



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

TESIS DOCTORAL

***VARIABILIDAD EN EL CRECIMIENTO
DE GRIETAS POR FATIGA BAJO
CARGAS ALEATORIAS***

M^a BELÉN MORENO MORALES

Málaga, Mayo 2002



TESIS DOCTORAL

***VARIABILIDAD EN EL CRECIMIENTO
DE GRIETAS POR FATIGA BAJO
CARGAS ALEATORIAS***

por

MARIA BELÉN MORENO MORALES

Ingeniera Industrial por la E.T.S.I.I. de Sevilla

presentada en la

***ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS INDUSTRIALES***

de la

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

para la obtención del

Grado de Doctor Ingeniero Industrial

Málaga, mayo de 2002

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Area de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica

TESIS DOCTORAL

**VARIABILIDAD EN EL CRECIMIENTO
DE GRIETAS POR FATIGA BAJO
CARGAS ALEATORIAS**

Autora:

MARIA BELÉN MORENO MORALES

Ingeniera Industrial por la E.T.S.I.I. de Sevilla

Directores:

D. JOSÉ ZAPATERO AREZANA

D. JAIME DOMÍNGUEZ ABASCAL

*Tesis doctoral presentada en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros
Industriales de la UNIVERSIDAD DE MÁLAGA para la obtención del
Grado de Doctor Ingeniero Industrial*

D. José Zapatero Arenzana, Catedrático del Área de Conocimiento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Málaga y D. Jaime Domínguez Abascal, Catedrático del Área de Conocimiento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Sevilla, en calidad de Directores, AUTORIZAN la presentación a trámite de la Tesis Doctoral de la Ingeniera Industrial D^a M^a Belén Moreno Morales, titulada VARIABILIDAD EN EL CRECIMIENTO DE GRIETAS POR FATIGA BAJO CARGAS ALEATORIAS.

Málaga, 3 de Mayo de 2002



Fdo: José Zapatero Arenzana
Director de Tesis



Fdo: Jaime Domínguez Abascal
Director de Tesis



Fdo: M^a Belén Moreno Morales
Doctorando

A Eva, mi hija

AGRADECIMIENTOS

Deseo manifestar mi más sincero agradecimiento a cuantas personas, de una u otra forma, han contribuido a llevar a buen fin este trabajo, en particular al profesor D. José Zapatero por su inestimable ayuda, dedicación y apoyo prestados durante la realización de esta Tesis.

También quiero agradecer al profesor D. Jaime Domínguez sus valiosos consejos y sugerencias, así como la confianza y apoyo que siempre me ha brindado.

A la Dirección General de Investigación Científica y Técnica agradezco la financiación aportada (Proyectos PB94-1189 y PB97-1065) sin la cual habría sido inviable la realización de este trabajo.

A todos mis amigos y compañeros agradezco el darme ánimos y continuo aliento.

Por último agradecer a mis padres y a mi esposo el indudable esfuerzo que han realizado para que todo esto fuera posible.

ÍNDICE

<i>Introducción y objetivos</i>	1
<i>Capítulo 1: El fallo por fatiga en materiales metálicos</i>	7
1.1. <i>Revision histórica.</i>	8
1.2. <i>Métodos clásicos y filosofía actual del diseño.</i>	12
1.3. <i>Conceptos básicos de MFEL.</i>	15
1.4. <i>Caracterización del crecimiento de grieta.</i>	24
1.5. <i>Cierre de grieta.</i>	30
<i>Referencias bibliográficas.</i>	36
<i>Capítulo 2: Fatiga con cargas aleatorias</i>	41
2.1. <i>Historias reales de cargas. Obtención de la historia representativa de cargas</i>	42
2.1.1. <i>Obtención de los diversos estados de carga que pueden producirse, su duración y la frecuencia relativa con que se presenta cada uno</i>	43
2.1.2. <i>Obtención del espectro. Métodos de contar ciclos</i>	44
2.1.3. <i>Manipulación del espectro.</i>	50
2.1.4. <i>Reconstrucción de la historia de carga</i>	51
2.2. <i>Descripción de los procesos aleatorios.</i>	52
2.3. <i>Efecto de secuencia.</i>	56

2.4. Mecanismos asociados con el comportamiento transitorio	59
2.4.1. Cierre de grieta inducido por plasticidad	59
2.4.2. Bifurcación y deflexión de la grieta	60
2.4.3. Cierre de grieta inducido por óxido.....	61
2.4.4. Cierre de grieta inducido por rugosidad.....	62
2.5. Modelos analíticos que consideran el efecto secuencia	64
2.5.1. Modelos basados en la plastificación del frente de grieta.....	64
2.5.2. Modelos basados en el cierre de grieta.....	69
2.6. Métodos de predicción del crecimiento de grietas bajo cargas de amplitud variable.....	76
2.6.1. Análisis mediante métodos sin consideración del efecto de secuencia.....	80
2.6.2. Análisis mediante métodos basados en el modelo de Willemborg	81
2.6.3. Análisis basados en el concepto de cierre de grieta	82
2.6.4. Métodos de predicción basados en la definición estadística de las cargas.....	86
Referencias bibliográficas.....	91
Capítulo 3: Metodología experimental	103
3.1. Material y probetas de ensayo	105
3.1.1. Material empleado.....	105
3.1.2. Geometría de las probetas	106
3.2. Generación de los registros de carga.	108
3.3. Descripción de los equipos	118
3.3.1. Máquina de ensayos	118
3.3.2. Sistema de medida de la longitud de grieta	123
3.3.3. Sistema de adquisición de datos	132

<i>Referencias bibliográficas.....</i>	<i>227</i>
Capítulo 6: Análisis de resultados	231
<i>6.1. Variabilidad debida al propio material</i>	<i>233</i>
<i>6.2. Variabilidad debida al registro de carga</i>	<i>237</i>
<i>6.3. Influencia del ancho de banda del proceso.....</i>	<i>243</i>
<i>6.4. Influencia de la longitud del registro y los valores extremos de carga de cada registro.....</i>	<i>250</i>
<i>6.5. Distribución estadística de la vida</i>	<i>271</i>
<i>6.5.1. Ajuste de los parámetros de las distribuciones y contraste de bondad del ajuste.</i>	<i>277</i>
<i>6.5.2. Distribuciones consideradas.....</i>	<i>278</i>
<i>6.5.3. Ajuste de las distribuciones.....</i>	<i>281</i>
<i>6.6. Conclusiones</i>	<i>287</i>
<i>Referencias bibliográficas.....</i>	<i>292</i>
 Capítulo 7: Conclusiones generales y desarrollo futuro	 295
 <i>Apéndice A: Parámetros estadísticos de los registros de carga</i>	
 <i>Apéndice B: Resultados de las simulaciones</i>	

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La mayoría de los sistemas mecánicos están sometidos durante su funcionamiento a cargas variables con el tiempo. La aplicación continuada de estas cargas puede llevar a la aparición de pequeñas grietas en el material, generalmente en la superficie, que progresan a través de él, reduciendo la capacidad portante del componente, pudiendo desembocar en su fractura. Dicho fenómeno se conoce como fallo por fatiga y es el responsable de más del 50% de los fallos en componentes mecánicos. Por tanto, una de las consideraciones importantes en el diseño de tales componentes es la vida esperada a fatiga.

El fenómeno de fatiga es conocido desde el siglo pasado y por su importancia se le ha dedicado una gran atención y esfuerzo investigador. Dicho esfuerzo ha ido encaminado tanto a conocer los mecanismos que rigen el propio fenómeno como al desarrollo de métodos de análisis para ayudar al ingeniero en el problema de diseño. La gran dificultad que presenta la predicción de la duración del proceso de crecimiento de una grieta por fatiga, debido a los numerosos parámetros que influyen en el proceso y dado que algunos de los cuales no son conocidos de forma precisa, hacen que el problema esté aún sin resolver.

Las propiedades del material y la carga son las principales incertidumbres que afectan al proceso de crecimiento de grietas en fatiga. La naturaleza aleatoria de las propiedades del material hace que la vida de crecimiento de grieta de distintos elementos de un mismo material y sometidos a cargas idénticas, pueda dar valores significativamente diferentes.

En cuanto a las cargas que van a producirse durante la vida de los componentes o estructuras reales, rara vez podrán ser consideradas de amplitud constante, muy al contrario serán normalmente de amplitud variable, en muchas ocasiones de carácter aleatorio o semialeatorio. Este hecho hace necesaria la obtención de un registro de cargas representativo para caracterizar la evolución de las cargas. Este primer paso ya representa en sí un problema complejo, y aún resuelto, dicho registro seleccionado, aunque representativo, no será más que una muestra de todos los posibles de idénticas características estadísticas. Empleando otra historia de carga se obtendrá una vida distinta a la producida con el primer registro.

Por otra parte, los registros de carga empleados tienen normalmente una longitud finita, de forma que para el análisis de la vida a fatiga de un elemento cualquiera, ya sea mediante simulación o ensayo, se aplica repetidamente hasta que se produce el fallo. Este hecho introduce un efecto de secuencia artificial que puede producir que la vida estimada dependa de la longitud del registro empleado. Así pues, la variabilidad de la vida de crecimiento de grietas por fatiga bajo cargas de amplitud variable dependerá entre otros factores de las características del material, de las características estadísticas de la carga y de la longitud del registro empleado. Es por tanto de gran importancia determinar, acotar y cuantificar la magnitud de estos efectos. Dicho estudio puede abordarse mediante experimentación o haciendo uso de modelos de simulación.

Las determinaciones experimentales son caras y conllevan un gran consumo de tiempo, de ahí la importancia del desarrollo de métodos de análisis fiables. Sin embargo, los análisis de crecimiento se hacen

normalmente a partir de datos obtenidos en ensayos con carga de amplitud constante y la extrapolación del conocimiento y de los datos experimentales obtenidos en amplitud constante a los casos reales de carga no es un problema sencillo. Unido al desconocimiento real de la secuencia de aplicación de las cargas, las cuales necesitan ser definidas estadísticamente, se produce el denominado efecto de secuencia o de interacción de cargas debido a la irregularidad de las mismas. El incremento de longitud de grieta en cada incremento de carga esta condicionado por la historia previa además de por la longitud de la grieta y los valores máximo y mínimo de tensión en cada ciclo.

Los análisis de vida de crecimiento mediante simulación ciclo a ciclo, permiten estudiar el comportamiento de una grieta bajo cargas de amplitud variable manteniendo el efecto de secuencia, y analizar la variabilidad en la vida que se produce al utilizar distintas historias de carga representativas de un mismo proceso. La mayoría de estos modelos de simulación han sido contrastados mediante ensayos con cargas de amplitud constante, y en algunos casos con cargas de amplitud variable.

El objetivo de este trabajo es aportar nuevos datos experimentales sobre el crecimiento de grietas bajo cargas de amplitud variable, contribuyendo a determinar la influencia que sobre la variabilidad de la vida tienen la aleatoriedad de las propiedades del propio material, el tipo de proceso aleatorio de cargas aplicadas, el uso de diferentes historias de carga representativas del mismo proceso y la longitud de dichos registros de carga. Estos resultados permitirán conocer la bondad de los métodos de simulación empleados. Además en este trabajo se analiza el comportamiento del modelo de simulación basado en la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal y la aproximación de Dugdale propuesto por Newman [1] e implementado en el programa de ordenador FASTRAN II [2]. La comparación entre los resultados obtenidos de los ensayos y las estimaciones numéricas realizadas, permiten analizar la capacidad del modelo propuesto por Newman para predecir la vida a fatiga.

Esta tesis está estructurada en 6 capítulos. En el capítulo 1 se presenta una breve revisión histórica sobre la evolución del conocimiento de la fatiga en materiales metálicos. En el capítulo 2 el interés se centra en los problemas que se plantean en la fatiga bajo cargas aleatorias y en el estudio de los modelos de análisis del crecimiento de grietas ante cargas aleatorias.

La metodología experimental: Tipo de material y geometría de las probetas empleadas, generación de los registros de cargas, descripción de los equipos usados, sistema de adquisición y procesado de datos, se tratarán en el capítulo 3. Se detallarán las bases físicas del funcionamiento del sistema de medida de la longitud de grieta, control de las cargas y precisión de las medidas.

En el capítulo 4 se exponen todos los resultados de los ensayos y la información referente a series de ensayos, número de ensayos por serie, tipos de registros empleados, niveles de carga y longitud de los registros empleados. Se incluyen aquí los resultados de vida de cada ensayo y las curvas de crecimiento por serie.

La simulación numérica y la comparación con los resultados experimentales se trata en el capítulo 5 donde se describen las características del modelo de análisis y el método seguido para el ajuste de los parámetros de la ecuación de crecimiento. Se recogen en este capítulo las conclusiones acerca del uso del método de simulación empleado en la predicción de las vidas de crecimiento de grietas bajo cargas aleatorias obtenidas en los ensayos.

El capítulo 6 está dedicado al análisis de los resultados experimentales. Se estudiará el efecto que sobre el crecimiento de grietas con cargas aleatorias tienen la variabilidad de las propiedades del material, el tipo de proceso y nivel de las cargas aplicadas, así como el uso de distintos registros y la influencia de la longitud de los mismos.

Por último el capítulo 7 recoge a modo de resumen las conclusiones aportadas por el presente estudio, así como las posibles vías de mejora y de desarrollo para trabajos futuros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]** Newman J. C., *A Crack Closure Model for Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading. Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading, (Edited by J. B. Chang and C. M. Hudson) ASTM STP 748, pp. 53–84, 1981.*
- [2]** Newman J. C., *FASTRAN II – A Fatigue Crack Growth Structural Analysis Program, NASA Tech. Memorandum 104159, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, 1992.*

Capítulo 1

EL FALLO POR FATIGA EN MATERIALES METÁLICOS

El término fatiga define en ingeniería el fenómeno de rotura en un material debido a la acción repetida de tensiones o deformaciones por debajo de su límite de rotura. El proceso tiene lugar con la formación y crecimiento de grietas que progresan a través del material hasta producir el fallo de un componente, generalmente de forma catastrófica. El fenómeno puede producirse de diferentes formas, debido a fluctuaciones de la carga a la que está sometido el componente (fatiga mecánica), sometido además a altas temperaturas (creep-fatiga) o bajo la acción combinada de cargas cíclicas y temperaturas también fluctuantes (fatiga termomecánica), en ambientes químicamente agresivos (corrosion-fatiga) o acciones fluctuantes asociadas a contactos con rozamiento entre materiales (fretting fatigue). La mayor parte de los fallos en componentes de máquinas o estructurales pueden atribuirse a alguno de estos procesos y tienen en común el producirse bajo la acción de cargas cíclicas cuyos valores extremos son considerablemente menores que las cargas calculadas como seguras en base a análisis estáticos.

A lo largo del presente capítulo se hará una breve revisión del estado del conocimiento sobre el fenómeno de la fatiga [1-2]. Hasta nuestros días numerosos científicos e ingenieros han aportando tantas contribuciones para comprender el fenómeno que no resulta factible detallar el desarrollo de las mismas en unas páginas. No obstante resulta interesante conocer el desarrollo histórico de los avances más importantes.

Los métodos y aproximaciones tradicionalmente empleados para la estimación de la vida a fatiga con cargas de amplitud constante también serán tratadas en este capítulo, así como algunos de los conceptos mas importantes de la mecánica de la fractura y su aplicación a la caracterización del crecimiento de grietas por fatiga [3-5].

1.1. REVISION HISTORICA.

El fenómeno de fatiga fue descubierto a principios del siglo XIX con el avance de la maquinaria y los vehículos de transporte. Los primeros trabajos relacionados con la fatiga se atribuyen al ingeniero de minas alemán W. Albert [6], quien en 1829 realizó ensayos sometiendo a cargas y descargas sucesivas eslabones de cadenas de elevadores. No obstante, el término fatiga para denominar el fallo de materiales debido a cargas repetidas fue introducido más tarde (Poncelet, 1839).

El interés en el estudio del fenómeno comenzó a crecer con el aumento de uso de estructuras férreas, particularmente puentes de ferrocarril. El primer estudio en fatiga de metales se inició en 1842 a raíz de un accidente de ferrocarril ocurrido en Versalles (Francia) en el que murieron entre 1500 y 1800 personas. Ya en 1843, W.J.M. Rankine [7], ingeniero británico que más tarde sería famoso por sus contribuciones a la ingeniería mecánica, reconoció las características distintivas de la fractura por fatiga e hizo notar el peligro de los concentradores de tensión en los componentes de máquinas.

La British Institution of Mechanical Engineers comenzó a estudiar la llamada teoría de cristalización, que atribuía la rotura por fatiga a que se producía una cristalización de los metales debido a las vibraciones de los elementos en servicio. Esta primera explicación surgió debido al aspecto cristalino de la superficie de fractura.

Los primeros estudios sistemáticos se debieron a August Wöhler [8] ingeniero de ferrocarriles alemán, quien realizó entre 1852 y 1870 gran cantidad de ensayos de flexión rotativa sobre ejes de ferrocarril. Observó que la resistencia de los ejes de acero sometidos a cargas cíclicas era apreciablemente menor que su resistencia estática. Su trabajo permitió la caracterización del comportamiento a fatiga en base a las curvas de amplitud de tensiones frente a número de ciclos de carga hasta la rotura. También estableció el concepto de límite de fatiga al comprobar que las aleaciones de hierro parecían tener un límite de tensión por debajo del cual no se producía la rotura por muy grande que fuera el número de ciclos.

En 1874, el ingeniero alemán H. Gerber [9] comenzó a desarrollar métodos para el diseño a fatiga, su contribución incluyó el desarrollo de métodos para el cálculo de la vida a fatiga para diferentes niveles medios de la tensión cíclica. Problemas similares fueron abordados por Goodman [10] (1899) y Soderberg [11-12].

La idea de que el límite elástico de los metales con cargas cíclicas podía ser diferente a la observada en la deformación monotónica fue popularizada por Bauschinger(1886), quien confirmó muchos de los resultados anteriores de Wöhler.

A principios de siglo Ewing y Humfrey (1903) utilizaron el microscopio óptico y observaron la formación de líneas y bandas de deslizamiento que desembocaban en la formación de microgrietas en el material. Se descartó entonces la vieja teoría de la cristalización del material.

Durante la primera mitad del siglo XX se obtuvieron gran cantidad de datos experimentales relacionando la resistencia a fatiga con factores tales como la geometría y tamaño de las piezas, condiciones ambientales, acabado superficial, estructura metalográfica, etc. Las investigaciones en este periodo permitieron el desarrollo de los modelos de daño acumulado para predecir el fallo por fatiga (Palmgren, 1924 [13]; Miner, 1945 [14]).

La idea de que las deformaciones plásticas son las responsables del daño en el material fue establecida por Coffin y Manson [15-19], quienes en la década de los 60 propusieron una relación empírica entre el número de inversiones de carga hasta rotura y la amplitud de la deformación plástica. La denominada relación Coffin-Manson es el método de caracterización de fatiga basado en las deformaciones más ampliamente utilizado.

A pesar de que desde principios de siglo se conocía que el fenómeno se debía a la formación y crecimiento lento de grietas, no estaba suficientemente desarrollada la herramienta matemática necesaria para cuantificar modelos de fallo por fatiga. El análisis de tensiones de Inglis (1913, [20]) y el concepto energético de Griffith (1921,[21]) aportaron el tratamiento cuantitativo de la fractura frágil. No obstante, estas ideas no pudieron ser aplicadas directamente para caracterizar el fallo por fatiga en los materiales metálicos.

Un avance en esta dirección vino con los estudios de Irwin (1957, [22]) quien mostró que la amplitud de la singularidad en tensiones delante de una grieta podía ser expresada en términos de una cantidad conocida como factor de intensidad de tensiones, K . Con el desarrollo de la mecánica de la fractura elástica lineal se intentó caracterizar el crecimiento de las grietas de fatiga también en términos del factor de intensidad de tensiones. Paris y Erdogan [23, 24] fueron los primeros en sugerir que el incremento de longitud de grieta por ciclo, da/dN , podía relacionarse con el rango del factor de intensidad de tensiones, ΔK , bajo cargas de amplitud constante. La

mayor aportación de la mecánica de la fractura elástica lineal es que el factor de intensidad de tensiones, determinado por las tensiones remotas aplicadas y las dimensiones geométricas del componente agrietado, basta para caracterizar la propagación de la grieta. Este método no requiere un detallado conocimiento de los mecanismos de fractura por fatiga.

Con la aplicación de los conceptos de mecánica de fractura al fallo por fatiga, tomaron un interés creciente el estudio de los mecanismos de crecimiento subcrítico de grieta. Modelos conceptuales y cuantitativos fueron desarrollados para obtener la resistencia de los materiales al crecimiento de grietas. Junto con estos estudios, creció el interés por comprender el proceso por el que el factor de intensidad de tensiones podía verse alterado con el avance de la grieta. Una importante contribución en esta dirección vino de los resultados experimentales de Elber (1970, [25, 26]) que mostraron que la grieta puede permanecer cerrada incluso cuando está sometida a tensiones cíclicas de tracción debido a la plastificación producida en el borde de la grieta. Este resultado también implica que la velocidad de crecimiento de grieta debería venir determinada no por el valor nominal del rango del factor de intensidad de tensiones sino por un valor efectivo que tuviese en cuenta el cierre. Investigaciones adicionales sugieren que el cierre de grieta puede ser inducido por otros factores mecánicos, microestructurales y ambientales.

En las últimas décadas, con el desarrollo y creación de máquinas más sofisticadas, comienza la realización de ensayos con cargas complejas (amplitud variable). Durante el crecimiento de una grieta con cargas de amplitud variable se produce lo que se denomina efecto de secuencia o de interacción debido a la irregularidad de la carga. Dicho efecto fue puesto de manifiesto en la década de los 60. Diversos trabajos experimentales [27-28] demostraron que la aplicación de una sobrecarga origina una velocidad de crecimiento en los ciclos posteriores a ella mucho menor que la producida si no existe sobrecarga. Numerosos modelos analíticos que tienen en cuenta dicho efecto se encuentran la bibliografía actualmente, destacando, sobre

todo por ser los más utilizados y haber servido de base para otros muchos, los propuestos por Wheeler y Willemborg [29-30].

Hasta hoy día las investigaciones realizadas son muy numerosas, la disponibilidad de máquinas cada vez más complejas, de técnicas de medición y detección de grietas cada vez más pequeñas, la aplicación de la Mecánica de Fractura, tanto elástica lineal como elasto-plástica, así como un mejor conocimiento del gradiente de tensiones y deformaciones en el fondo de la entalla, entre otros, han permitido un gran desarrollo en el cálculo de la vida a fatiga de elementos mecánicos y un aumento de la fiabilidad de los mismos.

1.2. MÉTODOS CLASICOS Y FILOSOFÍA ACTUAL DEL DISEÑO.

Históricamente el desarrollo de los métodos de análisis de fatiga ha sido promovido por dos razones diferentes. Por un lado la necesidad de proporcionar al ingeniero un método práctico de diseño y por otro la búsqueda de un mejor conocimiento del propio fenómeno. De las observaciones físicas, en el proceso de daño que se produce en el material, pueden distinguirse tres etapas: (a) iniciación o nucleación de grieta, (b) crecimiento estable y (c) inestabilidad estructural o fallo catastrófico. La etapa de iniciación corresponde al crecimiento y coalescencia de microgrietas para formar grietas dominantes que eventualmente, tras el crecimiento, pueden conducir al fallo catastrófico del componente.

Es necesario hacer notar que uno de los mayores obstáculos para el desarrollo de los modelos de predicción de vida es definir la transición entre iniciación y propagación. Desde el punto de vista de los micromecanismos que originan el proceso tiende a adoptarse la nucleación de defectos de tamaño micrométrico, en bandas de deslizamiento o límites de grano, como la grieta del estado inicial de fallo por fatiga. Por otra parte, desde el punto de vista práctico en ingeniería tiende a relacionarse la nucleación, y el tamaño inicial de grieta usado para diseño, con el límite de resolución del

equipo de detección de las mismas (generalmente del orden de fracciones de milímetro).

La vida total a fatiga de un componente se define como la suma del número de ciclos necesarios para iniciar la grieta y el necesario para propagarla de forma estable hasta un tamaño final. En la figura 1.1 se representa la variación típica de la amplitud de tensiones cíclicas frente al número de ciclos hasta rotura obtenidos con cargas de amplitud constante para un material que presenta límite de fatiga. Para amplitudes de tensión bajas, el 90 % de la vida del componente se debe a la etapa de iniciación, mientras que para amplitudes altas la mayor parte de la vida es agotada en la propagación de la grieta.

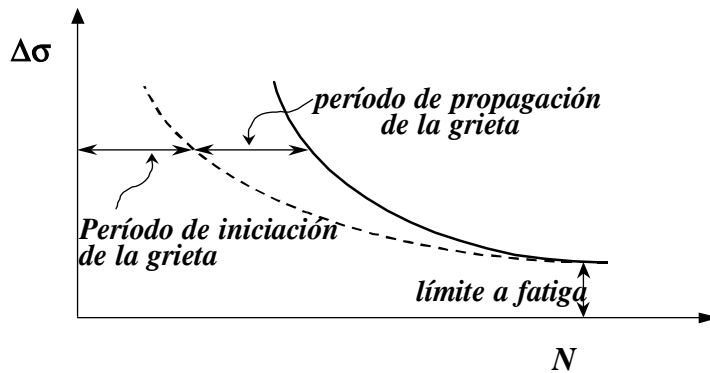


Figura 1.1: Variación de la amplitud de tensiones cíclicas frente al número de ciclos hasta rotura obtenidos con cargas de amplitud constante.

Los métodos clásicos de diseño a fatiga caracterizan la vida total en base al rango de tensiones o deformaciones (plásticas o totales) cíclicas. Los métodos basados en las curvas de Wöhler (curvas S-N) dan resultados aceptables para el cálculo a vida infinita o alto número de ciclos, situaciones donde los niveles de tensión son bajos y la deformación del material es

principalmente elástica. En este caso la mayor parte de la vida corresponde al periodo de iniciación de la grieta. Los ensayos para la obtención de las curvas se realizan con probetas pequeñas sin entallar donde la mayor parte de la vida se consume en la etapa de iniciación de una grieta dominante. Debido a esto, los resultados obtenidos pueden conducir a predicciones de vida mucho mayores que las obtenidas en el caso de una estructura real, donde la etapa de iniciación de la grieta es a menudo muy corta debido a la existencia previa de defectos. Los métodos basados en los rangos de deformaciones tienen aplicación fundamentalmente al cálculo a bajo número de ciclos. Es importante señalar que dichos métodos no distinguen entre las etapas de nucleación y crecimiento.

Los métodos más utilizados para estimar la vida a fatiga distinguiendo entre nucleación y crecimiento se basan en considerar las dos etapas con criterios distintos: la nucleación considerando las tensiones o deformaciones producidas en la zona de máxima sollicitación del componente y el crecimiento haciendo uso de la mecánica de fractura. De esta forma se considera que los procesos son controlados por distintos parámetros. Un cálculo realizado en estas condiciones, se aproxima más a los fenómenos físicos que ocurren durante el proceso de fatiga, ofreciendo en principio mayor posibilidad de obtener predicciones más seguras.

De entre los métodos más utilizados para calcular la vida en la etapa de nucleación es de destacar el método de las deformaciones locales. Este método se basa en la determinación de los rangos de tensión y deformación que se producen en el fondo de la entalla, calculados estos a partir de las tensiones nominales. Se supone que estas condiciones locales se pueden relacionar con las curvas ϵ - N obtenidas con pequeñas probetas sin entallar mediante ensayos con cargas cíclicas de amplitud constante. Es decir, se estima que la vida de nucleación de un componente con entalla, es la misma que la vida total de una probeta lisa, sometida ésta a la misma historia de tensiones y deformaciones que las existentes en el fondo del concentrador.

En el cálculo de la vida a fatiga durante la etapa de propagación de la grieta, como ya se ha mencionado, suele hacerse uso de los principios de la mecánica de fractura. Para que dichos principios sean aplicables se requiere un tamaño inicial de grieta conocido, de ahí que en componentes libres de defectos sólo sean aplicables para el cálculo de la etapa de propagación. Sin embargo, en componentes reales en los que existen imperfecciones o defectos previos (como la presencia de poros en las soldaduras, defectos de fundición, inclusiones, etc...) sí puede ser asumido un tamaño inicial de grieta.

Los métodos actuales de diseño que hacen uso de la mecánica de fractura se basan en una filosofía de tolerancia al daño. La premisa básica es que en todos los componentes ingenieriles se supone inherente la presencia de defectos, la vida útil a fatiga se define entonces como el número de ciclos necesarios para la propagación de una grieta dominante desde un tamaño inicial hasta una dimensión crítica. El diseño se basa pues, no en evitar la aparición de la grieta, sino en definir hasta cuando el defecto puede ser tolerado o por el contrario es necesario reemplazar el componente antes del fallo catastrófico.

1.3. CONCEPTOS BASICOS DE MFEL.

El primer paso en la aplicación de la teoría de la mecánica de la fractura para la caracterización del crecimiento de grietas es el estudio del campo de tensiones y deformaciones alrededor del vértice de la grieta.

Los principios de la mecánica de la fractura elástica lineal (MFEL) son usados para relacionar la magnitud de las tensiones y su distribución cerca de la grieta con las tensiones remotas aplicadas al componente agrietado, el tamaño y forma de la grieta y las propiedades del material. El estudio se basa en la aplicación de la teoría de la elasticidad a cuerpos con grietas o

defectos. Las hipótesis usadas en elasticidad son también inherentes en la MFEL: pequeños desplazamientos y linealidad entre tensiones y deformaciones. Pero la hipótesis principal que introduce intrínsecamente una restricción al tipo de grieta aplicable es la de homogeneidad del material. En efecto, para poder considerar que el medio en el que se propaga una grieta es continuo y homogéneo, el tamaño de dicha grieta debe ser varios órdenes de magnitud superior a la dimensión microestructural característica, lo que justifica la aplicación de la mecánica de la fractura sólo en el régimen de crecimiento de grietas.

Generalmente en el estudio del sólido con comportamiento elástico y lineal se distinguen tres modos básicos de desplazamientos en la grieta, que dependen de la dirección de aplicación de la carga con respecto al plano de ésta, denominados modo I, modo II y modo III y que se representan en la figura 1.2. Los casos de fracturas producidos por los modos cortantes (II y III) son relativamente poco frecuentes, siendo generalmente el caso I de tracción el modo por el que se producen la mayoría de las roturas, particularmente en fenómenos de fatiga. No obstante, algunas veces se presentan varios modos conjuntamente, generalmente el I y III.

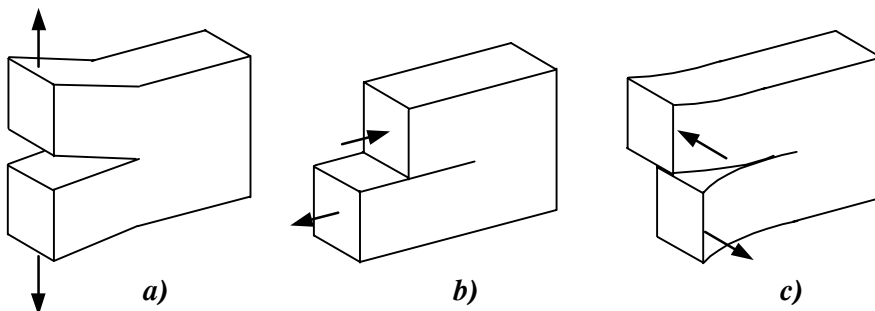


Figura 1.2: modos de apertura de grieta: a) modo I, b) modo II y c) modo III.

Para cualquiera de estos modos, el análisis elástico muestra que las tensiones locales en el entorno de la grieta responden de forma general a la expresión:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \dots \quad (1.1)$$

donde r y θ son las coordenadas cilíndricas en un punto con respecto al borde de la grieta (ver figura 1.3) y K_I es el factor de intensidad de tensiones en modo I.

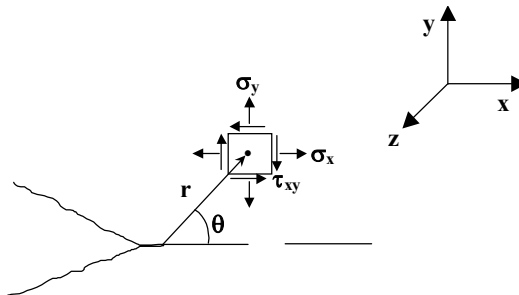


Figura 1.3: tensiones locales en el entorno de la grieta.

El factor de intensidad de tensiones, K_I , introducido en la ecuación 1.1, define la magnitud de las tensiones locales en el entorno del fondo de la grieta. Este factor depende del tipo de cargas, el tamaño y forma de la grieta y de las condiciones de contorno geométricas, que de forma general se suele expresar como:

$$K_I = f(g) \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1.2)$$

donde σ es la tensión remota aplicada al componente (que no debe confundirse con las tensiones locales σ_{ij} definidas en la ecuación 1.1), a es la longitud de la grieta y $f(g)$ es un factor de corrección que depende de la geometría de la probeta y de la grieta.

El factor de intensidad de tensiones ha sido obtenido para una amplia variedad de problemas y su valor está disponible en handbooks. La ecuación 1.3 corresponde a la expresión del factor de intensidad de tensiones para la probeta tipo CT que se muestra en la figura 1.4 [31].

$$K_I = \frac{P(2 + \alpha)}{B\sqrt{W}(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (1.3)$$

Donde $\alpha = \frac{a}{W}$, expresión válida para $\frac{a}{W} \geq 0.2$

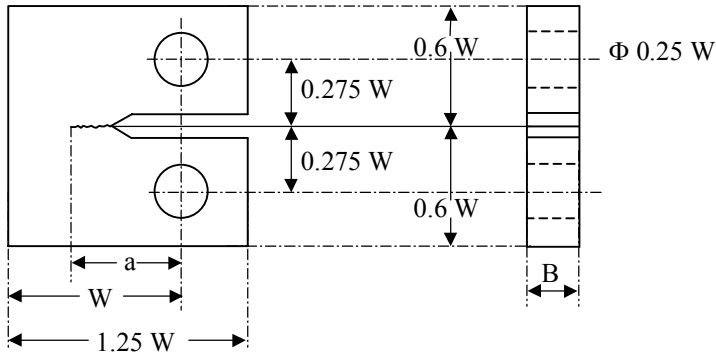


Figura 1.4: Geometría de la probeta CT.

La ecuación 1.1 muestra una singularidad para $r = 0$ que conduce a tensiones infinitas a distancia nula de la grieta. Dado que los materiales deforman plásticamente cuando el valor de tensión excede del límite elástico, se formará una zona plástica cerca del borde de grieta. Las hipótesis de la MFEL seguirán siendo válidas sólo si el tamaño de la zona plástica es pequeño comparado con las dimensiones de la grieta y el resto del componente agrietado.

Siempre que pueda aceptarse que el anterior campo asintótico de tensiones domina alrededor del vértice de la grieta, en una región grande comparada con la dimensión microestructural característica del material,

podrá considerarse que la distribución local de tensiones está unívocamente caracterizada por el factor de intensidad de tensiones K .

Cuando el tamaño de la zona plástica alrededor del vértice de la grieta es comparable con el tamaño de la propia grieta, es decir, cuando se viola la condición de plastificación a pequeña escala, el uso del factor de intensidad de tensiones no es apropiado para describir el campo local de tensiones. En este caso, la distribución de tensiones en el frente de la grieta se debe calcular haciendo uso de la teoría de la plasticidad, cuya aplicación al estudio de la fractura de materiales se conoce como Mecánica de la Fractura Elasto-Plástica (MFEP).

Una primera aproximación al tamaño de la zona plástica puede obtenerse, para una grieta solicitada en modo I si se analiza la tensión σ_y en la línea de la grieta ($\theta=0$), asumiendo que la zona plastificada estará determinada por $\sigma_y = \sigma_e$ (límite elástico, figura 1.5)

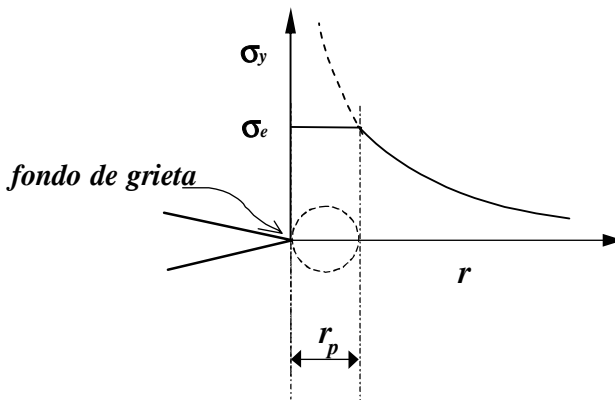


Figura 1.5: plastificación en el frente de grieta.

Considerando un material con comportamiento elásto-plástico perfecto y en condiciones de tensión plana, se tendrá:

$$\sigma_y(\theta = 0) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (1.4)$$

el radio plástico, r_p , vendrá dado por

$$\sigma_e = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_p}} \Rightarrow r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \quad (1.5)$$

Esta expresión ha sido obtenida considerando que la zona deformada plásticamente no influye en el resto del material. Sin embargo, esta fluencia produce una redistribución de las tensiones (figura 1.6), aumentando como consecuencia el radio plástico.

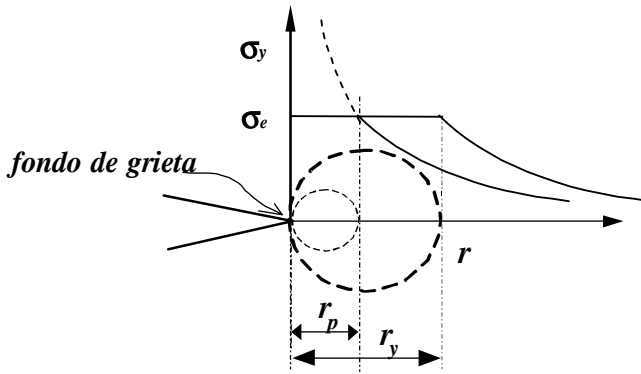


Figura 1.6: radio plástico considerando la redistribución de tensiones.

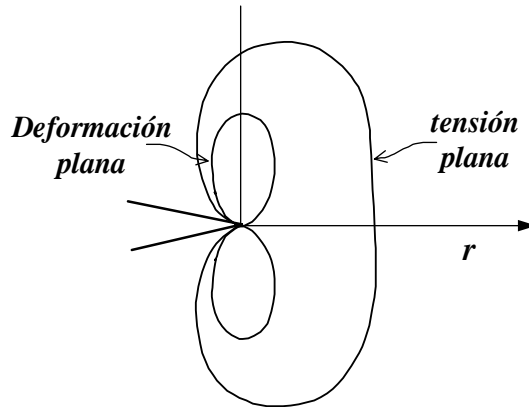
Teniendo en cuenta esta consideración, existen en la literatura diversas correcciones o estimaciones del tamaño de la zona plástica, entre las que cabe destacar la propuesta por Irwin [22]:

$$r_y = 2 r_p \quad r_y = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \quad (1.6)$$

Dugdale [32] propone una expresión muy aproximada dada por:

$$r_y = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \quad (1.7)$$

Para determinar la forma de la zona plástica es necesario conocer la distribución de tensiones en función del ángulo θ . Haciendo uso del criterio de plastificación de Von Mises se obtiene la forma representada en la figura



1.7.

Figura 1.7: Forma de la zona plástica.

Las anteriores expresiones para el tamaño de la zona plástica han sido obtenidas para un estado de tensión plana. El campo de tensiones en modo I descrito en términos de las tensiones principales cumple las siguientes relaciones para σ_1 , σ_2 , y σ_3 :

$$\sigma_2 = \sigma_1 \left(\frac{1 - \sin(\theta/2)}{1 + \sin(\theta/2)} \right) \quad (1.8)$$

$$\sigma_3 = 0 \quad \text{para tensión plana}$$

$$\sigma_3 = \nu(\sigma_1 + \sigma_2) = \frac{2\nu\sigma_1}{1 + \sin(\theta/2)} \quad \text{para deformación plana}$$

La aplicación del criterio de Von Mises, para $\theta = 0$ en condiciones de deformación plana lleva a que la plastificación se produce cuando:

$$(\sigma_1 - 2\nu\sigma_1)^2 + (2\nu\sigma_1 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_e \Rightarrow \sigma_1 = \frac{1}{1-2\nu} \sigma_e \quad (1.9)$$

Asumiendo un valor de $\nu = 1/3$ significa que la plastificación se produce para un valor de $\sigma_1 = 3 \sigma_e$, se dice entonces que el factor de constricción es 3. En primera aproximación se obtiene entonces que el tamaño de la zona

plástica en deformación plana es una novena parte el correspondiente a tensión plana, esto es:

$$r_y = 2 r_p \quad r_y = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{\alpha \sigma_e} \right)^2 \quad (1.10)$$

con $\alpha=1$ para tensión plana y $\alpha=3$ en deformación plana.

Para probetas de espesor finito, puesto que en las superficies libres no existen tensiones en la dirección del espesor, el dicho campo de tensiones en la superficie se corresponde con condiciones de tensión plana. A lo largo del espesor hay un aumento del grado de triaxialidad que aproxima el estado de tensiones a las condiciones de deformación plana. Esta variación del tamaño y forma de la zona plástica con el espesor de la probeta queda reflejado en la figura 1.8. El valor obtenido según la ecuación 1.10 con $\alpha=3$ puede subestimar el tamaño de la zona plástica en una probeta de espesor finito si se tiene en cuenta que en la superficie debido al estado de tensión plana el tamaño de zona plástica será nueve veces mayor. Por esta razón Irwin propone un valor intermedio del coeficiente de constricción de $\alpha=1.73$.

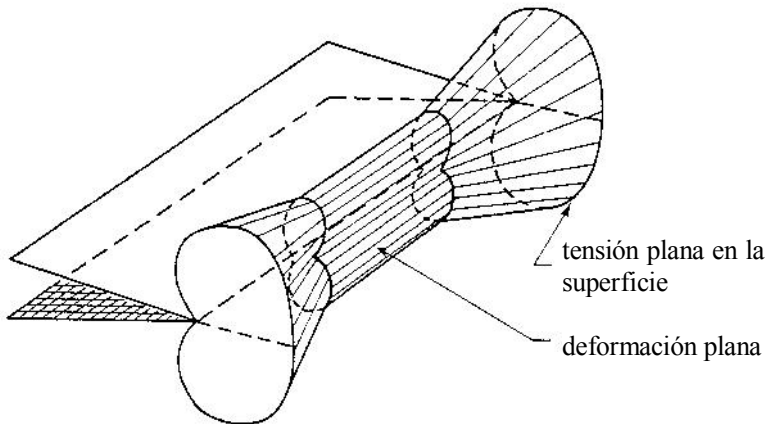


Figura 1.8: Variación del tamaño y forma de la zona plástica con el espesor.

La zona plástica vista hasta ahora se refiere al caso de un cuerpo sometido a una carga de tracción. Sin embargo, ya que el proceso de fatiga tiene lugar bajo la aplicación de cargas cíclicas, es necesario considerar el comportamiento del material en la descarga. Al producirse ésta se origina un flujo plástico en sentido contrario creando como consecuencia unas tensiones residuales de compresión, y por tanto, habrá una nueva zona de material deformada plásticamente. A esta zona se la conoce como zona plástica cíclica y su tamaño es aproximadamente una cuarta parte del correspondiente a la zona plástica monotónica.

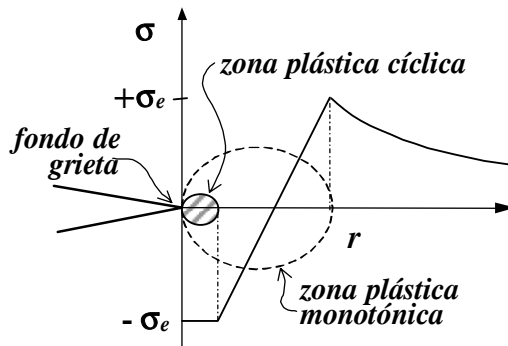


Figura 1.9: Tamaño de la zona plástica cíclica.

En general, el tamaño de la zona plástica establece la condición bajo la cual dominan campos tensionales lineales, es decir, la solución está bien definida en términos del factor de intensidad de tensiones.

1.4. CARACTERIZACIÓN DEL CRECIMIENTO DE GRIETA.

La velocidad de crecimiento de grietas sometidas a cargas cíclicas de amplitud constante se expresa en incrementos de longitud de grieta por ciclo, da/dN . Los valores de da/dN , para diferentes condiciones de carga, se determinan experimentalmente a partir de los cambios de longitud de grieta tras un cierto número de ciclos. Cuando el rango de tensiones aplicadas es constante, generalmente la velocidad de crecimiento de la grieta aumenta con el número de ciclos.

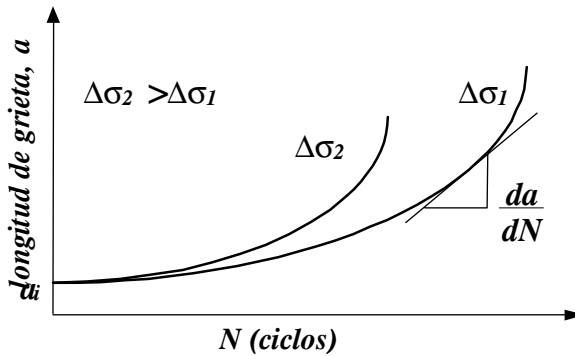


Figura 1.10: Evolución de la longitud de grieta frente al número de ciclos

Uno de los objetivos del diseño a fatiga es el desarrollo de métodos fiables de caracterización de la velocidad de crecimiento de grieta, en base a un apropiado parámetro de carga capaz de cuantificar la resistencia intrínseca del material al crecimiento del defecto para diferentes condiciones de tensión aplicada y geometrías de probeta y grieta. Hasta la década de los 60 muchos estudios experimentales condujeron a leyes de caracterización de la velocidad de crecimiento basadas en la longitud de grieta o en el rango de tensiones aplicadas $\Delta\sigma$:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot a \quad \text{o} \quad \frac{da}{dN} = C(\Delta\sigma)^m a^n \quad (1.11)$$

donde C , m y n son constantes determinadas experimentalmente.

El avance de la mecánica de fractura permitió la aparición de métodos más exactos. Cuando las tensiones aplicadas al componente son pequeñas de manera que la deformación plástica por delante del borde de grieta es una perturbación menor al restante campo elástico, las soluciones de la mecánica de la fractura elástica lineal proporcionan una descripción adecuada para la fractura por fatiga. Paris [24] sugirió que para variaciones cíclicas del campo de tensiones aplicado, la caracterización de la velocidad de crecimiento de grieta podría basarse en el rango del factor de intensidad de tensiones calculado en base a la MFEL.

