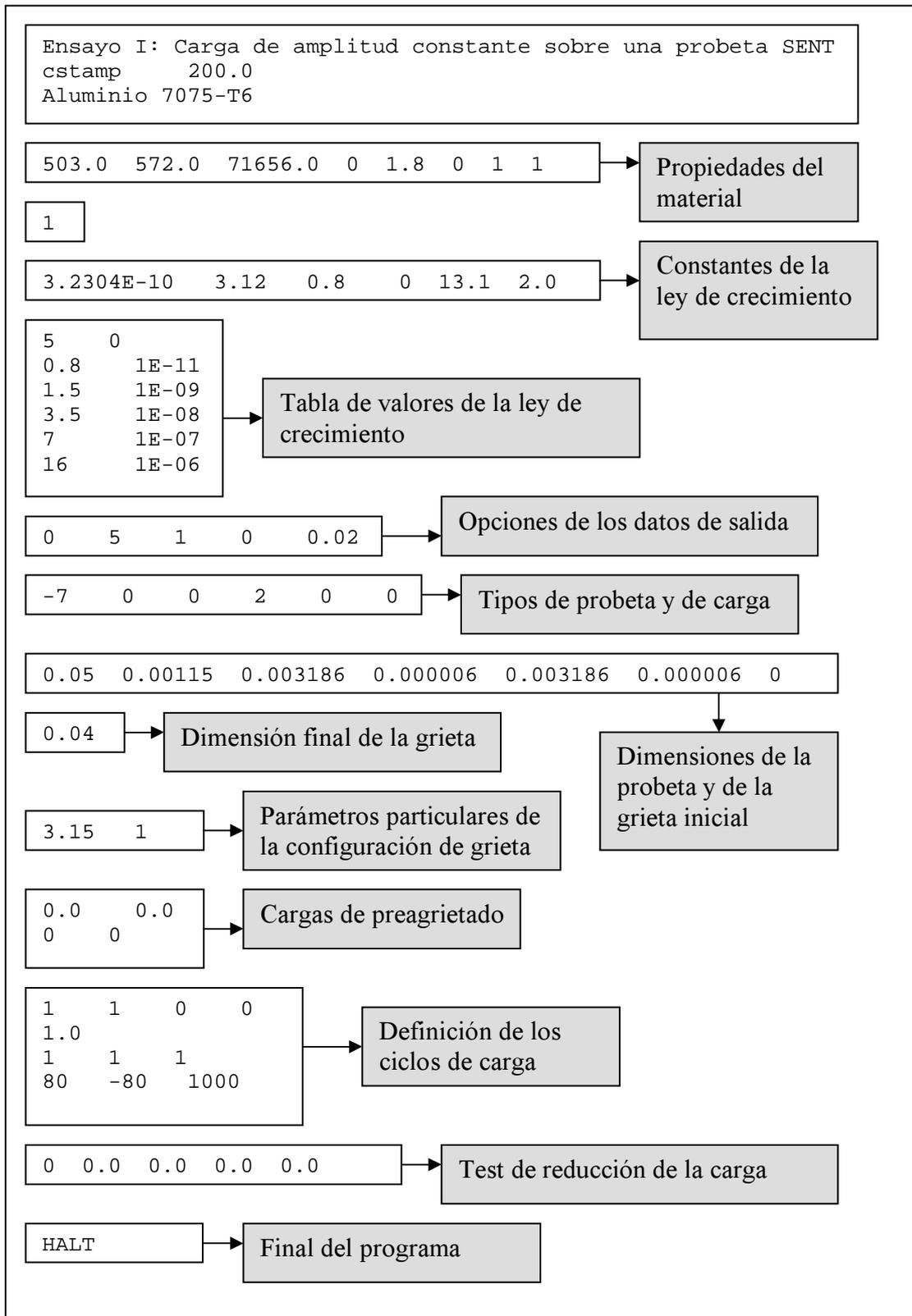


Figura 5.9: Archivo de entrada del Ensayo I.

Los resultados obtenidos con el programa **FASTRAN II** muestran gráficamente la relación velocidad de crecimiento - ΔK_{eff} que aparece en la *figura 5.10*.

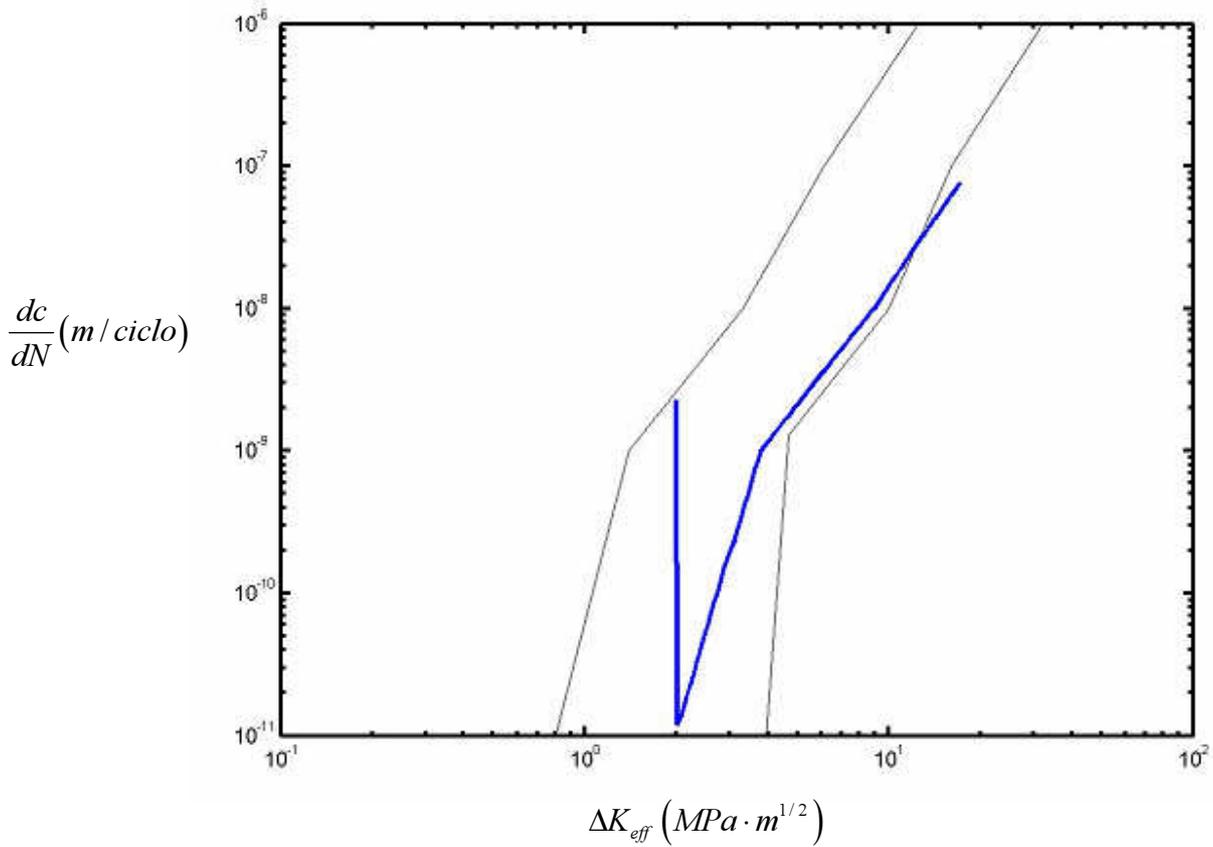


Figura 5.10: *Velocidad de crecimiento en función de ΔK_{eff} .*

Los resultados obtenidos concuerdan con los presentados por Newman, Jr. (1999), ver *figura 5.11*. La grieta, con unas dimensiones iniciales similares a las de inclusiones o poros del material ($a_i = c_i = 6\mu m$), parte de la curva ΔK_{eff} - *velocidad* debido a que inicialmente se ha supuesto que la grieta está completamente abierta. La caída de la velocidad de crecimiento se produce durante la transición al cierre de grieta, al iniciarse el cierre en los primeros estados de crecimiento. Una vez estabilizada, la grieta crece de forma similar a las predicciones para grietas grandes.