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (1.12)$$

Donde K_{max} y K_{min} son los valores máximo y mínimo respectivamente del factor de intensidad de tensiones durante un ciclo de tensión, que dependen de la geometría de la probeta y la longitud de grieta. En el caso más simple de una probeta con grieta central:

$$\begin{aligned} K_{max} &= Y\sigma_{max}\sqrt{\pi a} & K_{min} &= Y\sigma_{min}\sqrt{\pi a} \\ \Delta K &= Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a} & \Delta\sigma &= \sigma_{max} - \sigma_{min} \end{aligned} \quad (1.13)$$

donde Y es un factor geométrico que depende de la relación entre la longitud de grieta, a , y el ancho de la probeta, W , y σ_{max} y σ_{min} son los valores máximo y mínimo respectivamente del ciclo de tensión. Paris mostró que la velocidad de crecimiento podía relacionarse con ΔK a través de la siguiente ley:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1.14)$$

donde C y m son constantes, cuyo valor está influido por muchas variables

como la microestructura del material, la frecuencia de carga, condiciones ambientales y la relación de carga R , definida como:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}} \quad (1.15)$$

La relación 1.14, también conocida como ley de Paris, representa una variación lineal entre el $\log da/dN$ y $\log \Delta K$, que se corresponde con el crecimiento estable de la grieta solamente en una parte de la curva total de resistencia al crecimiento del material, para el rango intermedio de valores de ΔK . Para valores extremos de ΔK , tanto por encima de ese rango intermedio como por debajo, la velocidad de crecimiento aumenta rápidamente con el valor de ΔK . Para la mayoría de los materiales, la variación de da/dN frente a ΔK exhibe un comportamiento como el que se representa en la figura 1.11 en escala logarítmica. En la propia figura pueden identificarse tres zonas o regímenes distintos de crecimiento: la región I o régimen próximo al umbral, la región II o intermedia y la región III de rápida propagación de la grieta.

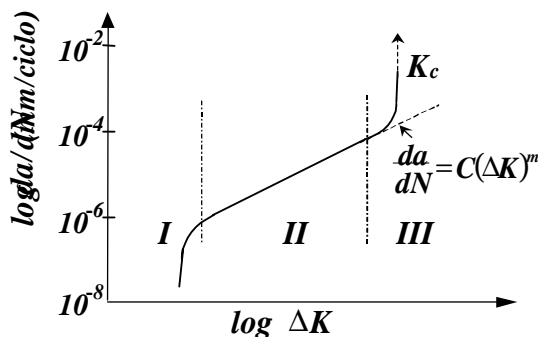


Figura 1.11: Ritmo de crecimiento de grieta frente a ΔK .

Región I.

La propagación de grieta en régimen I está relacionada principalmente con procesos de fractura no continuos, donde el incremento de longitud de grieta en un ciclo es inferior a 10^{-6} mm/ciclo. La velocidad de crecimiento aumenta muy rápidamente con ΔK desde valores muy bajos, asociados con la existencia de un rango de factor de intensidad de tensiones umbral ΔK_{th} por debajo del cual la grieta no crece o la velocidad de crecimiento es indetectable.

Región II.

En la región II la variación es esencialmente lineal y corresponde a la zona que puede ser ajustada bastante bien por la ley de Paris. Dicha expresión, sin embargo, no tiene en cuenta el efecto de la tensión media, ni el comportamiento asintótico de las curvas para los valores extremos de ΔK . En consecuencia dicha ley se ajusta bastante bien sólo en la zona de ΔK medios, mostrando ciertas desviaciones en los extremos de la curva.

Región III.

En la zona III correspondiente a altos valores de ΔK la velocidad de crecimiento aumenta rápidamente causando la fractura total del componente. Esta se produce cuando el valor máximo del factor de intensidad de tensiones (K_{max}) alcanza un cierto valor crítico K_c . En deformación plana dicho valor crítico K_{IC} , denominado tenacidad a fractura, es una característica del material y representa el máximo factor de intensidad de tensiones que una grieta puede soportar bajo carga estática antes de propagarse inestablemente.

Existen en la literatura numerosos modelos empíricos y semi-empíricos más complejos que la ley de Paris tratando de incorporar el comportamiento de la grieta en las regiones I y III. Así mismo, probado que la tensión media ejerce influencia sobre el crecimiento de grieta, dichas expresiones tratan de tener en cuenta este factor en función de la relación de cargas, R .

La mayoría de los ensayos realizados para el ajuste de las curvas $da/dN-\Delta K$ se suelen hacer con cargas de amplitud constante y $R=0$. No obstante, cuando $R \neq 0$ las curvas de velocidad de crecimiento difieren de las anteriores. A medida que R crece para un ΔK dado, es decir, con un aumento de la tensión media del ciclo, la velocidad de crecimiento aumenta, y las curvas sufren un desplazamiento, tanto mayor, cuanto mayor es ΔK , tendiendo a converger en la zona próxima a ΔK_{th} (figura 1.12). El umbral, no obstante, se ve influenciado por el valor de R , disminuyendo ligeramente a medida que R aumenta.

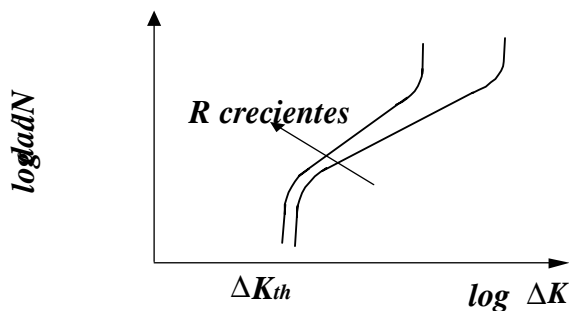


Figura 1.12: Influencia del valor de R sobre las curvas de crecimiento.

De las muchas expresiones propuestas para tener en cuenta el efecto de las tensiones medias puede citarse la debida a Walker [33]:

$$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{\Delta K}{(1-R)^{1-m}} \right)^n \quad (1.16)$$

usando la relación:

$$K_{max} = \frac{\Delta K}{(1-R)} \quad (1.17)$$

puede ser escrita en función de K_{max} como:

$$\frac{da}{dN} = C \left((1 - R)^m \Delta K_{max} \right)^n \quad (1.18)$$

La ecuación de Forman [34] es una expresión que tiene en cuenta además del efecto de las tensiones medias, el efecto asintótico de la curva para valores de ΔK próximos a K_c :

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{(1 - R)\Delta K_c - \Delta K} \quad (1.19)$$

Para tener en cuenta el comportamiento en la región próxima al umbral, basados en la hipótesis de que los desplazamientos de apertura residuales en el borde de grieta existen incluso sin carga, Donahue et al [35] plantearon la siguiente expresión:

$$\frac{da}{dN} = \frac{A}{E\sigma_s} \left(\Delta K^2 - \Delta K_{th}^2 \right) \quad (1.20)$$

donde E y σ_s son respectivamente el modulo de Young y límite elástico del metal, A es una constante. Esta ecuación es capaz de ajustar los resultados de ensayos en las regiones I y II de la curva de propagación de grieta. Puede observarse que las velocidades de crecimiento disminuirían cuando el límite elástico del material aumenta. Sin embargo los resultados de los ensayos muestran que el límite elástico tiene un efecto muy poco marcado en las velocidades de crecimiento en la región B. Smith [36] obtuvo una expresión similar ajustando los resultados de ensayos de soldadura en ángulo:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K - \Delta K_{th})^m \quad (1.21)$$

Muchos otros intentos de ajustar el comportamiento completo de la curva de propagación de grieta han llevado a expresiones más o menos

complejas, un ejemplo que combina las ideas anteriores es:

$$\frac{da}{dN} = C \frac{(\Delta K - \Delta K_{th})^m}{(1-R)K_c - K_{max}} \quad (1.22)$$

esta expresión representa una modificación a la ecuación de Forman teniendo en cuenta la expresión 1.21.

1.5 CIERRE DE GRIETA

El fenómeno de cierre de grieta es usado frecuentemente para explicar el efecto de la relación de tensiones sobre la velocidad de crecimiento, así como, el efecto de factores medioambientales en el valor del umbral ΔK . Por otra parte el concepto de cierre de grieta permitió explicar el efecto de la secuencia de cargas sobre el crecimiento de grietas que ya fue puesto de manifiesto en la década de los 60. El uso de la MFEL para caracterizar la propagación de la grieta, con una ley de crecimiento como la ley de Paris por ejemplo, es aplicable bajo la hipótesis de que la grieta puede ser idealizada como un corte ideal de espesor cero. Esta hipótesis lleva implícito asumir que la caracterización del factor de intensidad de tensiones delante del frente de la grieta determina únicamente las condiciones de propagación. El descubrimiento del cierre de grieta por Elber [26] estableció por primera vez que la velocidad de crecimiento está influida, no solamente por las condiciones delante del frente de la grieta, sino también por la naturaleza del contacto entre las superficies de ésta. Puesto que las condiciones en la zona próxima a las superficies de la grieta depende de factores tales como la historia de carga, longitud de la grieta y estado de tensiones, el trabajo de Elber permitió explicar la dependencia de la velocidad de crecimiento con la historia anterior de carga.

Una grieta ideal, supuesto un corte perfecto, de espesor cero, en el material permanece cerrada solamente con carga cero o cargas de compresión. Sin embargo, experimentalmente Elber observó que las grietas producidas por fatiga cierran durante la descarga antes de llegar a ser nula la tensión. Esta diferencia de comportamiento puede explicarse considerando la plastificación que se produce en la zona delante de la grieta durante el proceso de crecimiento por fatiga. Cuando la grieta crece, el frente va dejando tras de sí una zona con deformación residual de tracción. Esta zona corresponde al material alrededor de la grieta que ha sufrido deformación plástica durante el crecimiento previo de la grieta. La estela de material deformado va siendo mayor a medida que la grieta avanza y se puede considerar como la envolvente de las zonas plásticas creadas en el avance de la grieta. La deformación residual acumulada en dicha zona actúa como una cuña, generando tensiones residuales de compresión sobre la grieta que logran cerrarla antes de que la tensión se anule, e impide que se abra hasta que se venza el efecto de estas tensiones residuales.

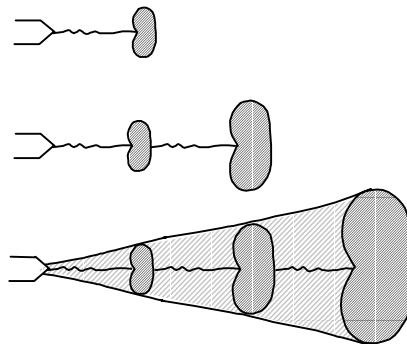


Figura 1.13: zona de deformación residual acumulada en el crecimiento de la grieta

Elber midió la tensión remota a la cual las dos superficies de fractura abrían completamente durante un ciclo de carga. Para ello midió la evolución del desplazamiento entre dos puntos X y X' durante un ciclo de

carga, colocando galgas extensométricas a ambos lados de la grieta en una probeta de aluminio con grieta centrada. La figura 1.14 muestra esquemáticamente la relación obtenida entre la tensión aplicada, σ , y el desplazamiento, δ , medido entre las caras de la grieta. En la región entre los puntos A y B, el gráfico σ - δ presenta una pendiente constante igual a la rigidez medida en una placa idéntica con un corte (es decir, con una grieta que no ha sido generada por fatiga) de idéntica longitud que la grieta por fatiga. Esto significa que en el proceso de descarga la grieta permanece completamente abierta hasta que la tensión nominal disminuye de σ_{max} hasta σ_{cl} . Si la descarga continúa, entre el punto B y C la variación de la rigidez indica el cambio de geometría al pasar la grieta de completamente abierta a cerrada. En la última etapa de la descarga, por debajo del punto C, la curva σ - δ exhibe un comportamiento lineal donde la pendiente de la línea CD coincide con la rigidez de una placa idéntica sin grieta. La tensión correspondiente al punto B, en el que comienza el contacto entre las superficies se denomina tensión de cierre, σ_{cl} . El valor δ_0 es el desplazamiento residual, para una tensión remota aplicada nula, cuyo valor es igual a la diferencia de distancia entre los puntos X y X' en el caso de una grieta ideal y una grieta producida por fatiga en la posición donde se han colocado las galgas.

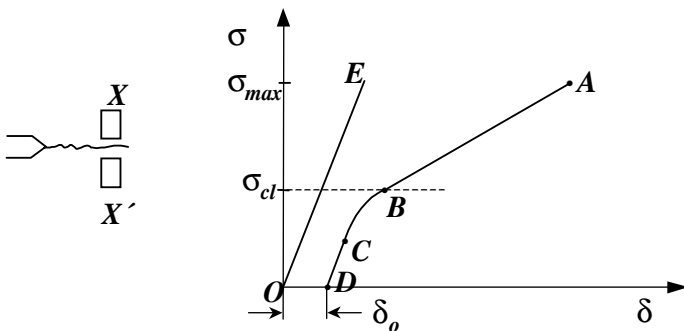


Figura 1.14: relación obtenida entre la tensión aplicada, σ , y el desplazamiento, δ , medido entre las caras de la grieta.

Durante el proceso de carga la relación entre tensión aplicada y desplazamiento es muy similar al producido en descarga, si bien ambas curvas no coinciden exactamente, debido a las deformaciones plásticas producidas en cada ciclo y al rozamiento entre las superficies de la grieta durante el cierre, produciéndose un ciclo de histéresis. Este hecho lleva a la distinción entre tensión de cierre, σ_{cl} , y tensión de apertura, σ_{op} , valor de tensión para el cual la grieta se abre completamente durante el proceso de carga. No obstante, a efectos prácticos ambos valores suelen considerarse idénticos.

El diagrama de flexibilidad σ - δ también puede representarse en función del factor de intensidad de tensiones en lugar de la tensión nominal, la figura 1.15 muestra una curva típica. Cuando el componente agrietado se somete a tracción, inicialmente la grieta permanece completamente cerrada hasta que se alcanza un determinado valor de ΔK . En este punto la grieta comienza a abrir gradualmente hasta estar completamente abierta para un valor K_{op} . Durante la descarga, el primer contacto entre las caras de la grieta ocurre para un valor del factor de intensidad de tensiones K_{cl} , por debajo del cual la grieta gradualmente se va cerrando. El cierre completo de la grieta ocurrirá en el punto marcado más abajo.

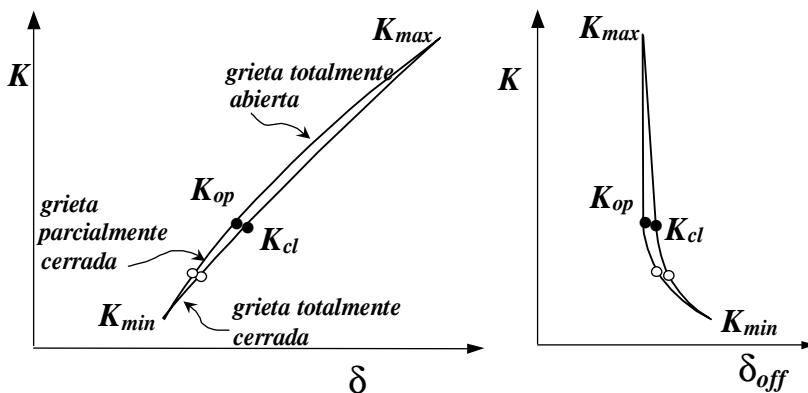


Figura 1.15: Diagrama de flexibilidad en función del factor de intensidad de tensiones.

Experimentalmente las curvas de flexibilidad se obtienen en base a desplazamientos obtenidos mediante métodos ópticos, o mediante extensómetros, tipo COD o mediante la colocación directa de galgas extensométricas sobre la superficie del elemento. Para obtener con precisión los puntos que marcan la apertura y cierre de la grieta se suelen representar los valores de σ o K en función de la diferencia entre los desplazamientos realmente producidos y los que se producirían con una configuración de grieta completamente abierta. Esta diferencia de desplazamientos se denomina δ_{off} (figura 1.14) y se define como la diferencia $\delta_{off} = \delta - \alpha K$, donde α corresponde a la pendiente de la curva K - δ en la zona comprendida entre K_{op} y K_{max} . Cuando la grieta está completamente abierta $\delta_{off} = 0$, y su valor se desvía de 0 cuando la grieta comienza a cerrarse.

Elber, considerando que sólo puede producirse propagación de la grieta durante la parte del ciclo de carga en que la grieta está completamente abierta, propuso el empleo de la tensión de apertura como valor de referencia para definir el rango de tensiones efectivo y en base a él un rango efectivo del factor de intensidad de tensiones:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{ef} &= \sigma_{max} - \sigma_{op} = U\Delta\sigma \\ \Delta K_{ef} &= K_{max} - K_{op} = U\Delta K\end{aligned}\tag{1.23}$$

donde U representa la relación entre el rango de tensiones o factor de intensidad de tensiones efectivo y el aplicado.

$$U = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{op}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} = \frac{\Delta K_{ef}}{\Delta K}\tag{1.24}$$

Así pues, considerando el efecto del cierre de grieta, si el crecimiento sólo tiene lugar en la parte de ciclo en que ésta permanece abierta, la caracterización de la velocidad de crecimiento de grieta basada en la MFEL vendrá dado por:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{ef})^m \quad (1.25)$$

A partir de los valores de tensión de cierre medidos experimentalmente en ensayos con amplitud constante en probetas de aluminio 2024-T3 para diferentes relaciones de carga, R entre -0.1 y 0.7, Elber determinó la siguiente relación:

$$\frac{K_{op}}{K_{max}} = 0.5 + 0.1R + 0.4R^2 \quad (1.26)$$

que es equivalente a: $U = 0.5 + 0.4R$

Mientras que la representación da/dN frente a ΔK (en la región en que es aplicable la ley de Paris) de los datos experimentales de Elber varía con la relación de cargas R, la representación para el mismo conjunto de datos en función del rango ΔK_{ef} convergen en una sola curva. Numerosas investigaciones posteriores han proporcionado distintas modificaciones empíricas a la ecuación 1.26 específicas para determinados materiales y distintas condiciones de ensayo [37]. Hoy en día se admite que además de su dependencia con R la relación U está fuertemente influida por la geometría de la probeta, el estado de tensiones, el rango del factor de intensidad de tensiones y condiciones medioambientales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Newman J. C. Jr., *The Merging of Fatigue and Fracture Mechanics Concepts: A Historical Perspective*, *Fatigue and Fracture Mechanics*, vol 28, ASTM STP 1321, pp. 1-49, 1997.
- [2] Schütz W., *A History of Fatigue*, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 54, No. 2, pp. 263-300, 1996.
- [3] Suresh S., *Fatigue of Materials*, Cambridge University Press. New York, USA, 1991.
- [4] Bannantine J. A., Comer J. J. and Handrock J. L., *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall, 1990.
- [5] Ewalds H. L. and Wanhill R. J. H., *Fracture Mechanics*, Edward Arnold, 1989.
- [6] Albert W.A.J, *Über treibseile am harz*. *Archiv für Mineralogie, Geognosie Bergbau und Huttenkunde* 10, pp. 215-234, 1837.
- [7] Rankine W. J., *On the cause of the unexpected breakage of the journal of railway axles and on the means of preventing such accidents by observing the law of continuity in their construction*, *Institution of Civil Engineers, Minutes of Proceedings*, Vol 2, pp. 105-108, 1843.
- [8] Wohler A., *Test to determine the forces acting on railway carriage axles and the capacity of resistance of the axles*, *Engineering* 11, pp. 199, 1871.
- [9] Gerber W., *Bestimmung der zulossigen spannungen in eisen constructionen*, *Z. Bayer Arch. Ing. Ver.* 6 , 1874
- [10] Goodman J., *Mechanics Applied to engineering*, Vol. 1 , 1930.

- [11] Soderberg C. R., *Factor of safety and working stress*, *Trans. ASTM*, 52 (2), 1930
- [12] Soderberg C. R., *Working stresses*, *Trans. ASTM* 57, A106, 1935.
- [13] Palmgren A., *Durability of ball bearing*, *ADVDI. Col* 68, No.14, 1924.
- [14] Miner M. A., *Cumulative Damage in Fatigue*, *Trans. ASME, J. of Appl. Mech.*, Vol. 67, pp.159, 1945.
- [15] Manson S. S., *Fatigue: A complex subject-some simple approximations*, *Expt. Mechanics*, 5 (7), pp. 193, 1965.
- [16] Manson S. S., *Thermal stress and low cycle fatigue*, McGraw-Hill, New York, 1966.
- [17] Manson S. S., *Discussion of experimental support for generalized equation predicting low cycle fatigue*, *Trans. ASME, J. Basic. Engr.*, Vol. 84, No. 4, pp. 537, 1962.
- [18] Manson S. S., *Inversion of the strain-life and strain-stress relationship for use in metal fatigue analysis*, *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol. 1, pp. 37-57, 1965.
- [19] Coffin L. F., *Experimental support for generalized equation predicting low cycle fatigue*, *Trans. ASME, J. Basic. Engr.*, Vol 84, No. 4, pp. 537, 1962.
- [20] Inglis C. E., *Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners*, *Transactions of the Institute of Naval Architects*, 55, pp.219-241, 1913.
- [21] Griffith A. A., *The phenomena of rupture and flow in solids*, *Trans. R. Soc. (Lond.)*, Vol. A 221, pp. 163, 1920.

- [22] Irwin G. R., *Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate*, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, Vol.24, pp. 136, 1957.
- [23] Paris P. C., *The growth of fatigue cracks due to variations in load*, Ph. D. Tesis, *Leigh University*, 1962.
- [24] Paris P. C. and Erdogan F., *A critical analysis of crack propagation law*, *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, Vol. 85, No. 4, pp. 528, 1963.
- [25] Elber W., *Fatigue crack closure under cyclic tension*, *engng. Fract. Mech.* 2, pp. 37-45, 1970.
- [26] Elber W., *The significance of fatigue crack closure in damage tolerance in aircraft structures*, *Special Technical Publication 486*, ASTM, Philadelphia, pp. 230-242, 1971.
- [27] Schijve J., *Fatigue crack propagation in light alloy sheet material and structures*, *Report MP-195*, *National Aerospace Lab.*, Netherlands, 1960.
- [28] Hudson C. M., Hardrath M. F., *Effects of changing stress amplitude on the rate of fatigue crack propagation in two aluminum alloys*, *NASA TN-D-960*, 1961.
- [29] Wheeler O.E., *Journal of basic engineering* Vol. 94, pp. 181-186, 1972.
- [30] Willemborg J., Engle F.M., Wood H.A., *A crack growth retardation model using an effective stress intensity concept*, *WPAFB-TM-71-1*. 1971.
- [31] *ASTM E647-91 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.*

- [32] Dugdale D. S., *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 8, No. 2, pp. 100-104, 1960.
- [33] Walker K., *The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum*, *J. Appl. Phys.* 58, pp. 688-691, 1970.
- [34] Forman R. G., Kearney V. E. and Engle R. M., *Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures*, *J. Bas. Engng.* 89, pp. 459-464, 1967.
- [35] Donahue R. J., Clark H. M., Atanmo P., Kumble R. and McEvily A. J., *Crack opening displacement and the rate of fatigue crack growth*, *Int. J. Fract. Mech.*, 8, pp. 209-215, 1972.
- [36] Smith I.F.C. and Smith R. A., *Fatigue crack growth in a fillet joint*, *Eng. Fract. Mech.*, 18, pp. 861-869, 1983.
- [37] Schijve J., *Some formulas for crack opening stress level*, *Engng. Fracture Mech.* 14, pp. 461-465, 1981.

Capítulo 2

FATIGA CON CARGAS ALEATORIAS

El capítulo anterior se ha dedicado a la discusión del comportamiento a fatiga de los materiales bajo cargas de amplitud constante, centrandó el interés en la caracterización de la vida de crecimiento de la grieta. El estudio bajo cargas de este tipo es la principal fuente de información sobre el proceso de crecimiento de grietas por fatiga. Sin embargo, las condiciones a que está sometida una estructura real rara vez pueden ser consideradas de amplitud constante normalmente son de amplitud variable y la mayoría de las veces aleatorias.

La extrapolación del conocimiento y de los datos experimentales obtenidos en crecimiento de grietas con carga de amplitud constante a los casos reales de carga no es un problema sencillo. Por un lado, si las cargas son aleatorias o semialeatorias, no se conocerán exactamente las sollicitaciones que van a producirse en el futuro, y deberán definirse estadísticamente. Además, durante el crecimiento de una grieta con cargas de amplitud variable se produce lo que se denomina efecto de secuencia o de interacción debido a la irregularidad de la carga. En este caso, el incremento de longitud en cada ciclo no tiene que ser igual al que se produce para las mismas cargas con amplitud constante, pues depende,

no sólo de los valores máximo y mínimo del ciclo y de la longitud de la grieta, sino también de la historia previa de carga.

En este capítulo se tratarán estos aspectos cuya consideración es importante. En primer lugar se tratará el análisis y predicción de las cargas que van a producirse, incluyendo la generación de historias de carga representativas del proceso a analizar. Por otra parte se estudiará el efecto de la secuencia de cargas sobre el crecimiento de grietas y los diversos mecanismos propuestos como responsables del mismo. Por último, se revisarán los modelos que permiten reproducir el comportamiento del material ante estas sollicitaciones y la aplicación de los mismos considerando el proceso de carga previsto. Esto último puede hacerse mediante la simulación ciclo a ciclo del proceso de fatiga, hasta que se produzca el fallo, o de una forma global, a partir de la definición estadística del proceso de carga, determinando la vida esperada del elemento y, dependiendo del modelo estadístico, su distribución. Una completa revisión de todos estos aspectos puede encontrarse en la referencia [1]

2.1. HISTORIAS REALES DE CARGAS. OBTENCIÓN DE LA HISTORIA REPRESENTATIVA DE CARGAS.

Una de las tareas más importantes a desarrollar en el diseño a fatiga de componentes sometidos a cargas variables es establecer el espectro de cargas representativo de las tensiones y deformaciones realmente experimentadas por el componente en servicio. Dichos espectros son estimados bajo condiciones típicas de operación en servicio, por ejemplo midiendo con galgas extensométricas las deformaciones sufridas en diferentes puntos críticos del componente.

Aunque en algunos casos puede considerarse que los equipos y estructuras están sometidos a cargas de amplitud aproximadamente constante en la realidad dichas cargas son normalmente de amplitud variable. Dos ejemplos típicos del primer caso son los sistemas de recipientes a presión o tuberías subterráneas y las máquinas rotativas. Multitud son los ejemplos en los que las estructuras y sistemas mecánicos están sometidos a cargas cuya amplitud es variable, la

mayoría de las veces además de carácter aleatorio o semialeatorio. Ejemplos de ello son las cargas en los aviones por efecto de las maniobras y turbulencias, las debidas al oleaje en los barcos y estructuras marinas, las producidas por el viento en edificios altos y chimeneas o en generadores eólicos, las producidas por la irregularidad del firme en los automóviles, etc.

En realidad, las cargas no son totalmente aleatorias, son semialeatorias, algunas veces mezcladas con cargas deterministas. Así, en los barcos, las cargas más altas se producirán agrupadas en los periodos de tormentas y éstas, a su vez, serán más frecuentes en unas épocas del año que en otras. Además de que determinados niveles de tensiones serán más frecuentes con unos niveles de peso cargado en el barco que con otros y que entre las historias de carga correspondientes a un viaje se intercala un ciclo determinista correspondiente a una descarga y carga posterior.

Para el análisis del crecimiento de grieta en estas estructuras, se hace pues necesario estimar la evolución de las cargas que van a producirse durante la vida de las mismas, es decir, los distintos estados de carga, frecuencia, proporción y secuencia en la que se van a producir. Todo ello hace que la obtención del registro de cargas representativo sea un problema complejo.

En general, el método seguido para obtener las historias representativas consta normalmente de varios pasos [2-5]:

2.1.1. Obtención de los diversos estados de carga que pueden producirse, su duración y la frecuencia relativa con que se presenta cada uno.

Este primer paso exige el análisis y clasificación de las condiciones de carga a que va a estar sometida la estructura, considerando en cada una de ellas las cargas de carácter aleatorio, semialeatorio y determinista, y su duración y frecuencia de aparición. Para cada uno de dichas condiciones de carga deben obtenerse, registros representativos bien mediante medida en prototipos en las mismas circunstancias, mediante inferencia, a partir de las medidas en estructuras similares o modelos previos, o a través de la simulación. La historia

representativa debe incluir los distintos registros en la misma proporción en que se espera van a producirse en la estructura. Además, si los efectos de secuencia son significativos, deben ordenarse en secuencias que produzcan los mismos efectos que la historia real.

2.1.2. Obtención del espectro. Métodos de contar ciclos.

El espectro representa normalmente las amplitudes de ciclos o los rangos producidos durante la vida de la estructura y el número de ellos que se producen. Puede representarse mediante diagramas como en la figura 2.1, en la que para cada rango se representa el número de ciclos con valor superior al mismo, o una tabla en la que se indican el número de rangos o ciclos producidos de cada amplitud. Dicha tabla puede incluir también los valores medios de éstos o indicar sus mínimos y máximos [6].

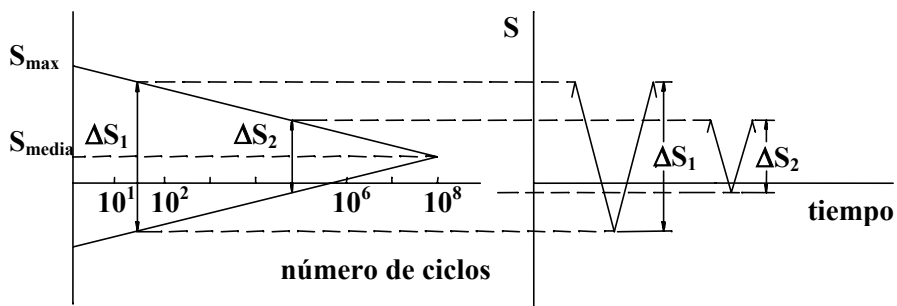


Figura 2.1: *Rangos de tensiones alcanzados frente al número de ciclos en que se producen.*

Para obtener el espectro, es necesario identificar en un registro los ciclos o rangos, de forma que puedan ser reproducidos posteriormente a efectos de análisis o ensayo. Existen diversos métodos de contar ciclos y rangos [7].

Level-crossing counting.

Un ejemplo simple sobre una historia en tensiones corta y los ciclos que resultan aplicando este método se ilustra en la figura 2.2. En este método se divide el eje de tensiones en el diagrama tensión-tiempo (σ -t) en un número de incrementos, estableciendo una serie de niveles de tensión. A continuación, para niveles de tensión por encima de uno fijado como referencia (que en este caso corresponde al cero) se cuentan el número de puntos de corte con pendiente positiva del diagrama σ -t con cada uno de estos niveles. Para niveles de tensión por debajo del de referencia se cuenta el número de puntos de corte con pendiente negativa del diagrama σ -t con cada uno de estos niveles.

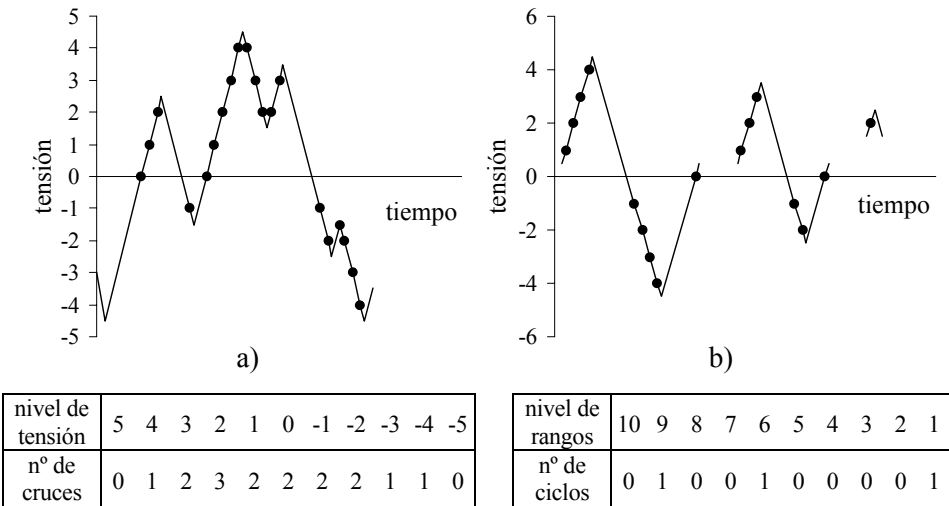


Figura 2.2: *level-crossing counting*

Una vez determinado este recuento los niveles deben ser combinados para formar ciclos completos. Este proceso puede realizarse de diversas maneras. La combinación, que podríamos llamar más dañina desde el punto de vista de fatiga, se obtiene formando primero el ciclo de mayor amplitud posible, usando los niveles disponibles restantes se formaría nuevamente el ciclo de mayor amplitud posible y así sucesivamente hasta usar todos los niveles contados. La figura 2.2 b muestra el resultado del recuento donde se ha supuesto que los picos y valles aparecen en la mitad de los intervalos o niveles de tensión.

Peak counting.

Basado en la identificación de picos y valles, dividiendo el eje de tensiones en un número de incrementos, estableciendo una serie de niveles de tensión, se cuentan el número de picos que caen dentro de cada uno de estos niveles para niveles de tensión por encima de uno fijado como referencia, así mismo, se determina el número de valles en cada uno de estos niveles para niveles de tensión por debajo del de referencia.

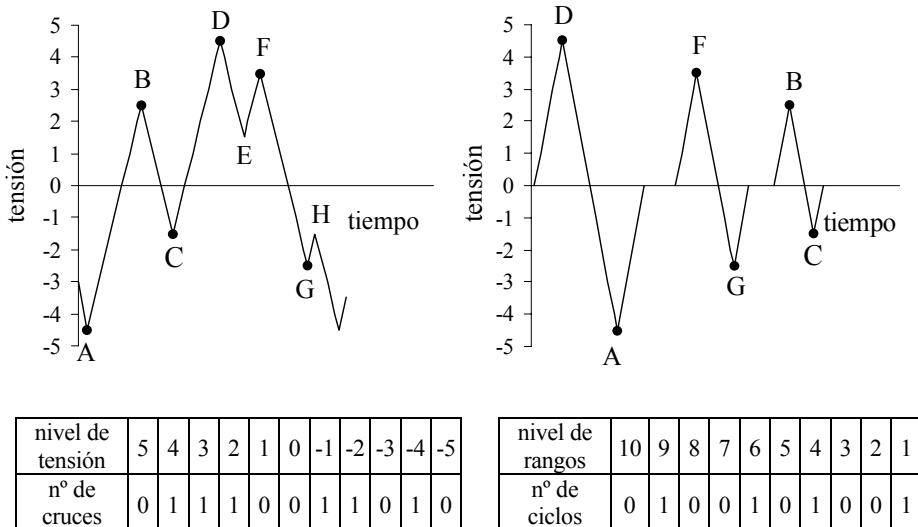


Figura 2.3: peak counting

Al igual que en el método anterior una vez determinado este recuento los niveles deben ser combinados para formar ciclos completos. Siguiendo el mismo proceso descrito el resultado es el representado en la figura 2.3.

Simple-range counting.

Con este método se cuentan los rangos de tensión entre sucesivas inversiones de carga. Pueden contarse los rangos positivos (valles seguidos de picos) y los negativos (picos seguidos de valles), en cuyo caso cada rango se contabiliza como medio ciclo, o bien, sólo los positivos o negativos en cuyo caso se considera que cada uno forma un ciclo completo. En el ejemplo de la figura 2.4, se consideran todos los rangos, positivos y negativos, como medios ciclos.

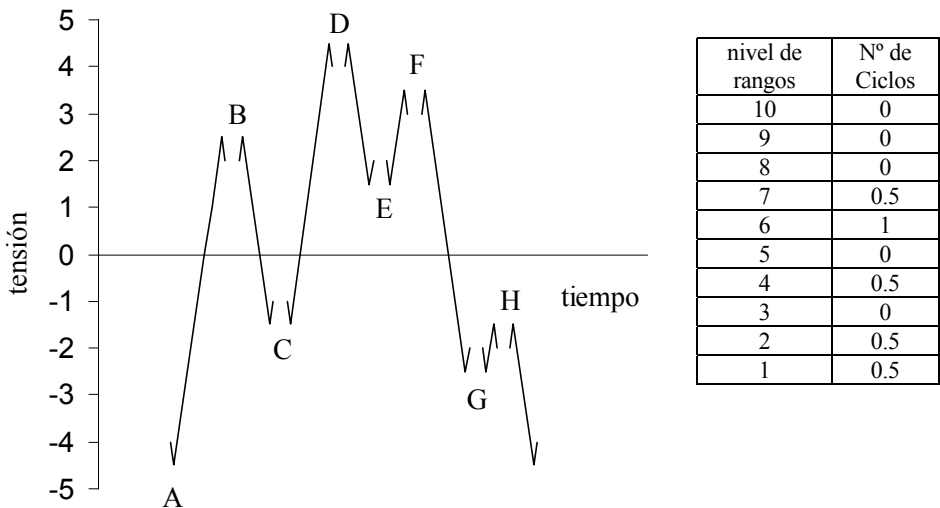


Figura 2.4: Simple range counting

Rain-flow.

Ninguno de los tres métodos descritos anteriormente tiene en consideración el orden en el que se aplican los ciclos. Dado que la relación entre tensiones y deformaciones no es lineal, debido al comportamiento plástico del material, el orden en el que se apliquen los ciclos tiene un efecto significativo en la respuesta tensión-deformación del material. En la figura 2.5 se representan dos historias distintas, en el caso de la historia A, el hecho de aplicar una deformación de compresión precediendo inmediatamente la aplicación de ciclos de deformación de menor amplitud produce tensiones medias de tracción. En el caso de la historia B, la aplicación de una deformación de tracción precediendo inmediatamente la aplicación de ciclos de deformación de menor amplitud produce tensiones medias de compresión. Puesto que las tensiones medias influyen en la vida a fatiga del material, estas dos historias producirían vidas distintas en un componente.

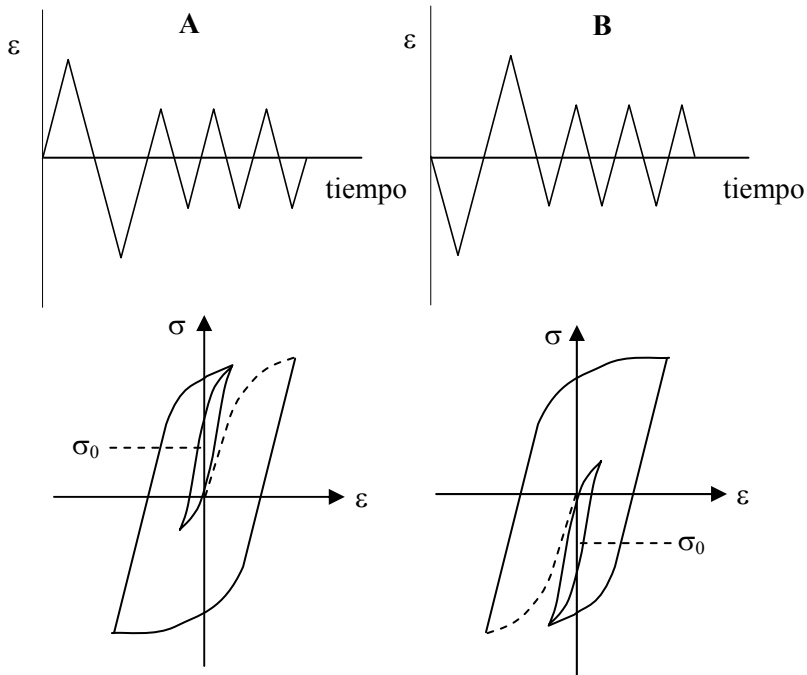


Figura 2.5: Relación tensión deformación en dos historias de carga distintas

Los métodos que intentan tener en cuenta la influencia de la secuencia de ciclos identificando los lazos de histéresis cerrados en la respuesta tensión-deformación del material reciben hoy en día el término genérico de Rain-flow. Muchas de estas técnicas pueden encontrarse en la bibliografía, así como un gran número de algoritmos para implementar en ordenador, algunos dados por ASTM [7].

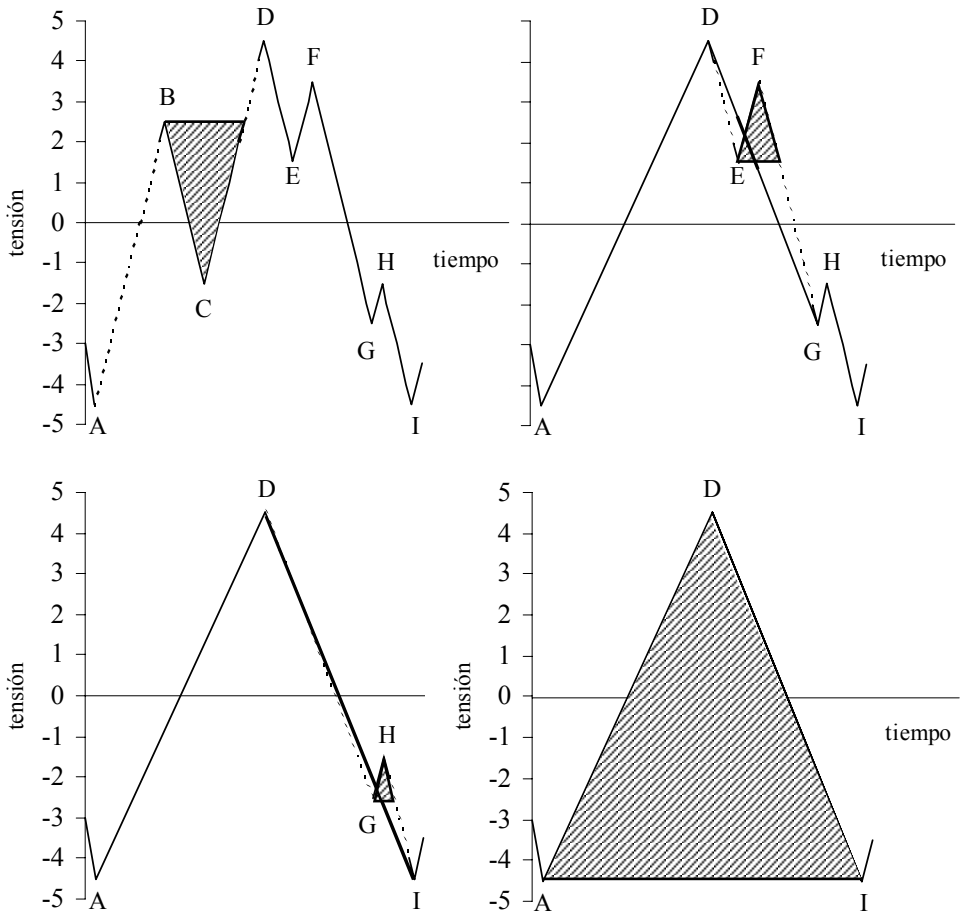


Figura 2.6: Rain-flow

La figura 2.6 ilustra el proceso de reconocimiento de ciclos completos. Para ello, siguiendo la secuencia de picos y valles, en grupos de cuatro puntos, se identifican los casos en que existen dos puntos intermedios con valores incluidos en el rango definido por los dos extremos. El ciclo definido por los puntos intermedios se contabiliza y elimina de la secuencia, iniciándose nuevamente el proceso.

2.1.3. Manipulación del espectro.

El espectro obtenido es sólo uno de los muchos que pueden obtenerse para esa estructura. Las historias de carga a que van a estar sometidas en el futuro dichas estructuras no serán exactamente iguales a ésta. Los ciclos de mayor rango, de los que sólo existe uno o varios en el espectro, puede que no se produzcan en algunas estructuras, en las que la grieta crecerá más rápidamente por ser menor el efecto de retardo. Para considerar esta posibilidad, deben eliminarse del espectro los valores más altos que no se produzcan más que varias veces en la vida de la misma.

La decisión sobre los niveles altos que deben ser eliminados del espectro debe tomarse después de analizar, mediante ensayos o simulación con distintos niveles, el efecto que producirá tal decisión. Ello permitirá definir unos límites superiores e inferiores de la curva de crecimiento de la grieta, así como el nivel más alto a considerar. Algunos expertos han sugerido para aviación [8] que la máxima amplitud del espectro no debe ocurrir menos de 10 veces en la vida. En materiales que no sufren efecto de secuencia, por ejemplo materiales compuestos, estos ciclos de mayor rango no deben eliminarse.

Antes de obtener la historia representativa también se suelen omitir del espectro los ciclos de menor amplitud cuyo efecto sobre la vida a fatiga es despreciable. En los espectros más usuales, la reducción del número de ciclos producida en esta operación es de uno o dos órdenes de magnitud. Esta reducción

de ciclos puede hacerse sobre el espectro, pasando los registros originales por un filtro que elimine los ciclos de menor amplitud [9,10].

Por último, el número de ciclos incluidos en el espectro no tiene que corresponder a toda la vida de la estructura o componente, puede corresponder, por ejemplo, a un año y repetirse cuantas veces sea necesario durante el ensayo o simulación hasta el fallo. No obstante, dicho tiempo debe ser suficientemente grande para incluir al menos uno o varios ciclos del nivel más alto no eliminado.

2.1.4. Reconstrucción de la historia de carga.

Una vez que se tiene la representación espectral de las cargas a incluir en los registros, es necesario generar el mismo. En este proceso debe tenerse en cuenta que las cargas se producen en la realidad de forma semialeatoria, y que los ciclos de mayores amplitudes no irán normalmente distribuidos aleatoriamente, sino agrupados en periodos correspondientes a condiciones de carga desfavorables. Además, las cargas deterministas deberán incluirse también con la secuencia adecuada. La mezcla aleatoria de todos los rangos del espectro puede producir efectos muy diferentes de los que producirán las cargas reales. Por ello, la reconstrucción de la historia de carga debe hacerse agrupando los rangos del espectro en distintos grupos. Cada grupo debe representar aproximadamente los rangos que se producen con distintos estados de carga diferenciados, como son: distintas condiciones o tipos de vuelo [11]; distintas condiciones atmosféricas; estados de carretera; etc. Obtenidos los espectros de cada grupo de ciclos, el registro correspondiente se genera normalmente mediante combinación aleatoria de los ciclos, añadiendo los deterministas, si los hay, en la secuencia necesaria. Posteriormente, debe definirse la secuencia de aplicación de los registros correspondientes a los distintos grupos. Igualmente, si hay cargas deterministas entre estos grupos, debe definirse su valor y secuencia de aplicación.

2.2. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS ALEATORIOS

En los procesos aleatorios no se puede conocer la magnitud que va a tener una variable asociada al suceso, al contrario de lo que ocurre en los deterministas en los que la magnitud de una variable asociada al fenómeno es conocida en cualquier instante de tiempo y la evolución de dicha variable estará definida mediante una fórmula o un registro determinado. El término aleatorio no implica que la variable tenga en cada instante una magnitud arbitraria, sino que ésta puede ser definida únicamente mediante valores estadísticos.

Existen varias formas alternativas de especificar un mismo proceso aleatorio, una de ellas es obviamente la representación en un registro de los valores alcanzados por la variable aleatoria que define el proceso en el dominio del tiempo. Cada uno de los registros será una muestra de dicho proceso y los valores obtenidos serán distintos de los que se producen en el resto de ellos. Evidentemente el número de registros que se podrían obtener es infinito, si bien en la realidad sólo se dispone de un número finito de ellos. Si el conjunto de registros del que se dispone es suficientemente grande, de forma que permite definir todos los posibles mediante propiedades estadísticas, dicho conjunto representa (de forma determinista) el proceso aleatorio.

El desarrollo en serie de Fourier nos permite representar cualquier historia periódica de una variable usando un conjunto de funciones senoidales, tomando cada una un conjunto de valores de amplitud, frecuencia y fase. Como una extensión del desarrollo de Fourier, la transformada de Fourier permite representar historias finitas en tiempo, usando una formulación espectral mediante la función de densidad espectral permite representar algunos parámetros importantes de cualquier proceso aleatorio estacionario. El proceso es descrito como una función de la frecuencia y se dice entonces definido en el dominio de la frecuencia, la conversión de una representación en tiempo a frecuencias o viceversa, es posible haciendo uso de la transformada de Fourier y su transformada inversa.

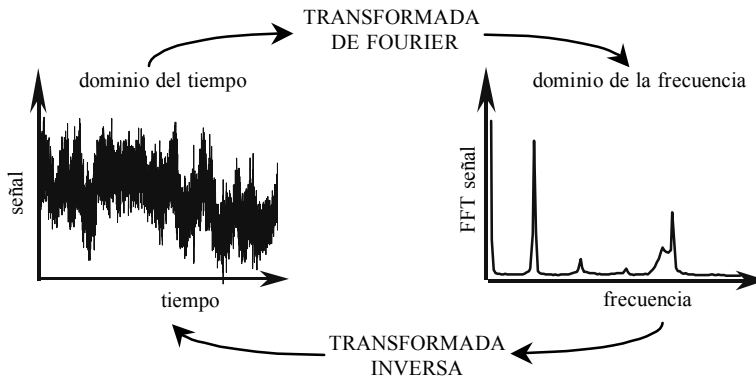


Figura 2.7: *La transformación de Fourier*

Básicamente el dominio de la frecuencia es otra forma de representar una historia temporal. Cierta información difícil de apreciar en una representación en el dominio del tiempo resulta evidente en una representación en frecuencias. La función de densidad espectral contiene la información únicamente de la amplitud de las ondas senoidales de distinta frecuencia en las que puede ser expresada cualquier función periódica. Su característica más importante es que si la variable en estudio, $x(t)$ es real, la función de densidad espectral es una función par, positiva y finita para todos los valores de frecuencia que si se integra en el rango $(-\infty, +\infty)$, da como resultado la media cuadrática de $x(t)$, que es normalmente el parámetro de más interés en el análisis de procesos aleatorios estacionarios.

Obtener un registro temporal a partir de la función de densidad espectral no sería posible en principio pues ésta no contiene información sobre la fase de las funciones senoidales individuales para cada frecuencia. Sin embargo para procesos gaussianos estacionarios los ángulos de fase están aleatoriamente distribuidos. Esto permite regenerar historias temporales que no serán exactamente iguales a la original pero si estadísticamente equivalentes.

Para algunos procesos aleatorios que se producen en ingeniería existen fórmulas empíricas aproximadas para la estimación de la densidad espectral en función de los parámetros que intervienen en el fenómeno objeto de estudio. Si no

se conoce la fórmula empírica, conocido un registro puede medirse la densidad espectral por métodos analógicos o determinarse por métodos numéricos, mediante el uso de la transformada rápida de Fourier.

La función de densidad espectral de un proceso estacionario da normalmente una información incompleta del proceso, sin embargo de ella pueden obtenerse algunas características importantes. Dependiendo de la forma de la función de densidad espectral se distinguen dos tipos de procesos aleatorios: de banda ancha y de banda estrecha. La distinción entre uno y otro no es exacta sino cualitativa.

Se dice que un proceso es de banda ancha, cuando la densidad espectral tiene valores significativos en una banda de frecuencias que es del mismo orden que la frecuencia central de la banda. Un registro de un proceso de este tipo tiene una gama amplia de frecuencias (figura 2.8). El caso extremo de este tipo de procesos es aquel cuya densidad espectral está representada por una recta horizontal sin límites en frecuencia. Estos procesos se denominan ruido blanco, por analogía con la luz blanca que tiene un espectro horizontal sobre toda la gama visible de frecuencias.

Un proceso se dice que es de banda estrecha cuando la densidad espectral tiene valores significativos en una gama de frecuencias cuyo ancho es pequeño, comparado con el valor de la frecuencia central de la gama. En la figura 2.8 se puede comprobar que estos registros poseen una forma similar a una onda senoidal de frecuencia dicha frecuencia central, pero cuya amplitud varían lentamente de forma aleatoria. El caso extremo de procesos de banda estrecha es una función senoidal cuyo ángulo de desfase tenga un valor aleatorio.

Como se ha comentado previamente la variable que caracteriza un proceso aleatorio sólo puede ser definida mediante parámetros estadísticos. Cada registro temporal es sólo uno de los infinitos que podrían ocurrir en el proceso y cada

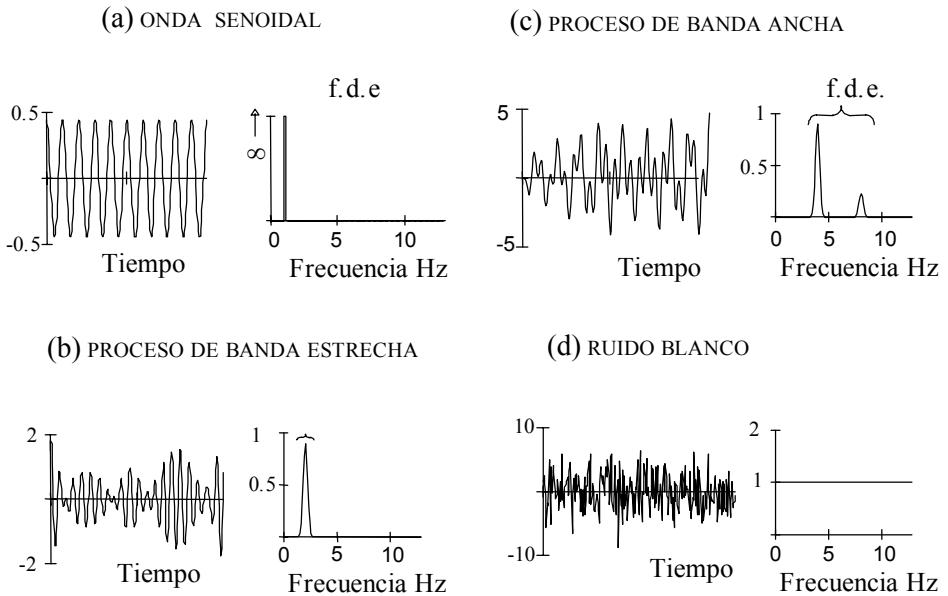


Figura 2.8: *Procesos de distintos anchos de banda*

uno será diferente. Sin embargo, si el tamaño de la muestra o registro es suficientemente grande los parámetros estadísticos de cada uno se mantendrán aproximadamente constantes. En este sentido, los dos parámetros estadísticos más importantes son el número de picos y el llamado número de cruces con el cero, o valor medio de la señal en aquellos procesos de media distinta de cero. La figura 2.9 ilustra ambos conceptos, así como el factor de irregularidad, definido como la relación entre el número de cruces y el número de picos.

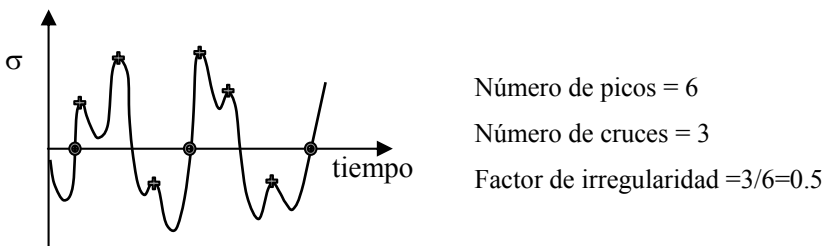


Figura 2.9: *Factor de irregularidad de un proceso*

2.3. EFECTO DE SECUENCIA.

El efecto de la secuencia de cargas sobre el crecimiento de grietas fue puesto de manifiesto en la década de los 60. Diversos trabajos experimentales [12,13] demostraron que la aplicación de una sobrecarga origina una disminución de la velocidad de crecimiento en los ciclos posteriores, este fenómeno se conoce como retardo. En determinadas condiciones, la sobrecarga puede incluso llegar a detener la grieta parando completamente su crecimiento [14].

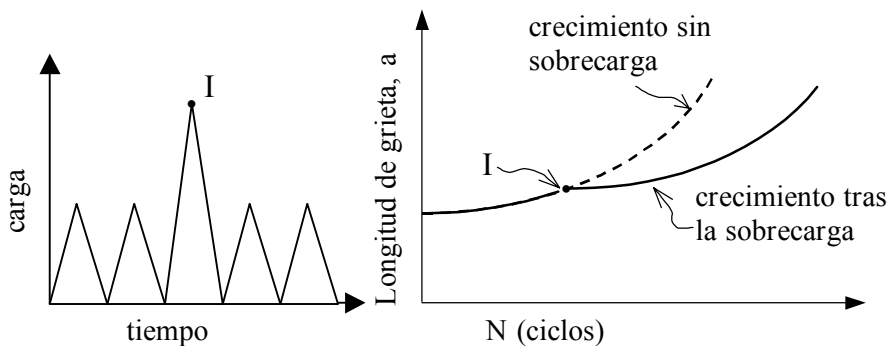
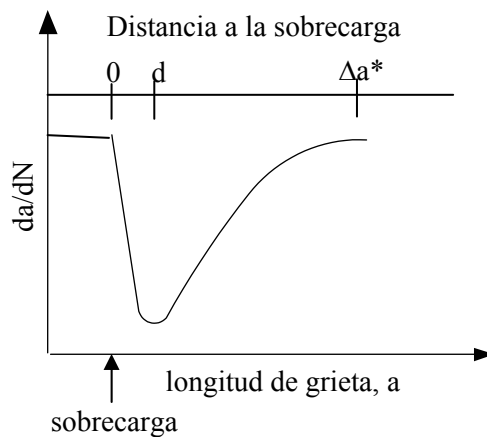


Figura 2.10: Retardo en el crecimiento de grieta producido tras la sobrecarga.

La figura 2.10 muestra esquemáticamente el comportamiento de una grieta después de una sobrecarga. La figura 2.11 representa un esquema de la evolución de la velocidad de crecimiento después de una sobrecarga. Esta velocidad no alcanza el valor mínimo inmediatamente después de la sobrecarga sino que se modifica progresivamente a medida que la grieta sigue avanzando. La distancia, que la grieta crece a través de la zona plástica producida por la sobrecarga hasta alcanzar el mínimo, se denomina distancia de retardo. El valor de esta distancia está próximo al 25% del tamaño de la zona plástica producida por la sobrecarga [15,16]. Una vez alcanzado el mínimo, la velocidad de crecimiento comienza a aumentar hasta estabilizarse en el valor previo a la sobrecarga. La distancia sobre la que se producen los efectos transitorios de la sobrecarga Δa^* , hasta estabilizarse la velocidad de crecimiento, depende de diversos factores, entre los que se incluyen: estado de tensiones, ΔK , R , r_{OL} , microestructura del material y

condiciones ambientales [17,18]. La extensión de crecimiento sobre la que afecta la sobrecarga, Δa^* , es mayor en los casos en que se desarrollan zonas plásticas grandes, tales como en materiales de bajo límite elástico o en probetas de pequeño espesor. Incluso, en una probeta de determinado espesor, dicha longitud puede ser menor en el centro, donde predominan condiciones de deformación plana que en la superficie, donde el estado es de tensión plana.

Figura 2.11: Evolución de la velocidad de crecimiento de la grieta tras la



sobrecarga.

Cuando durante un proceso de carga de amplitud constante se aplica un ciclo de menor carga mínima, se produce el efecto contrario: la velocidad de crecimiento de la grieta aumenta [19, 20]. Este efecto de aceleración es menor que el de retardo producido por una sobrecarga, dependiendo su importancia del valor de la carga aplicada. Igualmente, se ha comprobado que la aplicación de una carga de este tipo inmediatamente después de una sobrecarga reduce el efecto de ésta, en mayor o menor medida dependiendo de los valores de cargas [20-23], mientras que inmediatamente antes de una sobrecarga puede no tener influencia o reducir el retardo que ésta produce. Estos efectos se representan en la figura 2.12.

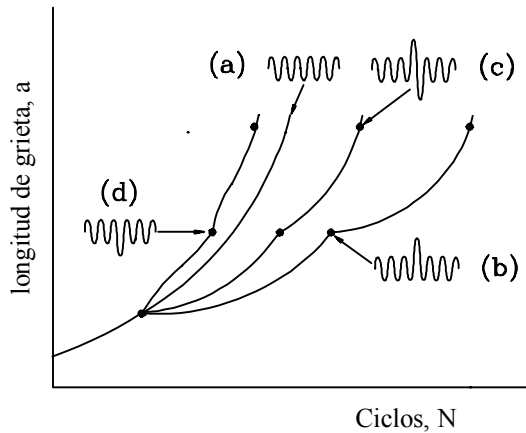


Figura 2.12: Evolución de la velocidad de crecimiento de la grieta a) para cargas de amplitud constante, b) tras una sobrecarga, c) sobrecarga seguida de un ciclo de menor K_{min} y d) tras la aplicación de un ciclo de menor K_{min} .

En secuencias de bloques de carga, si después de un bloque de ciclos de carga de amplitud constante se aplica otro de menor amplitud, se produce un efecto de retardo muy similar al generado por varias sobrecargas consecutivas [15,24]. Cuando los bloques de carga tienen igual valor máximo pero distinto valor mínimo, el efecto de secuencia es menor que el producido cuando lo que varía es el máximo. Dependerá de los valores de ΔK y de los mínimos de ambos bloques.

Cuando las cargas del primer bloque son menores que las del segundo, el efecto es el contrario, produciéndose durante los primeros ciclos del segundo bloque una velocidad de crecimiento mayor de la que ocurre con las mismas cargas y amplitud constante. La aceleración del crecimiento de la grieta se estabiliza rápidamente en comparación con los casos de efecto de retardo, volviendo la velocidad de crecimiento a los valores correspondientes a cargas de amplitud constante [25].

2.4. MECANISMOS ASOCIADOS CON EL COMPORTAMIENTO TRANSITORIO.

Desde que se observó la existencia del efecto de secuencia, se han propuesto diversos mecanismos como responsables del mismo. Su descripción y discusión sobre la importancia de cada uno de ellos en la producción del efecto de secuencia puede verse en la bibliografía [17,25-27]. A continuación se describen brevemente los que más afectan en el caso de materiales metálicos.

2.4.1. Cierre de grieta inducido por plasticidad.

Elber [28] introdujo el concepto de cierre de grieta para explicar ciertas anomalías en el comportamiento de una grieta sin carga. En casos de aplicación de una sobrecarga o bloques de cargas con dos amplitudes distintas, Elber comprobó que la tensión de apertura, S_{op} , variaba de forma que permitía considerar el cierre de grieta como uno de los principales causantes del efecto de secuencia.

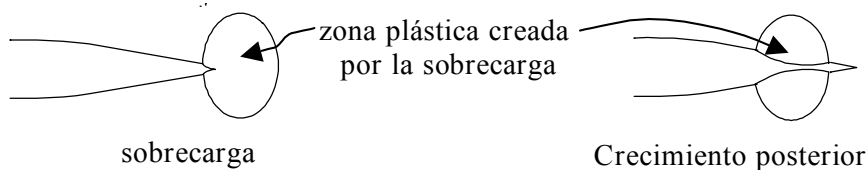


Figura 2.13.: Esquema de la zona plástica creada por la sobrecarga.

Al producirse una sobrecarga durante un proceso de carga con amplitud constante, justo delante del borde de la grieta se genera una zona plástica mayor con deformaciones plásticas residuales de tracción mayores (figura 2.13). Cuando la grieta crece a través de esta zona plástica con mayores deformaciones acumuladas, se generan mayores presiones entre las superficies de la grieta, aumentando S_{op} con la consiguiente disminución de la velocidad de crecimiento [29]. Igualmente, entre dos bloques de carga, al producirse un cambio de amplitud de los ciclos se produce un cambio no instantáneo de las tensiones de cierre que permite explicar, al menos en parte, los efectos de secuencia producidos.

Un modelo analítico del cierre de grieta producido por plasticidad durante el crecimiento estacionario por fatiga ha sido propuesto por Budiansky y Hutchinson [30]. Este modelo, que supone comportamiento elasto-plástico, con condiciones de tensión plana, permite entender la formación de las zonas plásticas monotónica y cíclica, permite comprender también el efecto de R y del endurecimiento por deformación en las tensiones de cierre. Su uso para determinar las tensiones de cierre en casos reales, presenta el inconveniente de que se limita al caso de tensión plana y que no es aplicable a condiciones con carga de amplitud variable. Se han propuesto otros modelos para simular el comportamiento de una grieta creciendo en distintas condiciones y determinar así las tensiones de cierre [31-35].

Aunque este mecanismo no permite explicar toda la variedad de comportamiento producido con distintos materiales, condiciones ambientales, niveles y tipos de carga y longitudes de grieta, sí puede decirse que el cierre de grieta producido por plasticidad es el principal causante de los efectos de secuencia producidos en metales [25,29]. Otros aspectos relativos al cierre de grieta pueden encontrarse en la bibliografía [36]. El efecto de otros mecanismos considerados a continuación sólo será apreciable con valores de ΔK bajos, y aunque existen algunos modelos que intentan considerarlos [37,38] es difícil cuantificar dicho efecto.

2.4.2. Bifurcación y deflexión de la grieta.

En algunas aleaciones metálicas con tendencia a deformación por acumulación de dislocaciones en planos de deslizamiento, durante una sobrecarga e inmediatamente después de ella puede producirse la bifurcación o deflexión de la grieta [39-42], volviendo posteriormente, después de cierto avance, a la dirección de propagación previa a la sobrecarga. La variación de orientación de la grieta y el avance a lo largo de una trayectoria inclinada hace que el crecimiento se produzca en modo mixto produciéndose una reducción del factor de intensidad de

tensiones, que justificaría este mecanismo como causante del efecto de secuencia. Sin embargo, se ha comprobado experimentalmente que, mientras unas veces se detecta retardo durante el avance de la grieta con trayectoria inclinada [40], otras se produce una aceleración, comenzando el retardo una vez que vuelve a la trayectoria original [41]. En este último caso, no está clara la razón por la que, habiéndose producido una reducción del factor de intensidad de tensiones se produce una aceleración en el crecimiento de la grieta.

Fleck [29], a partir del análisis de diversos resultados experimentales obtenidos por él mismo y otros autores, llega a la conclusión que este fenómeno no es una causa dominante de retardo cuando los valores de ΔK son altos. Con niveles bajos de ΔK , sí se produce deflexión de la grieta, ésta puede ser una de las causas de retardo conjuntamente con otros mecanismos.

2.4.3. Cierre de grieta inducido por óxido.

La observación de ciertas anomalías en el crecimiento de las grietas en determinados ambientes con valores de ΔK próximos al umbral de crecimiento, llevó a diversos investigadores [43,44] a plantear la posibilidad de que se produjera un efecto de cierre de grieta debido a la oxidación de las superficies de la misma. En efecto, la presencia de una atmósfera corrosiva produce la oxidación de las nuevas superficies generadas durante el crecimiento de la grieta (figura 2.14). Con valores de ΔK próximos al umbral de crecimiento, la apertura de la grieta en modo mixto, la rugosidad de las superficies y el cierre de grieta inducido por plasticidad producen una continua rotura y nueva formación de la capa de óxido mediante un mecanismo de fretting. Las partículas desprendidas de óxido producen un efecto de cuña, aumentando el factor de intensidad de tensiones al que se produce el cierre K_{cl} , reduciendo el valor de ΔK_{eff} , reduciendo en consecuencia la velocidad de crecimiento.

El cierre de grieta inducido por óxido se ve potenciado en determinadas condiciones, como son: ambientes oxidantes, pequeños valores de R y ΔK , superficies de grieta rugosas, bajo límite elástico del material y cualquier otra que potencie la oxidación, contacto y deslizamiento entre las superficies [37,44]. Su efecto sobre la tensión de cierre y la velocidad de crecimiento de la grieta es importante para valores de ΔK próximos al umbral y pequeños valores de R , donde es mayor el cierre producido y menor la parte de ésta debida a la plasticidad; además, cualquier variación de K_{op} tiene mayor influencia sobre da/dN . Por ello, su efecto sobre la vida a fatiga, normalmente sólo es significativo con estas condiciones de carga.

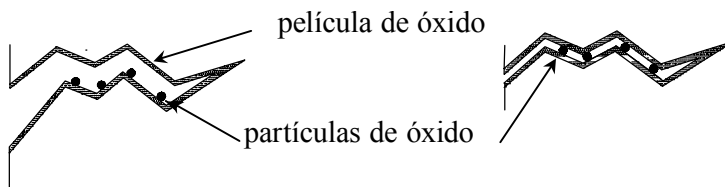


Figura 2.14.: Cierre de grieta inducido por óxido.

En cuanto al efecto de secuencia producido por este mecanismo, sólo se presenta adicionalmente a otros que hagan descender la velocidad de crecimiento a valores próximos al umbral después de una sobrecarga. En estos casos, al producirse la sobrecarga, la disminución de ΔK_{eff} a valores próximos al umbral ΔK_{th} , activa los mecanismos de crecimiento que incrementan el valor del cierre inducido por óxido[18].

2.4.4. Cierre de grieta inducido por rugosidad.

Con niveles bajos de tensión, como ocurre con niveles próximos al umbral, la zona plástica tiene dimensiones menores que una dimensión microestructural característica, por ejemplo, el tamaño de grano. En estas condiciones, el crecimiento de grieta se produce a lo largo de un solo sistema de deslizamiento, típico de crecimiento de grietas pequeñas (estado I de crecimiento de grieta por

fatiga). Esta forma de crecimiento da origen a una morfología altamente irregular que, conjuntamente con el desplazamiento de las superficies de la grieta en modo II y el desajuste entre las irregularidades de las superficies (figura 2.15), da origen a un aumento del valor de K_{cl} [17,45,46].

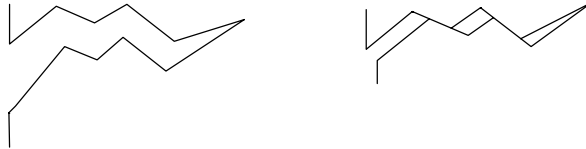


Figura 2.15.: *Cierre de grieta inducido por rugosidad.*

Entre los factores que potencian el cierre inducido por rugosidad pueden citarse: zona plástica menor que el tamaño de grano, que induce mecanismos de crecimiento por deslizamiento en un solo sistema; tamaño grande de grano y microestructura con tendencia a producir deslizamiento en un solo plano, lo que generará mayores asperezas; y deflexiones frecuentes, provocadas por bordes de grano, partículas de segunda fase o cambios bruscos de carga [37].

Este tipo de cierre de grieta, como en el caso del inducido por óxido, puede influir apreciablemente en el efecto de secuencia cuando una sobrecarga haga descender la velocidad de crecimiento a valores próximos al umbral. Entonces, se activan los mecanismos de crecimiento que incrementan el valor del cierre inducido por rugosidad de la superficie de la grieta, además de hacer mayor su valor en relación al total de las tensiones de cierre [18].

2.5. MODELOS ANALÍTICOS QUE CONSIDERAN EL EFECTO SECUENCIA.

En la bibliografía pueden encontrarse numerosos modelos analíticos o métodos de predicción del crecimiento de grietas por fatiga que intentan tener en cuenta los efectos de interacción debidos a la variabilidad de las cargas. En general, están basados en conceptos de la mecánica de la fractura elástica lineal y entran dentro de alguno de los siguientes grupos:

Modelos basados en la plastificación del frente de grieta:

asumen que los efectos de interacción de la carga (efecto de retardo) tienen lugar debido a la gran zona plástica desarrollada durante la sobrecarga. Los efectos permanecen activos hasta que la zona plástica desarrollada por los siguientes ciclos salgan de la zona plástica de la sobrecarga.

Modelos basados en el cierre de grieta:

asumen que los efectos de aceleración y retardo están causados por el cierre de grieta, el cual causa variaciones en la tensión de apertura y en el factor de intensidad de tensiones efectivo, ΔK_{ef} , cuando varían las cargas.

Modelos estadísticos:

relacionan la velocidad de crecimiento con un ΔK efectivo, como ΔK_{rms} , parámetro estadístico que es característico de la función de densidad de probabilidad de la historia de cargas.

2.5.1. Modelos basados en la plastificación del frente de grieta.

Se basan en relacionar la velocidad de crecimiento de la grieta bajo cargas de amplitud variable con la interacción de las zonas plásticas desarrolladas en el frente de la grieta. Entre ellos destacan, por ser los más utilizados y base de otros muchos, los propuestos por Wheeler [47] y Willemborg [48]. A partir de ellos se han desarrollado otros más sofisticados, se presenta aquí únicamente las características generales de estos dos modelos básicos.

Modelo de Wheeler

Wheeler plantea que el retardo en la velocidad de crecimiento que se produce tras una sobrecarga puede considerarse modificando la velocidad de crecimiento con carga de amplitud constante incluyendo un parámetro ϕ_i :

$$\frac{da}{dN_i} = \phi_i \frac{da}{dN} \quad (2.1)$$

donde da/dN es la velocidad de crecimiento con cargas de amplitud constante correspondiente a un rango del factor de intensidad de tensiones ΔK_i , una relación de tensiones R_i , en el ciclo de cargas i .

Este parámetro ϕ_i se puede expresar, para un ciclo cualquiera i después de una sobrecarga, en función del tamaño de la zona plástica asociada a dicho ciclo (r_i), del tamaño de la zona plástica producida por la sobrecarga (r_{OL}), de la longitud de grieta en el instante de la sobrecarga (a_o) y de la longitud en el instante de aplicación del ciclo (a_i) (ver figura 2.16).

$$\phi = \left(\frac{r_i}{a_o + r_{OL} - a_i} \right)^m \quad \text{Si } a_i + r_i < a_o + r_{OL} \quad (2.2)$$

$$\phi = 1 \quad \text{si } a_i + r_i \geq a_o + r_{OL} \quad (2.3)$$

donde m es el exponente de forma que debe obtenerse experimentalmente para cada material, geometría y espectro de carga.

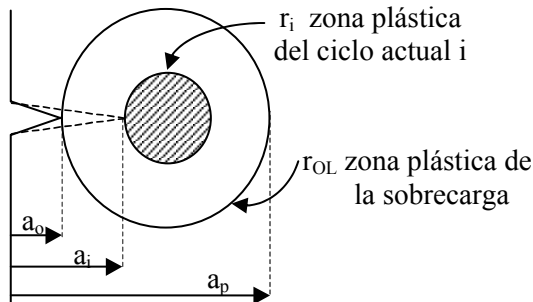


Figura 2.16: Representación esquemática del modelo de Wheeler.

El denominador de la ecuación $(a_o + r_{OL} - a_i)$, representa la distancia (r_r) desde el fondo de grieta hasta el punto más alejado dentro de la zona plástica generada por la sobrecarga. Es decir, este modelo predice que el retardo disminuye proporcionalmente a la penetración de la grieta en la zona plástica de la sobrecarga, y el valor máximo se alcanza inmediatamente después de la misma. El retardo se produce mientras la zona plástica del ciclo que actúe quede dentro de la zona plástica creada por la sobrecarga y se asume que cesa tan pronto como el límite o contorno de la primera toque o coincida con el contorno de la segunda (zona plástica creada por la sobrecarga, ver figura 2.17).

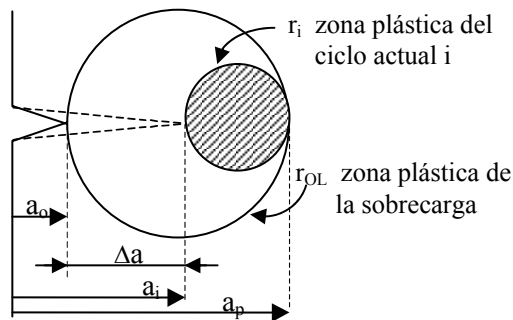


Figura 2.17: Situación hasta la que tendría efecto la sobrecarga según el modelo de Wheeler.

Los valores de ϕ_i variarán en un rango entre 0 y 1, el máximo retardo para valores próximos a la sobrecarga inmediatamente después de ésta, que irán aumentando hasta el valor de 1 en el cual el efecto de la sobrecarga, es decir, el retardo cesa.

Modelo de Willemborg

Con un enfoque distinto, Willemborg propone también un modelo basado en el tamaño de la zona plástica de la sobrecarga, pero en función de un factor de intensidad de tensiones efectivo. El modelo se basa en la hipótesis de que el retardo es causado por las tensiones residuales de compresión en el frente de la

grieta. Estas tensiones se desarrollan debido al sólido elástico que rodea la zona plástica y que provocan que esta zona entre en compresión pasada la sobrecarga.

De forma similar al modelo de Wheeler, se define a_p (figura 2.16)

$$a_p = a_o + r_{OL} \quad (2.4)$$

y empleando para definir el tamaño de zona plástica una expresión general tipo:

$$r = c \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2.5)$$

En el ciclo i , el factor de intensidad de tensiones K_r que se requiere para anular el efecto de la sobrecarga, deberá crear una zona plástica de tamaño: $r_p = a_p - a_i = r_{OL} - \Delta a$, que cumplirá la ecuación anterior:

$$r_p = c \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2.6)$$

o escrito de otra forma:

$$K_{maxr} = \sigma_{ys} \sqrt{\frac{a_p - a_i}{c}} = \sigma_{ys} \sqrt{\frac{r_{OL} - \Delta a}{c}} = K_{\max}^{OL} \left(1 - \frac{\Delta a}{r_{OL}} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

donde K_{\max}^{OL} es el factor de intensidad de tensiones máximo producido por la sobrecarga. Las tensiones S_{maxr} asociadas a K_{maxr} serán:

$$S_{maxr} = \frac{K_{maxr}}{f(a) \sqrt{\pi a_i}} \quad (2.8)$$

El modelo considera que se produce una tensión residual de compresión debida a la sobrecarga:

$$S_r = S_{maxr} - S_{maxi} \quad (2.9)$$

y el factor de intensidad de tensiones correspondiente será:

$$K_r = K_{maxr} - K_{maxi} = K_{\max}^{OL} \left(1 - \frac{\Delta a}{r_{OL}} \right)^{1/2} - K_{maxi} \quad (2.10)$$

donde S_{maxi} es la tensión máxima del ciclo i , y K_{maxi} el factor de intensidad de tensiones asociado a dicha tensión.

De acuerdo con ello, los valores efectivos máximo y mínimo del factor de intensidad de tensiones se pueden definir:

$$K_{max\text{eff}} = K_{maxi} - K_r = 2 K_{maxi} - K_{maxr} \quad (2.11)$$

$$K_{min\text{eff}} = K_{mini} - K_r = K_{mini} + K_{maxi} - K_{maxr} \quad (2.12)$$

Valores que serán positivos o nulos. Es decir, $K_{max\text{eff}}$ y $K_{min\text{eff}}$ se harán iguales a cero si se obtienen valores negativos. A partir de estos se define el rango efectivo:

$$\Delta K_{eff} = K_{max\text{eff}} - K_{min\text{eff}} \quad (2.13)$$

que pueden ser sustituidos en una ecuación tipo Paris:

$$\frac{da}{dN_i} = C(\Delta K_{eff})_i^m \quad (2.14)$$

o si fuese necesaria la relación efectiva de cargas:

$$R_{eff} = \frac{K_{min\text{eff}}}{K_{max\text{eff}}} \quad (2.15)$$

que pueden ser sustituidos en la ecuación de Forman:

$$\frac{da}{dN_i} = A \frac{(\Delta K_{eff})^n}{(1 - R_{eff}) K_c - \Delta K_{eff}} \quad (2.16)$$

El modelo de Willemborg tiene la ventaja respecto al de Wheeler de no necesitar el ajuste experimental de ningún parámetro. Sólo es necesario conocer σ_{ys} . Posteriormente al modelo original de Willemborg se han propuesto otros muchos, basados en la idea de las tensiones residuales [49,50] en los que se plantean diferentes formas de definir las y de determinar su evolución al ir creciendo la grieta. Entre las variantes más interesantes que incluyen la posibilidad de considerar aceleración y/o retardo, están los modelos propuestos por Johnson [51,52] y Chang et al. [53,54]. Estos, sin embargo, exigen la determinación experimental de algunos parámetros no necesarios en el modelo de Willemborg y otros derivados.

2.5.2. Modelos basados en el cierre de grieta

Estos modelos consideran el concepto del cierre de grieta para determinar la magnitud del retardo producido por una sobrecarga. Proponen una ecuación de crecimiento del tipo: $da/dN = f(\Delta K_{eff})$ en la que la determinación de ΔK_{eff} se basa en obtener las tensiones de cierre mediante ecuaciones empíricas basadas en valores experimentales, obtenidos a partir de ensayos de amplitud constante y de ensayos con una sobrecarga y con bloques de ellas, realizados para cada material. Un ejemplo de aproximación al valor de S_{op} producido por cargas de amplitud constante es la propuesta por Elber[28] para aluminio 2024-T3 con coeficientes de asimetría R entre -0.1 y 0.7 :

$$S_{op} = (0.5 + 0.1R + 0.4R^2)S_{max} \quad (2.17)$$

o la propuesta por Schijve para este mismo material [55]

$$S_{op} = (0.45 + 0.2R + 0.25R^2 + 0.1R^3)S_{max} \quad (2.18)$$

Una gran cantidad de relaciones empíricas propuestas pueden encontrarse en las referencias [56-58] para muy distintos materiales.

Existen diversos modelos que incluyen procedimientos numéricos más complicados para determinación de la tensión de cierre de grieta ciclo a ciclo, con cargas de amplitud variable [32-35, 59]. El modelo de cierre de grieta y predicción del crecimiento de grietas por fatiga usado en este estudio ha sido desarrollado por Newman [32] e implementado en el programa FASTRAN II [60]. A continuación se describe brevemente el procedimiento empleado por este método. Una descripción más detallada de alguna de sus variantes puede verse en la bibliografía [32, 61-63].

The Strip Yield Model

El modelo de cierre se basa en el modelo de grieta de Dugdale modificado para tener en cuenta las deformaciones plásticas residuales a lo largo de los bordes de la grieta en la estela plástica creada en el avance de la misma.

El tamaño de la zona plástica y el desplazamiento de las superficies de la grieta se obtiene numéricamente resolviendo dos problemas elásticos (figura 2.18):

- 1) una grieta ficticia de longitud $a+\rho$, donde ρ es la longitud de la región plástica, sometida a la tensión nominal remota
- 2) una tensión uniforme $-\sigma^*$ aplicada a la superficie correspondiente a la zona plástica, es decir, a lo largo de la longitud ρ , y que actuaría para mantener la grieta cerrada.

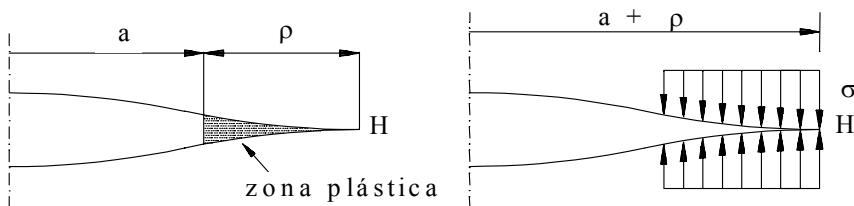


Figura 2.18: Problemas elásticos resueltos en el modelo de Dugdale.

Newman propone que el tamaño de zona plástica es:

$$\rho = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_{max}}{\alpha \sigma_0} \right) \quad (2.19)$$

con
$$\sigma_o = \frac{\sigma_{ys} + \sigma_u}{2} \quad (2.20)$$

donde σ_{ys} es el límite elástico, σ_u es la tensión de rotura y α es un coeficiente para diferenciar los estados de tensión. Para estados de tensión plana $\alpha = 1$, $\alpha=1.73$ para la condición de deformación plana de Irwin y $\alpha = 3$ para deformación plana.

Considerando el comportamiento plástico del material y el estado de tensiones, Newman propone un valor para la tensión efectiva de fluencia, σ^* :

$$\sigma^* = \alpha \sigma_o \quad (2.21)$$

Este modelo exige el conocimiento de una solución de K_I y de los desplazamientos para la geometría y longitud de grieta objeto de estudio, ante las dos hipótesis de carga indicadas. Para algunas geometrías se conocen soluciones analíticas, en otro caso se usan soluciones aproximadas.

Comparando la grieta real con la ideal del modelo de Dugdale, la longitud $L(x)$ (figura 2.19) se supone que corresponde al alargamiento total del material situado en la línea vertical correspondiente a la coordenada x . Es decir el aumento de distancia de dos puntos situados en una misma vertical, a una distancia x . Cuando la grieta crece, el alargamiento residual total del material, a una distancia $x < a$, una vez que el borde de la grieta a pasado, es $L_c(x_i)$.

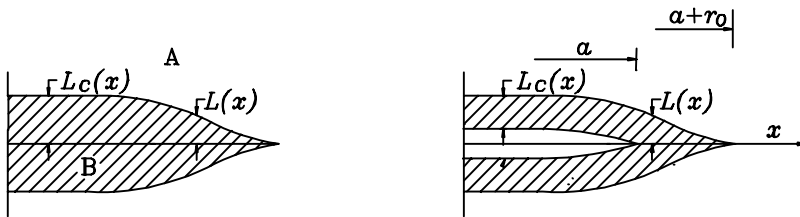


Figure 2.19: Zonas elástica (A) y plástica (B) consideradas en el modelo.

El estudio numérico distingue dos zonas en el material: una de comportamiento elástico, fuera de la línea de la grieta de Dugdale (A en la figura 2.19); y otra, de comportamiento rígido plástico (B). Esta última zona se discretiza con elementos de longitud L y ancho W , que pueden alargarse o acortarse plásticamente en función de las tensiones producidas en cada ciclo. El ancho W puede ser el mismo para cada elemento o variable, siendo menores los más próximos al borde (figura 2.20).

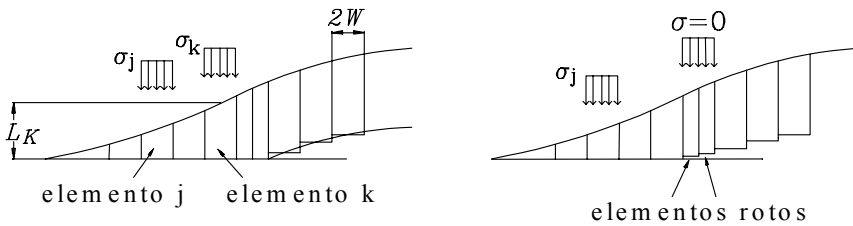


Figura 2.20: Discretización de la zona plástica en el frente de la grieta.

El proceso completo de simulación del comportamiento y cálculo de las tensiones de cierre, para cada incremento de longitud de la grieta, es el siguiente:

- A. Aplicación de la carga y determinación del tamaño de zona plástica, haciendo que no exista singularidad en el punto H al superponer los estados representados en la figura 2.18.
- B. Discretización de la zona B de la figura 2.19 en elementos, siendo suficientemente pequeños aquellos que están próximos al borde de la grieta (figura 2.20).
- C. Cálculo de los valores de L , esto es, los desplazamientos de la superficie de la grieta de Dugdale ante las cargas representadas en la figura 18. El segundo estado de carga se resuelve como superposición de n casos, correspondientes a una tensión σ_j en cada uno de los elementos en que se ha discretizado la zona plástica.

$$L_i = Sf(x_i) - \sum_{j=1}^n \sigma_j g(x_i, x_j) \quad i = 1, \dots, n \quad (2.22)$$

donde L_i es la longitud del elemento i , igual al desplazamiento de la superficie de la grieta de Dugdale, $Sf(x_i)$ es el desplazamiento producido en el punto x_i por la tensión nominal S y el término de la derecha representa la suma de los desplazamientos producidos en el punto i por las tensiones a que están sometidos todos los elementos, incluyendo el i . La función $g(x_i, x_j)$ es, el desplazamiento en el punto x_i , producido por una tensión unidad en el elemento j . La tensión σ_j tomará los valores $\sigma_j = \alpha\sigma_0$ en la zona plástica y $\sigma_j = 0$ en la superficie.

- D. Rotura del número necesario de elementos de la zona plástica para simular el crecimiento deseado. Esta se simula haciendo desaparecer la tensión en la zona de los elementos rotos (Fig. 2.20).
- E. Determinación de la nueva zona plástica, con la nueva longitud real de la grieta. En el primer ciclo de carga, el cálculo se hará como en el punto A. En ciclos sucesivos, si la tensión aplicada produce una zona plástica cuyo borde está más cerca del vértice de grieta que otra zona plástica producida anteriormente, se mantienen los límites previos de zona plástica.
- F. Nueva discretización de la zona plástica usando el mismo número de elementos que previamente a la rotura.
- G. Cálculo de los nuevos valores de L_i , con la carga máxima aplicada. Si la carga no ha modificado los límites de la zona plástica producida por una carga previa, esta determinación se hace mediante solución del sistema de ecuaciones obtenido de la compatibilidad de movimientos.

$$Sf(x_i) - L_i = \sum_{j=1}^n \sigma_j g(x_i, x_j) \quad i = 1, \dots, n \quad (2.23)$$

donde L_i , $Sf(x_i)$ y $g(x_i, x_j)$ tienen el mismo significado que en el punto C. Sin embargo, σ_j no estará siempre definida de antemano. Estará sometido a las siguientes restricciones:

En la zona plástica $-\sigma_0 \leq \sigma_j \leq \alpha \sigma_0$

En la superficie $-\sigma_0 \leq \sigma_j \leq 0$

La diferencia de valores de fluencia en tracción ($\alpha\sigma_0$) y en compresión ($-\sigma_0$) para los elementos de la zona plástica se justifica porque la singularidad en el borde de grieta en tracción hace que se esté más próximo a condiciones de deformación plana que en compresión, que se considera en tensión plana.

Para la solución del sistema de ecuaciones anterior, supuestos los L_i calculados en el punto C, en los puntos donde se violen las restricciones de σ_j se impondrán los valores límites de estas y se dejará L_i como variable a calcular. En los puntos en que σ_i se mantenga dentro de los límites indicados, L_i tendrá la misma longitud que previamente y la incógnita será σ_j .

- H. Aplicación de la carga mínima y nueva solución de la ecuación anterior, con la nueva carga, para determinar los desplazamientos plásticos residuales (L_i). En esta etapa se producirá fluencia de compresión en la zona plástica cíclica y puede que en algún elemento de la superficie.
- I. Cálculo de la tensión de apertura de la grieta (S_{op}). Puede definirse como la mínima tensión nominal para la que todos los puntos de la superficie sufran unos desplazamientos iguales o mayores a los producidos por una carga en la superficie de la grieta igual a las presiones de contacto. Con esa tensión se produce la separación del último par de puntos.

Ante un nuevo ciclo se volverá a repetir todo el proceso anterior, desde el punto C.

En todo el proceso indicado, se han hecho varias simplificaciones, además de las propias del modelo de Dugdale.

Una es la consideración de comportamiento rígido perfectamente plástico en la zona discretizada del material. La consideración de comportamiento rígido durante el régimen elástico es razonable, ya que en el resto del material del espécimen se está considerando comportamiento elástico, y la longitud de los elementos discretizados es despreciable.

Otra simplificación realizada es la suposición de estado monodimensional de tensiones en todos los elementos en que se ha discretizado la zona B de la figura 2.19. Con objeto de distinguir estados de tensión plana, deformación plana, o intermedios, se ha modificado la tensión de fluencia mediante el parámetro multiplicador α . Este coeficiente debe ser distinto en tracción que en compresión ya que la singularidad, con un gran gradiente de tensión, ocurre en el primer caso, pero no en el segundo. Con niveles bajos y medios de tensión, α será próximo a 3 en tracción y a 1 en compresión. En cualquier caso, el uso de estos valores de α no deja de ser una simplificación que, además, no distingue el comportamiento de la zona central del elemento, más próximo a deformación plana, del comportamiento de la superficie.

Este modelo, al igual que otros mencionados previamente, permite determinar la tensión de apertura S_{op} con cualquier longitud de grieta y después de cualquier ciclo del proceso de carga. Su aplicación a modelos de crecimiento se verá en el próximo apartado.

2.6. MÉTODOS DE PREDICCIÓN DEL CRECIMIENTO DE GRIETAS BAJO CARGAS DE AMPLITUD VARIABLE.

Para determinar la evolución de una grieta, es preciso establecer una serie de datos de partida, tales como condiciones de carga, tipo de material, geometría de la grieta, etc. Conocidos estos datos habrá que seleccionar una ley de crecimiento de grieta, expresada en general como:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R, \dots) \quad (2.24)$$

El cálculo del número de ciclos necesarios para extender la grieta desde una longitud inicial a_0 hasta una longitud a_f vendrá dado por:

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{f(\Delta K, R, \dots)} \quad (2.25)$$

El problema será calcular la integral anterior. Este cálculo depende del tipo de carga. Así, para el caso de carga de amplitud constante, la integración resulta directa y sólo es más o menos complicada por la propia expresión del factor de intensidad de tensiones en función de la longitud de grieta. En muchos casos esta información sólo está disponible mediante tablas o gráficos, por lo que la integración habrá que realizarla de forma numérica.