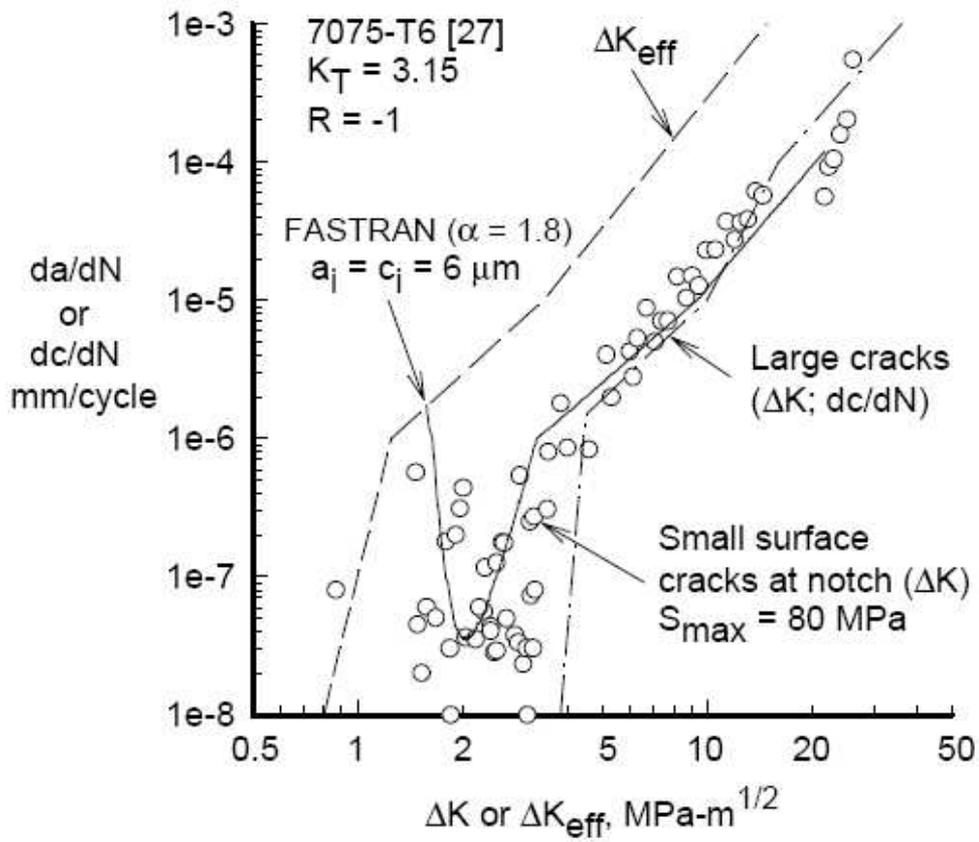


Figura 5.11: Resultados obtenidos por Newman, J. C., Jr. (1999).

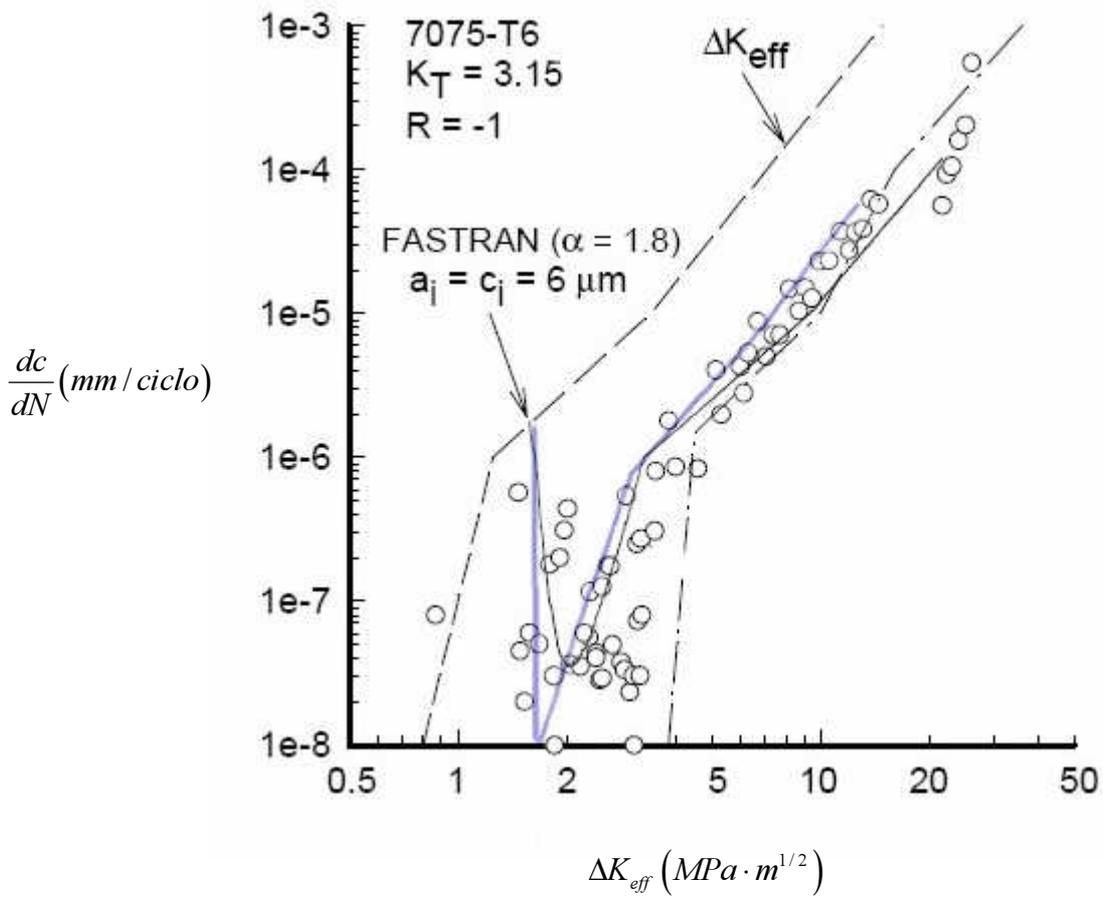


Figura 5.12: Superposición de ambas simulaciones.

5.5. ENSAYO II

5.5.1. Descripción de la probeta

En este ensayo se ha utilizado una probeta tipo SENT como la mostrada en la *figura 5.2*. La probeta es rectangular con un agujero semicircular practicado en uno de sus lados. Las dimensiones de la probeta aparecen en la tabla siguiente:

Tipo de probeta	w	B	r	K_T	Material
SENT	50 mm.	2 mm.	3.18 mm.	3.15	Aluminio LC9cs

Tabla 5.6: Dimensiones de la probeta.

La probeta ha sido fabricada con una aleación de aluminio LC9cs cuyas propiedades son similares a las de la aleación de aluminio 7075 – T6:

Aleación de Aluminio	Límite elástico	Límite de rotura	Módulo de Young
LC9cs	481 MPa.	538 MPa.	66.400 MPa.

Tabla 5.7: Propiedades del material.

La única diferencia entre ambas aleaciones es que mientras que en la aleación 7075 – T6 la grieta se iniciaba en inclusiones situadas en el centro de la entalla, en la aleación LC9cs la grieta, debido a que el material tiene una capa superficial de ‘clad’, se inicia preferentemente en la zona de clad y crece como una grieta de esquina, ‘corner crack’. Por otro lado, las peculiaridades de la superficie de esta aleación obligan a realizar las modificaciones adecuadas para tener en cuenta que el material no es homogéneo.