Con carga de amplitud variable, el proceso de integración se hace más complejo, ya que habrá que considerar la variabilidad de los ciclos de carga, la existencia de ciclos superpuestos que puede hacer necesario el uso de un método de contar ciclos y la consideración del efecto de secuencia. De forma general, los procedimientos se pueden clasificar en dos grupos: aquellos que emplean aproximaciones basadas en la determinación ciclo a ciclo del crecimiento y los que a partir de una definición estadística de las cargas determinan el valor esperado de la vida a fatiga.

La aproximación ciclo a ciclo consiste en calcular el incremento de longitud de grieta que se produce en cada ciclo, e ir sumando sucesivamente los incrementos para obtener la evolución de la longitud de la grieta con el número de

ciclos. Entre los métodos ciclo a ciclo pueden distinguirse a su vez dos grupos: los que hacen la integración lineal, sin tener en cuenta el efecto de secuencia, y los que consideran algún tipo de efecto de secuencia. Entre los más empleados de estos últimos pueden mencionarse los derivados del modelo de Willemborg y los que aplican el concepto de cierre de grieta.

Los programas de análisis ciclo a ciclo incluyen una serie de pasos o módulos, que en general responden al esquema que se indican a continuación y se representa en la figura 2.21:

1. Definición de la geometría del elemento y longitud inicial de la grieta a_0 .
2. Determinación, para la geometría considerada, de la función $f(a)$ que permitirá determinar K , en función de la longitud de grieta y de la tensión nominal S :
$$K = f(a) S \sqrt{\pi a}$$
 Puede ser determinada por puntos ó analíticamente. Incluirá subrutinas de cálculo, librería de funciones para distintas geometrías ó permitirá el acceso a un método numérico – método de elementos finitos, por ejemplo- para el cálculo de distintos puntos de la función.
3. Definición de la ley de crecimiento $\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R, \dots)$ y del modelo de retardo a aplicar.
4. Definición de los parámetros del modelo de crecimiento, por ejemplo K_c , K_{th} , el exponente o constantes de la ecuación de crecimiento, etc, y los del modelo de retardo, si se aplica.
5. Obtención de la historia de tensiones. Incluirá en caso necesario una subrutina para contar ciclos a partir de historias de carga suministradas y para generación ciclo a ciclo de la señal a considerar en el análisis. La salida de esta subrutina serán los distintos valores de S_{min} y S_{max} a aplicar secuencialmente al modelo de crecimiento.

6. Determinación de K_{\max} y ΔK a partir de $f(a)$, longitud de la grieta, ΔS y S_{\max} .
7. Aplicación del modelo de retardo en caso necesario. Incluirá el cálculo ciclo a ciclo de los parámetros del modelo a incluir en la ecuación de crecimiento. Por ejemplo, en los modelos basados en el cierre de la grieta, habrá que calcular K_{op} , y de ahí, los otros parámetros a incluir en la ecuación de crecimiento correspondiente, por ejemplo, ΔK_{eff} .
8. Determinación del incremento de longitud producido en cada ciclo en función de los parámetros calculados.

$$\Delta a_i = \left. \frac{da}{dN} \right|_i$$

y cálculo de la nueva longitud:
$$a_i = a_{i-1} + \Delta a_i = a_{i-1} + \left. \frac{da}{dN} \right|_i$$

9. Comprobación de que $a_i < a_f$ y vuelta al punto 5 para continuar el proceso.

Este proceso puede considerarse general para cualquier método de predicción empleado. Los elementos diferenciadores entre unos métodos y otros estarán por ejemplo en: el método considerado para tener en cuenta el efecto de secuencia, los distintos tipos de leyes de crecimiento empleadas (asociadas a veces directamente al método de consideración del efecto de secuencia), el método de contar ciclos (a veces no se incluye ninguno admitiendo directamente una secuencia de picos y valles) o la determinación de $F(a)$ (a veces obtenido directamente de una tabla de valores entre los que interpolar).

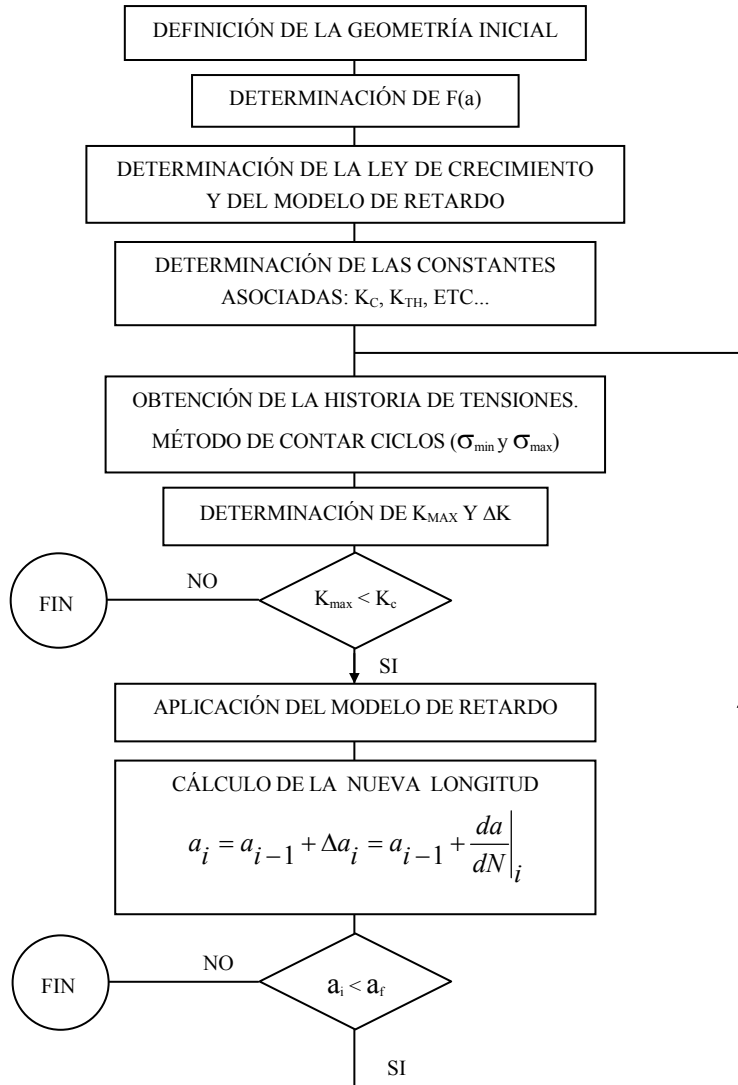


Figura 2.21: Diagrama de flujo genérico de un programa de análisis de crecimiento de grietas ciclo a ciclo.

2.6.1. Análisis mediante métodos sin consideración del efecto de secuencia.

De los métodos de análisis de crecimiento el más simple es el de acumulación lineal sin consideración del efecto de secuencia. En ese caso debe emplearse un método de contar ciclos, por ejemplo rain-flow, y organizada la secuencia de ciclos a aplicar, solo habrá que determinar ciclo a ciclo K_{\max} y K_{\min} y el incremento de longitud producido en el ciclo $(da/dN)_i$, en el orden mostrado en la figura 2.21.

Estos métodos que no incluyen los efectos de interacción de las cargas tienden a producir resultados conservativos en general [54,64-68], con vidas de crecimiento menores que las obtenidas experimentalmente. Cuando las historias de carga producen efectos de secuencia poco importantes, los resultados suelen ser suficientemente aproximados en comparación con los de modelos que si incluyen dichos efectos y normalmente, aunque no siempre [52], más conservativos. Si los efectos de secuencia producidos por la historia de carga son importantes, las duraciones predichas pueden ser bastante distintas a las reales: menores, si el efecto predominante es retardo, que es lo usual; y mayores, si existen sobrecargas importantes de compresión que produzcan un efecto de aceleración más acusado que el de retardo generado por las de tracción, que es mucho menos frecuente.

Debido a que los resultados producidos son generalmente conservativos, que los errores, si no hay sobrecargas importantes, no son muy grandes, y que son de fácil aplicación su uso con cargas aleatorias sin sobrecargas importantes es bastante frecuente. En estos casos, los resultados obtenidos, incluso sin aplicar un método de contar ciclos pueden ser aceptables [54]. En cualquier caso, es difícil conocer previamente el grado de precisión alcanzado por la predicción. Por ello, antes de adoptarlo como método de análisis en un caso determinado, debe comprobarse la importancia del efecto de secuencia producido por el tipo de historia de carga a aplicar, comparando los resultados con los de otros métodos que incluyan dicho efecto o con ensayos con el mismo material y cargas

similares. Dicha comparación puede servir para ajustar los parámetros del modelo de crecimiento al material y tipo de carga, mejorando las predicciones.

2.6.2. Análisis mediante métodos basados en el modelo de Willemborg.

En general, el esquema de funcionamiento de estos procedimientos es como el mostrado en la figura 2.21. La diferencia con los procedimientos de acumulación lineal radica en los módulos 5 y 7 del proceso, correspondientes a la generación de la historia de carga y a la aplicación del modelo de retardo, respectivamente.

En lo que a la generación de la secuencia de ciclos a analizar respecta, la única diferencia con los procedimientos de acumulación lineal se presenta en que al igual que en ellos, debe emplearse un método de contar ciclos, sin embargo, para poder considerar el efecto de secuencia, los ciclos deben aplicarse al modelo de retardo en el mismo orden en que se producen. Por ello, el método de contar ciclos empleado debe almacenarlos de forma que permitan su aplicación posterior manteniendo el orden indicado.

Entre los métodos más completos que emplean el concepto de tensiones residuales del modelo de Willemborg, pueden citarse los propuestos por Chang [54] y Johnson [52]. Ambos son modificaciones del modelo de Willemborg generalizado [48], y aunque producen resultados bastante aceptables [69] son muy empíricos, con poco fundamento en los mecanismos reales de retardo y necesitan la determinación experimental, mediante un proceso complicado, de varios parámetros dependientes del material. Por ello, aunque se emplean, sobre todo en la industria aeronáutica, con materiales muy concretos, es complicado su uso de forma general, existiendo actualmente una tendencia al empleo de métodos basados en el concepto de cierre de grieta.

2.6.3. Análisis basados en el concepto de cierre de grieta.

Existen varios programas para el análisis del crecimiento de grietas mediante métodos basados en el concepto de cierre de grieta. Unos emplean modelos empíricos para determinar la tensión de apertura en cada ciclo [70], mientras otros hacen uso de alguna de las distintas variantes del strip yield model [32,62,71]. Pueden ser programas más o menos completos de análisis del crecimiento, formados por los módulos indicados en la figura 2.21, incluyendo el tratamiento de las historias de carga con generación ciclo a ciclo de la historia de tensiones, o no lo incluyen y deben recibirla como dato ciclo a ciclo. El uso de estos métodos elimina la necesidad de aplicación de un método de contar ciclos. Además tienen la ventaja, respecto a los basados en tensiones residuales, de necesitar un número menor de parámetros a definir experimentalmente.

Las leyes de crecimiento empleadas pueden ser de cualquier tipo, bien sea una relación da/dN definida por puntos en función de ΔK_{eff} , con interpolación lineal entre los puntos definidos, la propuesta por Elber [28]

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_{eff}^n$$

o más complicada, como la propuesta por Newman:

$$\frac{da}{dN} = C_1 \Delta K_{eff}^{C_2} \frac{1 - \left(\frac{\Delta K_0}{\Delta K_{eff}} \right)^2}{1 - \left(\frac{K_{max}}{C_5} \right)^2} \quad \text{donde} \quad \Delta K_0 = C_3 \left(1 - C_4 \frac{S_o}{S_{max}} \right)$$

En los métodos basados en modelos empíricos, además de una expresión para la tensión de apertura del tipo de las propuestas por de Koning [70], dependientes de las tensiones máximas y mínimas producidas en cada ciclo y los precedentes, es necesario definir la ley de evolución de dicha tensión cuando la grieta crece dentro de la zona plástica. Si la historia de carga tiende a producir una tensión de apertura aproximadamente constante durante el crecimiento de la grieta

y el incremento de longitud entre sobrecargas es bastante menor que el tamaño de la zona plástica producida por la sobrecarga, la ley de evolución de la tensión de apertura con el avance de la grieta dentro de la zona plástica tiene poco efecto en el resultado. En ese caso, la precisión de la ley definida no es crítica. Las expresiones de las tensiones de apertura en función de los valores máximos y mínimos de los ciclos se obtienen normalmente a partir de ensayos con cargas de amplitud constante o de simulación algún método analítico o numérico, por ejemplo, el método de los elementos finitos.

Los métodos basados en el strip yield model son los que producen generalmente mejores resultados y necesitan menor número de parámetros y funciones a determinar experimentalmente. Además, sin nuevos parámetros, permiten obtener buenas aproximaciones del crecimiento de grietas cortas. Sin embargo tienen dos inconvenientes en relación a los otros procedimientos citados: es necesario conocer previamente las funciones $f(x_i)$ y $g(x_i, x_j)$, para la geometría y forma de carga de que se trate, lo que no ocurre en muchos casos; y el tiempo de cálculo ciclo a ciclo de la evolución de la tensión de apertura hace excesivamente lento el análisis, y a veces, imposible. El primer problema va resolviéndose progresivamente con el desarrollo de aproximaciones para nuevos casos, siendo actualmente posible la solución de variadas geometrías y formas de carga [60,63].

Por otro lado, es conocido que la tensión de apertura producida por una sobrecarga varía muy poco en los ciclos de menor amplitud siguientes a ésta, mientras la grieta va creciendo por la zona plástica creada. Para disminuir el tiempo de cálculo, puede emplearse un procedimiento en el que se sumen los incrementos de longitud cada ciclo, pero no se determine la tensión de apertura más que cada cierto número de ciclos o incremento de longitud. El error en las predicciones es pequeño si el cálculo y actualización de las tensiones de apertura se hace para un crecimiento de grieta entre el 1 y el 5% del tamaño de la zona plástica creada [32,63].

El proceso seguido entre una actualización y otra puede esquematizarse como se indica en la figura 2.22. Después de un ciclo de cálculo de la tensión de apertura, se conocen S_{op} , las longitudes de los elementos L_i , el tamaño de zona plástica, etc. Conocida S_{op} , y las tensiones máxima y mínima de cada ciclo, puede determinarse el incremento de longitud Δa_i producido en cada uno y el incremento Δa^* producido desde la última actualización. Durante esos ciclos se almacenan los valores de la máxima tensión producida S_{max} , la mínima tensión producida entre todos los ciclos previos al de la máxima tensión (S_{minb}) y la mínima posterior a la máxima almacenada (S_{mina}). Alcanzado el valor límite para la actualización Δa_{lim}^* , se aplica el proceso de cálculo de las tensiones de cierre en la forma mostrada en la figura 2.23. Los números entre paréntesis en los bloques del esquema corresponden con los pasos indicados en el apartado 2.5.2.

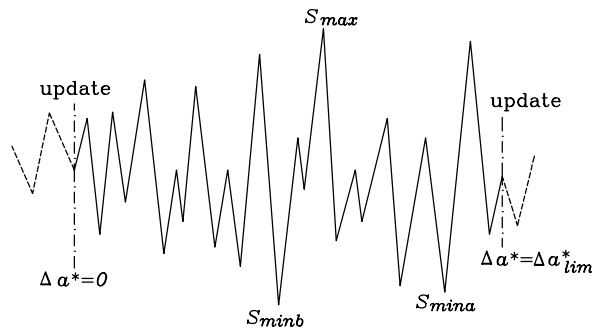


Figura 2.22: Secuencia de cargas en el cálculo de S_{op} entre una actualización y otra.

A veces, el número de ciclos necesarios para hacer crecer la grieta tal porcentaje es muy alto. Para evitar en estos casos que una sobrecarga producida en uno de los ciclos siguientes a una actualización de la tensión de apertura no se tenga en cuenta hasta la siguiente actualización muchos ciclos después, puede ponerse también un límite al número de ciclos máximo entre dos actualizaciones, por ejemplo [32], 300 ciclos.

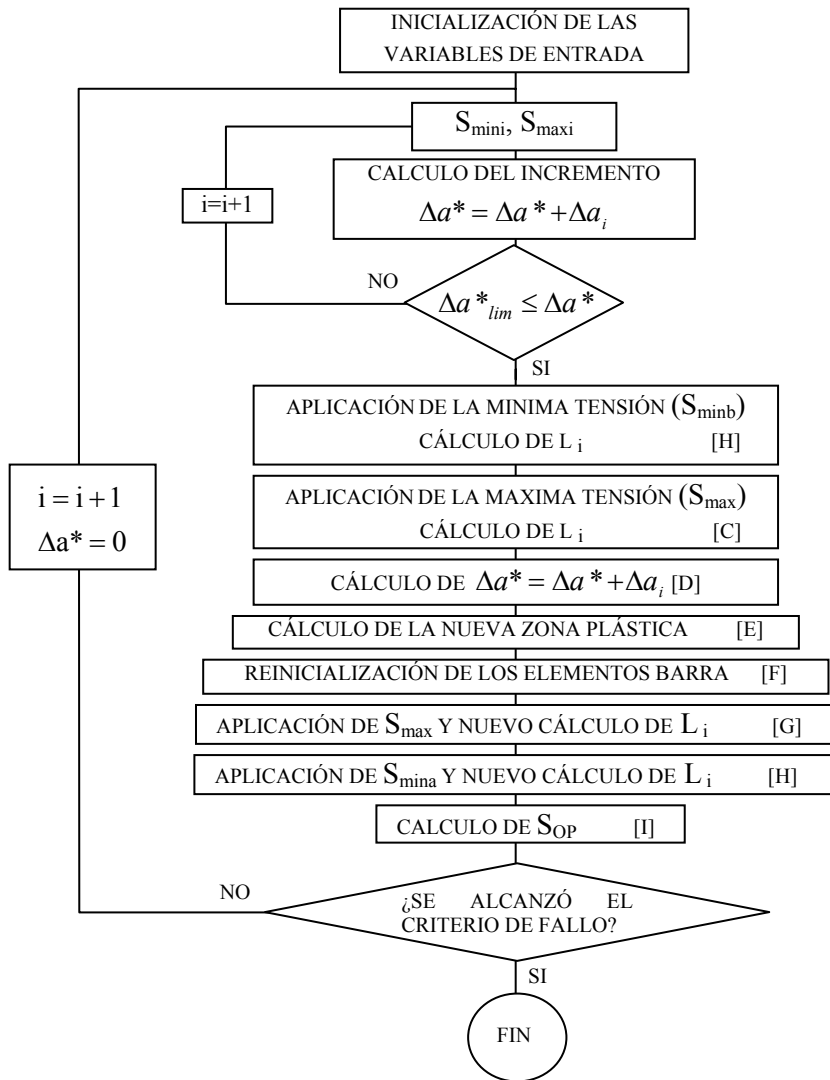


Figura 2.23: Diagrama de flujo para el cálculo y actualización de las tensiones de cierre.

2.6.4. Métodos de predicción basados en la definición estadística de las cargas

Una alternativa al análisis ciclo a ciclo del crecimiento de grietas con cargas de amplitud variable es el análisis global, basado en la descripción estadística de las cargas y determinando el incremento de longitud esperado para un número de ciclos determinado, la velocidad media de crecimiento o la vida esperada hasta la rotura.

Los primeros intentos de caracterizar estadísticamente una historia de carga para el análisis del crecimiento de grieta, trataron de definir un rango equivalente (ΔK_{eq} o ΔS_{eq}) que aplicado con amplitud constante produjera una velocidad de crecimiento igual a la media producida con la historia de carga de amplitud variable. Barsom [73], a partir del análisis del crecimiento de grietas en varios puentes de acero con cargas de amplitud variable con $S_{min}=0$, definió la ley de crecimiento

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_{rms}^n \quad (2.26)$$

donde C y n son las constantes de la ley de crecimiento obtenidas con ensayos de amplitud constante y ΔK_{rms} se define como:

$$\Delta K_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta K_i^2} \quad (2.27)$$

Posteriormente se han propuesto otras variantes de esta aproximación [74-77]. Por ejemplo empleando otro parámetro para definir el valor de ΔS_{eq} , el rango medio del proceso [78], definido:

$$S_{mr} = \langle S_{max} \rangle - \langle S_{min} \rangle \quad (2.28)$$

Más recientemente, Hudson [79] propuso un modelo en el que la velocidad media puede aproximarse por la ecuación

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K_{rms}^n}{(1 - R_{rms}) K_c - \Delta K_{rms}} \quad (2.29)$$

definiendo

$$R_{rms} = \frac{(S_{min})_{rms}}{(S_{max})_{rms}} \quad (2.30)$$

$$\Delta K_{rms} = (K_{max})_{rms} - (K_{min})_{rms} = [(S_{max})_{rms} - (S_{min})_{rms}] f(a) \sqrt{\pi a} \quad (2.31)$$

Hudson obtuvo resultados comparables a los obtenidos con procedimientos ciclo a ciclo que incluyen efectos de secuencia [69]. De 11 casos analizados con diferentes historias, obtuvo valores cuya relación con los registrados en ensayos estaba en un rango comprendido entre 0.82 y 2.13.

En el caso de procesos aleatorios de carga, estos modelos, incluido el de Barsom con $S_{min}=0$, tienen la ventaja de permitir la determinación de las ΔS_{eq} a partir de las distribuciones de máximos y mínimos, más fáciles de obtener que la distribución de rangos, necesarias para otros modelos que se describen a continuación. Sin embargo, tienen el inconveniente de no relacionar directamente el crecimiento de las grietas con los rangos efectivos. Por ello, se han propuesto otros modelos que, a partir de la función de densidad de probabilidad de rangos $p(\Delta S)$, determinan: ΔS_{eq} , [80-85]. En este caso, expresando de una forma general la ley de crecimiento

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta S, a, \dots) \quad (2.32)$$

el valor esperado de da/dN cuando la grieta tiene una longitud a_i será [86]

$$\frac{da}{dN} \Big|_{a_i} = \int_0^{\infty} f(\Delta S, a_i, \dots) p(\Delta S) d(\Delta S) \quad (2.33)$$

Integrando esta ecuación puede obtenerse el número de ciclos para el crecimiento de la grieta desde una longitud inicial a_0 hasta otra a_f

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{\int_0^{\infty} f(\Delta S, a_i, \dots) p(\Delta S) d(\Delta S)} \quad (2.34)$$

Si la ley de crecimiento $da/dN=f(\Delta S, a, \dots)$ permite la separación de los de los términos asociados al rango de tensiones y longitud de grieta, como por ejemplo en la ecuación de Paris:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta S^n = g(a) (\Delta S)^n \quad (2.35)$$

la ecuación anterior puede expresarse

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{g(a) \int_0^{\infty} (\Delta S)^n p(\Delta S) d(\Delta S)} = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{g(a) (\Delta S_{eq})^n} \quad (2.36)$$

donde ΔS_{eq} es la raíz media enésima de ΔS (ΔS_{rnn}):

$$\Delta S_{eq} = \sqrt[n]{\int_0^{\infty} (\Delta S)^n p(\Delta S) d(\Delta S)} \quad (2.37)$$

La aproximación general anterior (2.34) permite emplear cualquier ecuación de crecimiento $da/dN=f(\Delta S, a,..)$, incluso considerando el cierre de grieta [87]. Por ejemplo, Zapatero [86], para el análisis del crecimiento de grieta de algunos de los casos ensayados en los programas experimentales de ASTM y SAE [88,89], empleó la modificación de la ecuación de crecimiento de Forman

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K_{eff}^n}{(1 - R_m) K_c - \Delta K_{eff}} \quad \Delta k_{eff} > \Delta K_0 \quad (2.38)$$

$$\frac{da}{dN} = 0 \quad \Delta k_{eff} > \Delta K_0 \quad (2.39)$$

donde

$$\Delta k_0 = \Delta K_{th} \frac{1 - \frac{S_{op}}{S_{max}}}{1 - \frac{S_{min}}{S_{max}}} \quad R_m = \frac{\langle S_{min} \rangle}{\langle S_{max} \rangle} \quad (2.40)$$

y considerando S_{op}/S_{max} constante para todo el registro, los resultados obtenidos son comparables a los obtenidos por simulación ciclo a ciclo.

Los procedimientos globales expuestos exigen la determinación de la función de densidad de probabilidad de rangos $p(\Delta S)$. Tanto si ΔS representa los rangos de rain-flow o las diferencias entre mínimos y máximos consecutivos, $p(\Delta S)$ puede aproximarse a partir de los histogramas obtenidos del análisis de los registros [86]. Con algunos tipos de procesos aleatorios, puede aproximarse directamente, a partir de la densidad espectral u otras características estadísticas de los mismos [90-92].

El principal inconveniente de este tipo de modelos es la dificultad de considerar el efecto de secuencia. En muchos casos, esta dificultad puede ser parcialmente resuelta definiendo una tensión de apertura equivalente ($S_{op,eq}$), constante durante todo el proceso de crecimiento, que tenga en cuenta de alguna forma este efecto. Cuando los efectos de secuencia proceden de sobrecargas de tracción de distribución irregular, exógenas al proceso aleatorio, no es posible

definir ningún tipo de $S_{op,eq}$, ya que ésta será función del espaciado entre las sobrecargas. La suposición de espaciado regular puede ser no conservativa.

En cualquier caso, son muchos los casos de cargas de amplitud variable en que los efectos de interacción no son importantes, por ejemplo en vibraciones aleatorias, donde los picos más altos de tensión proceden del mismo proceso que el resto. En estas circunstancias, los métodos globales producen resultados tan buenos como otros que emplean simulación ciclo a ciclo, que consumen más tiempo de análisis y, en muchos casos, necesitan además la determinación experimental de varios parámetros del modelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] Domínguez J., Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading, Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures, Andrea Carpinteri (Editor) Elsevier Science, Vol. 2, pp 955-997, 1994.
- [2] Potter J.M. and Watanabe R.T., Eds., Development of Fatigue Loading Spectra, ASTM STP 1006, 1989.
- [3] Broek D., The Practical Use of Fracture Mechanics, Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [4] Schütz W. and Heuler P., The How and Why of Variable Amplitude Testing, Fatigue 87, R.O. Ritchie and E.A. Starke, Jr., Eds, EMAS, pp. 479-494, 1987.
- [5] Schütz W., in Fatigue Design , ESIS 16, Mech. Engng. Publ., pp 1-17, 1993.
- [6] Ten Have A.A., European Approaches in Standard Spectrum Development, Development of Fatigue Loading Spectra, J. M. Potter and R. T. Watanabe Eds., ASTM STP 1006, pp. 17-35, 1989.
- [7] ASTM E 1049-85, Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis, 1985.
- [8] Schijve J., The Significance of Flight-Simulation Fatigue Tests, Report LR-466, Delft University of Technology, The Netherlands, 1985.
- [9] Fuchs H.O., Nelson D.V., Burke M. A., and Toomay T. L., Shortcuts in Cumulative Damage Analysis, Fatigue under Complex Loading: Analyses and Experiments, R.M. Wetzel, Ed., Society of Automotive Engineers, pp. 145-162, 1977.

- [10] Nelson D.V. and Fuchs H.O., Predictions of Cumulative Fatigue Damage Using Condensed Load Histories, *Fatigue under Complex Loading: Analyses and Experiments*, R.M., Wetzel, Ed., Society of Automotive Engineers, pp. 163-187, 1977.
- [11] Fowler K. R. and Watanabe R. T., Development of Jet Transport Airframe Fatigue Test Spectra, *Development of Fatigue Loading Spectra*, J.M. Potter and R.T. Watanabe, Eds., ASTM STP 1006, pp. 36-64, 1989.
- [12] Hudson C. M. and Hardrath M. F., Effect of the Changing Stress Amplitude on the Rate of Fatigue Crack Propagation in Two Aluminum Alloys, NASA TN-D-960, 1961.
- [13] Schijve J., Fatigue Crack Propagation in Light Alloy Sheet Material and Structures, Report MP-195, National Aerospace Labs., The Netherlands, 1960.
- [14] Probst E. P. and Hillberry, B. M. , Fatigue Crack Delay and Arrest Due to Single Peak Tensile Overloads, AIAA Paper No. 73-325, 1973.
- [15] Von Euw E. F. J., Hertzberg R. W. and Roberts R., Delay Effects in Fatigue Crack Propagation, Stress Analysis and Growth of Cracks, ASTM STP 513, pp. 230-259, 1972.
- [16] Nelson D. V., Review of Fatigue-Crack-Growth Prediction Methods, *Experimental Mechanics*, Vol. 17, pp. 41-49, 1977.
- [17] Suresh S., Micromechanisms of Fatigue Crack Growth Retardation Following Overloads, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 18, pp.577-593, 1983.
- [18] Suresh S., *Fatigue of Materials*, Cambridge University Press, 1991.

- [19] Topper T. H. and Yu M. T., The Effect of Overloads on Threshold and Crack Growth, *International Journal of Fatigue*, Vol. 7, pp. 159-164, 1985.
- [20] Hsu T. M. and Lassiter L. W., Affects of Compressive Overloads on Fatigue Crack Growth, *AIAA Paper No. 74-365*, 1974.
- [21] Alzos W. X., Skat A. C. and Hillberry, Effect of Single Overload/Underload Cycles on Fatigue Crack Propagation, *Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads*, ASTM STP 595, pp. 41-60, 1976.
- [22] Marissen R., Trautman K. H. and Nowack H., The Influence of Compression Loads and of dK/da on the Crack Propagation Under Variable Amplitude Loading, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, pp. 863-879, 1984.
- [23] Dawicke D. S., Overload and Underload Effects on the Fatigue Crack Growth Behavior of the 2024-T3 Aluminum Alloy, *NASA Contractor Report 201668*, 1997.
- [24] Mc Millan J.C. and Pelloux R.M.N., Fatigue Crack Propagation Under Program and Random Loads, *Fatigue Crack Propagation*, ASTM STP 415, pp. 505-535, 1967.
- [25] Ward-Close C.M., Blom A.F. and Ritchie R.O., Mechanisms Associated with Transient Fatigue Crack Growth Under Variable-Amplitude Loading: an Experimental and Numerical Study, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 32, pp. 613-638, 1989.
- [26] Damri D. and Knott J.F., Transient Retardations in Fatigue Crack Growth Following a Single Peak Overload, *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, Vol. 14, pp. 709-719, 1991.

- [27] Suresh S. and Ritchie R.O., Near-Threshold Fatigue Crack Propagation: a Perspective on the Role of Crack Closure, Fatigue Crack Growth Threshold Concepts, D. Davidson and R.O. Ritchie, Eds., The Metallurgical Society of AIME, pp. 227-261, 1984.
- [28] Elber W., The Significance of Fatigue Crack Closure, Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486, pp. 230-242, 1971.
- [29] Fleck N. A., Influence of Stress State on Crack Growth Retardation, Basic Questions in Fatigue: Volume I, J. T. Fong and R. J. Fields, Eds., ASTM STP 924, p. 157-183, 1988.
- [30] Budiansky B. and Hutchinson J.W., Analysis of Closure in Fatigue Crack Growth, Journal of Applied Mechanics, Vol. 45, pp. 267-276, 1978.
- [31] Führung H. and Seeger T., Dugdale Crack Closure Analysis of Fatigue Crack Under Constant Amplitude Loading, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 99-122, 1979.
- [32] Newman J.C., A Crack Closure Model for Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading, Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading, J. B. Chang and C. M. Hudson (Eds.), ASTM STP 748, pp 53-84, 1981.
- [33] McClung R.C. and Sehitoglu H., On the Finite Element Analysis of Fatigue Crack Closure, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 33, pp. 237-272, 1989.
- [34] Chermahini R.G., Shivakumar K.N., Newman J.C. and Blom A.F., Three-dimensional Aspects of Plasticity Induced Fatigue Crack Closure, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 34, pp. 393-402, 1989.

- [35] De Koning A.U., A Simple Crack Closure Model for Prediction of Fatigue Crack Growth Rates Under Variable Amplitude Loading, NLR MP 8006 U, 1980.
- [36] Newman J.C. and Elber W., (Eds.), Mechanics of Fatigue Crack Closure, ASTM STP 982, 1988.
- [37] Suresh S. and Ritchie R.O., Near-Threshold Fatigue Crack Propagation: a Perspective on the Role of Crack Closure, Fatigue Crack Growth Threshold Concepts, D. Davidson and R.O. Ritchie, Eds., The Metallurgical Society of AIME, pp. 227-261, 1984.
- [38] Suresh S. and Ritchie R.O., A Geometric Model for Fatigue Crack Closure Induced by Fracture Surface Morphology, Metallurgical Transactions, Vol. 13A, pp. 1627-1631, 1982.
- [39] Bucci R.J., Thakker A.B., Sanders T.H., Sawtell R.R. and Staley J. T., Ranking 7XXX Aluminum Alloy Fatigue Crack Growth Resistance Under Constant Amplitude and Spectrum Loading, Effect of Load Spectrum Variables on Fatigue Crack Initiation and Propagation, D.F. Bryan and J.M. Potter, Eds., ASTM STP 714, pp. 41-78, 1980.
- [40] Vecchio K.S., Hertzberg R.W. and Jaccard R., On the Overload Induced Fatigue Crack Propagation Behavior in Aluminum and Steel Alloys, Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol. 7, pp.181-194, 1984.
- [41] Lankford J. and Davidson D.L., The Effect of Overloads Upon Fatigue Crack Tip Opening Displacement and Crack Tip Opening/Closing Loads in Aluminum Alloys, Advances in Fracture Research, D. François (Ed.), Vol. 2, pp. 899-906, Pergamon Press, 1981.

- [42] Suresh S., Vasudevan A. K., Tosten M.H. and Howell P. R., Microscopic and Macroscopic Aspects of Fracture in Lithium-containing Aluminum Alloys, *Acta Metallurgica*, Vol. 35, pp. 25-46, 1987.
- [43] Suresh S., Zamiski G. F. and Ritchie R. O., Oxide-induced Crack Closure: an Explanation for Near-threshold Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior, *Metallurgical Transactions*, Vol. 12 A, pp. 1435-1443, 1981.
- [44] Liaw P. K., Leax T. R. and Logsdon W. A., Near-threshold Fatigue Crack Growth Behavior in Metals, *Acta Metallurgica* Vol. 31, pp. 1581-1587, 1983.
- [45] Davidson D.L., Incorporating Threshold and Environmental Effects into the Damage Accumulation Model for Fatigue Crack Growth, *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol 3, pp. 229-236, 1981.
- [46] Gray G.T., Williams J.C. and Thompson A.W., Roughness-induced Crack Closure: an Explanation for Microstructurally Sensitive Fatigue Crack Growth, *Metallurgical Transactions*, Vol. 14A, pp. 421-433, 1983.
- [47] Wheeler O.E., Spectrum Loading and Crack Growth, *Journal of Basic Engineering*, *Transactions of the ASME*, Vol. 94, pp. 181-186, 1972.
- [48] Willemborg J. D., Engle R. M. and Wood H. A., A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept. AFFDL-TM-FBR-71-1, 1971.
- [49] Gallagher J.P., A Generalized Development of Yield Zone Models, AFFDL-TM-FBR-74-28, Air Force Flight Dynamics Laboratory, 1974.
- [50] Rudd J.L. and Engle R.M. Jr., Crack Growth Behavior of Center-Cracked Panels under Random Spectrum Loading, *Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading*, J.B. Chang and C.M. Hudson, Eds., ASTM STP 748, pp. 103-114, 1981.

- [51] Johnson W. S., Multi-parameter Yield Zone Model for Predicting Spectrum Crack Growth, NASA Tech. Mem. 81890, 1980.
- [52] Johnson W.S., Multi-Parameter Yield Zone Model for Predicting Spectrum Crack Growth, Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading, J.B. Chang and C.M. Hudson, Eds., ASTM STP 748, pp. 85-102, 1981.
- [53] Chang J.B., Engle R.M. and Szamossi M., An Improved Methodology for Predicting Random Spectrum Load Interaction Effects on Fatigue Crack Growth, Advances in Fracture Research, Proceedings of the 5th International Conference on Fracture (ICF5), Pergamon Press, Vol. 6, pp.2761-2769, 1981.
- [54] Chang J.B., Szamossi M. and Liu K.W., Random Spectrum Fatigue Crack Life Predictions With or Without Considering Load Interactions, Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading, J.B. Chang and C.M. Hudson, Eds., ASTM STP 748, pp. 115-132, 1981.
- [55] Schijve J., Some Formulas for Crack Opening Stress Level, Engng. Fracture Mech. Vol. 14, pp. 461-465, 1981.
- [56] Bachmann V. and Munz D., Crack Closure in Fatigue of Titanium Alloy, Int. J. Fracture11,pp. 713-716, 1975.
- [57] Chand S. and Garg S. B. L., Crack Propagation under Constant Amplitude Loading, Engng. Fracture Mech. 21, pp. 1-30, 1985.
- [58] Bell P. D. and Crager M., Crack Growth Analysis for Arbitrary Specimen Loading, AFFDL-TR-74-129, 1974.

- [59] Ibsø J. B. and Agerskov H., An analytical Model for Fatigue Life Prediction Based on Fracture Mechanics and Crack Closure, *J. Construct. Steel Res.*, Vol. 37, No. 3, pp. 229-261, 1996.
- [60] Newman J. C. Jr, FASTRAN II-A Fatigue Crack Growth Structural Analysis Program, NASA Tech. Memorandum 104159, NASA Langley Research Center, Hampton VA, 1992.
- [61] Newman J. C. Jr., A Nonlinear Fracture Mechanics Approach to the Growth of Small Cracks, *Behavior of Short Cracks in Airframe Components*, AGARD-CP-328, 1983.
- [62] De Koning A.U. and Liefing G., Analysis of Crack Opening Behavior by Application of a Discretized Strip Yield Model, *Mechanics of Fatigue Crack Closure*, J.C. Newman and W. Elber, Eds., ASTM STP 982, pp. 437-458, 1988.
- [63] Wang G.S. and Blom A.F., A Strip Model for Fatigue Crack Growth Predictions under General Load Conditions, *Engng Fracture Mech*, Vol. 40, pp. 507-533, 1991.
- [64] Brussat T.R., An Approach to Predicting the Growth of Failure of Fatigue Cracks Subjected to Arbitrary Uniaxial Cyclic Loading, *Damage Tolerance in Aircraft Structures*, ASTM STP 486, pp. 122-143, 1971.
- [65] Katchar M., Crack Growth Retardation under Aircraft Spectrum Loads, *Engng. Fract. Mech.*, 5, pp. 793 , 1973.
- [66] De Koning A.U., Optimized Approach to Damage Tolerance, Part II, Crack Growth Prediction Methods, NLR TR 86123 L, 1986.
- [67] Wang G. S., A Probabilistic Damage Accumulation Solution Based on Crack Closure Model, *International Journal of Fatigue*, Vol. 21, pp. 531-547, 1999.

- [68] Huang Y. C., Zou P. C., Gao Q., A Statistical Theory of Fatigue Crack Growth at Damage Cumulation, *Arch. Appl. Mech.*, Vol. 67, No. 3, pp. 153-157, 1997.
- [69] Round-Robin Crack Growth Predictions on Center- Cracked Tension Specimens under Random Spectrum Loading, *Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading*, ASTM STP 748, J.B. Chang and C.M. Hudson, Eds., pp. 3-40, 1981.
- [70] De Koning A.U. and Van Der Wekken A.J.P., *Corpus: A Program for Analysis of Fatigue Crack Growth and Failure of Centrally Cracked Sheet Specimens -User Manual-*, NLR TR 86097 L, 1986.
- [71] Wang G.S. and Gustavsson A.I., *An Analytical Model to Determine Fatigue Crack Closure Stress Levels*, Aeronautical Research Institute of Sweden, FFAP-11-869, 1987.
- [72] Wanhill R.J.H., De Koning A.U. and Schra H.C, *Modelling of Fatigue Crack Growth in 7075-T651 Aluminium Alloy Plate*, *Fracture Control of Engineering Structures-ECF 6*, H.C. Van Elst and A. Bakker, Eds., EMAS, pp. 1243-1253, 1986.
- [73] Barsom J.M., *Fatigue Crack Growth Under Variable-Amplitude Loading in Various Bridge Steels*, *Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads*, ASTM STP 595, pp.217-235, 1976.
- [74] Sobczyk K., Trebicki J and Spencer B. F. Jr, *Modelling of curvilinear random fatigue crack growth*, *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 52, No. 4, pp. 703-715, 1995.
- [75] Sobczyk K., Trebicki J., *Cumulative Jump-correlated Model for Random Fatigue*, *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 40, pp. 201-210, 1991.

- [76] Kirkner D. J., Sobczyk K., Spencer B. F. Jr, On the Relationship of the Cumulative Jump Model for Random Fatigue to Empirical Data, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 14, pp. 256-267, 1999.
- [77] Shen W., Soboyejo A. B. O., Soboyejo W. O., Probabilistic Modeling of Fatigue Crack Growth in Ti-6Al-4V, International Journal of Fatigue, Vol 23, pp. 917-925, 2001.
- [78] Sobczyk K and Spencer B.F. Jr., Random Fatigue: From Data to Theory, Academic Press, 1992.
- [79] Hudson C.M., A Root-Mean-square Approach for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading, Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading, ASTM STP 748, J.B. Chang and C.M. Hudson, Eds., pp. 3-40, 1981.
- [80] Bignonnet A., Sixou Y. and Verstavel J.C., Equivalent Loading Approach to Predict Fatigue Crack Growth under Random Loading, Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading, J. Petit, D.L. Davidson, S. Suresh and P. Rabbe, Eds., Elsevier Sci. Publ., pp. 372-383, 1988.
- [81] Kam J and Dover W., Fatigue Crack Growth in Offshore Welded Tubular Joints under Real Life Variable Amplitude Loading, Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading, J. Petit, D.L. Davidson, S. Suresh and P. Rabbe, Eds., Elsevier Sci. Publ., pp. 384-397, 1988.
- [82] Zapatero J. and Domínguez J., A Statistical Approach to Fatigue Crack Growth under Random Loading, Fracture Control of Engineering Structures, H.C. van Elst and A. Bakker, Eds., EMAS, pp. 889-902, 1986.

- [83] Asok R., Patankar R., A Stochastic Model of Fatigue Crack Propagation under Variable-amplitude Loading, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 62, pp. 477-493, 1999.
- [84] Asok R., Patankar R., Fatigue Crack Growth under Variable-Amplitude Loading: Part I- Model Formulation in State-space Setting, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 25, pp. 979-994, 2001.
- [85] Asok R., Patankar R., Fatigue Crack Growth under Variable-Amplitude Loading: Part II- Code Development and Model Validation, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 25, pp. 995-1013, 2001.
- [86] Zapatero J. and Domínguez J., A Statistical Approach to Fatigue Life Predictions under Random Loading, *Int. J. Fatigue*, Vol. 12, pp. 107-114, 1990.
- [87] Veers P. S., Winterstein R., Nelson D.V. and Cornell C.A., Variable-Amplitude Load Models for fatigue Damage Crack Growth, *Development of Fatigue Loading Spectra*, J.M. Potter and R.T. Watanabe, Eds., ASTM STP 1006, pp 172-197, 1989.
- [88] Tucker L., Bussa S., The SAE Cumulative Fatigue Damage Test Program, R. M. Wetzel (Ed.), *Fatigue Under Complex Loading: Analysis and Experiments*, pp. 1-53, 1977.
- [89] Chang J. B., Round-robin Crack Growth Prediction on Center Cracked tension Specimen under Random Spectrum Loading, *Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading*, J. B. Chang and C. M. Hudson, Eds., ASTM STP 748, pp 4-40, 1981.
- [90] Rice J.R. and Beer F.P., On the Distribution of Rises and Falls in a Continuous Random Process, *J. Basic Engng*, Vol. 87, pp. 398-404, 1965.

- [91] Lindgren G. and Rychlik I., Rain Flow Cycle Distributions for Fatigue Life Prediction under Gaussian Load Process, *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, Vol. 10, pp. 251-260, 1987.
- [92] Bishop N.W.M. and Sherratt F., A Theoretical Solution for the Estimation of Rainflow Ranges from Power Spectral Density Data, *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, Vol. 13, pp. 311-326, 1990.

Capítulo 3

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se describen las características del material y probetas de ensayo empleadas y la técnica aplicada para la generación de los registros de carga, así como el equipamiento empleado para la realización de los ensayos de fatiga planteados como objetivo de este trabajo. Se detalla también el procedimiento seguido en la realización de dichos ensayos y, por último, el tratamiento dado a los resultados obtenidos de los mismos.

Todos los ensayos han sido realizados en un laboratorio del área de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Málaga. En la fotografía 3.1 se puede apreciar una vista del laboratorio de trabajo y en la fotografía 3.2 un detalle del equipamiento empleado para la realización de los ensayos de fatiga



Fotografía 3.1: *Laboratorio de trabajo*



Fotografía 3.2: *Detalle de la máquina de ensayos.*

3.1. MATERIAL Y PROBETAS DE ENSAYO.

3.1.1. Material empleado.

El material de ensayo seleccionado es la aleación de aluminio 2024-T351 cuya composición se muestra en la tabla 3.1. El cobre es el principal elemento de aleación junto con el magnesio. Estas aleaciones se tratan térmicamente para conseguir un aumento del límite elástico, su efecto sobre la tensión de rotura no es muy grande. Están particularmente indicadas para estructuras que requieren altas relaciones resistencia/peso, y comúnmente se usan en ruedas y suspensión de camiones y aviones, fuselajes y alas de aviones y componentes estructurales que requieren una buena resistencia a temperaturas superiores a 150 ° C.

La aleación 2024 desarrolla una máxima resistencia a la cedencia por combinación de endurecimiento por deformación y envejecimiento. La denominación T3xx indica que la aleación es tratada térmicamente a solución y posteriormente trabajada en frío, los dígitos 51 se aplican específicamente a placas, para laminado o barras acabadas en frío y anillos.

Otras propiedades físicas de esta aleación vienen reflejadas en la tabla 3.2.

Tabla 3.1: *Composición química de la aleación Al-2024*

Designación	Porcentaje en peso %							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
2024	0.50	0.50	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	0.10	0.25	0.15

Tabla 3.2: *Propiedades físicas de la aleación Al-2024-T351.*

Límite elástico	325 MPa
Tensión de rotura	470 MPa
Módulo de elasticidad	73 GPa
Resistencia a cortante	285 MPa
Alargamiento en 50 mm	20%
Límite de fatiga	140 MPa
Dureza(carga 500 Kg y bola 10 mm)	120 HB
Resistividad eléctrica a 20 ° C	0.058Ω mm ² /m
Densidad nominal	2.78 gr/cm ³
Coefficiente medio de expansión térmica	23.2 μm/m ° C
Conductividad térmica	121 W/mK

3.1.2. Geometría de las probetas.

Las probetas empleadas son tipo CT (*Compact Tension*), cuya geometría se muestra en la figura 3.1, de dimensiones: ancho $W=50\text{ mm}$ y espesor $B=12\text{mm}$. Todas las probetas fueron obtenidas de una misma chapa y fabricadas según las recomendaciones de la norma ASTM E647-91.[1]

La longitud de la grieta en este tipo de probetas corresponde a la distancia al eje que une el centro de los taladros. Para cada probeta la longitud de la entalla a_0 ha sido medida haciendo uso de un proyector de perfiles con una precisión de 0.001 mm. Según las recomendaciones de la norma ASTM E647-91, es necesario que la longitud de la entalla sea superior a $0.2 W$, de tal forma que los orificios no influyan en el valor de K. En este tipo de probetas el valor del espesor B debe estar comprendido entre $W/20$ y $W/4$.

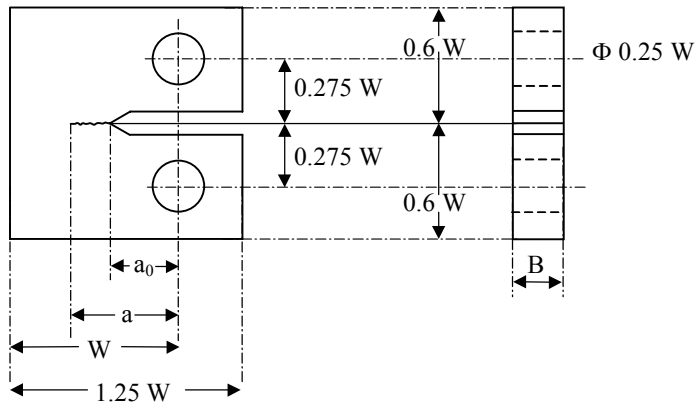


Figura 3.1: Geometría de las probetas CT

El tamaño de la probeta, así como el valor de la carga deben elegirse de tal forma que el campo de tensiones provoque deformaciones predominantemente elásticas, reduciéndose la plastificación al entorno del extremo de la grieta. Para ello es necesario que se cumpla la condición:

$$(W - a) \geq \left(\frac{4}{\pi} \right) \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{YS}} \right)^2$$

donde σ_{YS} es el límite elástico convencional.

3.2. GENERACIÓN DE LOS REGISTROS DE CARGA.

Los registros de carga empleados para llevar a cabo los ensayos representan cuatro procesos aleatorios distintos caracterizados por diferentes formas de la función de densidad espectral de las cargas nominales. Dichas funciones de densidad espectral corresponden a procesos aleatorios gaussianos, uni o bimodales, de media cero.

Para cada tipo de espectro se generan numéricamente por simulación distintas historias o registros aleatorios. La simulación se ha realizado mediante superposición de funciones senoidales de frecuencia y fase aleatoria con distribución uniforme [2]. La forma de dichas funciones puede observarse en la figura 3.2, variando los valores de las frecuencias iniciales (ω_1 , ω_2) y finales (ω_3 , ω_4) y la relación H_1/H_2 , se obtienen distintos procesos aleatorios con diferentes formas de la función de densidad espectral. En la tabla 3.3 se representan los parámetros que definen los espectros de carga considerados.

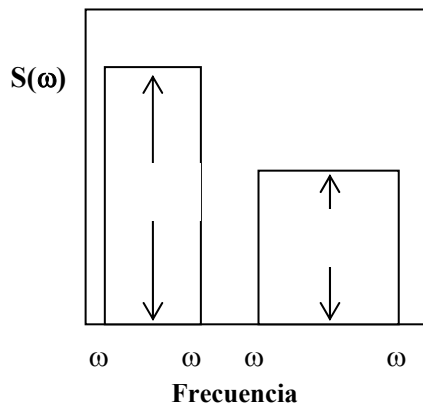


Figura 3.2: Forma de las funciones de densidad espectral consideradas.

Tabla 3.3: *Parámetros de los espectros de carga considerados.*

Tipo	H_1 / H_2	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ε
A	6.67	5	15	80	130	0.64
B	2	5	25	30	60	0.70
C	2	10	20	25	75	0.77
D	-	7	27	-	-	0.85

Todas las funciones de densidad espectral así definidas representan procesos de carga de valor medio cero y cuya componente variable vendrá definida por su varianza, es decir, por el momento de orden cero de dicha función de densidad espectral:

$$\sigma^2 = M_0 = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega$$

Todos los procesos empleados en este estudio se han seleccionado de forma que todos tengan la misma componente de carga variable, definida éste como la varianza o momento de orden cero de valor 35, para valores de carga expresados en Kg. Esto determina el valor de los parámetros H_1 y H_2 de las funciones de densidad espectral consideradas, dichos valores figuran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: *Parámetros H_1 y H_2 de los espectros de carga considerados.*

Proceso	A	B	C	D
H_1	2	1	1	1.75
H_2	0.3	0.5	0.5	-

Para poder considerar distintos niveles de carga los registros así obtenidos se multiplican por un factor de amplificación, de manera que todos los registros de un mismo proceso y nivel de carga tienen idéntica desviación estándar y carga media cero. Los niveles de carga seleccionados corresponden a una desviación estándar de las cargas nominales $\sigma_c = 638 \text{ N}$ para el denominado nivel bajo de carga o nivel L y $\sigma_c = 1078 \text{ N}$ para el denominado nivel alto de carga o nivel H.

Con el fin de evitar las cargas de compresión los registros son desplazados sumando un determinado valor medio. El nivel medio de carga establecido para todos los procesos considerados es $\mu_c = 4851 \text{ N}$. De esta forma, los procesos quedan definidos por el valor medio de carga y nivel y forma de la función de densidad espectral por el de su componente de carga variable.

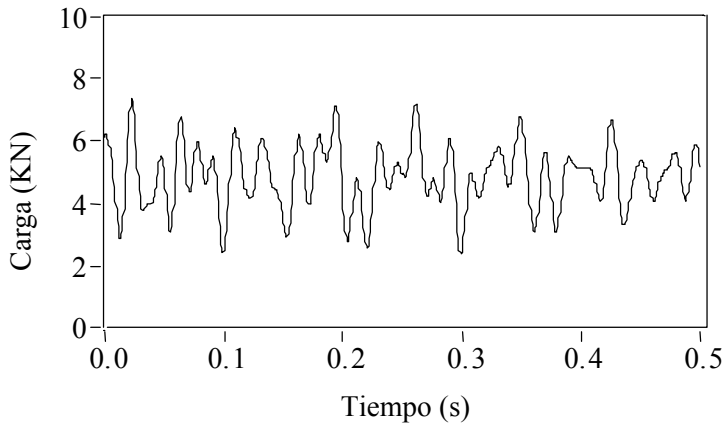


Figura 3.3: *Secuencia de cargas nominales para el nivel alto de cargas en el proceso tipo C.*

El ancho de banda de los procesos puede caracterizarse en función del factor de irregularidad ε , definido como:

$$\varepsilon = \frac{M_2}{\sqrt{M_0 M_4}}$$

Representando M_n el momento de orden n : $M_n = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega$

El parámetro ε indicativo de la irregularidad de la carga varía desde 0 hasta 1 con valores tanto más cercanos a la unidad cuanto más estrecha sea la banda de frecuencias. Para los tipos de carga seleccionados el valor del parámetro ε varía desde 0.85 para la banda más estrecha hasta 0.64 para la banda más ancha (tabla 3.3).

Del proceso simulado se obtiene un segundo que contiene sólo los picos y valles del anterior. Los registros así generados se utilizan como una secuencia normalizada de picos y valles sucesivos, de manera que los ensayos reproducirán dichas secuencias, es decir, los rangos de carga. Para identificar los procesos se usará la denominación A, B, C y D, según lo indicado en la tabla 3.3, y se distinguirán los niveles alto y bajo de cargas añadiendo respectivamente las letras H y L.

Los registros de carga así generados tienen una longitud finita y se han empleado registros de 5000, 25000 y 100000 ciclos. Para identificar los registros de carga se usará la misma denominación anterior, distinguiendo las distintas longitudes de registro con los números 5, 25 o 100 según se trate de 5000, 25000 o 100000 ciclos respectivamente. En el caso de hacer referencia a un registro concreto se añade $_n$, donde n es un número de orden distintivo de cada registro. En la tabla 3.5 se resume esquemáticamente esta nomenclatura con indicación de las características del proceso, longitud de los registros y número de registros generados.

Tabla 3.5: Denominación de los registros o historias de carga.

Denominación de los registros	Tipo de proceso	Ancho de banda (ϵ)	Valor medio de carga	Nivel de carga	Longitud (ciclos)	Nº de registros
C-H5	C	0.77	$\mu_c=4851$ N	$\sigma_c=1078$ N	5000	30
A-H25	A	0.64				
B-H25	B	0.70				
C-H25	C	0.77	$\mu_c=4851$ N	$\sigma_c=1078$ N	25000	20
D-H25	D	0.85				
A-L25	A	0.64				
C-L25	C	0.77	$\mu_c=4851$ N	$\sigma_c=638$ N	25000	20
D-L25	D	0.85				
C-H100	C	0.77	$\mu_c=4851$ N	$\sigma_c=1078$ N	100000	20

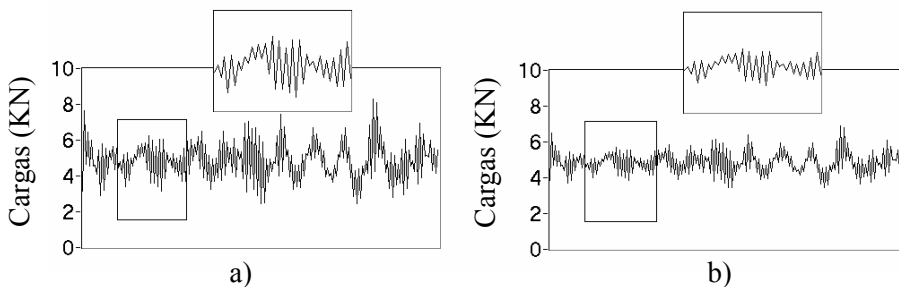


Figura 3.4: secuencia de picos y valles para el proceso tipo A ($\epsilon=0.64$)
 a) nivel alto de carga b) nivel bajo de cargas

La figura 3.4 representa parte de la secuencia de picos y valles para el proceso tipo A ($\varepsilon=0.64$) para los niveles alto y bajo de cargas, es decir, parte de algún registro de las series A-H25 y A-L25. En esta representación los valores de picos y valles están unidos por líneas rectas. En la figura 3.5 se muestran de esta misma manera la secuencia de cargas de los cuatro procesos de distintos anchos de banda para el nivel alto de cargas, esto es de los registros correspondientes a las series A-H25, B-H25, C-H25 y D-H25.

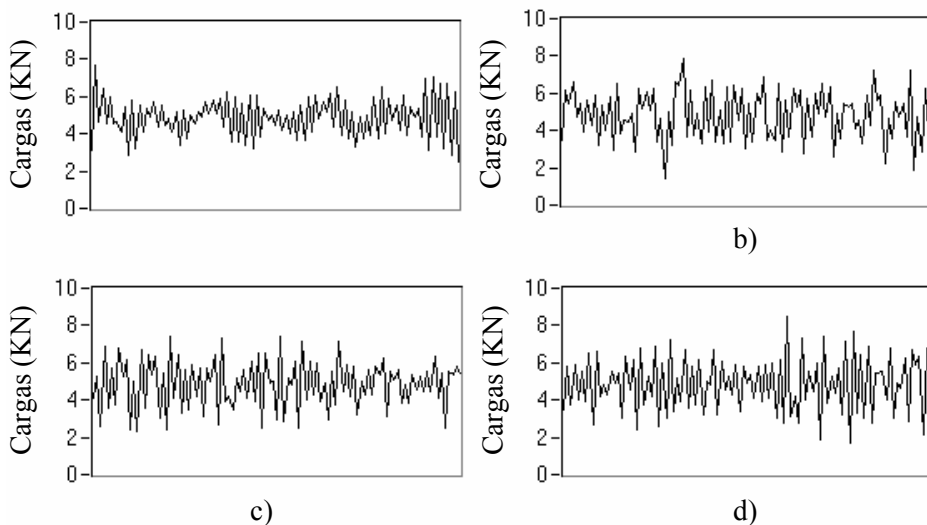


Figura 3.5: *secuencia de cargas nominales para el nivel alto de cargas en los procesos a) tipo A ($\varepsilon=0.64$), b) tipo B ($\varepsilon=0.70$), c) tipo C ($\varepsilon=0.77$) y d) tipo D ($\varepsilon=0.85$).*

Con el fin de caracterizar mejor estas historias se han obtenido el valor máximo y mínimo, la media, desviación estándar y raíz media cuadrática tanto de picos y valles de la secuencia de cargas como de los rangos. El método empleado para contar los rangos es en este caso el método simple, se cuentan los rangos positivos (valles seguidos de picos) entre sucesivas inversiones de carga. En el apéndice A se incluyen dichos datos para cada uno de los registros. Los datos que se presentan en la tabla 3.6 corresponden a los promedios de

dichos parámetros estadísticos sobre todos los registros de carga generados para cada proceso.

Tabla 3.6: *Parámetros estadísticos de los procesos de carga*

PROCESO	Valor medio (N)			Desviación estándar (N)		
	Picos	Valles	Rangos	Picos	Valles	Rangos
C-H5	5894	3819	2075	876	875	1236
A-H25	5719	3993	1725	941	939	931
B-H25	5808	3905	1903	910	911	1178
C-H25	5895	3817	2077	875	875	1235
D-H25	6007	3706	2300	824	824	1344
A-L25	5367	4345	1022	557	556	551
C-L25	5471	4241	1231	518	518	731
D-L25	5538	4175	1363	488	488	796
C-H100	5895	3817	2077	875	875	1235

De los valores de la tabla puede observarse que para el proceso C-H los parámetros estadísticos de los registros de 5000, 25000 y 100000 ciclos coinciden. Esto representa que aunque con longitudes distintas todos esos registros podrían considerarse estadísticamente idénticos, al menos en cuanto a valores medios y dispersiones tanto de picos, como de valles o rangos se refiere. No obstante, no ocurre lo mismo con otros parámetros, cuya influencia sobre la vida de crecimiento de grietas será necesario analizar, como el valor máximo de los picos o rangos del registro. Dichas diferencias pueden observarse en la tabla

3.7, lógicamente cuanto mayor es la longitud del registro de carga más probable es la aparición de un pico de carga alto. Esto explica que tanto el valor máximo como el promedio (entre todos los registros de una serie) del pico máximo de carga alcanzado en cada registro, máximo de P_{\max} y $\mu_{P_{\max}}$ respectivamente, sea mayor en los registros de 100000 ciclos. Idéntico razonamiento es válido en el caso de los rangos, donde R_{\max} representa el rango máximo en cada registro y $\mu_{R_{\max}}$ el promedio de R_{\max} entre todos los registros de una serie.

Tabla 3.7: *Parámetros estadísticos de los valores máximos de carga y rango del registro en el proceso C-H*

PROCESO	C-H5	C-H25	C-H100
Valor máximo de P_{\max} (N)	10379	10374	10488
Valor máximo de R_{\max} (N)	8510	8631	8922
$\mu_{P_{\max}}$ (N)	9359	9584	9983
$\mu_{R_{\max}}$ (N)	7251	7720	8128

Los datos de la tabla 3.6 muestran también que tanto la media como la dispersión de los rangos aumentan a medida que disminuye el ancho de banda del proceso, y lógicamente para el mismo proceso son superiores los valores correspondientes al nivel alto de carga. Lógicamente los rangos aumentan dado que el valor medio de los picos aumenta y el de los valles disminuye. La dispersión, no obstante, tanto de valles como de picos disminuye al aumentar el ancho de banda del proceso.

Esta observación queda reflejada claramente en la figura 3.6 en la que se representan superpuestos los histogramas de rangos de carga de todos los procesos considerados para los dos niveles de carga.

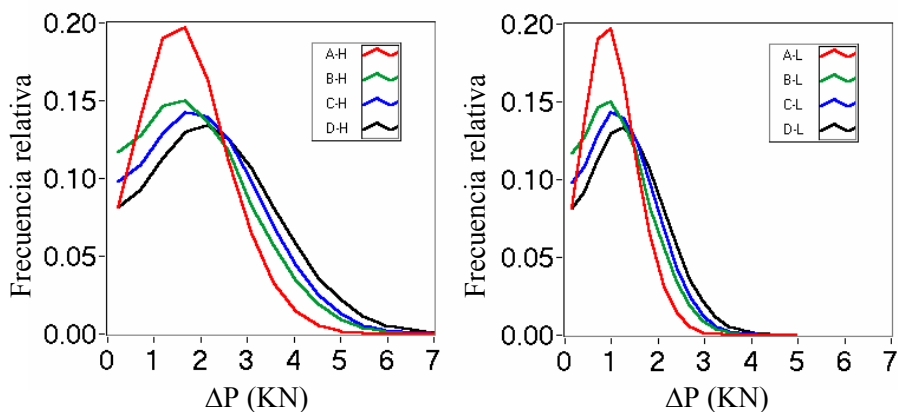


Figura 3.6: *Histogramas de rangos de todos los procesos.*

A la vista de esta figura puede decirse que en cuanto a distribución de rangos los procesos B, C y D (de anchos de banda 0.7, 0.77 y 0.85) son entre ellos similares presentando mayores diferencias con el proceso tipo A (de ancho de banda 0.64)

Para tener seguridad de que todas las historias de carga generadas, con cada tipo de densidad espectral considerado, corresponden al mismo proceso se han comparado las distribuciones y parámetros estadísticos de picos, valles y rangos de carga de cada registro, no encontrándose diferencias significativas (Apéndice A). Dichas diferencias en valores medios de picos y rangos de carga son inferiores a 15 N. Las distribuciones estadísticas de las cargas son igualmente muy similares. En la figura 3.7 se muestran los histogramas para la distribución de rangos de carga correspondientes a cada uno de los registros que producen las vidas máxima y mínima de crecimiento de grieta en los cuatro tipos de procesos.

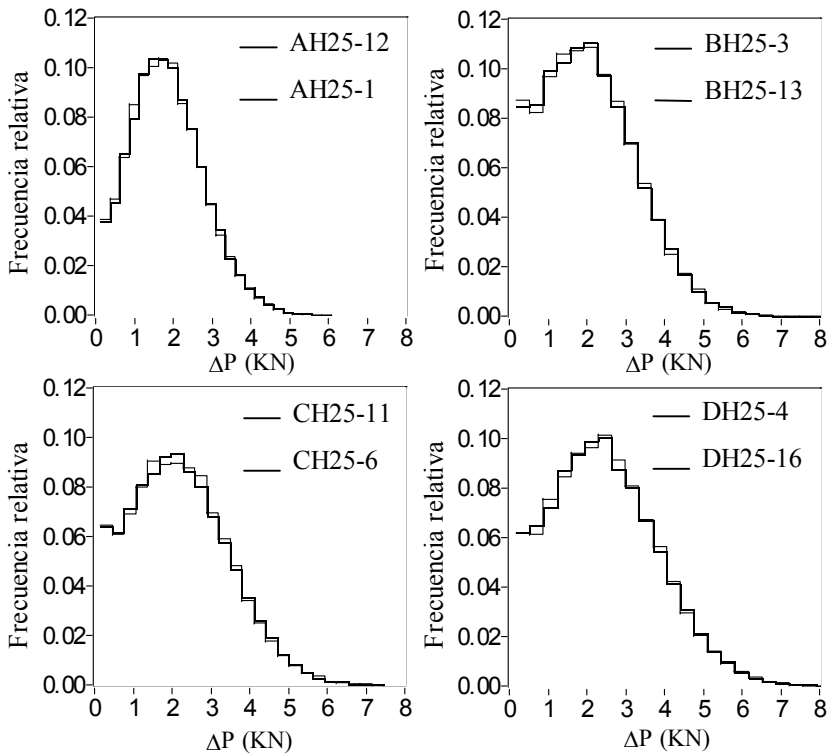
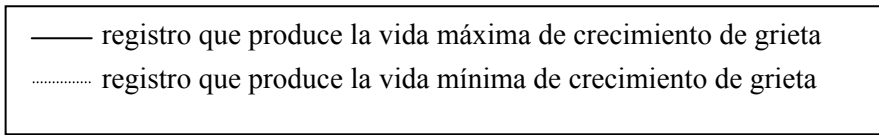


Figura 3.7: *histogramas de rangos de carga correspondientes a los registros que producen las vidas máxima y mínima de crecimiento de grieta en los cuatro tipos de procesos para el nivel alto de carga.*

3.3. DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS.

3.3.1. Máquina de ensayos.

Los ensayos se realizaron en control de carga con una máquina servohidráulica Instron, modelo 8501. La aplicación de cargas de amplitud constante en el preagrietado de la probeta se realiza controlando la máquina directamente desde la consola o panel de control haciendo uso de una función propia que genera la onda de valor medio y amplitud seleccionados. Para la aplicación de la carga aleatoria la máquina es controlada por un ordenador a través del programa Flaps Plus versión 5.0 [3]. Para generar un tipo de forma de onda complejo es necesario suministrar en fichero la serie de puntos (picos y valles) que el controlador unirá con medios ciclos senoidales o con forma de onda triangular. La frecuencia de aplicación de la carga tanto en amplitud constante durante el preagrietado como con carga variable durante el crecimiento de la grieta fue de 10 Hz.



Figura 3.8: *máquina de ensayos.*

Es sumamente importante comprobar que el control de la máquina permite seguir la forma de onda demandada [4]. En el sistema servohidráulico el controlador de lazo es el elemento que controla y genera la señal de excitación que es enviada a la servoválvula. El esquema de control de lazo cerrado de un sistema es el que se representa en la figura 3.9.

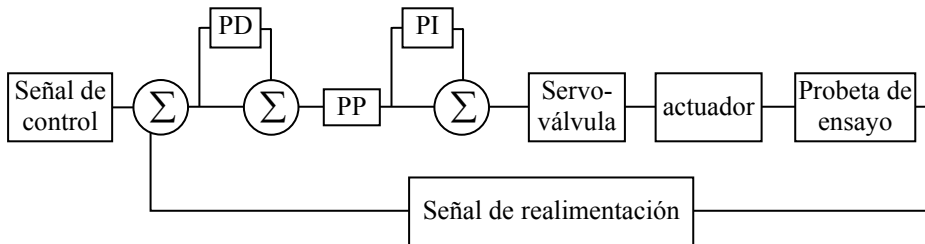


Figura 3.9: Esquema de un sistema de control de lazo cerrado.

La señal de control y la de realimentación son comparadas y generada una señal error como diferencia entre ambas, el controlador de lazo aplica una serie de cálculos sobre esta señal de error para producir la señal de excitación optimizando la respuesta del sistema. Los parámetros proporcional, integral y derivado (PP, PI y PD), o parámetros PID, controlan la exactitud o el grado en que se aproximan el patrón o forma de onda de la carga demandada y la aplicada a la probeta bajo ensayo.

Al inicio de un ensayo, dependiendo del material y el tipo de probeta empleados, es necesario ajustar los parámetros PID que optimizan la respuesta dinámica del sistema. Este ajuste puede realizarse manualmente o, como en este caso, de forma automática a través de una función propia de la máquina (“Auto-Tuning”). En el proceso se determina la combinación de ganancias proporcional, integral y derivada que produce la mejor respuesta con una señal de control que corresponde a una onda cuadrada de pequeña amplitud.

En el caso concreto de los ensayos de fatiga, los parámetros ajustados pueden no ser igualmente válidos durante todo el ensayo debido a los cambios de rigidez en la probeta producidos por el avance de la grieta. El parámetro de

ganancia proporcional es el de mayor efecto sobre la respuesta y su valor correcto depende de la rigidez de los componentes de la máquina y de la probeta [5], que es variable. Este hecho obliga a la readaptación de los parámetros de control durante el ensayo. En el modelo 8501, el propio equipo tiene incorporado un sistema de control adaptativo que permite la modificación automática de los parámetros de control del lazo para optimizar el seguimiento de la carga.

Para la puesta a punto de los equipos antes del inicio de los ensayos se comparó la respuesta de la máquina para las cargas aleatorias a considerar. En la figura 3.10 se muestran los valores del registro de carga (picos y valles), unidos por segmentos rectos, y los valores medidos como señal analógica a través del sistema de adquisición de datos.

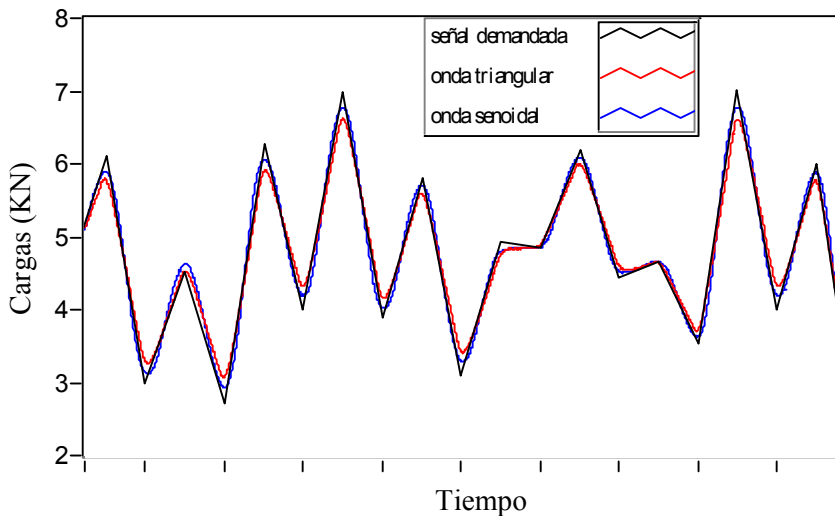


Figura 3.10: valores del registro de carga, picos y valles unidos por segmentos rectos, y los valores alcanzados por el sistema empleando onda de tipo triangular y semiciclos senoidales para el proceso C-H.

Los valores de la figura 3.10 se obtuvieron usando el control adaptativo y con los parámetros de control obtenidos con el ajuste automático (Auto-Tuning), en un caso con la opción de onda de tipo triangular y en otro con semiciclos senoidales. De la propia figura puede observarse que está última da una mejor aproximación, no obstante los errores son apreciables. Estos errores son mayores cuanto más estrecha es la banda del proceso y más alto el nivel de cargas. En el caso del proceso de ancho de banda intermedio $\varepsilon = 0.77$ el error con relación a la media de cargas entre el valor del pico o valle de carga demandado y el realmente alcanzado por el sistema es del orden del 4.3% con ondas de tipo triangular y del 2.4 % para ondas senoidales. Esto representa un error con relación a la media de carga en los rangos aplicados del 8.5 y 4.8 % para ondas triangulares y senoidales respectivamente.

Una solución para mejorar los resultados anteriores podría ser ajustar manualmente los parámetros PID en base a la onda aleatoria, sin embargo, esta opción imposibilita hacer uso del control adaptativo con lo que no podría conseguirse un ajuste óptimo durante todo el ensayo. La alternativa seleccionada, que sí permite el uso del control adaptativo, es modificar el parámetro que representa la rigidez del sistema. Aumentando dicho parámetro la ganancia proporcional adoptada por el sistema en el ajuste automático de los parámetros es mayor y los resultados mejoran sensiblemente. Los valores así obtenidos se representan en la figura 3.11. En este caso y para el mismo proceso anterior los errores absolutos con relación a la media de cargas entre el valor del pico o valle de carga demandado y el realmente alcanzado por el sistema es del orden del 1.5 % con ondas de tipo senoidal mientras que el cometido en los rangos de carga es del orden de 3 %. Para el proceso de banda más estrecha y nivel de carga alto, al que corresponden las máximas diferencias, el error absoluto en los rangos de carga es del orden del 3.2 % del valor medio de las cargas. Si dicho error no se mide en valor absoluto es del orden del 2.8 %, ya que no siempre, aunque sí la mayoría de las veces, los rangos alcanzados son menores a los demandados.

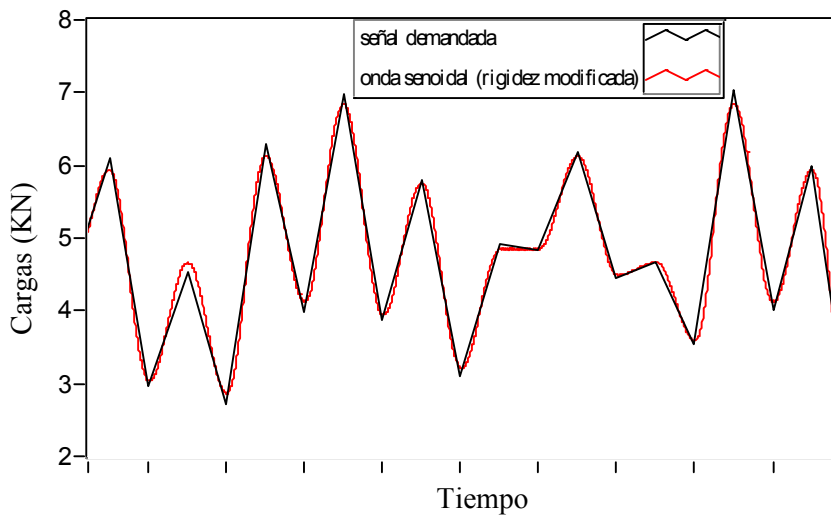


Figura 3.11: valores del registro de carga y los valores alcanzados al modificar la rigidez del sistema y empleando ondas de tipo semiciclos senoidales para el proceso C-H.

Así pues, en todos los ensayos realizados los rangos de carga serán siempre como máximo un 2.8 %, del valor medio de las cargas, inferiores a los valores demandados, en cualquiera de los procesos de distintos anchos de banda y en los dos niveles de carga empleados. Para crecimiento de grieta con cargas de amplitud constante puede estimarse, suponiendo una ecuación de crecimiento tipo Paris con un exponente igual a 3, que esto supondría un incremento de la vida en torno a un 8 %. No obstante, en cargas de amplitud variable habría que tener en cuenta la interacción entre las cargas. La disminución de los picos y rangos tiene dos efectos, por un lado, las velocidades de crecimiento serán menores y por tanto las vidas más largas, pero por otro lado, también se producirán menores retardos con lo que el efecto sería acortar las vidas. Debido a esto cabe esperar que con cargas aleatorias los errores sean aún menores.

3.3.2. Sistema de medida de la longitud de grieta.

En los primeros ensayos realizados, en concreto para el proceso C-H con registros de 5000 ciclos, se empleó para el control de la longitud de grieta un microscopio óptico con un sistema de medición acoplado. El uso de este sistema requiere para cada medición desmontar la probeta de la máquina de ensayos, con lo que obtener información detallada de la evolución del defecto con el número de ciclos se convierte en un trabajo lento y laborioso. Por este motivo el único resultado obtenido de los ensayos así realizados fue el número de ciclos hasta una longitud final predeterminada. Aún así, el control del tamaño de grieta hasta dicha longitud final no resulta fácil siendo necesario hacer correcciones posteriores [6]. Con el fin de obtener un registro continuo del crecimiento de la grieta con el número de ciclos se opta por hacer uso de un sistema de medida basado en la técnica de caída potencial [7-12].

Las técnicas de caída de potencial se basan en medir la caída de tensión sufrida en una probeta de un material conductor por el que se hace pasar una corriente eléctrica que puede ser continua o alterna. La resistencia eléctrica de la probeta se verá alterada por la presencia de grietas en el material, el tamaño de éstas puede medirse indirectamente a partir de la variación en la caída de potencial entre el componente sin defecto y el componente agrietado.

Existen dos variantes del método: caída de potencial con corriente continua (DCPD) y caída de potencial con corriente alterna (ACPD). El método DCPD usa una corriente continua que pasa a través de la probeta y mide la diferencia de potencial entre dos puntos del material a ambos lados de la grieta. La variación del tamaño de grieta se mide mediante el aumento de resistencia eléctrica del material conductor debido al crecimiento del defecto. Sin embargo, esta técnica requiere grandes corrientes para obtener alta resolución en la medida de la caída de potencial que pueden provocar el calentamiento de la probeta, además la relación voltaje- longitud de grieta no resulta lineal.

El método ACPD usa corrientes de alta frecuencia (de 3 a 100 KHz) de amplitud constante pasando a través de la probeta y al igual que en el método DCPD se mide la caída de potencial entre dos puntos. La diferencia entre uno y otro método es que la corriente alterna queda confinada en una delgada capa siguiendo la superficie del material, este efecto es conocido como efecto piel. Este fenómeno puede ser modelado teóricamente pero para la mayoría de los ensayos prácticos es suficiente conocer su existencia y las ventajas que conlleva.

El espesor de la capa, Δ , es función de las propiedades eléctricas y magnéticas del material y de la frecuencia de la corriente:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}}$$

donde ρ es la resistividad eléctrica, μ la permeabilidad magnética y f la frecuencia de la corriente.

Como puede observarse el efecto piel aumenta (el espesor de la capa disminuye) con la frecuencia de la señal, aumentando la sensibilidad en la detección del defecto. La profundidad de dicha capa puede estimarse en 0.6, 0.15 y 0.08 mm en aceros para frecuencias de 3, 10 y 30 KHz respectivamente, y en 2, 1 y 0.6 mm en aleaciones de aluminio, para las mismas frecuencias. Dicho efecto es el responsable de las mayores ventajas del método: la relación entre longitud de grieta y caída de potencial es lineal, la corriente de excitación es mucho menor que la necesaria con corriente continua, con lo que no se producirán calentamientos de la probeta, y la utilización de corrientes alternas permite además eliminar los ruidos eléctricos con el consiguiente aumento de sensibilidad y resolución del método.

En la figura 3.12 se muestra el flujo de corriente en una probeta CT así como un esquema de las conexiones eléctricas en la misma. Son necesarias cuatro conexiones: dos para la corriente que recorrerá la superficie de la probeta y dos para la medida de diferencia de potencial entre dos puntos. Los conectores de corriente se colocarán de forma que el camino seguido por la corriente

incluya a la grieta, de esta manera la propagación del defecto alterará el flujo de corriente permitiendo detectarlo con un cambio en el potencial entre los extremos de la grieta. Colocando los conectores de voltaje como indica la figura se obtendrá una medida de la longitud de grieta media a lo largo del espesor de la probeta.

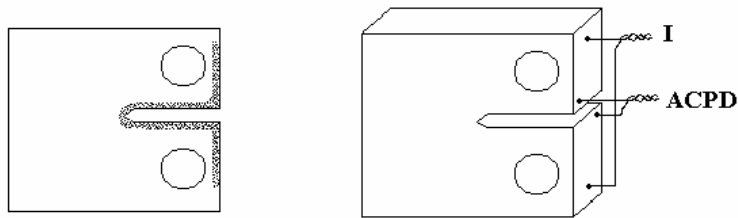


Figura 3.12: flujo de corriente en la probeta CT y esquema de las conexiones eléctricas.

El equipo de medición empleado corresponde al modelo CGM-5R de Matelec [13], con el cual se puede obtener una relación lineal entre la caída de potencial alrededor de una grieta, ACPD, y la longitud de ésta. Un esquema del funcionamiento del equipo se muestra en la figura 3.13.

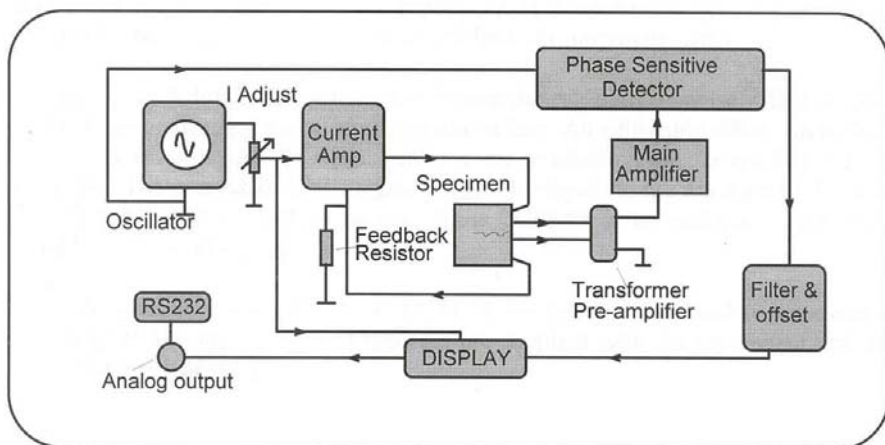


Figura 3.13: Esquema de funcionamiento del equipo de medición de grietas.

Dicho equipo dispone de un generador de corriente alterna de frecuencias 0.3, 1, 3, 10, 30 y 100 KHz y cuya intensidad se puede regular entre 0 y 2 A. Dicha corriente se hace pasar a través de la probeta y la caída de potencial es recogida por otro circuito y tratada como sigue:

1. Se amplifica con una ganancia seleccionable.
2. Se filtra eliminando los componentes que difieran de la frecuencia de la señal original. En general, la señal no estará en fase con la corriente original dado que los circuitos y la probeta introducen componentes inductivos o capacitivos.
3. Se filtra la señal de salida para obtener la onda rectificadas pudiendo seleccionarse que incluya sólo la parte resistiva o no. El valor medio de la onda también puede ser modificado.

En función del tipo de material y la geometría de la probeta es necesario ajustar los parámetros de ganancia, frecuencia e intensidad de la corriente. Una vez conectada la probeta se recomienda que la caída inicial de potencial sea de unos 0.5 voltios. El aumento de frecuencia hace que el efecto piel de la corriente alterna sea mayor, de manera que la medida ACPD es más sensible a los cambios de longitud de la grieta, por el contrario, el efecto de corrientes inducidas es mayor con la frecuencia. Un valor aconsejable es situar la frecuencia en 30 KHz. Para las probetas de aluminio es necesario situar la ganancia en 60 dB para poder alcanzar una caída inicial de potencial próxima a 0.5 V. Finalmente dicho potencial se alcanza ajustando la intensidad de corriente. Para la aleación en estudio se seleccionó una corriente de frecuencia 30 KHz, con 1,482 A de amplitud y una ganancia de amplificación de 60dB.

El equipo permite desplazar el valor inicial de caída de potencial (ACPD) a cero de manera que la señal de salida es directamente la diferencia entre el valor inicial de referencia y la medida actual. Debido a que el valor inicial de ACPD es muy sensible a muchos factores, como las dimensiones exactas de la probeta, posicionamiento, espaciado y conexión de los conectores, etc., es necesario un procedimiento de operación cuidadoso e idéntico para todos los ensayos. No

obstante puesto que la señal inicial es posible desplazarla a cero y establecerla como referencia al inicio de cada ensayo no parece necesaria la normalización de la señal ACPD.

La señal analógica de salida, previamente filtrada por el propio equipo para obtener el valor RMS de la onda rectificadora, es tomada a través de un sistema de adquisición de datos para el posterior procesamiento de los mismos.

La respuesta típica de la señal ACPD en función del tiempo cuando la probeta se somete a carga cíclica de amplitud constante es la que aparece en la figura 3.14. Puede observarse que dicha señal cambia de forma continua durante cada ciclo de carga como resultado de las deformaciones, efectos del cierre de grieta y complejas interacciones mecánico-magnéticas. El valor de ACPD depende pues de la tensión a la que está sometida la probeta, y por tanto, sería necesario obtener una curva de calibración, relación entre los valores de ACPD y la medida de longitud de grieta, para cada nivel de carga.

Para obtener la curva de calibración es necesario realizar distintas medidas del valor de ACPD y longitud de grieta. Para ensayos de amplitud constante podría tomarse como valor de ACPD en cada ciclo el valor máximo del pico, que depende del valor máximo de carga, con lo que la curva de calibración sería válida para otro proceso de carga con el mismo valor máximo. La variación de ACPD con el número de ciclos sería la debida al crecimiento de la grieta. Sin embargo este criterio no sería lógico aplicarlo en el caso de cargas de amplitud variable, dado que dicha variación sería debida también al valor del pico de carga en cada ciclo. Este hecho se ve reflejado en la figura 3.14 en la que se representa la respuesta de la señal ACPD en función del tiempo cuando la probeta se somete a carga cíclica de amplitud variable.

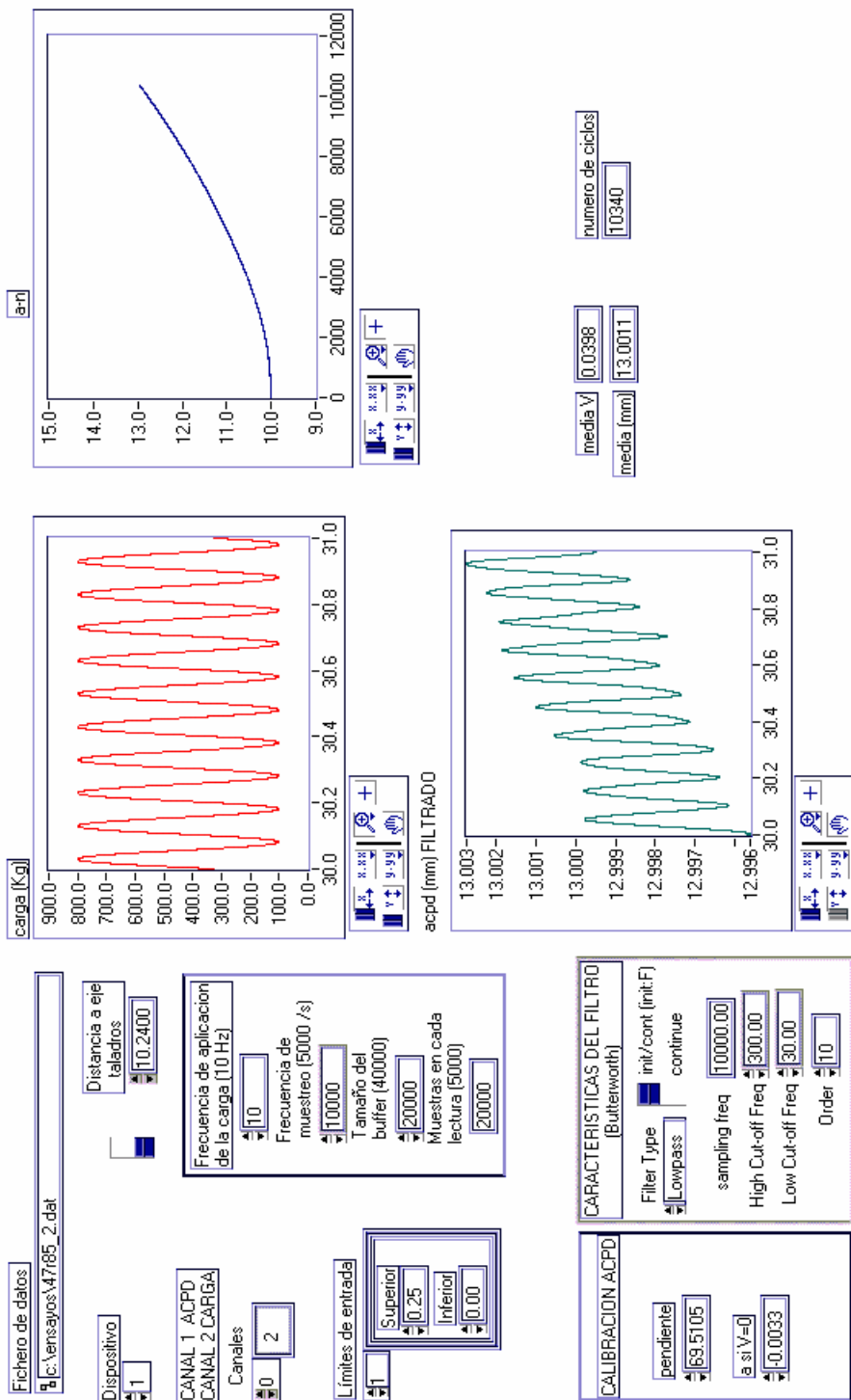


Figura 3.14: Respuesta de la señal ACPD cuando la probeta se somete a carga cíclica de amplitud constante.

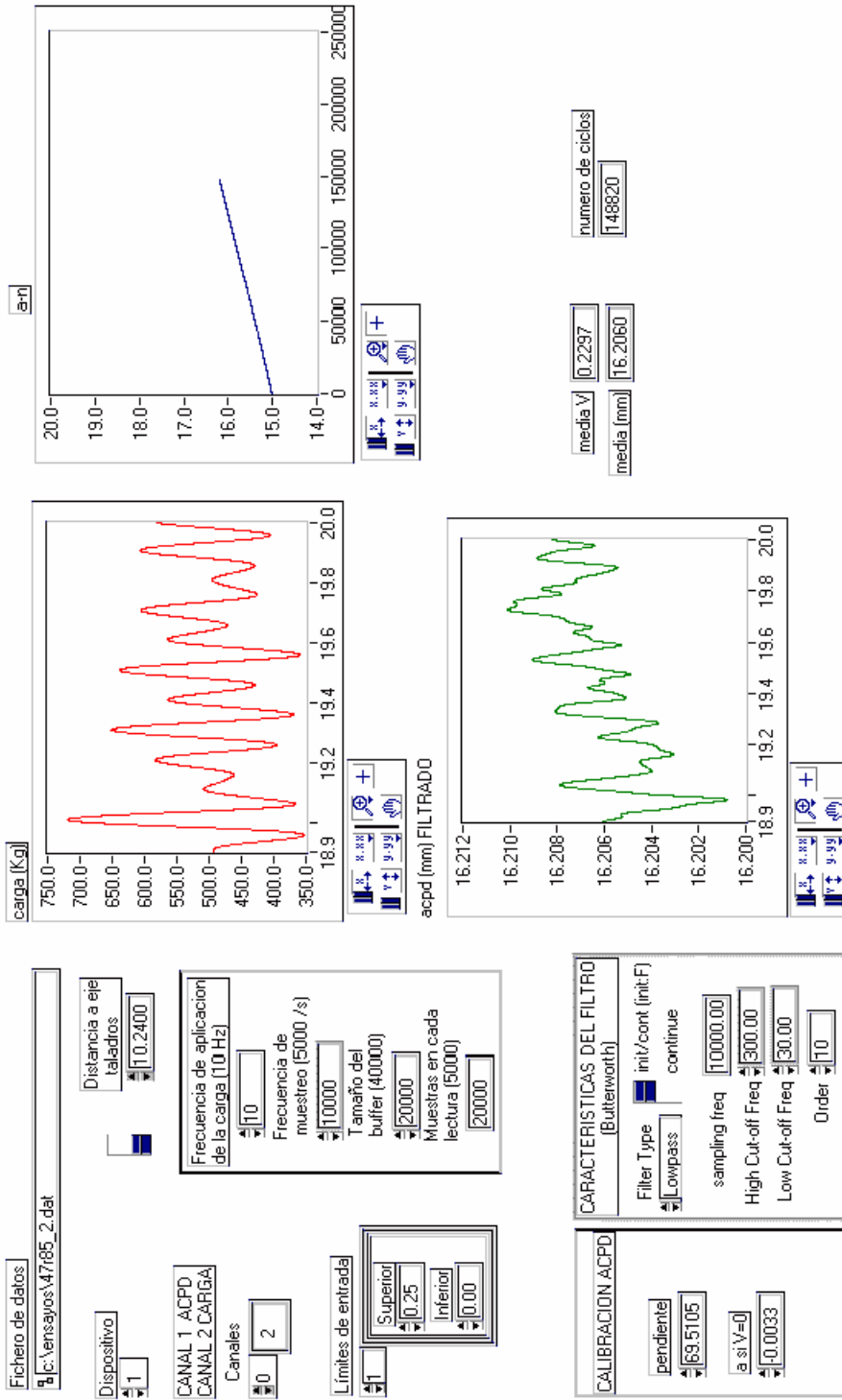


Figura 3.15: Respuesta de la señal ACPD cuando la probeta se somete a carga cíclica de amplitud variable.