Aleación de Aluminio	Cladding
LC9cs	60 μm

Tabla 5.8: Espesor de la capa de clad.

5.5.2. Descripción de la carga utilizada

Se han realizado varios ensayos, variando en cada caso la amplitud de los ciclos de carga utilizados. Se analizará el comportamiento de la probeta para cargas máximas de 50 MPa, 70 MPa, 90 MPa y 110 MPa. La carga utilizada está formada por ciclos de amplitud constante con una relación de carga $R = -1$.

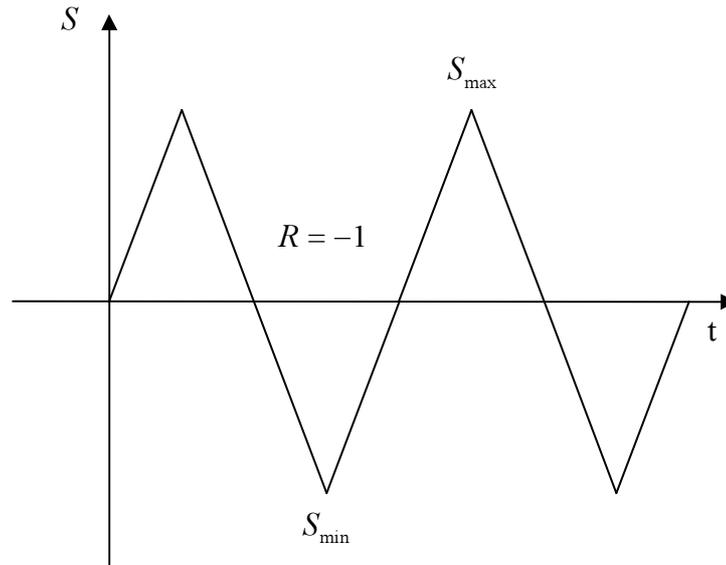


Figura 5.13: Carga aplicada durante el ensayo.

Se han realizado con esta configuración de probeta un total de 4 ensayos, con los valores de carga que se indican en la tabla siguiente:

Ensayo	S_{\max}	S_{\min}	R
1	50 MPa	-50 MPa	-1
2	70 MPa	-70 MPa	-1
3	90 MPa	-90 MPa	-1
4	110 MPa	-110 MPa	-1

Tabla 5.9: Valores de carga utilizados.

5.5.3. Influencia del clad

En la aleación de aluminio LC9cs, las grietas se inician en la capa de clad y crecen como grietas de esquina por el núcleo del material. Para tener en cuenta este fenómeno es necesario modificar la solución del factor de intensidad de tensiones para grietas en esquina y realizar un modelo aproximado para grietas creciendo en un material no homogéneo formado por varias capas.

Debido a que el límite elástico de la capa de clad se ha estimado en 50 MPa y a que en las probetas SENT dicha capa desarrolla multitud de grietas a lo largo del borde de la entalla, se ha tomado como aproximación que la capa de clad, de longitud l , no soportará tensión alguna durante el ensayo. Para estimar el efecto del clad sobre el factor de intensidad de tensiones se han utilizado dos soluciones del factor de intensidad de tensiones: la primera es la obtenida al aplicar una tensión uniforme únicamente sobre la grieta desarrollada en el núcleo del material, como se muestra en la *figura 5.14*; la segunda, es la solución desarrollada para una tensión uniforme aplicada sobre la longitud total de la grieta, a , *figura 5.15*.

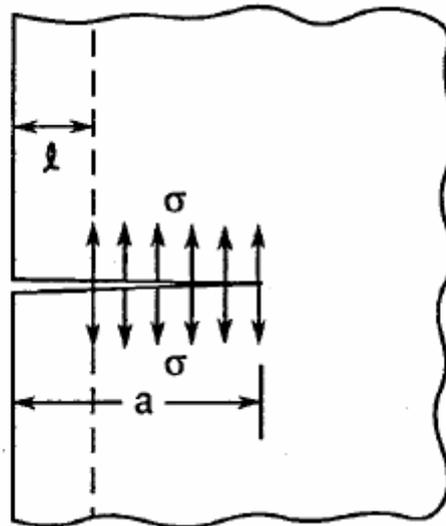


Figura 5.14: Tensión uniforme aplicada sobre el núcleo del material.

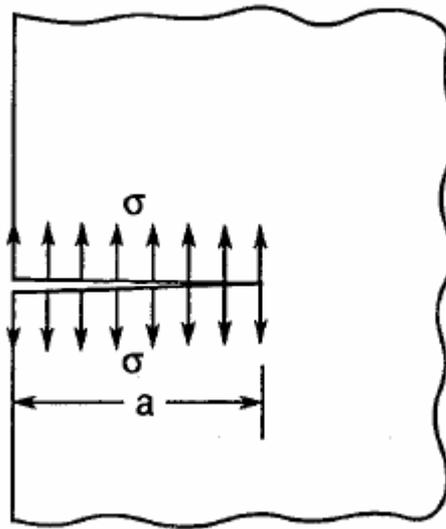


Figura 5.15: Tensión uniforme aplicada sobre la totalidad de la grieta.

El factor de corrección del clad se define como la relación entre el factor de intensidad de tensiones para las dos configuraciones. Para la primera configuración, la solución es:

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi a} \frac{\sqrt{2}}{\pi} \sum_{j=1}^5 \frac{\beta_j \left(1 - \frac{l}{a}\right)^{j-\frac{1}{2}}}{2j-1} \quad (22)$$

con los coeficientes:

β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
2	0.9788	1.1101	-0.3194	-0.1017

El factor de intensidad de tensiones para la segunda configuración es:

$$K_2 = 1.1215 \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \quad (23)$$

El factor de corrección, K_1 / K_2 , queda como:

$$G_c = 0.4 \sum_{j=1}^5 \frac{\beta_j \left(1 - \frac{l}{a}\right)^{j-\frac{1}{2}}}{2j-1} \quad (24)$$

El factor de intensidad de tensiones para la grieta en esquina en el filo de la entalla, definido por el factor de corrección superficial, será el obtenido de multiplicar por G_c el factor de intensidad de tensiones para la solución sin clad.

$$F_c' = F_c \cdot G_c \quad (25)$$

El código del programa ha sido modificado convenientemente para introducir la corrección anterior.

```

B1=2
B2=0.9788
B3=1.1101
B4=-0.3194
B5=-0.1017
L=0.00006
CX2=CX-0.000318
G1=(B1*(1-(L/A))**(1-0.5))/((2*1)-1)
G2=(B2*(1-(L/A))**(2-0.5))/((2*2)-1)
G3=(B3*(1-(L/A))**(3-0.5))/((2*3)-1)
G4=(B4*(1-(L/A))**(4-0.5))/((2*4)-1)
G5=(B5*(1-(L/A))**(5-0.5))/((2*5)-1)
GF=0.4*(G1+G2+G3+G4+G5)
FC=FC*GF
    
```

Figura 5.16: Código modificado en el programa.

5.5.4. Características iniciales de la grieta

La longitud inicial de la grieta, $77 \mu m$, es igual tanto en la dirección longitudinal como en la transversal $a_i = c_i = 77 \mu m$ y del mismo modo se considera que la grieta crece a igual velocidad en esas dos direcciones. La *figura 5.17* muestra la grieta inicial localizada en la esquina de la probeta.