Debido a que el valor de ACPD, cuando la probeta se somete a carga cíclica de amplitud variable, varía con el número de ciclos no sólo debido al crecimiento de la grieta que se superpone la debida a la variación de la carga, parece más conveniente utilizar como valor de ACPD el valor medio para un cierto número de ciclos. Dado que el objetivo de este trabajo es la medición de longitud de grieta en ensayos de carga aleatoria con valor medio de 495 Kg en todos los casos, se opta por tomar como medida de la longitud de grieta, la media de los valores muestreados (a 200 datos por ciclo) de la señal ACPD, durante veinte ciclos. Se adopta dicho valor porque para el tipo de cargas en estudio el valor medio de carga se mantiene aproximadamente constante en 495 Kg considerando al menos veinte ciclos. La medida de la longitud de grieta en mm se obtiene a partir de la recta de calibración obtenida con el procedimiento que se describe a continuación:

1. Partiendo de probetas sin agrietar y sometidas a una carga estática de 495 Kg se tomó la referencia desplazando a cero el valor inicial de ACPD.
2. Con diferentes probetas se realizaron ensayos de crecimiento de grieta por fatiga bajo cargas de amplitud constante de valor medio 495 Kg hasta distintas longitudes finales. Se adopta como valor de ACPD la media de los valores muestreados (a 200 datos por ciclo) durante veinte ciclos de carga.
3. Una vez crecida la grieta se fracturaron las probetas y se midió la longitud de la misma, con una precisión de 0.01 mm, haciendo uso de un proyector de perfiles.
4. La curva de calibración, o relación entre los valores de ACPD y la medida de longitud de la grieta, se obtiene ajustando por mínimos cuadrados los valores obtenidos que se representan en la figura 3.16, donde puede observarse la linealidad de dicha relación.

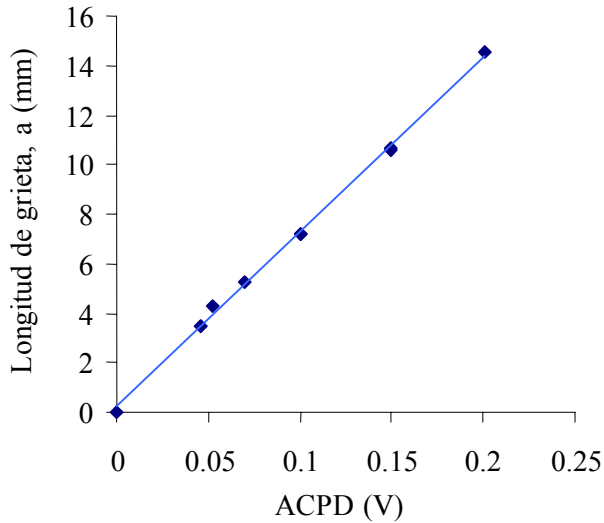


Figura 3.16: *Curva de calibración.*

Para comprobar la validez de los resultados obtenidos en base al sistema de medida y calibración previamente descrito, al final de varios ensayos se fracturaron las probetas y se midió la longitud de la grieta haciendo uso del proyector de perfiles. Debido a la curvatura que adquiere el frente de grieta es necesario medir en tres puntos equidistantes ($a_{1/2}$, $a_{1/2}$, $a_{3/4}$), tal como muestra la figura 3.18, y adoptar la media de esos tres valores como medida de la longitud de grieta. Será necesario hacer una corrección por curvatura si no se cumplieren los siguientes requisitos: 1) la diferencia entre dos cualesquiera de las tres medidas no debe exceder del 10 % de la media, 2) la media de estos tres valores no debe diferir en más de un 10 % de la media de las medidas tomadas en ambas superficies laterales de la probeta y 3) la media de los tres valores no debe diferir en más de un 15 % de ninguna de las dos medidas tomadas en las superficies laterales de la probeta. Con los valores observados tras la fractura de múltiples probetas puede concluirse que en el caso de los ensayos realizados para las dimensiones de probeta empleadas, no es necesaria la corrección por curvatura.

Los resultados obtenidos prueban que el valor medido corresponde con gran exactitud a longitud real con discrepancias inferiores al 1 %. De las comprobaciones realizadas puede concluirse que el método de caída de potencial con corriente alterna junto con la metodología propuesta resultan adecuados para la medición de la longitud de grieta durante el crecimiento por fatiga bajo la acción de carga aleatorias.

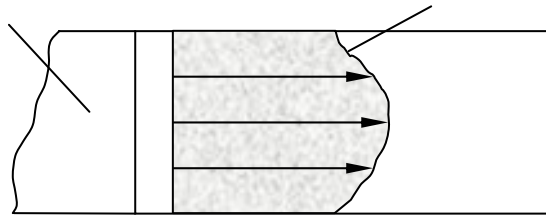


Figura 3.18: Posición de los puntos de medida para determinar la longitud de grieta.

Para comparar los resultados obtenidos mediante medición óptica de la longitud de grieta con los obtenidos haciendo uso de la técnica ACPD es necesario hacer algunas correcciones a la primera debido precisamente a la curvatura del frente de grieta.

3.3.3 Sistema de adquisición de datos.

Las magnitudes físicas a obtener durante el ensayo, carga y longitud de grieta, son medidas a través de las señales eléctricas o salidas analógicas de la máquina de ensayos y el equipo ACPD. Dichas señales analógicas son transformadas en señales digitales y suministradas a un PC a través de la tarjeta de adquisición de datos AT-MIO-16E-10 de National Instrument. Esta tarjeta usa un convertidor analógico/digital de aproximación sucesiva y un amplificador de ganancia programable que permite ajustar automáticamente, al

fijar los límites de entrada, el rango de cada señal para aprovechar la máxima resolución de 12 bits; permite 16 canales de entrada referenciada o 8 con entrada diferencial, a frecuencia máxima de muestreo 100000 muestras por segundo en un rango máximo de trabajo de ± 11 voltios.

El software desarrollado para la adquisición se ha programado en el lenguaje de programación gráfica Labview. Los programas en Labview se denominan VIs (Virtual Instruments) porque en su apariencia y modo de operar imitan a instrumentos de medida (voltímetros, osciloscopios, analizadores de espectros, etc). La salida en pantalla del programa de adquisición de datos es lo que se representa en las figuras 3.14 y 3.15. La salida del programa proporciona de forma gráfica los valores de las señales de entrada digitalizadas, carga en Kg y longitud de grieta en milímetros, frente al tiempo. Así mismo, se representa de forma gráfica la evolución de la longitud de grieta frente al número de ciclos a lo largo de todo el ensayo y a la vez ambos parámetros son almacenados en un fichero de salida.

En los ensayos realizados la frecuencia de aplicación de la carga fue de 10 Hz y se adoptó una frecuencia de muestreo de 2000 datos por segundo, lo que supone 200 puntos por ciclo. Las señales analógicas tanto de carga como ACPD son filtradas digitalmente de forma independiente durante la propia adquisición de los datos, con el fin de eliminar los ruidos eléctricos introducidos por los propios sistemas de medida, en los cables de conexión o incluso en el convertidor analógico-digital. El filtro digital corresponde a un filtro paso-baja con una frecuencia de corte de 300 Hz. En la adquisición continua cada lectura corresponde a 4000 datos, es decir 20 ciclos, la medida de la longitud de grieta se adopta en base al valor medio de la señal del ACPD en los 20 ciclos. Haciendo uso de la relación entre caída de potencial y longitud de grieta y sumando la distancia inicial de la entalla al eje de taladros, se representa y almacena dicho valor como la longitud de grieta cada 20 ciclos.

3.4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.

En esta sección se describe el procedimiento o pasos seguidos y modo de operar en la realización de los ensayos.

3.4.1. Preparación de las probetas.

En primer lugar se realiza un pulido de la superficie de las probetas para facilitar la observación óptica del crecimiento de la grieta. Para cada una de las probetas se mide la longitud exacta de la entalla haciendo uso de un proyector de perfiles.

A continuación se practican con ayuda de una plantilla los orificios necesarios para las conexiones al sistema de medición de grieta. Se realizan cuatro orificios de 1 mm de diámetro en los que se introducen, y se anclan simplemente por presión, unos conectores a los que se sueldan los cables del sistema ACPD, según el esquema de conexiones de la figura 3.12. Posteriormente se procede a la limpieza de la superficie de la probeta y de la zona de la entalla. La posición de los orificios de conexión no es tan determinante en el correcto funcionamiento del sistema ACPD como lo es el movimiento de los cables de conexión, por las variaciones de inducción magnética que producen; por esta razón, al colocar la probeta en la máquina de ensayo se fijarán dichos cables de forma que se evite al máximo su movimiento.

3.4.2. Puesta a punto del sistema ACPD.

Seleccionando una corriente de 30 KHz y una ganancia de amplificación de 60 dB se ajusta la intensidad de corriente a 1.482 A, comprobando que la caída inicial de potencial está próxima a 0.5 V. A continuación se desplaza el valor inicial de caída de potencial (ACPD) a cero de manera que la señal de salida es directamente la diferencia entre el valor inicial de referencia, correspondiente a la longitud de entalla, y la medida actual.

3.4.3. Precrecimiento de grieta.

El componente es preagrietado desde la longitud inicial de la entalla hasta una longitud de grieta de 15 mm usando una carga senoidal de amplitud constante 6867 N, valor medio 4415 y frecuencia 10 Hz. El seguimiento de la grieta se lleva a cabo haciendo uso del sistema ACPD con la lectura del programa de adquisición de datos, en el que únicamente es necesario cambiar para cada ensayo la longitud de la entalla o distancia inicial a eje de taladros. El valor promedio de dicha longitud es de 10.6 mm y la vida media en el preagrietado es de 20000 ciclos aproximadamente, lo que supone un tiempo de ensayo de unos 30 minutos. Para la aplicación de las cargas de amplitud constante durante el preagrietado la máquina se controla directamente desde la consola o panel de control. Alcanzada la longitud final de preagrietado el proceso se detiene manualmente.

3.4.4. Crecimiento de grieta.

Antes del inicio de la aplicación de la carga aleatoria se configura la adquisición de datos cambiando el nombre del fichero de salida, que en general identifica la probeta y el registro de carga empleado.

Para la aplicación de la carga aleatoria la máquina es controlada por un ordenador a través del programa Flaps Plus (Fatigue Laboratory Application Software) versión 5.0. Esta aplicación permite definir un ensayo cuya estructura es creada por el usuario en el módulo Flaps Plus Design y almacenada como un fichero de control para su posterior ejecución.

Para generar un tipo de forma de onda complejo es necesario suministrar en fichero la serie de puntos (picos y valles) que el controlador unirá con medios ciclos senoidales. El módulo de ejecución Flaps Run no puede procesar los datos directamente en ASCII por lo que previamente el módulo Flaps Playback permite convertir estos datos en formato adecuado para su ejecución. Los registros generados por simulación son suministrados en ficheros ASCII al módulo Flaps Playback y transformados a formato de ejecución en ficheros

.SLH (Standard Load History). En el diseño del ensayo, módulo Flaps Design, puede establecerse para la serie de puntos el nivel medio de la forma de onda generada, valor que se suma a cada punto de la serie, así como la amplitud, que define el valor que multiplica (divido por 100) a la serie de puntos del fichero .SLH. La unidad de carga seleccionada en la máquina para el control y adquisición de datos es el kilogramo.

Alcanzada la longitud final de la grieta el proceso se detiene automáticamente al activarse un relé del sistema de medición de la grieta cuando el valor de ACPD alcanza un valor, fijado en el correspondiente a una longitud de 26 mm. La automatización del ensayo es sumamente importante, ya que sin ella no sería posible la realización ininterrumpida de muchos de los ensayos, algunos de los cuales tienen una duración de 34 horas.

Finalmente el último paso sería lógicamente el procesado de los datos obtenidos que se describe en mayor detalle en la próxima sección.

3.5. PROCESADO DE DATOS.

Durante los ensayos se recogen los valores de longitud de grieta como valor medio de la señal ACPD durante veinte ciclos de carga, se grava pues el par de valores: número de ciclos y longitud de grieta cada dos segundos. La figura 3.19 muestra una de las curvas a-N obtenidas en uno de los ensayos y un detalle de la misma.

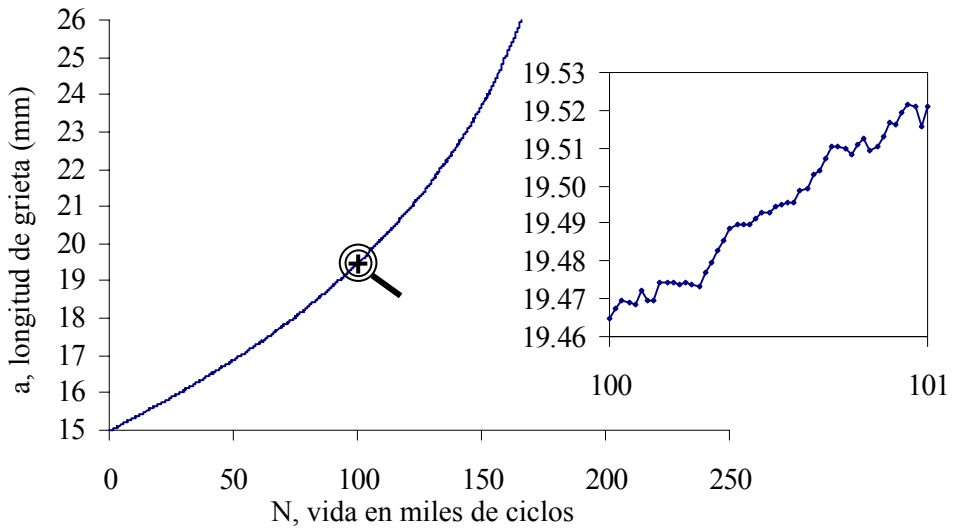


Figura 3.19: Curva $a-N$ obtenida durante uno de los ensayos.

Como puede observarse en la figura los valores de longitud de grieta así obtenidos no resultan siempre crecientes con el número de ciclos, y las oscilaciones que hacen incluso disminuir su valor se deberán en parte a ruidos en los sistemas de lectura. Esto justifica el que se realice un filtrado digital de los registros originales obtenidos de los ensayos, de manera que con la mínima pérdida de información quede unívocamente definida la vida o número de ciclos que tarda en alcanzarse una determinada longitud de grieta. En la figura 3.20 se representa el mismo detalle la curva $a-N$ de la figura 3.19 y superpuesta la curva $a-N$ filtrada.

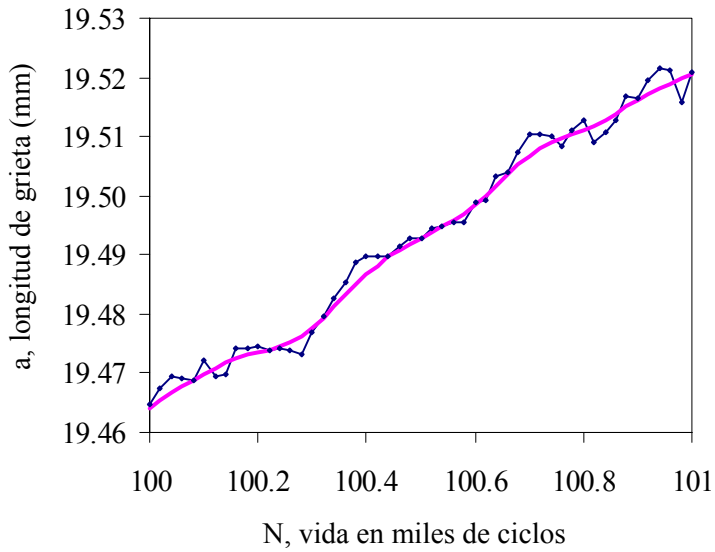


Figura 3.20: *Detalle de una curva a-N obtenida durante uno de los ensayos y superpuesta la curva filtrada digitalmente.*

A partir de las curvas a-N filtradas y por interpolación se obtiene el valor de vida o número de ciclos para cada longitud de grieta entre 15 y 25.3 mm con incrementos de 0.1 mm. De esta forma las curvas a-N sobre las que se analizarán todos los resultados, estadística de vidas medias, desviaciones, coeficiente de variación, etc, para todos los ensayos de todas las series contienen 103 puntos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] ASTM E647-91, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.
- [2] Shinozuka M., Applications of digital simulation of gaussian random processes, Random excitation of Structures by Earthquakes and atmospheric turbulence, Parkus H. (Ed), Springer Verlag, 1977.
- [3] Flaps Plus, Fatigue Laboratory Application Software, User's Guide, Instron Corporation, 1991.
- [4] Instron Model 8500 Plus, Dynamic Testing System, Operator's Guide, Instron Corporation, 1995.
- [5] Ian Malkin BSc., Automatic update of P.I.D. Terms on a Servohydraulic Machine Control Technology to Solve Materials Testing Problems, Instron Ltd, High Wycombe, UK, 1993.
- [6] Dominguez J., Zapatero J. and Pascual J., Effect of Load Histories on Scatter of Fatigue Crack Growth in Aluminum Alloy 2024-T351, Engineering Fracture Mechanics Vol. 56, No. 1, pp 65-76,1997.
- [7] ASTM STP 1251, Special Applications and Advanced Techniques for Crack Size Determination, J. J. Ruschau an J. K. Donald, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1995.
- [8] Jablonski D. A., Measurement of Multiple-Site Cracking in Simulated Aircraft Panels Using AC Potencial Drop, ASTM STP 1251, Philadelphia, pp 33-50, 1995.

- [9] Ranganathan N, Automated Fatigue Crack Growth Monitoring: Comparison of Different Crack-Following Techniques, ASTM STP 1025, Philadelphia, pp 77-92, 1989.

- [10] Dai Y., Fatigue Crack Growth Measurement in TMF Testing in Titanium Alloys Using an ACPD Technique, ASTM STP 1251, Philadelphia, pp. 17-32, 1995.

- [11] Moreno B., Ruiz J., Zapatero J., Medición de la Longitud de Grieta en Ensayos con Carga Aleatoria Usando el Sistema de Caída de Potencial con Corriente Alterna (ACPD), Propiedades Mecánicas de los Sólidos, Vol 6, pp. 409-413, 1998..

- [12] Practical Aspect of The ACPD Technique, User Manual, Matelect Limited, 1994

- [13] Matelec ACPD Crack Growth Monitor, Instruction Manual, Matelect Limited, 1995.

Capítulo 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para la realización del presente trabajo se han llevado a cabo un total de 235 ensayos de crecimiento de grietas por fatiga, lo que supone en tiempo de ensayo unas 2.600 horas. En este capítulo se exponen los resultados experimentales obtenidos, justificando en primer lugar la planificación de las diferentes series de ensayos realizados en base a alcanzar los objetivos planteados en esta investigación. El procedimiento de ensayo se describe con detalle en el capítulo 3, de forma resumida se exponen a continuación sólo los aspectos más importantes.

Los ensayos se realizaron en control de carga con una máquina servohidráulica Instron modelo 8501. El material empleado en este estudio es la aleación de aluminio Al-2024 T-351, con la que se fabricaron probetas tipo CT de 12 mm de espesor y 50 mm de anchura. La medición del tamaño de grieta se realizó en los primeros ensayos usando un microscopio óptico y en su mayoría haciendo uso de la técnica de caída de potencial con corriente alterna con el equipo CGM-5R de Matelec.

El componente fue preagrietado hasta una longitud de 15 mm usando una carga senoidal de 3434 N de amplitud constante, valor medio 4415 N y una frecuencia 10 Hz. Después del preagrietado se aplica un registro de carga variable entre la longitud inicial $a_0=15$ mm y una longitud final $a_f=25.3$ mm.

Los registros de carga considerados han sido generados numéricamente y corresponden a cuatro tipos distintos de procesos aleatorios. Todos los procesos considerados en este estudio tienen el mismo valor medio de carga (4851 N) y dentro de cada tipo de proceso se han empleado dos niveles de carga, con una desviación estándar de 1078 N en el nivel considerado alto y 638 N para el nivel bajo. Dichos registros tienen una longitud finita y se han empleado registros de 5000, 25000 y 100000 ciclos.

A través de un sistema de adquisición de datos se registran y almacenan como resultado de cada ensayo la longitud de grieta, a , y el número de ciclos de carga acumulados, N , necesarios para hacer crecer la grieta desde la longitud inicial de referencia a_0 hasta la longitud final a_f . Los resultados así obtenidos son por último filtrados digitalmente. En este capítulo se exponen en tablas los valores de vida obtenidos para la longitud final de grieta en todos los ensayos realizados y en forma gráfica la evolución de dicho crecimiento en curvas $a-N$.

4.1. PLANIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS.

Como ya se ha comentado en los capítulos previos la determinación del tiempo que tarda en crecer una grieta por fatiga ante cargas aleatorias está condicionado por múltiples variables que afectan al proceso. El objetivo de esta investigación es estudiar la influencia que sobre la variabilidad de la vida tienen tanto la propia aleatoriedad de las propiedades del material como la del proceso de carga. En concreto, con relación a los procesos de carga, el interés se centra por una parte en estudiar la influencia del uso de diferentes historias representativas de un mismo proceso aleatorio y de la longitud de dichas historias (número de ciclos), y por otra parte, en analizar la influencia del propio

tipo de proceso de carga, caracterizado en base al ancho de banda y nivel de carga. Para alcanzar los objetivos planteados se hace necesario repetir diversos ensayos agrupados en diferentes series, los ensayos se agrupan en función del tipo de proceso y nivel de carga, así como, del registro concreto de carga empleado y la longitud del mismo.

Para determinar la variabilidad de la velocidad de crecimiento producida por el uso de diferentes registros representativos de un mismo proceso, es necesario conocer previamente la variabilidad producida cuando para diferentes probetas se emplea siempre un mismo registro representativo de dicho proceso. Ello permitirá distinguir el efecto producido por la aleatoriedad de la respuesta del material del generado por la diferencia entre los registros empleados. Por ello, antes de realizar los ensayos con distintos grupos de registros representativos de los diferentes tipos de procesos seleccionados para el estudio, se plantea la realización de una primera serie de ensayos empleando siempre un mismo registro.

Para la primera serie de ensayos se empleó un mismo registro de carga de 5000 ciclos representativo del proceso denominado tipo C y nivel alto de carga. Se seleccionó dicho proceso por tener un ancho de banda ($\varepsilon=0.77$) intermedio dentro del rango de los distintos tipos de procesos considerados. Se realizaron un total de 25 ensayos en los que las longitudes inicial y final de grieta fueron medidas haciendo uso de un microscopio óptico con amplificación x100 y una resolución de 0.01 mm. Esta serie de ensayos se denominará en adelante C-H5*, haciendo uso de la denominación empleada para distinguir los registros de carga. El símbolo * se empleará para hacer referencia a que todos los ensayos se han realizado con el mismo registro, en concreto en esta serie con el registro C-H5_1.

Con la segunda serie de ensayos, que denominaremos C-H5, se pretende caracterizar la influencia, que sobre la vida de crecimiento de grieta, produce el uso de distintos registros representativos de un mismo proceso con probetas o especímenes teóricamente iguales. Esta serie consta de un total de 30 ensayos, para los que se generaron numéricamente otras tantas historias de carga diferentes, todas ellas representativas también del proceso tipo C y para el nivel alto de cargas con una longitud de 5000 ciclos cada una. El seguimiento de la longitud de grieta se realizó igualmente mediante microscopía óptica.

Como resultado de estas dos primeras series de ensayos se obtuvieron únicamente los valores de vida hasta la longitud final de 25.3 mm puesto que con el sistema de medición óptica es inviable el seguimiento continuo de la longitud de la grieta, y por tanto, la obtención de las curvas a-N. En las siguientes tandas de ensayos, con la puesta a punto del sistema de medición de grietas por caída de potencial, se obtiene el registro continuo del crecimiento de la grieta con el número de ciclos.

Tras el análisis de los resultados para completar el estudio sobre la variabilidad de los resultados debida al propio material y la debida al registro de carga, se plantean dos nuevas series de ensayos de idéntica descripción a las anteriores pero usando en este caso registros de longitud 25000 ciclos. Por ello, la tercera serie denominada C-H25* consta de 20 ensayos realizados todos usando un mismo registro (C-H25_1) mientras que la cuarta serie la forman 20 ensayos en los que se emplearon 20 registros diferentes, en ambos casos de longitud 25000 ciclos, pero también todos representativos del proceso tipo C y nivel de carga alto al igual que en las anteriores series.

Para completar el análisis sobre el efecto de la longitud de los registros empleados, también para el proceso tipo C y el nivel de carga alto, se realizaron otros 20 ensayos con otros tantos registros diferentes, en este caso de longitud 100000 ciclos.

En la siguiente tabla se resumen las características y denominación que se usará en adelante para cada una de estas cinco series de ensayos.

Tabla 4.1: *Características y denominación de las series de ensayos.*

NOMBRE SERIE	TIPO DE PROCESO	NIVEL DE CARGA	TIPO DE REGISTRO	LONGITUD REGISTROS	NUMERO ENSAYOS
C-H5*	C ($\varepsilon = 0.77$)	ALTO $\mu_c = 4851$ N $\sigma_c = 1078$ N	Idéntico Registro	5000	25
C-H5			Distintos Registros		30
C-H25*	C ($\varepsilon = 0.77$)	ALTO $\mu_c = 4851$ N $\sigma_c = 1078$ N	Idéntico Registro	25000	20
C-H25			Distintos Registros		20
C-H100	C ($\varepsilon = 0.77$)	ALTO $\mu_c = 4851$ N $\sigma_c = 1078$ N	Distintos Registros	100000	20

Para caracterizar la influencia del tipo de proceso de carga y el nivel de la misma se plantean un total de 140 ensayos. Dichos ensayos se agrupan en siete series distintas para cada una de las cuales se han obtenido numéricamente 20 historias o registros de carga diferentes de 25000 ciclos cada uno. Con cada una de las historias de carga se ensayó una probeta obteniéndose las curvas de crecimiento de grieta entre una longitud inicial $a_0=15$ mm y una longitud final $a_f=25.3$ mm.

Con el nivel alto de carga se realizaron cuatro series de ensayos, cada una considerando uno de los cuatro procesos aleatorios distintos elegidos para este estudio. De estas cuatro series, la correspondiente al proceso de carga denominado tipo C coincide con la tercera de las expuestas anteriormente. Con el nivel bajo de carga se realizaron tres series de ensayos correspondientes a los procesos tipo A, C y D. En la tabla 4.2 se resumen las características y

denominación que se usará en adelante para estas siete series de ensayos distintos.

Tabla 4.2: *Características y denominación de las series de ensayos.*

NOMBRE SERIE	TIPO DE PROCESO	NIVEL DE CARGA	TIPO DE REGISTRO	LONGITUD REGISTROS	NUMERO ENSAYOS
A-H25	A ($\epsilon = 0.64$)	ALTO $\mu_c = 4851$ N $\sigma_c = 1078$ N	Distintos Registros	25000	20
B-H25	B ($\epsilon = 0.70$)				
C-H25	C ($\epsilon = 0.77$)				
D-H25	D ($\epsilon = 0.85$)				
A-L25	A ($\epsilon = 0.64$)	BAJO $\mu_c = 4851$ N $\sigma_c = 638$ N	Distintos registros	25000	20
C-L25	C ($\epsilon = 0.77$)				
D-L25	D ($\epsilon = 0.85$)				

4.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Esta sección incluye única y exclusivamente los valores tabulados de los resultados de vida para cada serie de ensayos. Así mismo, y también en tablas, se exponen los parámetros estadísticos: vida media μ_N , desviación estándar de la vida σ_N y coeficiente de variación σ_N/μ_N . Las curvas de crecimiento de grieta entre la longitud inicial $a_0=15$ mm y la longitud final $a_f=25.3$ mm para cada una de las series en las que se obtuvieron se representan en las figuras 4.1-10.

Tabla 4.3: Resultados de vida para la serie de ensayos C-H5*.

Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)
1	169800	8	170875	15	170634	22	171903
2	175345	9	172731	16	166911	23	173618
3	166341	10	168704	17	168800	24	173357
4	170719	11	172300	18	167142	25	167417
5	169187	12	178906	19	167444		
6	168412	13	176201	20	164235		
7	178356	14	175140	21	165317		

Tabla 4.4: Parámetros estadísticos de vida para la serie de ensayos C-H5*.

Vida media μ_N (ciclos)	Desviación estándar σ_N (ciclos)	Coficiente de variación σ_N/μ_N
170792	3874	0.0227

Tabla 4.5: Resultados de vida para la serie de ensayos C-H5.

Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)
1	169712	9	154692	17	165922	25	175260
2	160608	10	155415	18	184893	26	214155
3	154733	11	164669	19	158549	27	190994
4	157861	12	161315	20	174460	28	171991
5	198112	13	168213	21	163140	29	151418
6	179032	14	170756	22	198557	30	191004
7	159564	15	163186	23	157000		
8	159833	16	155419	24	168872		

Tabla 4.6: Parámetros estadísticos de vida para la serie de ensayos C-H5.

Vida media μ_N (ciclos)	Desviación estándar σ_N (ciclos)	Coefficiente de variación σ_N/μ_N
169978	15272	0.0898

Tabla 4.7: Resultados de vida para la serie de ensayos C-H25*.

Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)
1	160996	6	160867	11	157040	16	167804
2	160654	7	169342	12	151728	17	161945
3	159929	8	162278	13	157711	18	165871
4	164752	9	165686	14	166173	19	165148
5	162752	10	154906	15	165287	20	165151

Tabla 4.8: Parámetros estadísticos de vida para la serie de ensayos C-H25*

Vida media μ_N (ciclos)	Desviación estándar σ_N (ciclos)	Coefficiente de variación σ_N/μ_N
162301	4347	0.0268

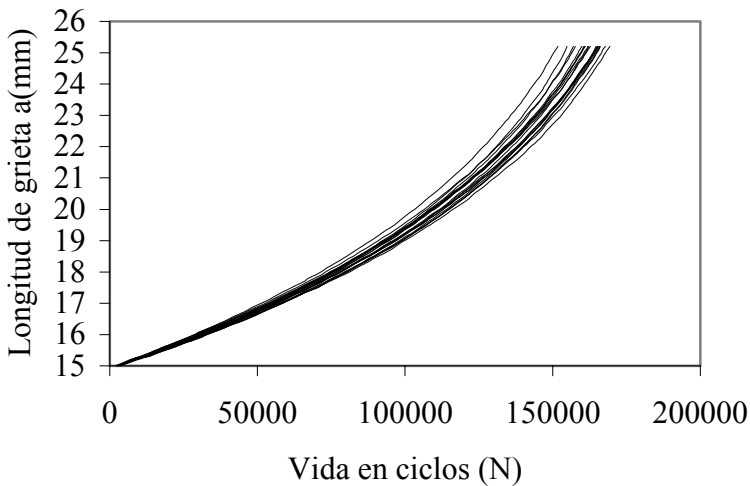
**Figura 4.1:** Curvas a-N para la serie de ensayos C-H25*.

Tabla 4.9: Resultados de vida para la serie de ensayos C-H25.

Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)
1	163518	6	156527	11	175793	16	172543
2	168101	7	169192	12	173289	17	166713
3	165904	8	172029	13	169178	18	172489
4	161975	9	161439	14	174377	19	167098
5	161909	10	166916	15	172066	20	174692

Tabla 4.10: Parámetros estadísticos de vida para la serie de ensayos C-H25.

Vida media μ_N (ciclos)	Desviación estándar σ_N (ciclos)	Coficiente de variación σ_N/μ_N
168287	5124	0.0304

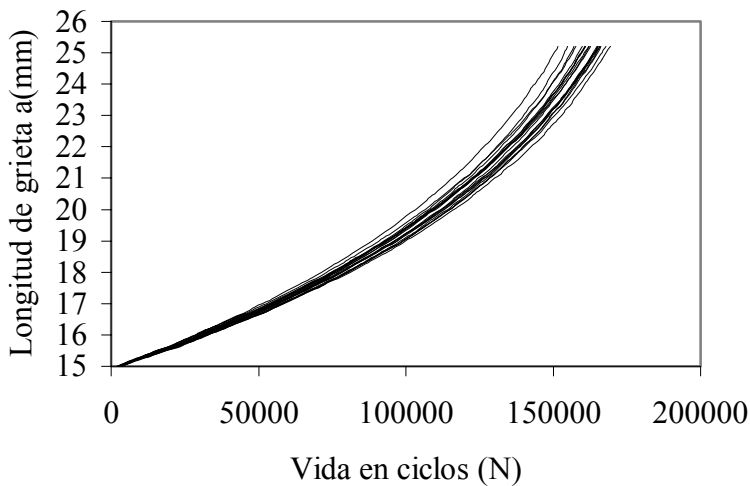


Figura 4.2: Curvas a-N para la serie de ensayos C-H25.

Tabla 4.11: Resultados de vida para la serie de ensayos C-H100.

Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)
1	170774	6	170234	11	169773	16	178913
2	170383	7	166220	12	168755	17	179527
3	167646	8	168985	13	164803	18	170051
4	166185	9	166017	14	170539	19	171358
5	167811	10	166437	15	173684	20	170366

Tabla 4.12: Parámetros estadísticos de vida para la serie de ensayos C-H100.

Vida media μ_N (ciclos)	Desviación estándar σ_N (ciclos)	Coefficiente de variación σ_N/μ_N
169923	3769	0.0222

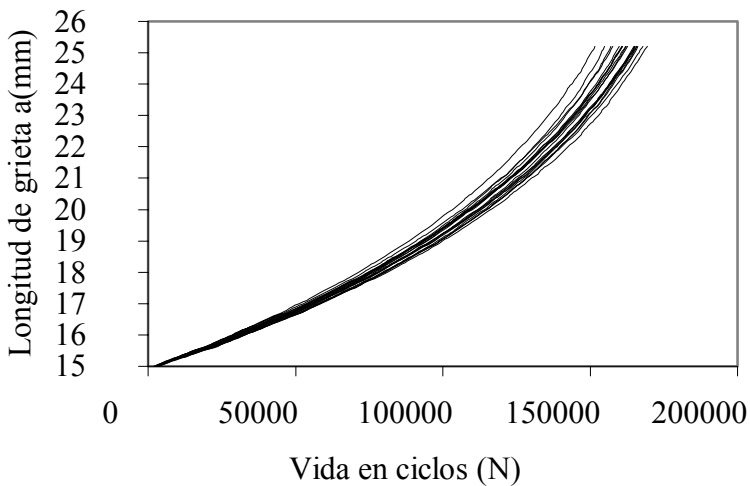
**Figura 4.3:** Curvas a - N para la serie de ensayos C-H100.

Tabla 4.13: Resultados de vida para la serie de ensayos A-H25.

Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)
1	252037	6	282685	11	297442	16	283431
2	278357	7	263253	12	303699	17	272483
3	270739	8	271256	13	269760	18	267089
4	281769	9	267153	14	288726	19	272211
5	257509	10	299800	15	275030	20	288584

Tabla 4.14: Parámetros estadísticos de vida para la serie de ensayos A-H25.

Vida media μ_N (ciclos)	Desviación estándar σ_N (ciclos)	Coficiente de variación σ_N/μ_N
277151	13377	0.0483

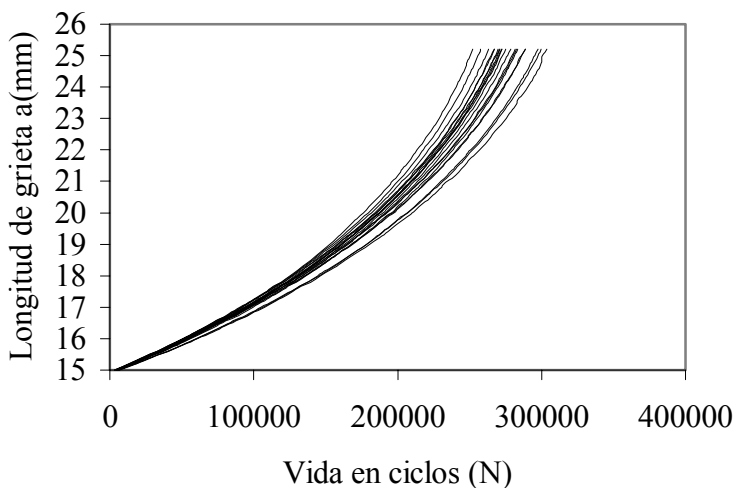


Figura 4.4: Curvas a-N para la serie de ensayos A-H25.

Tabla 4.15: Resultados de vida para la serie de ensayos B-H25.

Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)
1	197571	6	214787	11	191569	16	192843
2	198280	7	199787	12	199925	17	182228
3	213463	8	190720	13	185478	18	192957
4	191279	9	195975	14	205707	19	199479
5	197165	10	196021	15	197712	20	199326

Tabla 4.16: Parámetros estadísticos de vida para la serie de ensayos B-H25.

Vida media μ_N (ciclos)	Desviación estándar σ_N (ciclos)	Coefficiente de variación σ_N/μ_N
197114	7686	0.0390

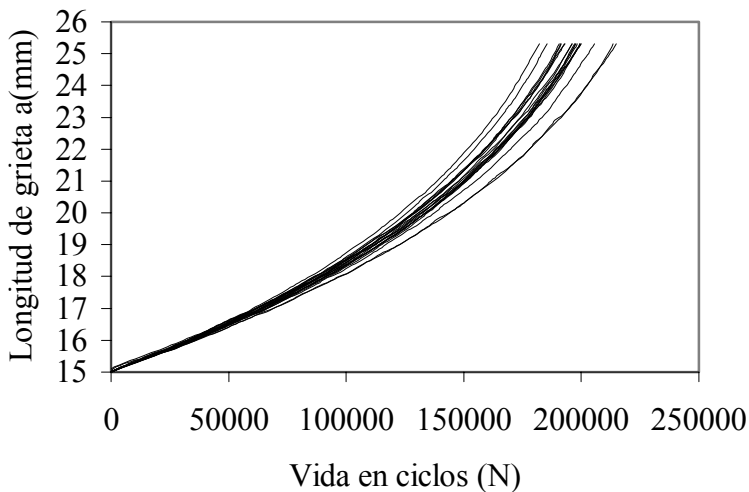
**Figura 4.5:** Curvas $a-N$ para la serie de ensayos B-H25.

Tabla 4.17: Resultados de vida para la serie de ensayos D-H25.

Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)
1	142471	6	146012	11	151908	16	135452
2	140334	7	141552	12	149165	17	147463
3	153984	8	143821	13	147306	18	156687
4	157995	9	145294	14	149633	19	147367
5	144667	10	148805	15	147644	20	142057

Tabla 4.18: Parámetros estadísticos de vida para la serie de ensayos D-H25.

Vida media μ_N (ciclos)	Desviación estándar σ_N (ciclos)	Coficiente de variación σ_N/μ_N
146981	5363	0.0365

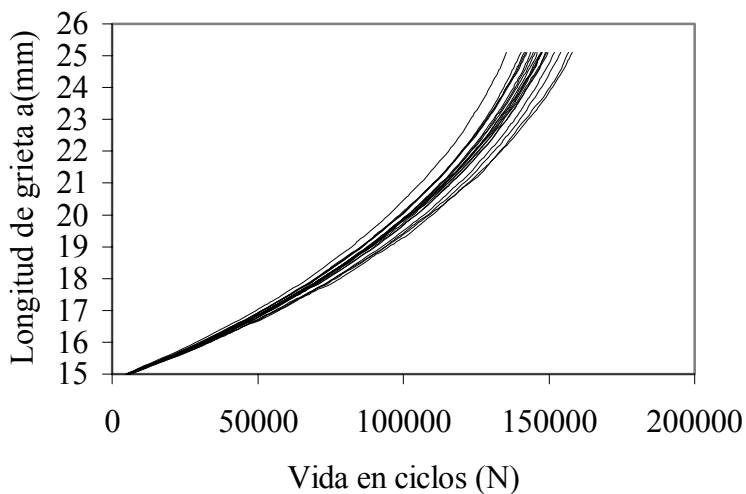


Figura 4.6: Curvas a-N para la serie de ensayos D-H25.

Tabla 4.19: Resultados de vida para la serie de ensayos A-L25.

Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)
1	1148861	6	1166427	11	1184027	16	1218736
2	1198065	7	1121274	12	1226894	17	1162383
3	1182136	8	1120180	13	1148975	18	1136317
4	1158923	9	1139706	14	1177771	19	1078186
5	1150015	10	1179450	15	1216027	20	1165368

Tabla 4.20: Parámetros estadísticos de vida para la serie de ensayos A-L25.

Vida media μ_N (ciclos)	Desviación estándar σ_N (ciclos)	Coefficiente de variación σ_N/μ_N
1163986	35447	0.0305

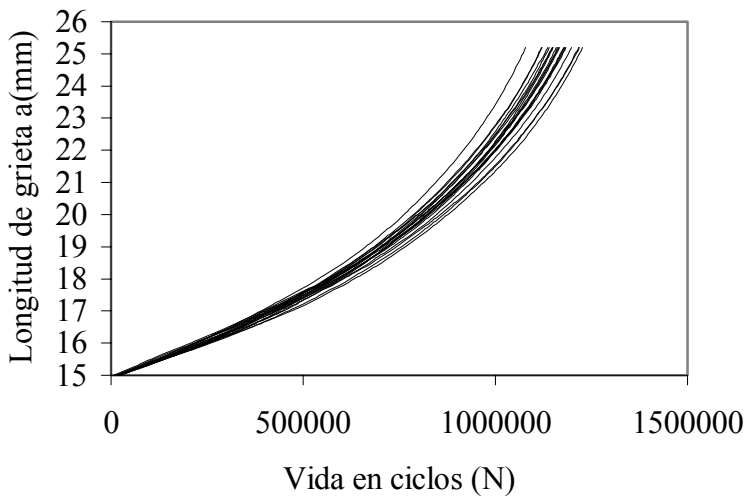
**Figura 4.7:** Curvas a-N para la serie de ensayos A-L25.

Tabla 4.21: Resultados de vida para la serie de ensayos C-L25.

Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)
1	646857	6	710754	11	697675	16	700708
2	701004	7	681220	12	696165	17	686745
3	668544	8	665748	13	686503	18	675976
4	701926	9	690063	14	708625	19	714876
5	669974	10	696408	15	716844	20	696718

Tabla 4.22: Parámetros estadísticos de vida para la serie de ensayos C-L25.

Vida media μ_N (ciclos)	Desviación estándar σ_N (ciclos)	Coefficiente de variación σ_N/μ_N
690667	17715	0.0256

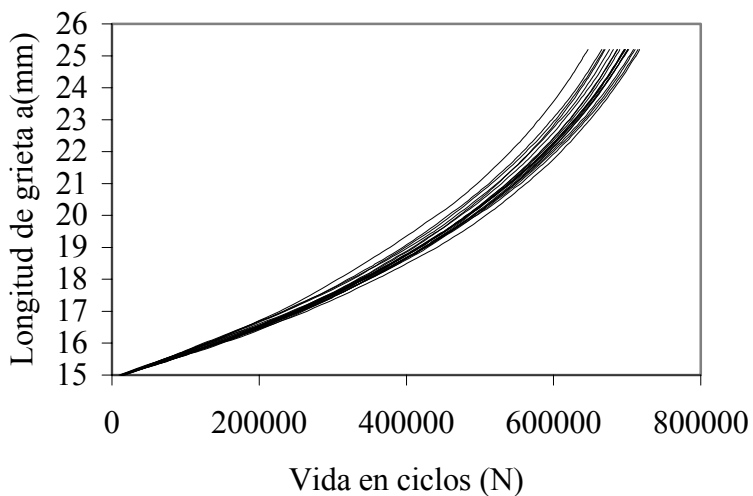


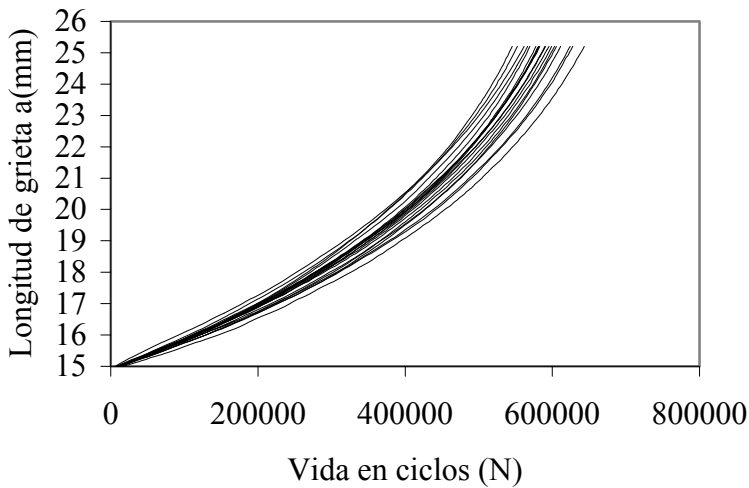
Figura 4.8: Curvas a-N para la serie de ensayos C-L25.

Tabla 4.23: Resultados de vida para la serie de ensayos D-L25.

Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)	Ensayo	N (ciclos)
1	566428	6	581190	11	590895	16	577606
2	582102	7	605477	12	595421	17	598901
3	590070	8	545417	13	602834	18	627754
4	581803	9	569540	14	561522	19	624127
5	583079	10	643539	15	552278	20	611404

Tabla 4.24: Parámetros estadísticos de vida para la serie de ensayos D-L25.