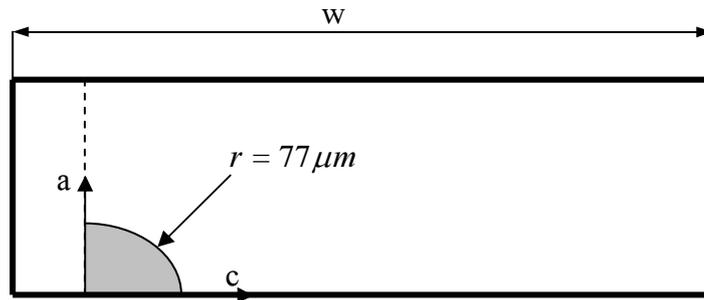


Figura 5.17: Dimensiones iniciales de la grieta.

5.5.5. Velocidad de crecimiento de la grieta

Para este ensayo se utilizarán las medidas realizadas para la velocidad de crecimiento de grietas en probetas SENT de aluminio LC9cs en función del rango efectivo del factor de intensidad de tensiones. Los valores se proporcionan al programa en forma de tabla.

Relación entre $\frac{dc}{dN}$ y ΔK_{eff}					
$\frac{da}{dN}, \frac{dc}{dN}$ (m/ciclo)	$1e^{-11}$	$1e^{-9}$	$1e^{-8}$	$1e^{-7}$	$1e^{-6}$
ΔK_{eff} (MPa · m ^{1/2})	0.9	1.2	3	6	13

Tabla 5.10: Relación entre la velocidad de crecimiento y ΔK_{eff} .

En la *figura 5.18* vemos gráficamente, realizando una interpolación lineal, la representación de los valores proporcionados en la tabla.

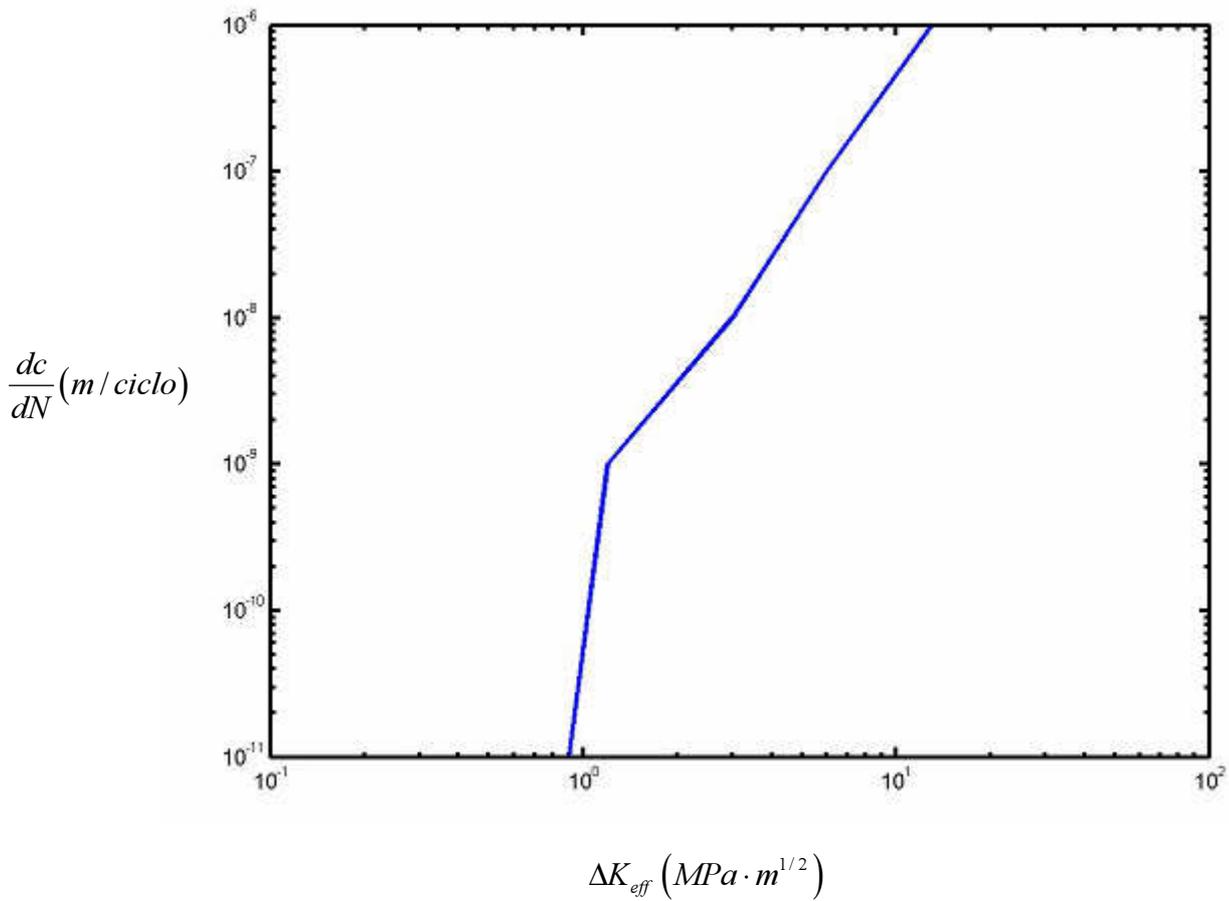


Figura 5.18: *Velocidad de crecimiento en función de ΔK_{eff} .*

5.5.6. Archivo de entrada y resultados obtenidos

En el archivo de entrada proporcionado al programa se han definido todas las características anteriormente descritas. La figura siguiente muestra el archivo de entrada de uno de los ensayos, en el que la carga máxima es $S_{max} = 50MPa$.

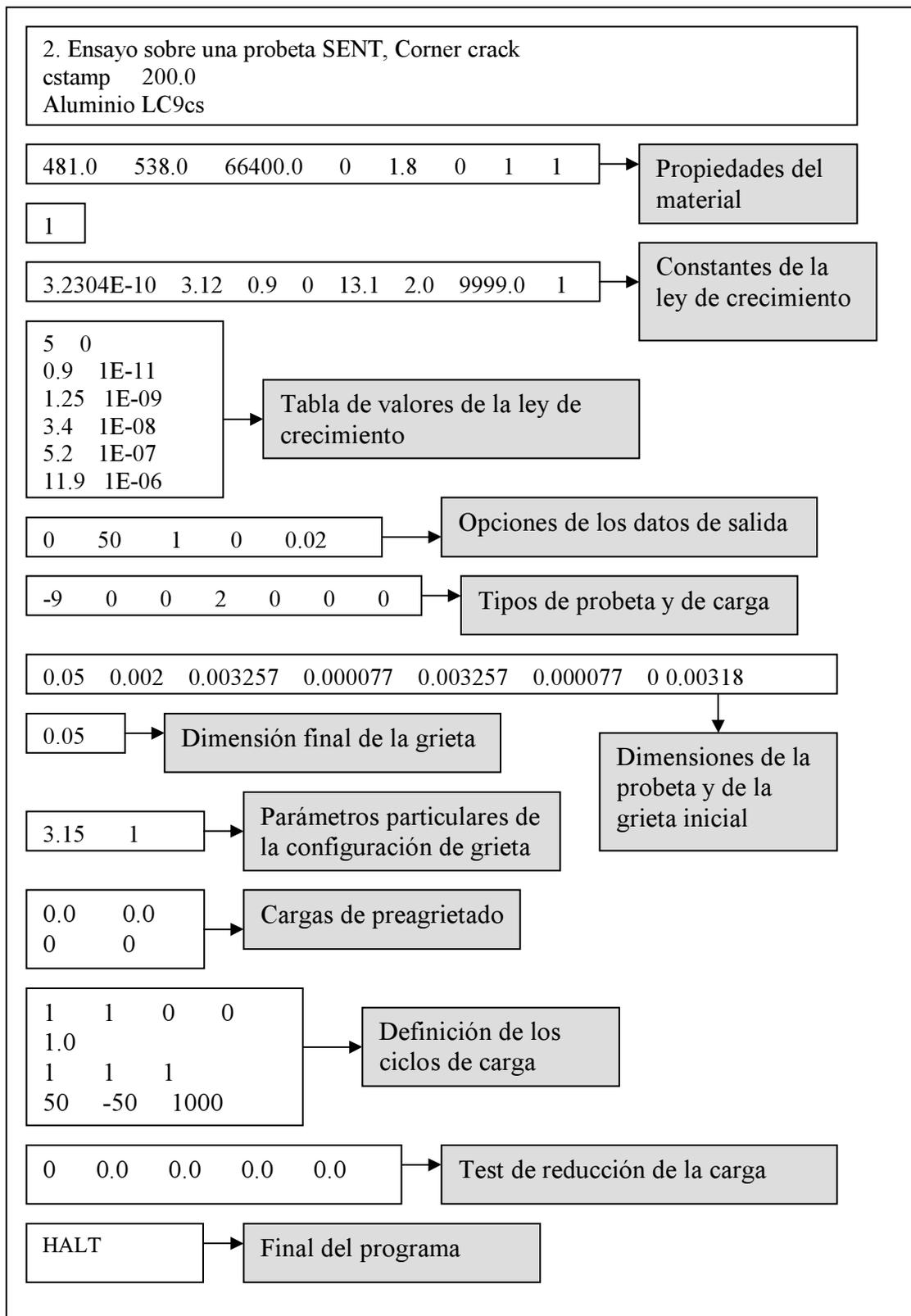


Figura 5.19: Archivo de entrada del ensayo.

Los resultados obtenidos con el programa FASTRAN II se representan en la *figura 5.20*.

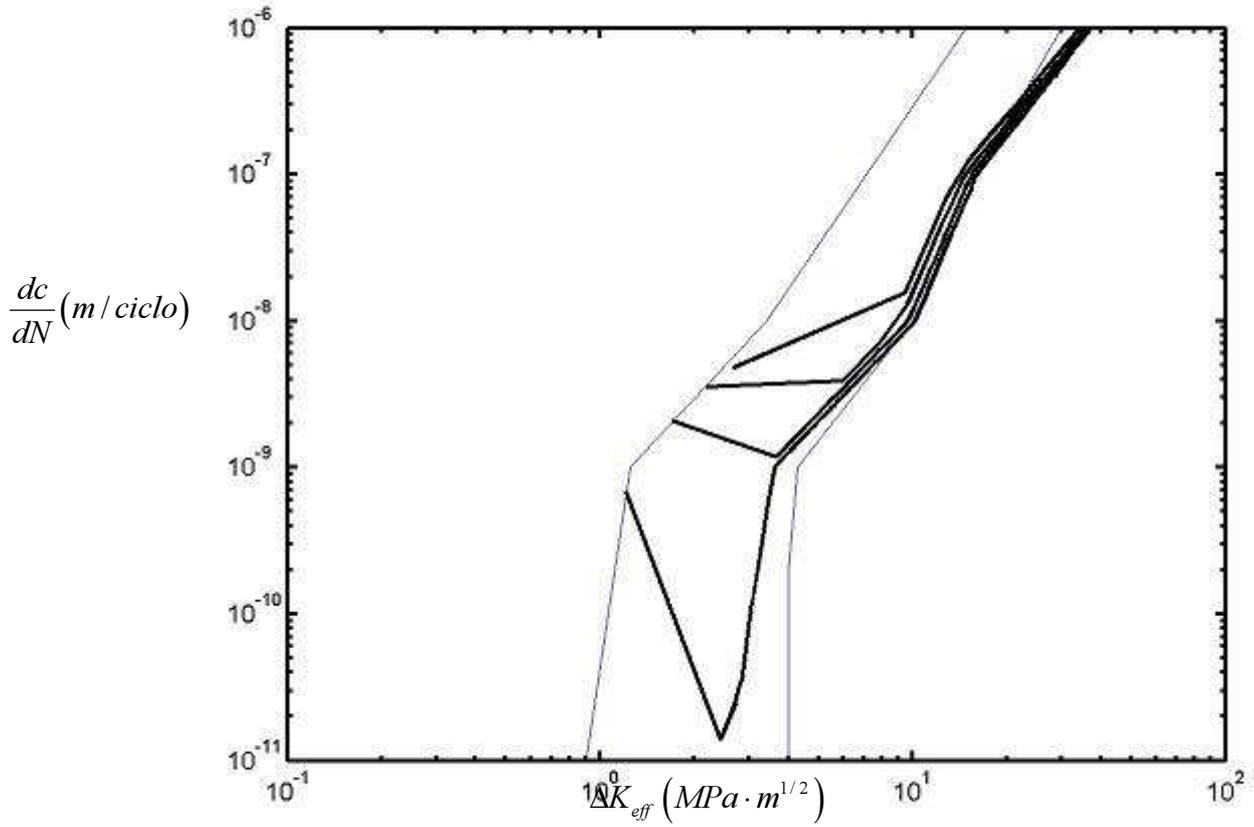


Figura 5.20: *Velocidad de crecimiento en función de ΔK_{eff} .*

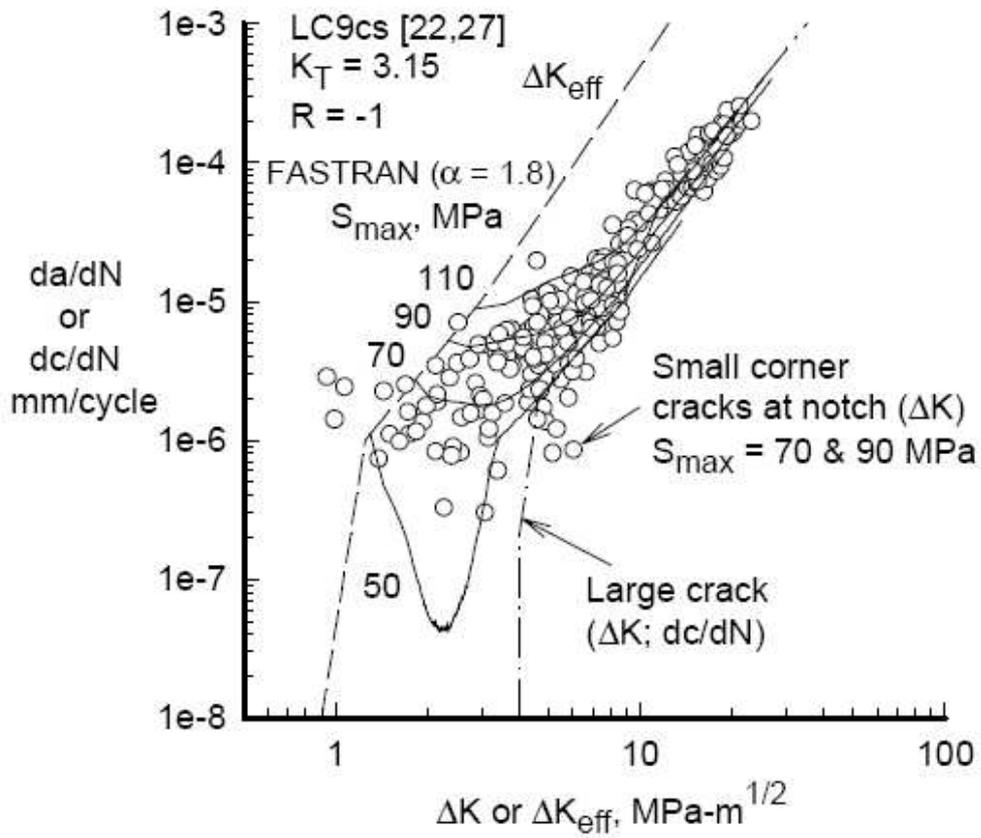


Figura 5.21: Resultados obtenidos por Newman, J. C., Jr. (1999).