Vida media μ_N (ciclos)	Desviación estándar σ_N (ciclos)	Coefficiente de variación σ_N/μ_N
589569	24525	0.0416

**Figura 4.9:** Curvas a-N para la serie de ensayos D-L25.

Capítulo 5

SIMULACIÓN Y COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para determinar la vida a fatiga de elementos o sistemas sometidos a cargas de variación irregular es necesario realizar ensayos usando historias de carga que representen con fidelidad las solicitudes reales que van a producirse. Dado el carácter aleatorio de las cargas, cada uno de los posibles registros representativos empleados en el ensayo producirá una vida distinta en el elemento en cuestión. La diferencia entre los resultados de uno y otro registro, con independencia de la variación de las propiedades del material, dependerá de diversos factores como son: longitud del registro representativo empleado, grado de irregularidad de las cargas que deben representarse, frecuencia de aparición de sobrecargas, valores y distribución de las mismas, etc. Por ello, para decidir la historia de cargas a emplear de entre todas las posibles, es interesante determinar la variabilidad de la vida que se obtiene al emplear cada una de ellas. Así se podrá decidir cual de ellas emplear y el orden de magnitud del error que puede producirse respecto a la duración real del elemento o sistema.

En ensayos o simulación, para obtener resultados conservativos, puede emplearse el registro más desfavorable de los considerados representativos. Otro procedimiento empleado es la eliminación de las sobrecargas más altas del registro a emplear considerando que existe cierta probabilidad de que no se produzcan en alguno de los elementos sometidos posteriormente al proceso real de carga. Con ello se elimina el efecto de retardo que pueden producir, aumentando el grado de seguridad de la predicción. Sin embargo, si quiere conocerse adecuadamente el margen de seguridad obtenido al modificar el registro o al emplear el más desfavorable, es importante realizar algún tipo de análisis del efecto conseguido.

El análisis de la variabilidad de la vida a fatiga en función del registro empleado puede hacerse mediante ensayo o simulación, definiendo varios registros y aplicando cada uno de ellos de forma repetida hasta el fallo al elemento en cuestión [1]. El método experimental tiene el inconveniente del coste de su realización, tanto económico como en tiempo, lo que lo hace prohibitivo, excepto en casos excepcionales. Por ello, el uso de la simulación está bastante extendido para analizar la variabilidad de la vida con las modificaciones del registro de carga.

Como se comentó en el capítulo 2 se pueden emplear diversos modelos que simulan el comportamiento de una grieta ante cargas de variación irregular, considerando el efecto de secuencia [2-4,6]. De ellos, quizás los más empleados son los basados en el cierre de grieta. Normalmente, estos modelos han sido probados y contrastados, analizando su comportamiento con cargas de amplitud constante que incluyen una sobrecarga y con cargas de variación irregular [4-13], comparándose la vida obtenida con la experimental, llegándose a resultados aceptables. Sin embargo, ante registros distintos producen normalmente vidas cuya relación con la experimental puede variar apreciablemente de un registro a otro. Ello hace que la fiabilidad del análisis de la variabilidad de vida a fatiga en función del registro empleado pueda no ser suficiente, aunque sí permite conocer la tendencia de la vida producida en función del registro empleado. Para conocer con más exactitud el grado de seguridad introducido al modificar un registro, eliminando por ejemplo las sobrecargas más altas, sería necesaria mayor precisión en el análisis de la variabilidad de la vida obtenida con el registro.

En este capítulo se hace un análisis de la precisión del modelo propuesto por Newman [6] para representar la citada variabilidad, al mismo tiempo que la vida en crecimiento. Con este modelo, se ha ajustado la ley de crecimiento a las curvas da/dN obtenidas con ensayos de amplitud constante. Posteriormente, se ha determinado la vida en crecimiento, haciendo uso del modelo citado implementado en el programa FASTRAN2 [14], para todas las series de registros de carga de variación irregular empleadas en los ensayos. Los resultados así obtenidos se comparan con los obtenidos experimentalmente. Con un primer ajuste de los parámetros del modelo se analiza el efecto de los factores de constricción, la carga máxima del registro, la longitud de éste, el tipo de proceso aleatorio considerado y el nivel de carga, en las dispersiones y vidas obtenidas y se consideran posibles razones de las diferencias encontradas entre el modelo y la experimentación. Con objeto de conseguir los mejores resultados posibles, se propone una modificación al ajuste de los parámetros del modelo en base a los resultados de los ensayos de amplitud constante.

5.1. MODELO DE CRECIMIENTO

Como se ha indicado previamente el método de predicción elegido en este trabajo para simular el crecimiento de grietas por fatiga es el propuesto por Newman[6], e implementado en el código FASTRANII [14]. Este método de simulación paso a paso propone un modelo analítico para considerar el efecto de secuencia basado en el cierre de grieta. En el modelo de crecimiento se asume que los efectos de secuencia de las cargas están causados por el cierre de grieta, el cual causa variaciones en la tensión de apertura y en el factor de intensidad de tensiones efectivo cuando varían las cargas.

La ley de crecimiento propuesta en este modelo responde a la expresión:

$$\frac{da}{dN} = C_1 \Delta K_{eff}^{C_2} \frac{1 - \left(\frac{\Delta K_0}{\Delta K_{eff}} \right)^2}{1 - \left(\frac{K_{max}}{C_5} \right)^2} \quad (5.1)$$

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (5.2)$$

$$\Delta K_0 = C_3 \left(1 - C_4 \frac{S_0}{S_{max}} \right) \quad (5.3)$$

donde:

da/dN	velocidad de crecimiento de grieta
K_{max}	máximo factor de intensidad de tensiones en el ciclo de carga
ΔK_{eff}	rango del factor de intensidad de tensiones efectivo
K_{op}	factor de intensidad de tensiones de apertura
K_0	factor de intensidad de tensiones umbral efectivo
S_{max}	máxima tensión en el ciclo de carga
S_0	tensión de apertura de grieta que calcula el modelo
C_1 a C_5	parámetros del modelo.

La ecuación de crecimiento propuesta requiere de la determinación de la tensión de apertura ya que la velocidad de crecimiento es función del factor de intensidad de tensiones efectivo y de los valores umbral para el material considerado en base al rango del factor de intensidad de tensiones umbral efectivo. La relación entre la tensión de apertura y la tensión máxima puede representarse por el parámetro q , que obviamente coincide con la relación entre K_{op} y K_{max} .

$$q = \frac{S_o}{S_{max}} = \frac{K_{op}}{K_{max}} \quad (5.4)$$

La relación entre el rango de tensiones efectivas y aplicadas o entre el factor de intensidad de tensiones efectivo y aplicado puede representarse por U :

$$U = \frac{S_{max} - S_o}{S_{max} - S_{min}} = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} \quad (5.5)$$

$$U = \frac{\Delta S_{eff}}{\Delta S} = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{\Delta K_0}{\Delta K_{th}}$$

La relación de tensiones se define como:

$$R = \frac{S_{min}}{S_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}} \quad (5.6)$$

La relación entre los parámetros q , U y R es:

$$q = 1 - U(1 - R) \quad \text{ó} \quad U = \frac{1 - q}{1 - R} \quad (5.7)$$

El valor de la tensión de apertura estará influido no sólo por la relación de cargas, R , sino también por la geometría de la probeta y el estado de tensiones. Tal como se comentó en el capítulo 2, para caracterizar el estado de tensiones el modelo propone una modificación de la tensión de fluencia mediante dos parámetros de constricción denominados α y β a considerar en tracción y compresión respectivamente. Antes de realizar la simulación del crecimiento

con carga de amplitud variable es necesario estimar estos dos parámetros junto con las constantes C_1 a C_5 . Para ello son necesarios los resultados de ensayos de crecimiento con amplitud de carga constante con los que poder obtener las velocidades de crecimiento en función del factor de intensidad de tensiones.

5.2. ENSAYOS DE AMPLITUD CONSTANTE

Los resultados experimentales empleados para el ajuste de los parámetros de la ecuación de crecimiento son los obtenidos por Lapetra et al. [15]. Dichos ensayos fueron realizados con objeto de caracterizar el comportamiento del material, Al-2024-T351. Empleando probetas tipo CT, de 50 mm de ancho y 12 mm de espesor, se realizaron 18 ensayos de crecimiento con amplitud constante con $R=0.2$ ($P_{\min}=882$ N y $P_{\max}=4410$ N) y una longitud de grieta variando entre $a_o=15$ mm y $a_f=29.5$ mm.

Los ensayos se llevaron a cabo en una máquina universal de ensayos MTS 810 y para la medición de la longitud de grieta se utilizó un sistema de tipo ACPD de la marca INSTRON. En los ensayos se realizó el precrecimiento de la grieta con una carga máxima de 5600 N, hasta una longitud de 15 mm, cambiando en este punto a cargas de amplitud constante de rango entre 882 y 4410 N. La lectura de los valores correspondientes de número de ciclos (vida) - longitud de grieta se obtuvo a partir de una longitud de grieta de 17.5 mm para garantizar que el crecimiento superaba la zona plástica producida por la carga máxima del preagrietado, por lo que se asegura que el crecimiento no está influenciado por la historia de carga.

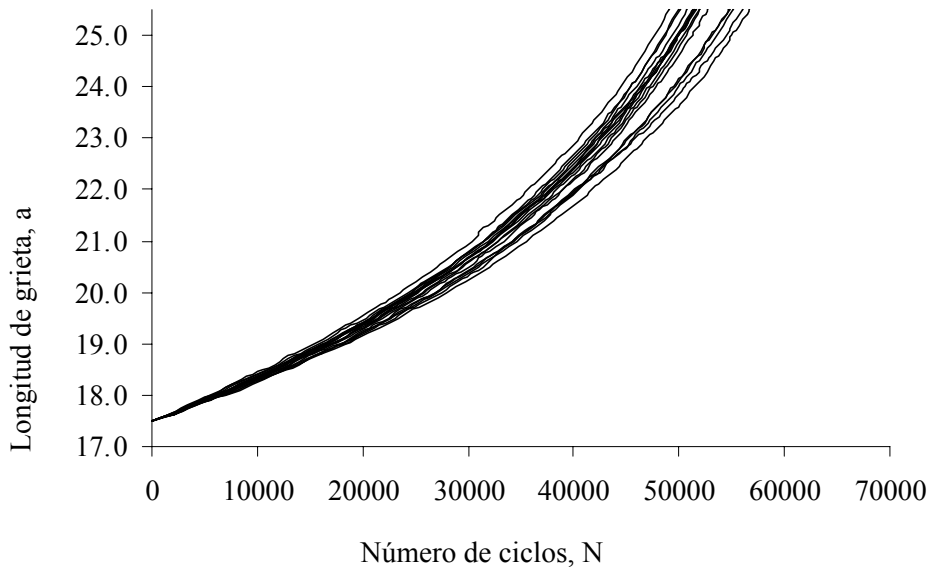


Figura 5.1: *Curvas de crecimiento con cargas de amplitud constante*

Para el crecimiento de grieta hasta 25.5 mm el valor medio de vida obtenido es de 52411 ciclos con una desviación típica de 2165 ciclos, con lo que el coeficiente de variación o relación entre la desviación y la media es de 0.0413. En estos datos y en la figura 5.1 se puede observar una dispersión importante de los resultados, ésta se debe al material y al resto de variables del entorno (condiciones de ensayo, tolerancias de la probeta, temperatura, etc).

5.3. AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO.

Tal como propone Newman [6], puesto que el parámetro C_5 representa el factor de intensidad de tensiones que produce la fractura inestable bajo las condiciones de ensayo, dicho valor puede ser aproximado por el valor de K_c . Ensayado el material con la geometría de probetas empleadas dicho valor resultó ser $44 \cdot \text{Mpa m}^{1/2}$, valor adoptado para el parámetro C_5 .

Los parámetros C_3 y C_4 pueden ser determinados a partir de valores umbral para el material Al-2024-T351 de las referencias [10-12,16]. El rango del factor de intensidad de tensiones umbral efectivo, ΔK_0 , puede expresarse como:

$$\Delta K_0 = U \Delta K_{th} = \frac{S_{max} - S_0}{S_{max} - S_{min}} \Delta K_{th} = \frac{1 - S_0/S_{max}}{1 - R} \Delta K_{th} \quad (5.8)$$

Conocidos distintos valores de ΔK_{th} , S_0 y S_{max} para diferentes valores de R , es posible evaluar ΔK_0 en función de S_0/S_{max} y ajustar los valores de C_3 y C_4 según la ecuación 5.3. Los valores así obtenidos resultaron:

$$C_3 = 3.6 \text{ Mpa m}^{1/2} \quad \text{y} \quad C_4 = 0.87.$$

Para la determinación de los parámetros C_1 y C_2 es necesario ajustar la ecuación de crecimiento a resultados obtenidos en ensayos de amplitud constante, con los que poder obtener las velocidades de crecimiento en función del factor de intensidad de tensiones. En el caso más simple del ajuste de los parámetros de una ecuación de crecimiento tipo Paris:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (5.9)$$

una forma sencilla sería ajustar por mínimos cuadrados la recta en coordenadas logarítmicas de los valores de las velocidades de crecimiento en función del factor de intensidad de tensiones, obteniendo de esta forma los valores de C y m .

Aun en este caso tan sencillo el ajuste no es tan inmediato, puesto que experimentalmente lo que se obtiene directamente de los ensayos de crecimiento de grieta con carga de amplitud constante no son las velocidades de crecimiento sino los valores de longitud de grieta frente al número de ciclos, es decir, las curvas a - N . Para obtener las curvas de crecimiento es necesario derivar numéricamente dicha relación a - N para obtener las velocidades, los estudios de Virkler [17] demuestran que el método numérico elegido influye en los valores obtenidos para los parámetros.

En lugar de esto, Ostergaard y Hillbery [18] proponen directamente integrar la ecuación de crecimiento y ajustar los parámetros buscando los valores que hagan mínimo el error cometido al obtener N_T , número de ciclos teórico obtenido con la integración de la ley de crecimiento, como estimación de N_E , número de ciclos experimental.

El número de ciclos teóricos acumulados hasta una longitud a_i se obtendría a partir de la integración numérica de la ecuación de crecimiento, que en el caso de Paris sería:

$$N_{Ti} = \int_0^N dN = \int_{a_0}^{a_i} \frac{da}{C \Delta K^m} \quad (5.10)$$

Los parámetros C y m se determinarían como aquellos que minimizan la función error:

$$E_T = \sum_{i=0}^{A_i} (N_{Ei} - N_{Ti})^2 \quad (5.11)$$

donde N_{Ei} es el conjunto de valores experimentales obtenidos para distintas longitudes de grieta a_i , N_{Ti} es el número de ciclos teóricos acumulados, obtenidos tras la integración numérica en el paso i , y A_i es el número total de intervalos de integración o número de incrementos de longitud de grieta.

Este procedimiento resultaría relativamente sencillo con una ley de crecimiento función de ΔK como en el caso expuesto. Sin embargo, para ajustar la ley de crecimiento propuesta en 5.1, función de valores efectivos del factor de intensidad de tensiones, se necesita estimar al mismo tiempo el valor de la tensión de cierre, S_0 , o lo que es lo mismo del parámetro $q = S_0 / S_{\max}$.

Para cargas de amplitud constante, dicho valor de la tensión de cierre está condicionado fundamentalmente por la relación de cargas R y por el estado de tensiones a que está sometida la zona del borde de grieta, caracterizado por los factores de constricción α y β , para tracción y compresión, respectivamente. La figura 5.2 muestra la dependencia entre q y R obtenidas por Newman [6], para distintos estados de tensiones o valores de α .

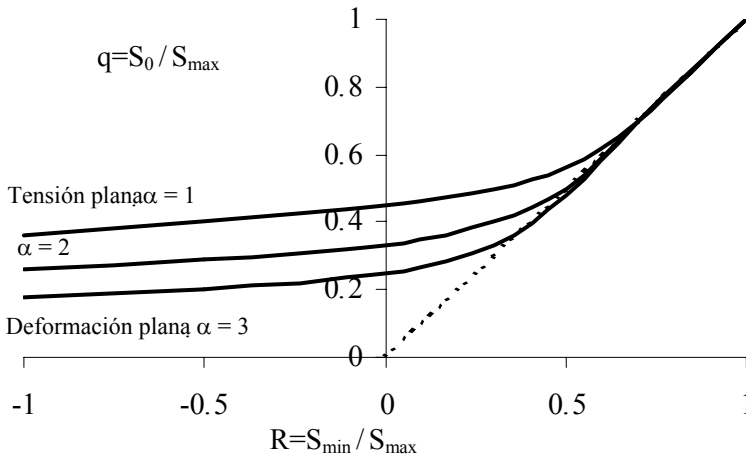


Figura 5.2: Tensión de apertura normalizada como función de R simuladas con cargas de amplitud constante y condiciones de tensión y deformación planas.

Puede aquí observarse como para altas relaciones de carga $R > 0.7$ no existe cierre de grieta, es decir, la tensión de cierre está por debajo de la tensión mínima, con lo que el rango efectivo de carga coincide con el aplicado, $q = R$, $U = 1$ y $\Delta K = \Delta K_{eff}$. Para valores bajos de R , el valor de la tensión de cierre depende fuertemente de α , con $R = 0.2$ la relación $q = S_0 / S_{max}$ varía entre 0.3 y 0.5 aproximadamente según que el estado de tensiones varíe entre deformación plana o tensión plana respectivamente.

Para estimar las tensiones de cierre en los ensayos de amplitud constante se propone simular partiendo de un conjunto de constantes C_1 a C_5 y distintos valores de α . Usando como constantes del modelo de crecimiento las propuestas en [14]

para el material Al-2024: $C_1=4.94593 \text{ E-11 Mpa m}^{1/2}$, $C_2=4.07$, $C_3=C_4=0$ y $C_5=999 \text{ MPa m}^{1/2}$ se simuló el crecimiento de la grieta bajo cargas de amplitud constante de rango entre 882 y 4410 N ($R=0.2$) con valores de α variando entre 1.2 y 2.3. Obsérvese que con estos valores de las constantes C_1 a C_5 la ecuación de crecimiento 5.1 prácticamente coincide con la ley de Paris. Para la geometría de probeta empleada puesto que el radio plástico de Irwin calculado para tensión plana es inferior a 1 mm, inferior por tanto a la décima parte del espesor de la probeta, cabe esperar que el estado de tensión sea próximo a las condiciones de deformación plana.

En la tabla 5.1 figuran los valores así obtenidos de S_0/S_{\max} , que se mantienen aproximadamente constantes a lo largo del crecimiento. También figuran en dicha tabla los valores de vida así estimados, para el crecimiento de la grieta entre 17.5 y 25.5 mm, y la relación entre estos valores de vida estimados y la vida media obtenida en los ensayos, que fue de 52411 ciclos.

Tabla 5.1: *Valores iniciales estimados por simulación de S_0/S_{\max} y vida.*

α	1.2	1.3	1.4	1.5	1.73	1.9	2.1	2.3
$q=S_0/S_{\max}$	0.49	0.47	0.46	0.44	0.41	0.39	0.37	0.35
N_T (ciclos)	81625	68663	60231	53110	42478	37467	32709	29141
N_T/N_E	1.56	1.31	1.15	1.01	0.81	0.71	0.62	0.56

Puede observarse que los valores de q obtenidos concuerdan con lo representado en la figura 5.2. Las estimaciones de vida varían ampliamente acercándose al valor medio obtenido en los ensayos el estimado para $\alpha = 1.5$.

En el siguiente paso para cada valor de $q = S_0/S_{\max} = K_{op}/K_{\max}$, considerado constante con la longitud de grieta, podemos calcular los valores de ΔK_{eff}

$$\Delta K_{eff} = K_{\max}(1 - q) \quad \text{ó} \quad \Delta K_{eff} = \frac{1 - q}{1 - R} \Delta K \quad (5.12)$$

La integración numérica de la ecuación de crecimiento, con la que obtener el número de ciclos teóricos acumulados hasta una longitud a_i sería:

$$N_{Ti} = \int_{a_0}^{a_i} \frac{da}{C_1 \Delta K_{eff}^{C_2} \frac{1 - (\Delta K_o / \Delta K_{eff})^2}{1 - (K_{\max} / C_5)^2}} \quad (5.13)$$

y los parámetros C_1 y C_2 se ajustan buscando el mínimo de la función error:

$$E_T = \sum_{i=0}^{A_i} (N_{Ei} - N_{Ti})^2 \quad (5.14)$$

En este ajuste se tomaron como valores de las restantes constantes:

$$C_3 = 3.6 \text{ MPa m}^{1/2}, C_4 = 0.87 \text{ y } C_5 = 44 \text{ MPa m}^{1/2}$$

En la figura 5.3 se representa la primera de las 18 curvas a-n obtenidas experimentalmente y la curva a-n obtenida por integración según la ecuación 5.13, usando un valor de $\alpha = 1.5$ (o lo que es lo mismo $S_0/S_{\max} = 0.44$), con los parámetros C_1 y C_2 óptimos, que para esta curva en concreto resultan ser:

$$C_1 = 3.23258 \text{ E-10 y } C_2 = 3.12817$$

para las velocidades de crecimiento de grieta en m/ciclo y los factores de intensidad de tensiones en $\text{MPa m}^{1/2}$.

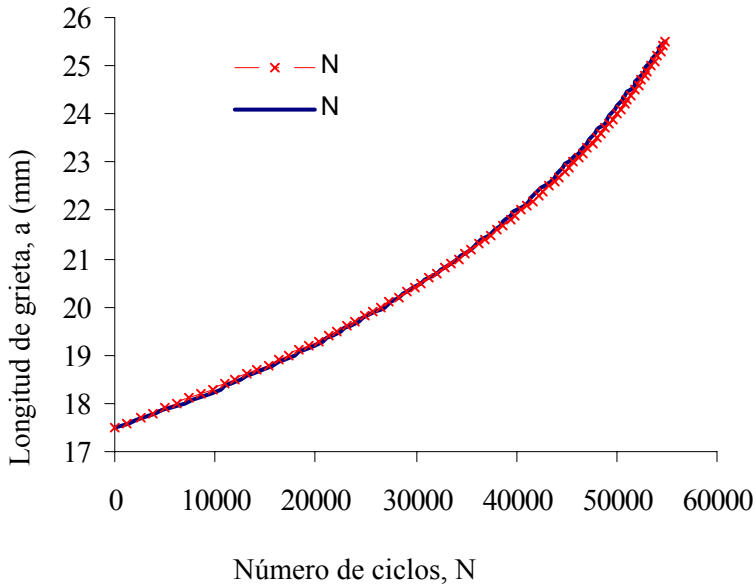


Figura 5.3.: Curvas $a-n$ obtenidas experimentalmente, N_E , y por integración N_T

Las diferencias entre una y otra curva en error absoluto no superan los mil ciclos, el error relativo: $E = \frac{N_{Ei} - N_{Ti}}{N_{Ei}}$

es sólo importante al inicio del crecimiento cuando el número de ciclos es pequeño, para longitudes de grieta superiores a 18.25 mm (o vida superior a 10000 ciclos aproximadamente) los errores son siempre positivos e inferiores al 8%, es decir, la estimación sería conservadora. A partir de longitudes en torno a 19 mm, vida de 18000 ciclos, dichos errores en valor absoluto quedan por debajo del 3%.

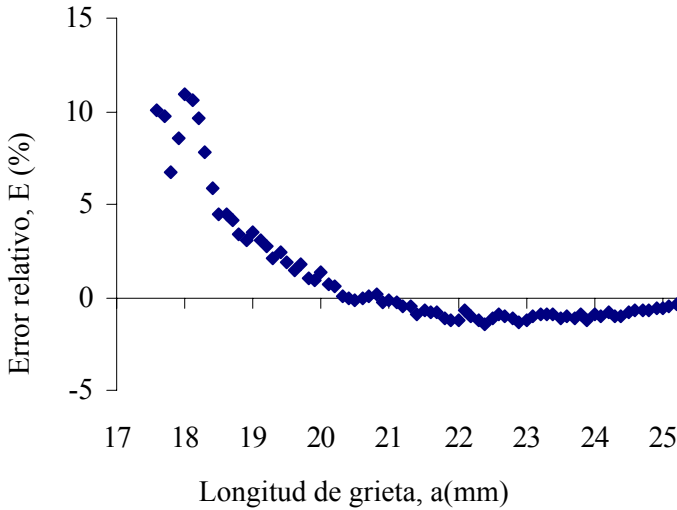


Figura 5.4: Error relativo $E = \frac{N_{ei} - N_{ti}}{N_{ei}}$

Otra forma de analizar la precisión de la estimación es obteniendo la relación entre número de ciclos estimados y experimentales, N_t/N_e . En la figura 5.5 se representa dicha relación para cada longitud de grieta.

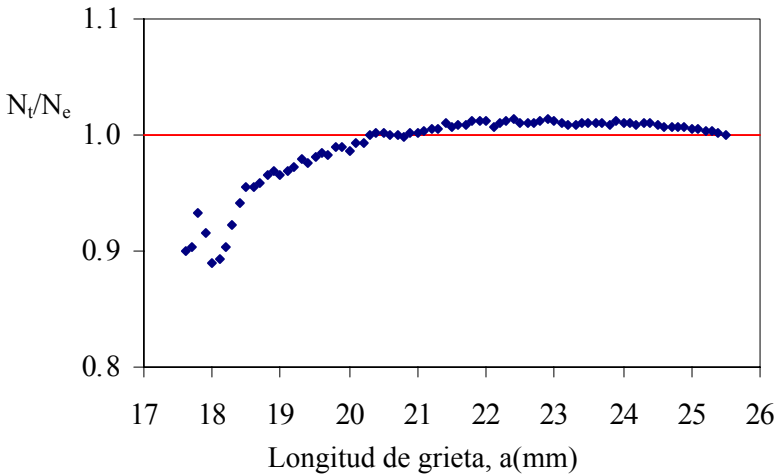


Figura 5.5: Relación vida estimada/vida experimental para cada longitud de grieta.

Para cada valor de α , o de q , se ajustan los 18 conjuntos de datos obtenidos en los ensayos de amplitud constante y se adoptan como parámetros C_1 y C_2 los valores promediados, dichos valores son los que figuran en la tabla 5.2. Es preciso aclarar que dichos valores de las constantes corresponden a la ecuación de crecimiento expresadas las velocidades en m/ciclo y los factores de intensidad de tensiones en MPa m^{1/2}.

Tabla 5.2: *Ajuste de los parámetros C_1 y C_2 para distintos valores de α .*

α	$U= S_0/S_{\max}$	C_1	C_2
1.2	0.49	4.82351 E-10	3.10695
1.3	0.47	4.24187 E-10	3.11100
1.4	0.46	3.98380 E-10	3.11311
1.5	0.44	3.52793 E-10	3.11679
1.73	0.41	2.96267 E-10	3.12207
1.9	0.39	2.65091 E-10	3.12517
2.1	0.37	2.38229 E-10	3.12775
2.3	0.35	2.14615 E-10	3.13066

La variabilidad de los parámetros de la ecuación de crecimiento puede observarse en la figura 5.6. En dicha figura se representan en coordenadas semilogarítmicas los parámetros C_1 y C_2 ajustados en las 18 curvas de crecimiento, para valores de $\alpha=1.2, 1.5, 1.73$ y 2.3 . La fuerte relación encontrada entre los parámetros coincide con los resultados obtenidos por Ostergaard y Hillbery al ajustar a las curvas de crecimiento obtenidas por Virkler una ley de crecimiento tipo:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K - \Delta K_{th})^m$$

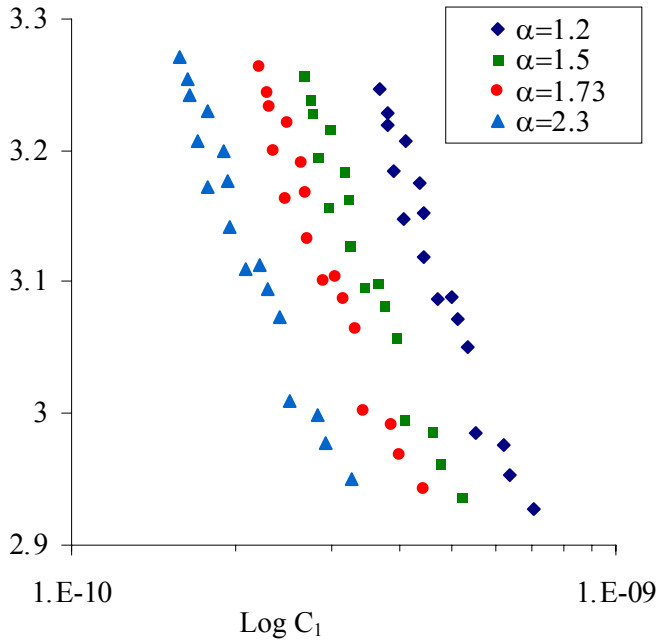


Figura 5.6: Parámetros C_1 y C_2 obtenidos en el ajuste para distintos valores de α .

En la figura 5.7 se representan las curvas de crecimiento obtenidas por simulación con los parámetros ajustados para $\alpha=1.2, 1.5, 1.73$ y 2.3 junto con las obtenidas experimentalmente. Como cabe esperar para valores altos de α , es decir estados de tensión más próximos a deformación plana, las tensiones de cierre son menores, con lo que el rango del factor de intensidad de tensiones efectivo y por tanto la velocidad de crecimiento son mayores, lo que conduce a vidas más cortas. De lo expuesto en la tabla 5.3, sobre los valores del número de ciclos obtenido por simulación con distintos valores de α y el valor medio obtenido experimentalmente, puede concluirse que el valor de α que produce una vida de crecimiento más aproximada a la vida media obtenida experimentalmente es $\alpha=1.73$. La figura 5.8 pone de manifiesto la precisión del ajuste para este valor de α ya que para cualquier longitud de grieta la relación vida estimada/vida experimental está entre 0.95 y 1.01. Sin embargo, como puede también observarse en la figura 5.7, la variabilidad de los resultados experimentales es superior o del mismo orden a la obtenida variando el

parámetro α , por lo que en principio no existe argumento de peso para establecer claramente el valor de dicho parámetro en base al ajuste.

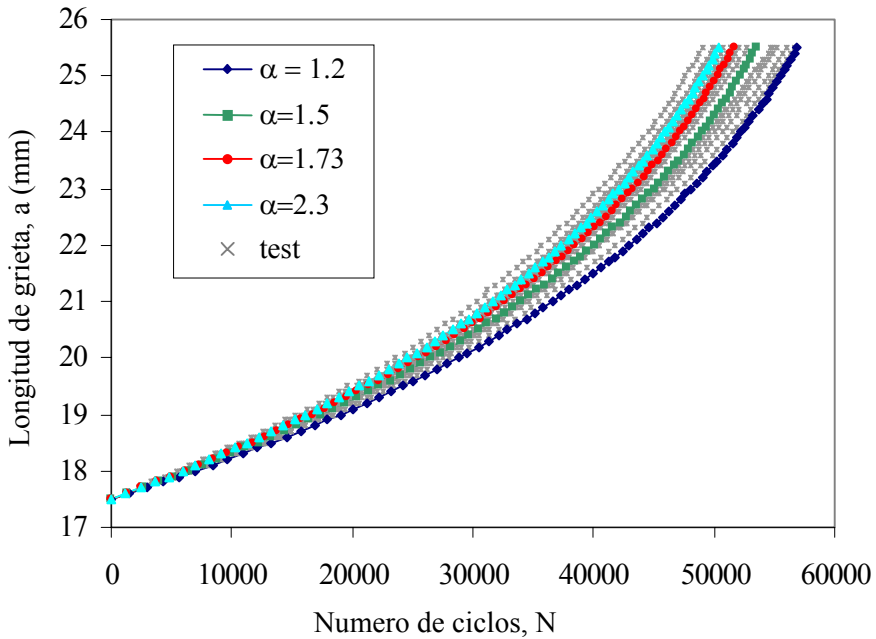


Figura 5.7: Curvas de crecimiento con carga de amplitud constante obtenidas experimentalmente y por simulación para distintos valores de α .

Tabla 5.3: Vida obtenida por simulación para distintos valores de α .

	Media experimental	Valores obtenidos por simulación con:			
		$\alpha = 1.2$	$\alpha = 1.5$	$\alpha = 1.73$	$\alpha = 2.3$
N(ciclos)	52411	56857	53531	51639	50358
N_T/N_E	1	1.06	1.02	0.99	0.96

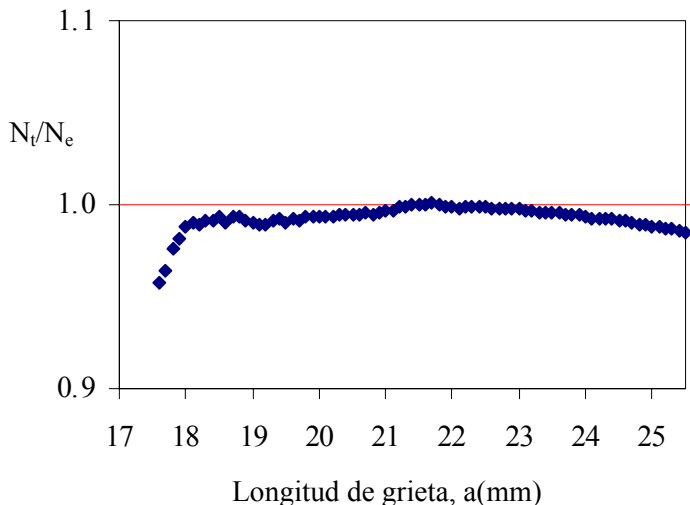


Figura 5.8: Relación vida simulada/vida media experimental para cada longitud de grieta con $\alpha = 1.73$

Por otra parte, el modelo de crecimiento también contempla la posibilidad de considerar un coeficiente de constricción variable con la velocidad de crecimiento, al ser α variable, también será variable la tensión de cierre. En este caso, tal como propone Newman [13] para este material puede considerarse un factor de constricción $\alpha=1.3$ para velocidades superiores a $7.5 \cdot 10^{-7}$ m/ciclos (final de la transición de crecimiento plano a inclinado) y $\alpha = 1.73$ para velocidades por debajo de $9 \cdot 10^{-8}$ m/ciclos (inicio de la transición de crecimiento plano a inclinado). Para los datos obtenidos de los ensayos de amplitud constante se estimaron los valores de ΔK correspondientes a dichas velocidades límite, de esta forma se considera $\alpha=1.73$ para $\Delta K < 8,74$ Mpa $m^{1/2}$, $\alpha=1.3$ para $\Delta K > 16.92$ Mpa $m^{1/2}$ y para el rango intermedio se supone una variación de α lineal. Al ser α variable, también será variable S_0 y $q=S_0/S_{max}$, calculada como:

$$\frac{S_0}{S_{max}} = A_0 + A_1 R + A_2 R^2 + A_3 R^3$$

$$A_0 = (0.825 - 0.34\alpha + 0.05\alpha^2) [\cos(\pi S_{max}/2\sigma_0)]^{1/\alpha}$$

$$\begin{aligned}A_0 &= (0.825 - 0.34\alpha + 0.05\alpha^2) [\cos(\pi S_{max}/2\sigma_0)]^{1/\alpha} \\A_1 &= (0.415 - 0.071\alpha) S_{max}/\sigma_0 \\A_2 &= 1 - A_0 - A_1 - A_3 \\A_3 &= 2A_0 + A_1 - 1\end{aligned}\tag{5.15}$$

Donde $R = S_{min}/S_{max}$ y σ_0 es el valor medio entre el límite elástico y la tensión última del material:

$$\sigma_0 = (\sigma_u + \sigma_y)/2$$

Para los datos obtenidos de los ensayos de amplitud constante, los valores medios de C_1 y C_2 obtenidos en el ajuste de los 18 registros son:

$$C_1 = 1.17942E-10 \quad C_2 = 3.64$$

para velocidades expresadas en m/ciclo y factores de intensidad de tensiones en MPa m^{1/2}.

La figura 5.9 esquematiza de forma resumida el procedimiento seguido para el ajuste de los parámetros de la ecuación de crecimiento, siempre a partir de los datos de amplitud constante, tanto en el caso de considerar valores constantes de α y β como en el caso de tomar el parámetro α variable, en cuyo caso β vale 1.

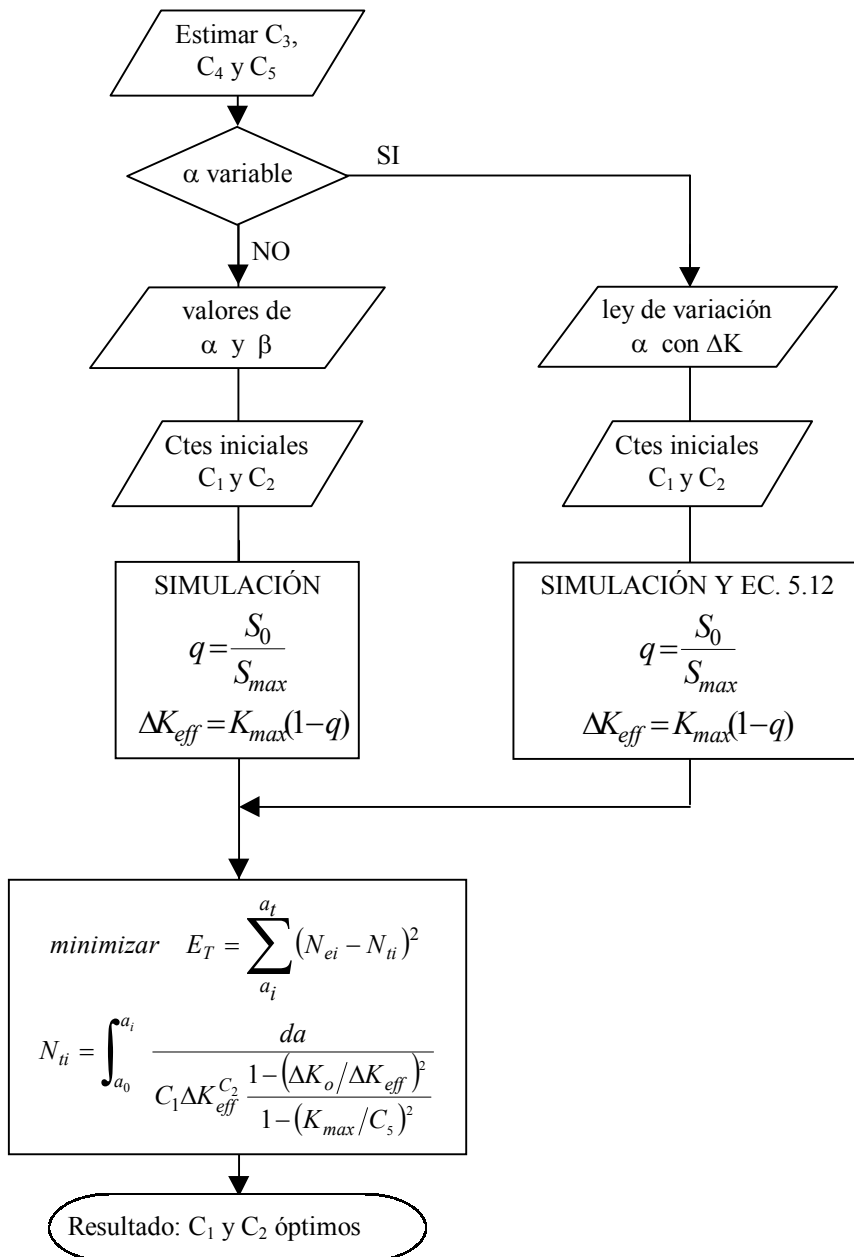


Figura 5.9: Esquema del procedimiento seguido en el ajuste de los parámetros del modelo de crecimiento.

5.4. SIMULACIÓN CON CARGAS DE AMPLITUD VARIABLE.

Para estudiar la bondad del modelo en la estimación del proceso de crecimiento de grieta con cargas de amplitud variable, se ha simulado con distintos factores de constricción, α y β , el crecimiento producido por los mismos registros de carga usados en todos los ensayos. Se han utilizado valores de α desde 1.2 hasta 2.3, es decir, desde estados próximos a tensión plana hasta próximos a deformación plana. También se ha considerado un factor de constricción α variable en función de la velocidad de crecimiento entre 1.3 y 1.73. Del factor β se han usado valores entre 1 y 1.5. En primer lugar se analizará la influencia de la elección de estos parámetros en la determinación de la vida de crecimiento.

Por otra parte, parece probado [19,20] que el uso de registros de longitud finita que se repiten indefinidamente hasta el fallo introduce inevitablemente un efecto de secuencia artificial. Los valores máximos de la historia de cargas pueden ser considerados sobrecargas que se repiten periódicamente. Por esta razón dichos valores máximos y en particular el valor máximo del registro pueden influir significativamente en la vida obtenida. También se analizan en esta sección el efecto del pico máximo del registro y de la longitud del mismo.

Esta primera parte del análisis es discutida por completo en el caso del proceso tipo C y nivel de carga alto, para el resto de procesos y en los dos niveles de carga se estudia el nivel de aproximación conseguido en las estimaciones para distintos valores de los parámetros del modelo.

5.4.1. Efecto de los parámetros del modelo de simulación.

Se ha realizado un exhaustivo estudio para determinar la influencia de los factores de constricción en las estimaciones mediante simulación con este modelo [21] para las 30 historias de carga del proceso C-H5. La tabla 5.4 muestra los valores de vida media (μ_N) y desviación estándar (σ_N) obtenidas tanto de los resultados de ensayos como de las simulaciones realizadas con

distintos valores de los parámetros α y β . En el apéndice B se incluyen los resultados obtenidos para cada registro con todos los valores considerados de los parámetros α y β y para todos los procesos de carga que se incluyen en este estudio.

Los resultados de la tabla 5.4 muestran que las predicciones de vida dependen fuertemente de los factores de restricción. Esto mismo se ilustra gráficamente en la figura 5.10. Los valores estimados de vida media varían entre 0.49 y 1.03 veces la vida media obtenida en los ensayos y las desviaciones estimadas entre 0.1 y 3.4 las obtenidas experimentalmente. Para un valor constante del parámetro β , tanto la vida media (μ_N) como la dispersión (σ_N) disminuyen a medida que aumenta el valor del parámetro α , aunque las variaciones son cada vez menores, tendiendo a estabilizarse.

Las estimaciones de vida se ajustan mejor a los resultados experimentales para valores bajos de α , sin embargo los valores de dispersión resultan muy superiores a los reales, siendo las vidas medias estimadas siempre inferiores a las ensayadas. Así, para $\beta=1$, la vida media varía de 116508 ciclos para $\alpha=1.2$ a 88400 ciclos para $\alpha=2.3$, a cambio la desviación típica se reduce desde 24466 ciclos ($\alpha=1.2$) hasta los 1568 ciclos ($\alpha=2.3$), es decir, σ_N disminuye en un factor de 15 para este rango de α . La dispersión obtenida para $\beta=1$ y $\alpha=1.5$ es la que mejor se ajusta a los resultados experimentales, estimando pues con mucha aproximación la variabilidad de la vida aunque no así la vida media.

Si se considera un valor de α variable la vida media aumenta hasta 171141 ciclos estimando con muy buena aproximación la obtenida experimentalmente, sin embargo, la dispersión de estos resultados excede en 2.4 veces la obtenida en los ensayos.

Tabla 5.4: *Vidas medias y desviaciones típicas obtenidas por simulación para las cargas del proceso C-H5.*

Parámetros del modelo		Vida media	Desviación estándar, σ_N	$\frac{\mu_N \text{ estimada}}{\mu_N \text{ experimental}}$	$\frac{\sigma_N \text{ estimada}}{\sigma_N \text{ experimental}}$
β	α	μ_N (ciclos)	(ciclos)		
1	1.2	116508	24466	0.69	1.60
	1.3	107254	22993	0.63	1.51
	1.5	91644	15459	0.54	1.01
	1.7	83202	6107	0.49	0.40
	1.9	82521	3751	0.49	0.25
	2.1	84017	2538	0.49	0.17
	2.3	88400	1568	0.52	0.10
	variable	171141	36479	1.01	2.39
1.3	1.5	145332	41231	0.86	2.70
	1.7	117253	29540	0.69	1.93
1.4	1.5	175518	50599	1.03	3.31
1.5	1.7	166864	51743	0.98	3.39
	1.9	128012	35600	0.75	2.33
ensayos		169978	15272	-	-

En cuanto a la influencia del parámetro β , tanto en la tabla 5.4 como en la figura 5.10, puede observarse que valores más altos de dicho parámetro aumentan la vida media, sin embargo el efecto de dispersión se hace mucho más acusado, alejándose mucho de los resultados experimentales. En el rango de valores para β entre 1.3 y 1.5, para los valores de α que mejor aproximan la vida media, la dispersión obtenida es del orden de 50000 ciclos frente a los

15272 obtenidos experimentalmente. Este análisis de resultados sugiere que mientras valores altos del parámetro β pueden arrojar mejores resultados sobre el valor de vida estimada el grado de aproximación sobre la variabilidad de dicha vida disminuye resultando valores excesivamente altos sobre la dispersión de los mismos. Habría que tener en cuenta además, que en los ensayos existen más factores que pueden influir en la dispersión de los resultados (material, máquina, preparación de probeta, tolerancias, temperatura, equipos de medida, etc.), dando sin embargo desviaciones típicas inferiores a las estimadas por el modelo ciclo a ciclo.

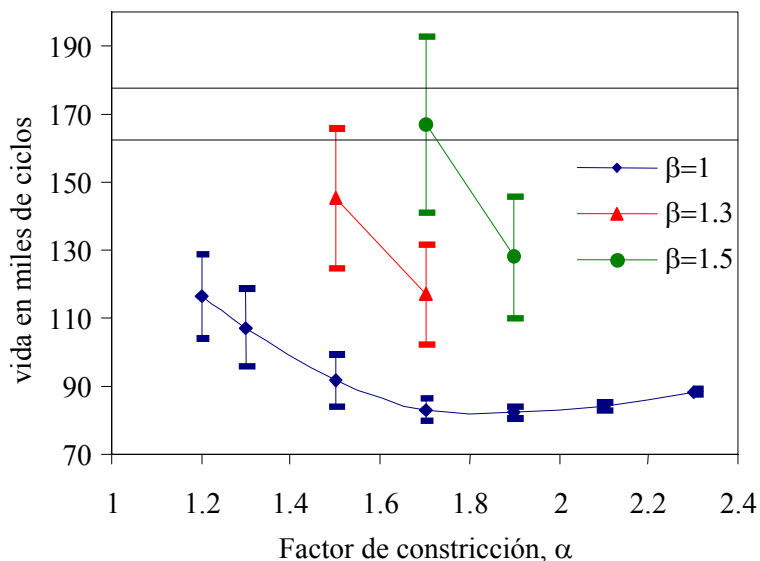


Figura 5.10: *Vidas medias y desviaciones típicas obtenidas por simulación para las cargas del proceso C-H5.*

Si en lugar de analizar los valores medios se comparan los resultados obtenidos para cada registro (figura 5.11) se puede observar que las simulaciones del modelo de Newman para $\beta=1$ y $\alpha=1.5$ reproducen las variabilidades encontradas en los ensayos, aunque los valores de vida obtenidos son siempre inferiores a los reales. El registro que produce la vida máxima y mínima en ensayos y simulación coinciden y la relación vida estimada/experimental es del orden de 0.5 en todos los registros. Cuando se considera el valor de α variable se consigue aumentar la vida estimada con cada registro alcanzando una buena aproximación en valores medios pero aumentando el efecto de dispersión, alejándose mucho de los resultados experimentales.