5.6. ENSAYO III

5.6.1. Descripción de la probeta

En este ensayo la probeta utilizada es del tipo SENT, como la mostrada en la *figura 5.2*. La probeta es rectangular con un agujero semicircular practicado en uno de sus lados.

Las dimensiones de la probeta aparecen en la tabla siguiente:

Tipo de probeta	w	B	r	K_T	Material
SENT	50 mm.	2 mm.	3.18 mm.	3.15	Aluminio 2024 – T3

Tabla 5.11: *Dimensiones de la probeta.*

La probeta ha sido fabricada con una aleación de aluminio 2024 – T3 cuyas propiedades son las indicadas a continuación:

Aleación de Aluminio	Límite elástico	Límite de rotura	Módulo de Young
2024 – T3	310 MPa.	448 MPa.	73.034 MPa.

Tabla 5.12: *Propiedades del material.*

5.6.2. Descripción de la carga utilizada

Se analizará el comportamiento de la probeta para una carga de amplitud constante con un valor máximo igual a 110 MPa y una relación de carga $R = 0$.

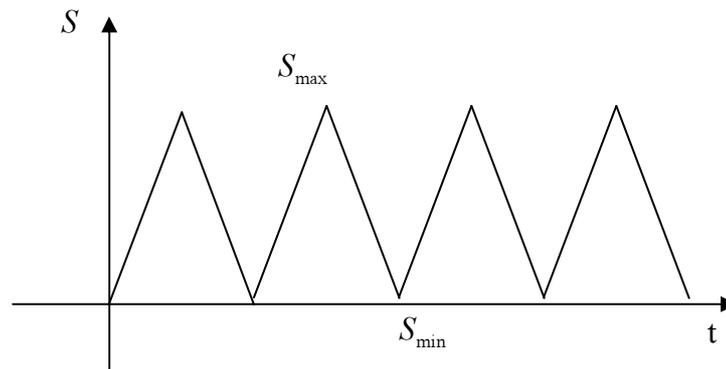


Figura 5.22: Carga aplicada durante el ensayo.

5.6.3. Características iniciales de la grieta

La longitud inicial de la grieta, $6\mu m$, es igual tanto en la dirección longitudinal como en la transversal $a_i = c_i = 6\mu m$ y del mismo modo se considera que la grieta crece a igual velocidad en esas dos direcciones. La *figura 5.23* muestra la grieta inicial localizada en el centro de la probeta.

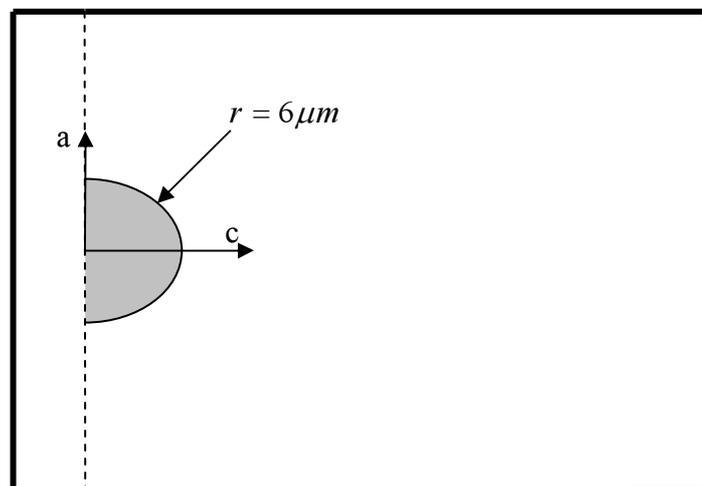


Figura 5.23: Dimensiones iniciales de la grieta.

5.6.4. Velocidad de crecimiento de la grieta

Para este ensayo se utilizarán las medidas realizadas para la velocidad de crecimiento de grietas en probetas SENT de aluminio 2024 – T3 en función del rango efectivo del factor de intensidad de tensiones. Los valores se proporcionan al programa en forma de tabla.

Relación entre $\frac{dc}{dN}$ y ΔK_{eff}					
$\frac{da}{dN}, \frac{dc}{dN} (m/ciclo)$	$1e^{-11}$	$1e^{-10}$	$2e^{-9}$	$7e^{-9}$	$1e^{-6}$
$\Delta K_{eff} (MPa \cdot m^{1/2})$	0.75	1	2	4	14

Tabla 5.13: Relación entre la velocidad de crecimiento y ΔK_{eff} .

En la *figura 5.24* vemos gráficamente, realizando una interpolación lineal, la representación de los valores proporcionados en la tabla.

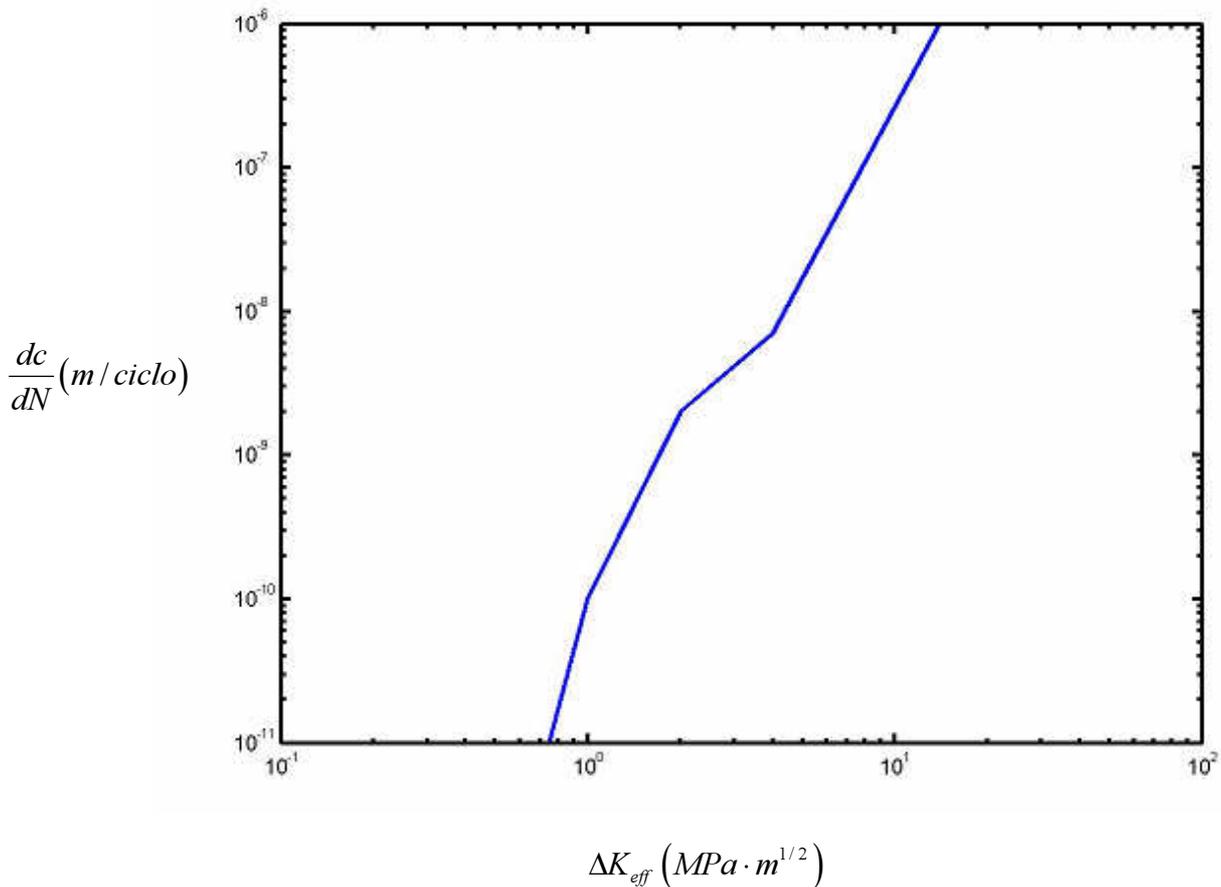


Figura 5.24: Velocidad de crecimiento en función de ΔK_{eff} .

5.6.5. Archivo de entrada y resultados obtenidos

En el archivo de entrada proporcionado al programa se han definido todas las características anteriormente descritas. La figura siguiente muestra el archivo de entrada del tercer ensayo.

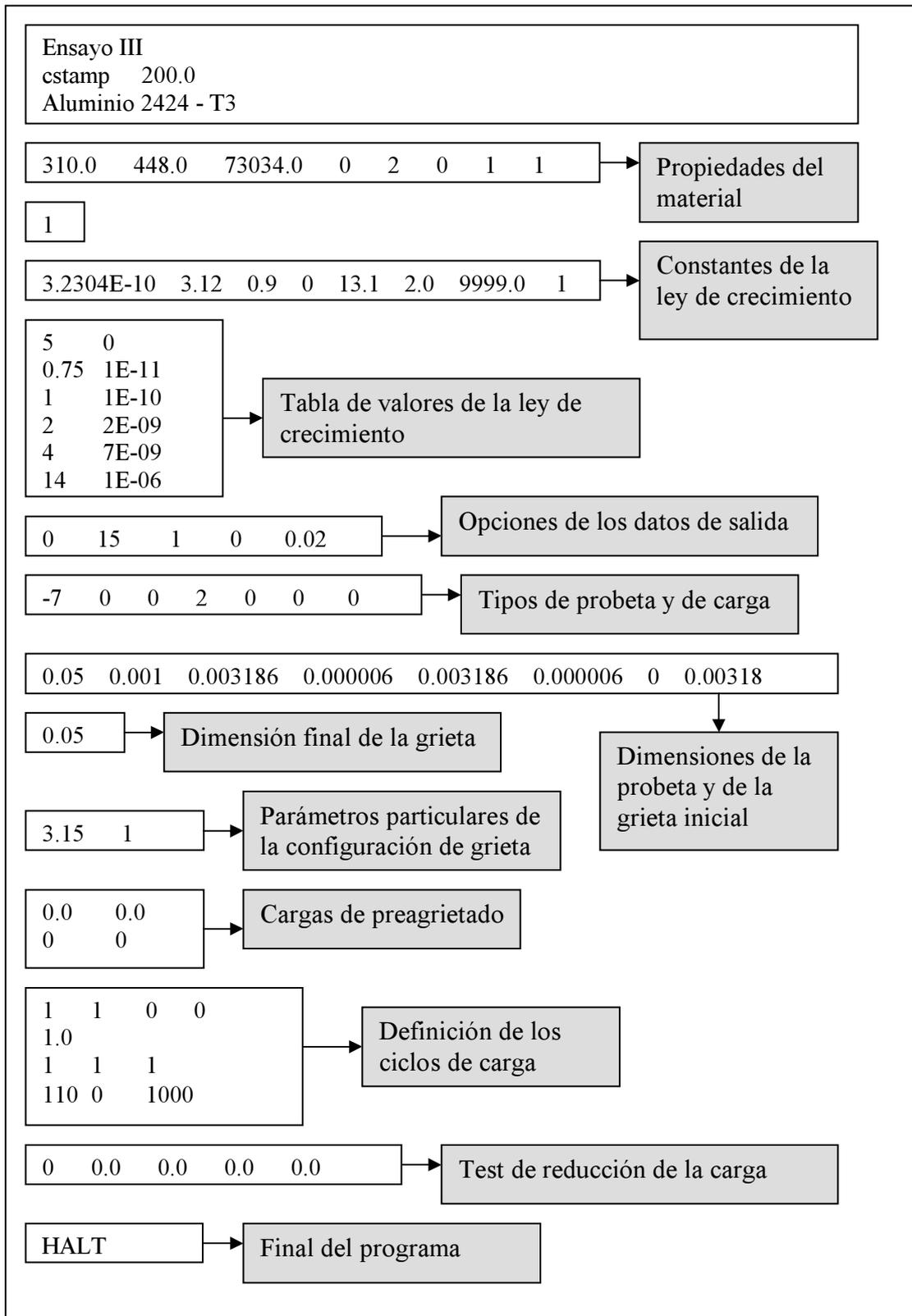


Figura 5.25: Archivo de entrada del Ensayo III.

Gráficamente la relación velocidad de crecimiento - ΔK_{eff} aparece en la *figura 5.26*.

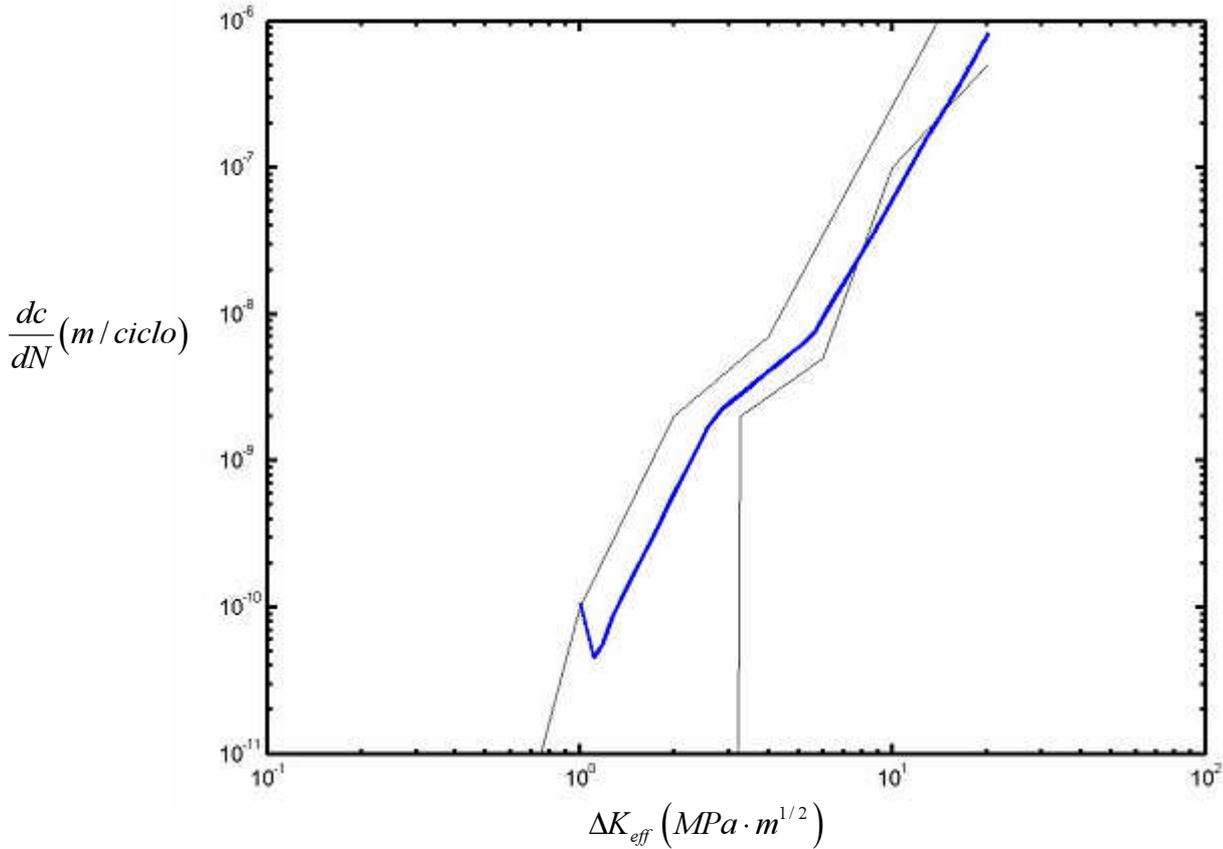


Figura 5.26: Velocidad de crecimiento en función de ΔK_{eff} .

Los resultados para esta aleación muestran la gran diferencia existente entre el umbral de crecimiento para grietas grandes, cercano a $3MPa\sqrt{m}$, y el comportamiento de pequeñas grietas, que llegan a crecer con valores del rango efectivo del factor de intensidad de tensiones próximos a $0.75MPa\sqrt{m}$. El programa es capaz de simular el comportamiento de grietas pequeñas, creciendo con valores muy por debajo del umbral para grietas grandes y cuando ΔK comienza a tomar mayores valores aproxima los resultados a los de grietas grandes. Los resultados obtenidos con el programa concuerdan con los datos experimentales obtenidos por Newman, Jr. (1999) como puede verse en la *figura 5.27*.

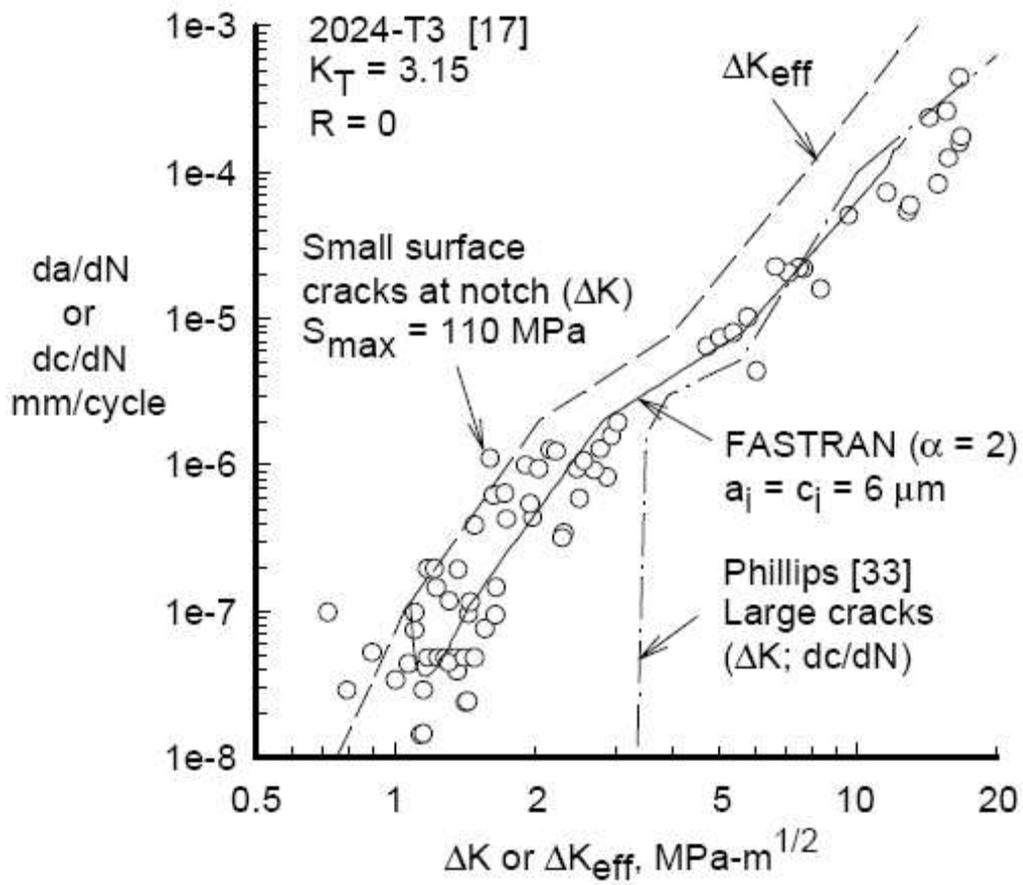


Figura 5.27: Resultados obtenidos por Newman, J. C., Jr. (1999).

En la figura 5.28 se muestra el resultado de superponer adecuadamente ambas gráficas.

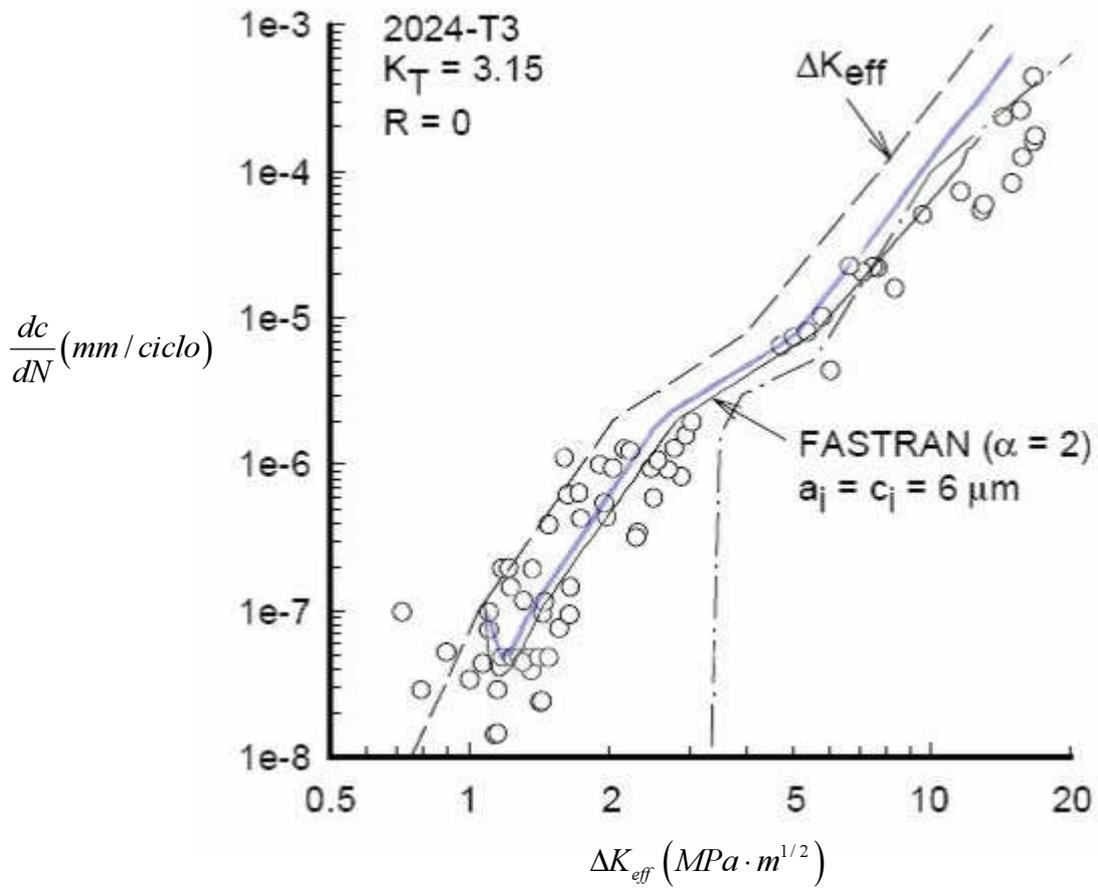


Figura 5.28: Superposición de ambas simulaciones.