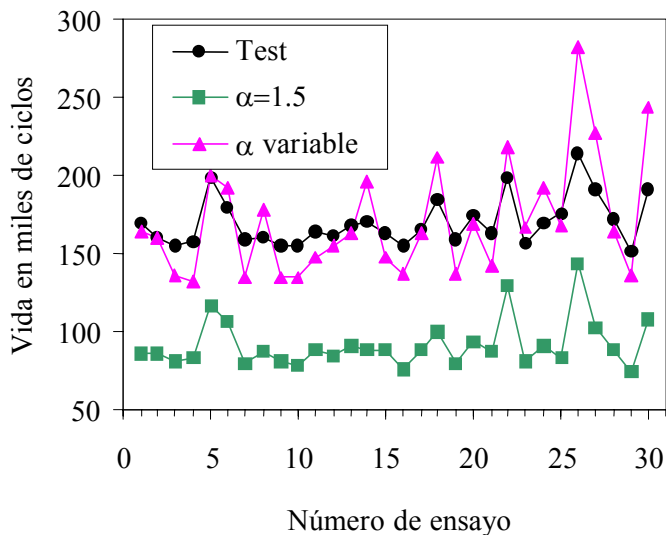


Figura 5.11: Comparación entre las simulaciones con $\beta=1$ y los resultados experimentales para el proceso C-H5.

La figura 5.12 muestra como, para $\beta=1$ constante, a medida que aumenta α las dispersiones disminuyen, para $\alpha=2.3$ las diferencias entre simulaciones se hacen prácticamente imperceptibles. La figura 5.13 muestra como valores altos de β aumentan tanto la vida media como la dispersión de resultados.

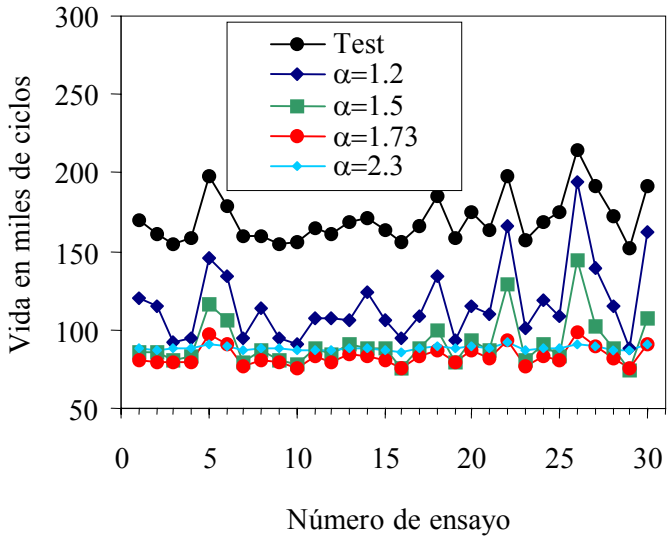


Figura 5.11: Comparación entre las simulaciones con $\beta=1$ y los resultados experimentales para el proceso C-H5.

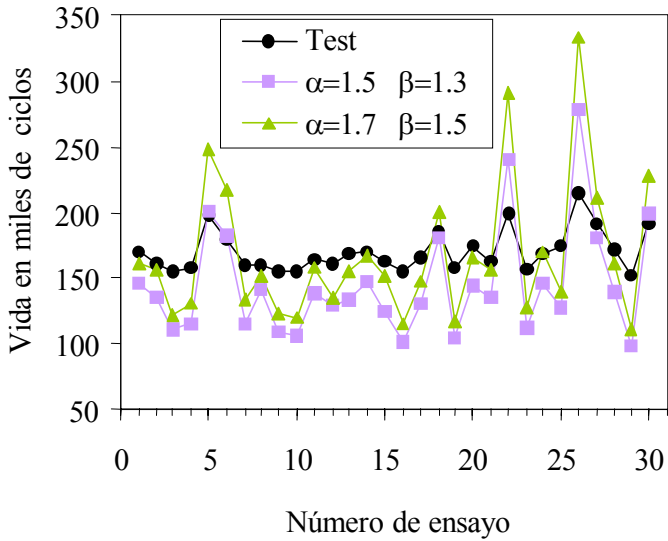


Figura 5.12: Comparación entre las simulaciones con distintos valores de β y los resultados experimentales para la serie C-H5.

Tras el análisis previo puede concluirse que valores bajos del parámetro α producen mayores efectos de interacción de las cargas que los valores altos. Valores de α en torno a 1.2 reproducen con muy buena aproximación la variabilidad de las cargas aunque con vidas extremadamente conservadoras. No obstante, dada la geometría de probeta empleada en este estudio, de espesor $B=12$ mm, no parece justificado caracterizar el estado de tensiones por un valor tan bajo del factor de constricción, que representaría suponer un estado de tensiones próximo a tensión plana.

El cálculo de un factor de constricción en el caso de una placa de espesor finito, en la que existe un estado triaxial de tensiones, no es posible. No obstante, existen una serie de reglas o recomendaciones empíricas para estimar si las condiciones de tensión son predominantemente de tensión plana o deformación plana: a) puede suponerse un estado de tensión plana cuando calculado el tamaño de la zona plástica éste resulta del orden del espesor de la probeta, el tamaño de la zona plástica puede obtenerse a partir del diámetro $2r_y$ en el análisis de Irwin o el obtenido por Dugdale, b) cabe esperar unas condiciones de tensión predominantemente de deformación plana si el tamaño de la zona plástica en tensión plana (que es la que existe en la superficie) es inferior a la décima parte del espesor. Calculando el tamaño de la zona plástica según la formulación de Dugdale, que es la propuesta por Newman en [6], para K_{max} con una carga de 10 KN y para longitudes de grieta de 15, 20 y 25 mm se obtienen como valores del radio plástico $\rho=1, 1.71$ y 3.1 mm, respectivamente. Esto significa que para grieta corta el estado de tensiones corresponde a deformación plana y que a medida que la grieta avanza el estado de tensiones se iría aproximando a tensión plana, para 25 mm la relación $\rho/B=3.9$. Por otra parte, considerar para deformación plana un valor de $\alpha=1.73$, que representa un radio plástico en deformación plana de un tercio el correspondiente a tensión plana, tal como propone Irwin, resulta más verosímil que tomar $\alpha=3$ como condición de deformación plana, con el que el radio plástico resulta un noveno el correspondiente a tensión plana.

5.4.2. Efecto del pico máximo del registro.

El efecto de las sobrecargas en registros de amplitud variable difiere con el comportamiento ante ciclos de amplitud constante, debido a la interacción de unas cargas sobre otras en función de la secuencia aleatoria de aplicación de las mismas. El efecto producido por una alta carga de tracción puede ser potenciado o eliminado por la aplicación de otro pico ya sea de tracción o compresión. La secuencia en la aplicación de los picos en un registro irregular puede influir en su comportamiento, también el número de ciclos de cada registro va a determinar la importancia de las cargas más altas del mismo. En registros cortos, una sobrecarga puede afectar a un gran porcentaje de ciclos del registro, volviendo a repetirse cuando sus efectos apenas han terminado o todavía están afectando al crecimiento. Fundamentalmente dos factores diferencian un registro de otro en un mismo proceso: la secuencia de aparición y el valor del pico más alto.

Para ver la posible influencia de los ciclos de mayor magnitud sobre la vida de los ensayos, se ha determinado la correlación entre el pico más alto y la vida, encontrándose una alta correlación ($\rho=0.96$) entre ambas variables, sin embargo si se determina la correlación con la media del 1% de picos extremos dicho valor disminuye a 0.36. En la tabla 5.5. se relacionan los coeficientes de correlación obtenidos entre vida y pico máximo, media del 0.1 % y del 1 % de picos extremos, tanto para los resultados experimentales como los simulados con distintos valores de los coeficientes α y β . Estos datos evidencian la existencia de fuertes efectos de retardo producidos fundamentalmente por el valor extremo de cada registro, produciendo un efecto artificial de secuencia debido a la repetición indefinida del registro de cargas en cada ensayo [22,23]. Este fenómeno está favorecido por el pequeño número de ciclos de los registros utilizados.

En los resultados de las simulaciones la influencia del valor extremo sigue siendo grande, encontrándose una disminución de la correlación al aumentar α y un incremento cuando aumenta β , aunque en este caso la variación es menor. Obsérvese que para $\beta=1$ el valor de correlación pasa de 0.97 para $\alpha= 1.2$ a 0.84 para $\alpha= 2.3$, variando β para $\alpha=1.7$ el valor de correlación pasa de 0.92 para $\beta= 1$

a 0.95 para $\beta=1.5$. Coeficientes de correlación más altos significa un mayor efecto de las sobrecargas o mayores efectos de retardo, y por tanto velocidades de crecimiento menores y vidas más largas, al tiempo que conlleva una mayor dispersión de resultados. Esto justifica el que la vida media y la desviación estándar sean mayores con valores bajos de α , y disminuyan al aumentar este parámetro, mientras que el aumento del parámetro β produce aumentos de vida media y también de la dispersión. En el caso de α variable con vida y desviación altas el coeficiente de correlación es también muy alto, 0.95.

Tabla 5.5: *Coeficientes de correlación entre vidas y valores extremos de los registros del proceso C-H5*

Parámetros del modelo		Coeficiente de correlación		
β	α	Pmax	0.1%	1%
1	1.2	0.97	0.58	0.28
	1.3	0.95	0.55	0.28
	1.5	0.93	0.59	0.33
	1.7	0.92	0.74	0.44
	1.9	0.91	0.75	0.46
	2.1	0.89	0.73	0.44
	2.3	0.84	0.66	0.34
	variable	0.95	0.55	0.28
1.3	1.5	0.96	0.60	0.32
	1.7	0.93	0.57	0.32
1.4	1.5	0.97	0.61	0.29
1.5	1.7	0.95	0.62	0.33
	1.9	0.91	0.57	0.32
Ensayos		0.95	0.84	0.36

El comportamiento visto hace suponer que el modelo de Newman simula el efecto global de una carga irregular siendo capaz de reproducir el efecto de interacción de las sobrecargas pero subestimando en general el efecto del retardo, ya que estima vidas muy inferiores a las reales. Cuando predomina una sobrecarga en el registro (n° 5, 18, 22, 26 y 30), las vidas obtenidas por simulación consiguen los mejores resultados con respecto a los ensayos, por ejemplo para $\alpha=1.2$ la relación vida estimada/experimental oscila entre 0.73 y 0.91. En estos casos el número de picos de tensión con valores iguales o superiores al 90% o entre el 85% y el 90% del máximo es pequeño, entre 2 y 5 para el primer caso y entre 3 y 15 para el segundo caso. Sin embargo, para los registros con menor vida (n° 3, 9, 16, 23 y 29) el número de ciclos que sobrepasan el 90% del máximo están entre 17 y 54, este valor se aproxima a 250 ciclos cuando se consideran los picos superiores al 85% del valor extremo. En este caso la relación vida estimada/experimental oscila entre 0.58 y 0.64.

Según lo anterior, cuando el número de picos con valores próximos al máximo aumenta, el modelo tiende a disminuir el efecto de retardo, dando vidas más cortas y aproximando peor los resultados experimentales. Esta acción produce además un aumento de la dispersión de las predicciones. El distinto comportamiento del modelo queda reflejado en la figura 5.14 donde se representan la evolución del crecimiento de la grieta a lo largo de la vida, en los ensayos y en la simulación, para el caso de valor extremo más pequeño (registro n° 29) y para uno de los más altos (registro n° 30). De la figura se observa, que las predicciones de la evolución de la grieta son muy distintas para uno y otro caso, siguiendo un comportamiento muy parecido (simulación y ensayos) en el caso del predominio de una sobrecarga (registro n° 30). Las principales diferencias se centran al principio y al final del proceso, mientras que las velocidades de crecimiento resultan similares entre aproximadamente 10000 y 120000 ciclos. Se observa una velocidad de crecimiento al principio de la simulación es mayor que la obtenida en los ensayos, esto puede ser debido a que el modelo supone unas tensiones de cierre inferiores a las reales y un mayor tiempo en estabilizarse, prediciendo un mayor efecto de la etapa de preagrietado.

Sin embargo en el caso en que el valor extremo es más pequeño, el comportamiento es completamente distinto. En este caso las velocidades de crecimiento simuladas son siempre superiores a las medidas en el ensayo. Es de suponer que en este registro, las tensiones de cierre simuladas son siempre inferiores a las reales, participando en el crecimiento muchos ciclos pequeños que en realidad no producen crecimiento.

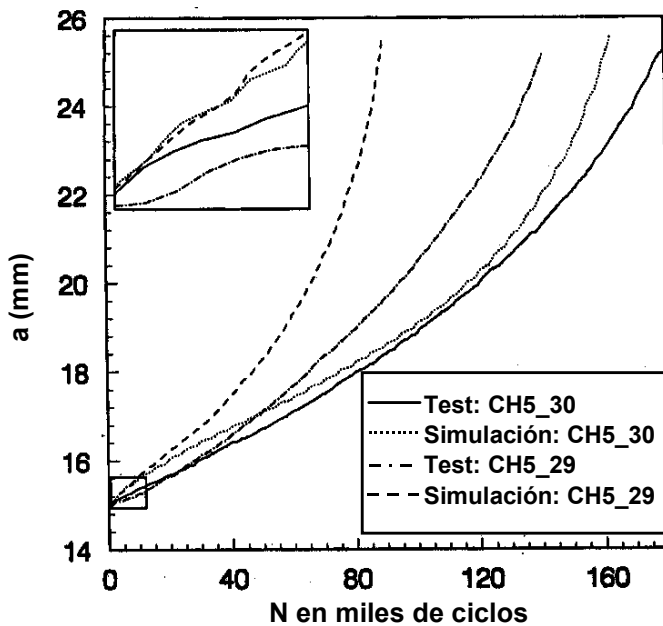


Figura 5.14: Curvas de crecimiento en simulación y ensayos con los registros C-H5_29 y C-H5_30.

Con objeto de analizar el efecto del valor extremo sobre el crecimiento, se han truncado los registros de manera que el valor máximo sea el correspondiente al registro de menor vida (registro 29), las simulaciones en estas condiciones dan valores muy similares para todos los registros. Para $\beta=1$ y $\alpha=1.2$ las diferencias de vida obtenidas difieren en aproximadamente 10,000 ciclos, cuando en los registros sin truncar la diferencia entre la vida más alta y la más baja es superior a 100,000 ciclos. En estas condiciones la dispersión disminuye desde 24466 ciclos a 3478 ciclos. Estos resultados dan idea de la gran importancia de esta variable sobre la simulación. Teniendo en cuenta que la estadística de rangos es prácticamente la misma y que la de picos difiere fundamentalmente en el valor extremo, se puede suponer que la principal variable, a efectos de retardo es este valor extremo. Hay que tener en cuenta que el número de ciclos generados es pequeño, y que el efecto del valor extremo disminuiría si la longitud del registro aumenta.

No obstante, ensayos realizados por otros autores [24,25], encuentran que el modelo simula con bastante aproximación los efectos de sobrecargas sobre el crecimiento con cargas de amplitud constante. Por otra parte, Davidson [24] y Zhang [25] comparan, experimentalmente y con el modelo de Newman, la evolución de la velocidad de crecimiento que sigue a una sobrecarga hasta la estabilización con cargas de amplitud constante. Estos investigadores encuentran que aunque el número de ciclos que tarda en estabilizarse es similar en muchos casos, la evolución de la velocidad desde que se aplica sobrecarga hasta alcanzar nuevamente la velocidad de crecimiento que había antes, es muy distinta. Dado que en cargas de amplitud variable no se alcanza la estabilización del efecto de las sobrecargas, es probable que el efecto transitorio que tiene lugar inmediatamente después de la sobrecarga, sea el que más efecto va a tener sobre el crecimiento.

Todo lo expuesto induce a pensar que el modelo no simula adecuadamente en determinados casos el efecto de interacción entre distintas sobrecargas al aplicar un registro de cargas irregular. Las diferencias encontradas entre los resultados experimentales y las simulaciones pueden tener distintos orígenes. Al inicio de la

simulación inmediatamente después del preagrietado las velocidades de crecimiento en simulación son superiores a las alcanzadas en los ensayos, aunque en el proceso de preagrietado con cargas de amplitud constante la simulación arroje muy buenos resultados. La diferencia parece encontrarse en un aumento de la tensión de cierre al inicio del crecimiento con cargas irregulares. En la figura 5.15 se muestran los cambios en la tensión de cierre durante el crecimiento bajo cargas de amplitud variable, pudiendo observarse que el incremento de la tensión de cierre inicialmente es muy lento. Igualmente se observa como la repetición de la historia de cargas introduce un fuerte efecto de secuencia potenciando la influencia del valor extremo del registro.

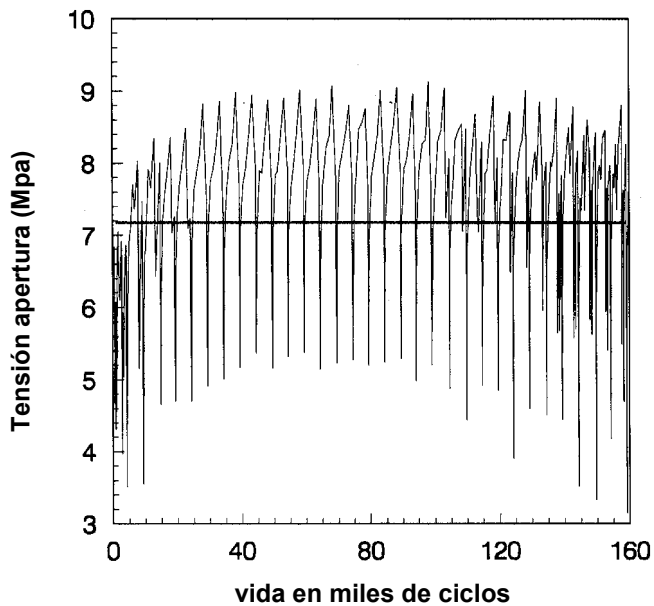


Figura 5.15: Evolución de la tensión de apertura en simulación con el registro C-H5_30.

Las diferencias en la zona intermedia del proceso de crecimiento pueden atribuirse a la incapacidad del modelo para simular el comportamiento transitorio que sigue a la aplicación de una sobrecarga. Bajo cargas de amplitud variable puede considerarse que todo el proceso tiene lugar bajo un régimen transitorio permanente de continuos cambios en la tensión de cierre y por consiguiente un error en la estimación del retardo puede tener gran efecto dado que se producirá con cada sobrecarga.

Por otra parte, el que se obtengan vidas muy por debajo de las reales, para coeficientes de constricción que sin embargo sí aproximan muy bien la dispersión de resultados, puede deberse a que el modelo subestima el valor de las tensiones de cierre. De hecho las aproximaciones al valor de la tensión de cierre propuestas por Elber[26] y Schijve[27] predicen para cargas de amplitud constante valores más altos a los obtenidos en la simulación. También las medidas experimentales obtenidas por la autora de este trabajo [28], con cargas de amplitud constante, coinciden en mayor medida con los resultados de Elber y Schijve, es decir, los valores de tensión de cierre obtenidos experimentalmente resultan superiores a los obtenidos en la simulación.

El hecho de que el modelo subestime las tensiones de cierre puede quizás no conducir a errores importantes con cargas de amplitud constante pero producir grandes errores con cargas de amplitud variable con un gran número de ciclos cuyos picos alcancen valores próximos a la tensión de cierre. Para estos ciclos de pequeña amplitud otros mecanismos de cierre de grieta no considerados por el modelo, tales como el cierre inducido por rugosidad, bifurcación y deflexión de la grieta o por óxido, podrían tener un marcado efecto. En base a esta hipótesis se propone una modificación al ajuste de los parámetros del modelo que se describe en el apartado 5.5.

5.4.3. Efecto de la longitud del registro.

Los valores presentados en la tabla 5.6 permiten comparar los resultados obtenidos para el mismo proceso C considerando ahora distintas longitudes del registro de carga. Tal como cabía esperar tras la discusión previa, el primer resultado a destacar es que tanto en los resultados experimentales como en las simulaciones las desviaciones se reducen enormemente, al tiempo que disminuyen la correlación entre la vida y el valor máximo del registro (ρ), lo que demuestra que el efecto del valor máximo disminuye si la longitud del registro aumenta. Se observa que, al igual que sucede con los resultados experimentales, la vida media obtenida en las simulaciones varía muy poco al aumentar la longitud del registro, resultado que concuerda con los encontrados por otros autores [19,20].

Tabla 5.6: *Resultados de ensayos y simulación del proceso tipo C usando registros de carga de distintas longitudes.*

PROCESO	(1)	ENSAYOS	SIMULACIÓN con $\beta=1$			
			$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable
C-H5	μ_N	169978	116508	91644	83202	171141
	σ_N	15272	24466	15459	6107	36479
	ρ	0.96	0.97	0.93	0.92	0.95
C-H25	μ_N	168287	107387	85759	80468	159897
	σ_N	5124	6481	2497	1398	12452
	ρ	0.51	0.29	0.15	0.18	0.63
C-H100	μ_N	169923	109133	86863	81368	163497
	σ_N	3769	4909	1804	868	7944
	ρ	0.22	0.33	0.38	0.18	0.57

(1) μ_N =Vida media (ciclos), σ_N =Desviación estándar (ciclos), ρ =correlación vida-valor máximo del registro

En la tabla 5.7 se presentan las relaciones entre vida media estimada y experimental y entre desviación estándar estimada y experimental. De los resultados de dicha tabla puede afirmarse que el nivel de aproximación conseguido en la estimación de las vidas medias es muy similar en registros largos y cortos, las relaciones vida media estimada/experimental son muy similares para cada valor de α . Sin embargo, las relaciones entre desviación estándar estimada y experimental disminuyen cuando aumenta la longitud del registro debido a que en las estimaciones la dispersión disminuye en mayor medida que en los ensayos.

Tabla 5.7: Comparación entre los resultados de ensayos y simulación del proceso tipo C usando registros de carga de distintas longitudes.

Proceso	$\frac{\mu_N \text{ estimada}}{\mu_N \text{ experimental}}$				$\frac{\sigma_N \text{ estimada}}{\sigma_N \text{ experimental}}$			
	SIMULACIÓN con $\beta=1$				SIMULACIÓN con $\beta=1$			
	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable
C-H5	0.69	0.54	0.49	1.01	1.60	1.01	0.40	2.39
C-H25	0.64	0.51	0.48	0.95	1.26	0.49	0.27	2.43
C-H100	0.64	0.51	0.48	0.96	1.30	0.48	0.23	2.11

En cuanto a la influencia del parámetro α en las estimaciones obtenidas puede concluirse que es la misma si se usan registros cortos o largos, a medida que α aumenta tanto la vida media, muy por debajo de los resultados experimentales, como la desviación disminuyen. Una diferencia a resaltar es que mientras con los registros de 5000 ciclos el valor de α del que resulta la

misma dispersión que en los ensayos es 1.5 para registros más largos dicho valor estaría más próximo a 1.2. Al considerar variable el parámetro α la estimación de la vida media es muy buena pero aún con registros largos la dispersión es superior a 2 veces la obtenida en los ensayos. En la figura 5.15 se representan los resultados para cada registro correspondientes a la serie C-H100.

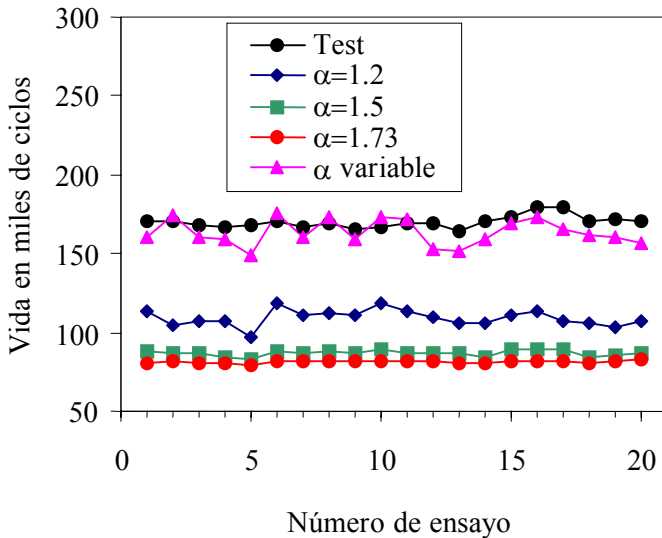


Figura 5.15: Comparación entre las simulaciones y los resultados experimentales para la serie C-H100

Cabría plantearse ahora si el uso de un factor β superior a 1 permite obtener mejores estimaciones de la vida media y las dispersiones. En la tabla 5.8 figuran los resultados obtenidos para distintos valores de β simulando ahora los registros de 25000 ciclos, es decir, los correspondientes al proceso C-H25. Comparando estos resultados con los correspondientes a los registros de 5000 ciclos en la tabla 5.4 puede observarse que las estimaciones sobre la vida media son muy similares. En cuanto a las dispersiones, puede verse como en efecto σ_N es menor que en el caso de registros más cortos pero al disminuir igualmente la dispersión de los resultados experimentales el grado de aproximación

conseguido es prácticamente el mismo. Así para $\alpha=1.5$ y $\beta=1.3$ la relación desviación estimada/experimental es de 2.7 en el caso de registros con 5000 ciclos y de 2.36 en el caso de registros de 25000 ciclos.

Tabla 5.8: *Vidas medias y desviaciones típicas obtenidas por simulación para las cargas del proceso C-H25.*

Parámetros del modelo		μ_N (1)	σ_N (2)	$\frac{\mu_N \text{ estimada}}{\mu_N \text{ experimental}}$	$\frac{\sigma_N \text{ estimada}}{\sigma_N \text{ experimental}}$
β	α				
1	1.5	85759	2497	0.51	0.49
1.2	1.5	142436	8468	0.85	1.65
1.3	1.5	186714	12113	1.11	2.36
ensayos		168287	5124	-	-

(1) μ_N =Vida media (ciclos)

(2) σ_N =Desviación estándar (ciclos)

Otro efecto a destacar es que para registros más largos el número de valores próximos al máximo aumenta, en la mayoría de los casos el número de picos de tensión con valores iguales o superiores al 90% es mayor que 45, y entre el 85% y el 90% del máximo es mayor que 165. Tal como se discutió para registros de 5000 ciclos, en este caso el modelo tiende a disminuir el efecto de retardo, explicando así porqué en la simulación con registros largos se obtienen vidas más cortas y también menos dispersión. Para $\beta=1$ y $\alpha=1.2$ la relación vida estimada/experimental oscila ahora entre 0.59 y 0.67.

5.4.5. Efecto del tipo de proceso.

Los valores obtenidos por simulación con las 20 historias de carga correspondientes al resto de procesos aleatorios de distintos anchos de banda considerados en este estudio y nivel de carga alto conducen a idénticas conclusiones.

Los resultados de las tablas 5.9 y 5.10 muestran como tanto la vida media (μ_N) como la dispersión (σ_N) disminuyen a medida que aumenta el valor del parámetro α . Valores pequeños de α conducen a mejores ajustes en relación a la variabilidad de la vida o dispersión pero con estimaciones muy conservadoras sobre la vida media, con relaciones entre la vida media estimada y experimental entre 0.59 y 0.66.

Puede afirmarse además que el nivel de aproximación conseguido en la estimación de la vida media es prácticamente el mismo para los distintos anchos de banda de los procesos considerados, especialmente para valores altos de α , lo mismo sucede con las desviaciones. Esto significa que la influencia del ancho de banda del proceso en la precisión de las estimaciones es pequeña.

Considerando variable el valor del parámetro α la vida media aumenta estimando con muy buena aproximación la obtenida experimentalmente, con relaciones vida media estimada/experimental entre 0.89 y 1.04, pero con dispersiones muy alejadas de los valores experimentales, con relaciones entre la desviación estándar estimada y experimental entre 2.3 y 3.5.

En la figura 5.16 se representan tanto la relación entre la vida media estimada y experimental como entre desviaciones estimadas y experimentales frente al ancho de banda del proceso para distintos valores del parámetro α .

Tabla 5.9: Resultados de ensayos y simulaciones de los distintos procesos para el nivel alto de carga.

PROCESO	Media y desviación	ENSAYOS	SIMULACIÓN con $\beta=1$			
			$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable
A-H25	μ_N	277151	164013	145235	139820	247311
	σ_N	13377	10731	6256	3573	30399
B-H25	μ_N	197114	123571	99487	93412	190980
	σ_N	7686	9524	4118	2170	26451
C-H25	μ_N	168287	107387	85759	80468	159897
	σ_N	5124	6481	2497	1398	12452
D-H25	μ_N	146981	97625	74680	68794	152486
	σ_N	5363	6765	2474	1299	18521

Tabla 5.10: Comparación entre los resultados de ensayos y las simulaciones de los distintos procesos para el nivel alto de carga.

Proceso	$\frac{\mu \text{ estimada}}{\mu \text{ experimental}}$				$\frac{\sigma \text{ estimada}}{\sigma \text{ experimental}}$			
	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable
A-H25	0.59	0.52	0.50	0.89	0.80	0.47	0.27	2.27
B-H25	0.63	0.50	0.47	0.97	1.24	0.54	0.28	3.44
C-H25	0.64	0.51	0.48	0.95	1.26	0.49	0.27	2.43
D-H25	0.66	0.51	0.47	1.04	1.26	0.46	0.24	3.45

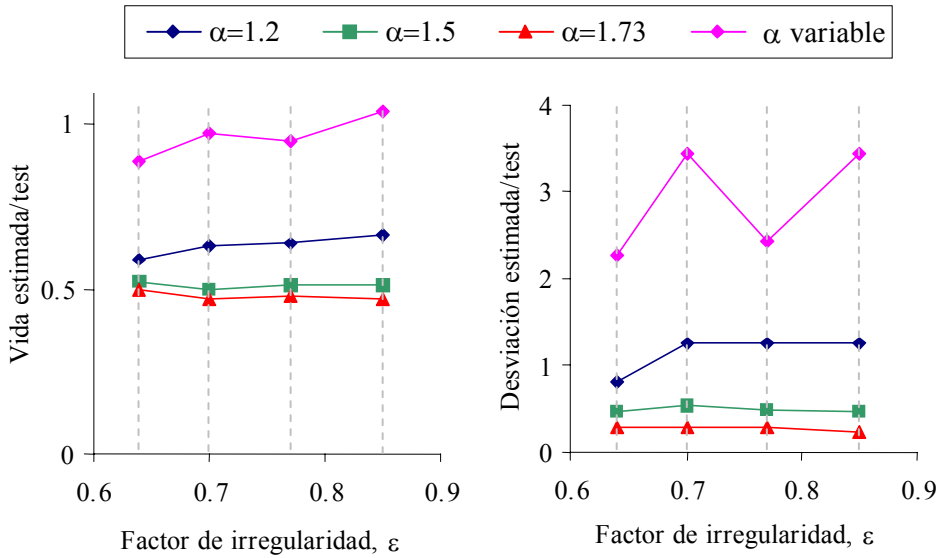


Figura 5.16: Comparación entre los resultados de ensayos y simulaciones de los distintos procesos para el nivel alto de carga.

El efecto del ancho de banda del proceso sobre la vida media y dispersión obtenidas en los ensayos se discutirá con detalle en el próximo capítulo, en este punto interesa resaltar simplemente que para los cuatro tipos de procesos considerados el modelo de simulación se comporta de idéntica forma.

En la figura 5.17 se representan los resultados individuales para cada registro de carga obtenidos en los ensayos y la simulación para el nivel alto de cargas. En ella puede observarse la influencia del parámetro α , igual en los cuatro tipos de procesos.

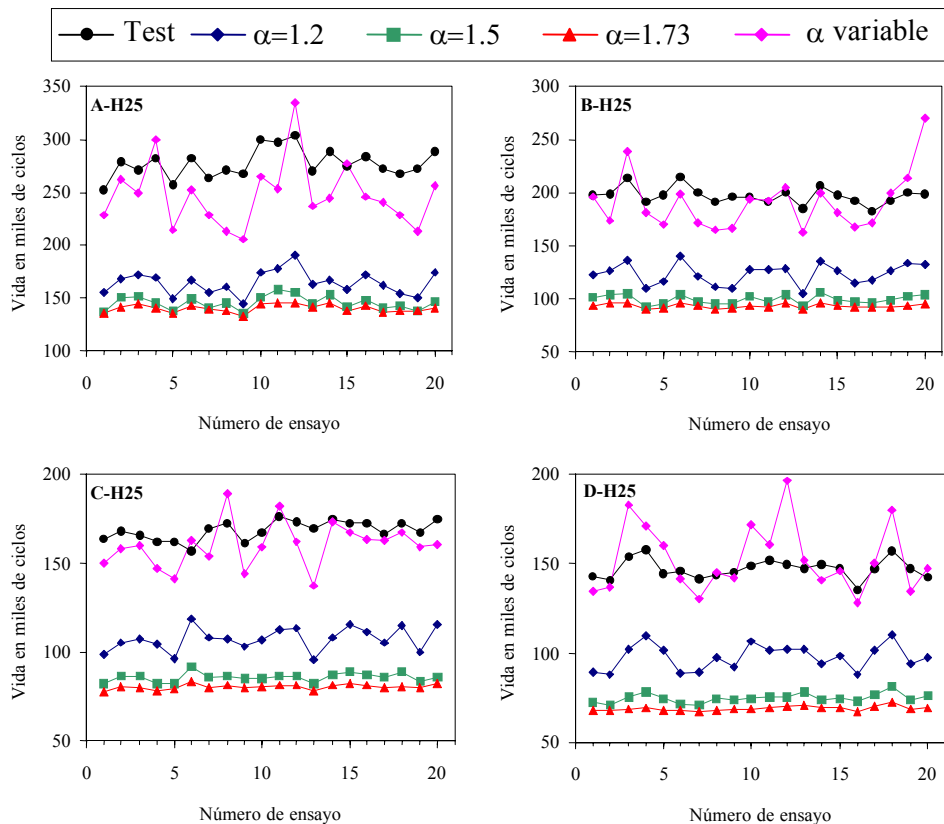


Figura 5.17: Resultados individuales para cada registro de carga obtenidos en los ensayos y por simulación para el nivel alto de cargas.

5.4.6. Efecto del nivel de carga.

En cuanto a los resultados obtenidos para la simulación de los mismos procesos para el nivel bajo de carga, que se exponen en las tablas 5.11 y 5.12, la primera conclusión es que aún considerando variable el valor del parámetro α las estimaciones de vida están muy por debajo de los resultados obtenidos experimentalmente. Un aumento del parámetro α produce igualmente una disminución de las dispersiones obtenidas. Sin embargo, el efecto sobre la vida media al aumentar α es contrario al obtenido para el nivel alto de carga tendiendo a aumentar en lugar de disminuir. En la figura 5.16 puede observarse este hecho, además pone de manifiesto que el grado de estimación conseguido es menor que en el caso del nivel alto de carga.

También en este caso la influencia del ancho de banda del proceso en la precisión de las estimaciones es pequeña.

Tabla 5.11: Resultados de ensayos y simulaciones para los distintos procesos para el nivel bajo de carga.

PROCESO	Media y desviación	ENSAYOS	SIMULACIÓN con $\beta=1$			
			$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable
A-L25	μ_N	1163986	516271	546265	606227	826366
	σ_N	35447	29069	12540	5930	59766
C-L25	μ_N	690667	309853	310156	340487	478434
	σ_N	17715	14276	5574	3295	33953
D-L25	μ_N	589569	271356	259854	279440	416379
	σ_N	24525	17237	6893	4041	37177

Tabla 5.12: Comparación entre los resultados de ensayos y las simulaciones para los distintos procesos para el nivel bajo de carga.

Proceso	$\frac{\mu \text{ estimada}}{\mu \text{ experimental}}$				$\frac{\sigma \text{ estimada}}{\sigma \text{ experimental}}$			
	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable
A-L25	0.44	0.47	0.52	0.71	0.82	0.35	0.17	1.69
C-L25	0.45	0.45	0.49	0.69	0.81	0.31	0.19	1.92
D-L25	0.46	0.44	0.47	0.71	0.70	0.28	0.16	1.52

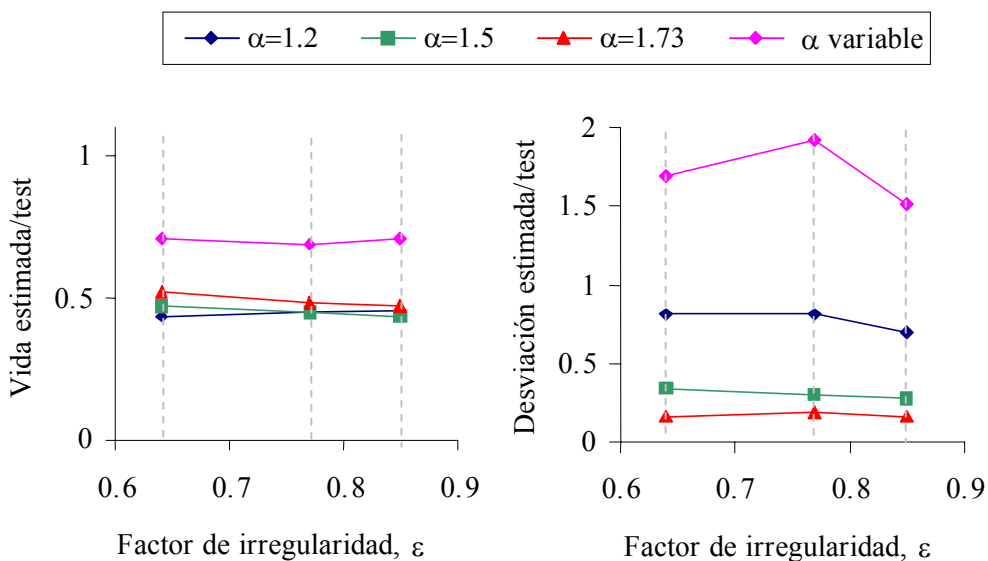


Figura 5.18: Comparación entre los resultados de ensayos y simulaciones para los distintos procesos para el nivel bajo de carga.

La figura 5.19 muestra los valores obtenidos en ensayos y simulación para las 20 historias de carga de los tres procesos analizados con el nivel de carga bajo, es decir, las series A-L25, C-L25 y D-L25.

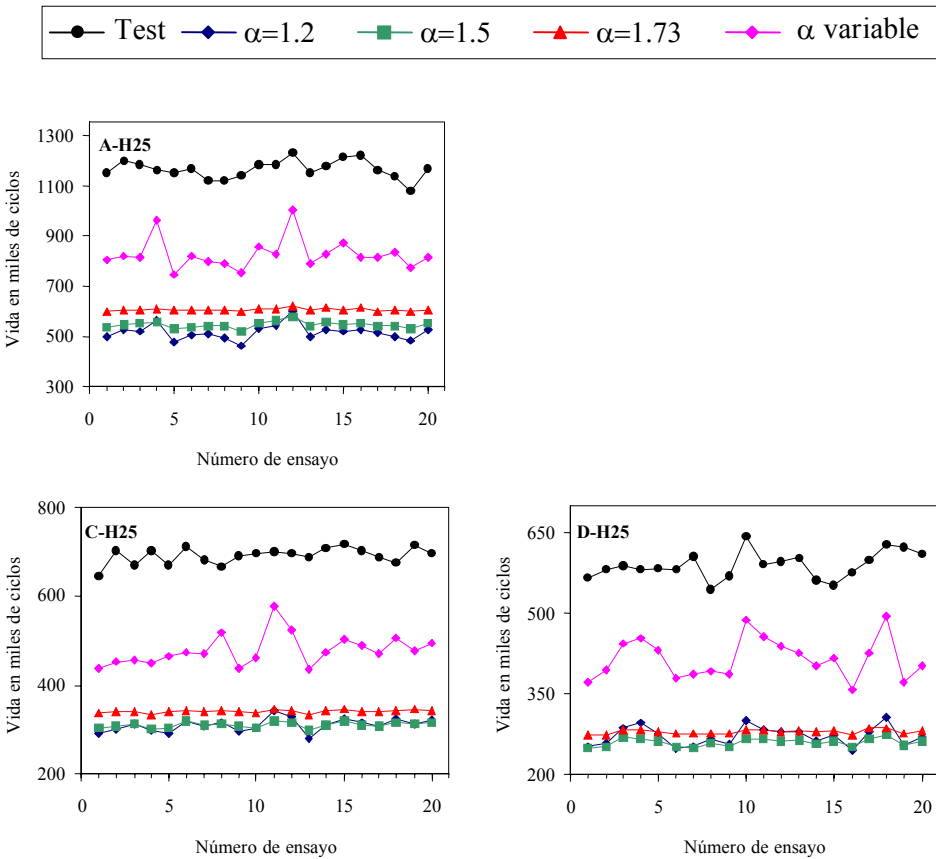


Figura 5.19: Resultados individuales para cada registro de carga obtenidos en los ensayos y por simulación para el nivel bajo de cargas.

5.5. MODIFICACIÓN AL AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO

El análisis de las estimaciones obtenidas por simulación mostrado hasta ahora, induce a pensar que la tensión de cierre que el modelo predice para el caso de cargas aleatorias es inferior a la tensión de cierre producida en la probeta durante el ensayo. El modelo determina la tensión de cierre suponiendo que ésta es solamente inducida por plasticidad, no obstante otros efectos como la bifurcación y deflexión de la grieta, rugosidad u óxido pueden influir en la tensión de cierre. Ya se comentó en el capítulo 2 que estos mecanismos adicionales de cierre pueden influir apreciablemente en el efecto de secuencia para niveles bajos de ΔK . Con las cargas aleatorias, especialmente para el nivel bajo de carga, existen muchos ciclos pequeños con valores próximos al umbral que pueden activar dichos mecanismos de cierre incrementando el valor de las tensiones de cierre inducidas por plasticidad.

Para corregir las tensiones de cierre calculadas por el modelo ciclo a ciclo, e intentar mejorar las estimaciones del mismo con cargas de amplitud variable, se propone modificar el ajuste de los parámetros del modelo. La idea es modificar la ecuación de crecimiento, modificando los valores de los parámetros C_1 y C_2 , sin modificar el código FASTRANII ni el cálculo por tanto del ΔK_{eff} calculado en base a las tensiones de cierre inducidas por plasticidad. Se trata de desplazar las curvas da/dN frente a ΔK_{eff} hacia la derecha de manera que a un determinado valor de ΔK_{eff} corresponda una velocidad de crecimiento menor. Esto significa que en la ley de crecimiento que se integra en la optimización de los parámetros C_1 y C_2 se toma como valor del rango del factor de intensidad de tensiones efectivo, el mismo que en el ajuste previo al que se le suma un factor de corrección:

$$\Delta K_{eff}^{corr} = \Delta K_{eff} + \Delta K_{corr}$$

Este cambio del procedimiento de ajuste de los parámetros del modelo puede observarse en la figura 5.20 comparándola con 5.9.

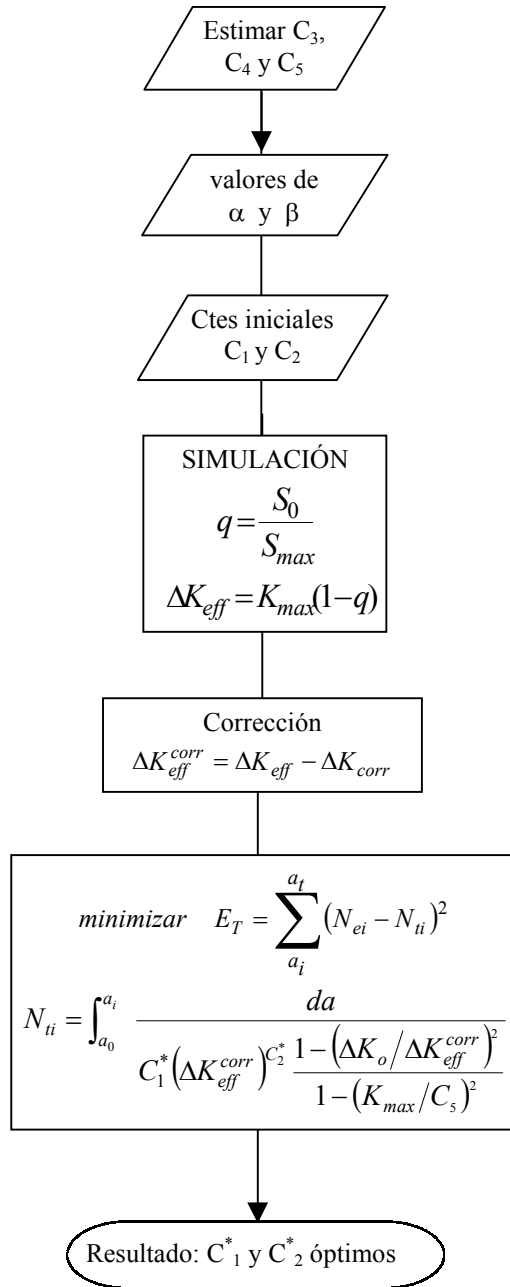


Figura 5.20: Esquema del procedimiento seguido en la modificación propuesta al ajuste de los parámetros del modelo de crecimiento.

Para calcular cuanto vale el factor de corrección se simula una carga de amplitud constante igual al valor umbral efectivo (ΔK_0), valor promedio tomado de referencias bibliográficas para este mismo material y usado en el ajuste de los parámetros C_3 y C_4 . Se observa que, con las constantes C_1 y C_2 ajustadas según se describió en 5.3, el modelo supone crecimiento con esta carga que sin embargo no debería de existir. La diferencia por tanto, entre el ΔK_{eff} proporcionado por el modelo (para la carga correspondiente al umbral, que se denominará $\Delta K_{\text{eff}}^{\text{th}}$) y el rango efectivo del umbral (ΔK_0), se toma como valor de corrección (ΔK_{corr}) para el ajuste nuevamente de los parámetros que ahora denominaremos C_1^* y C_2^* de la ecuación de crecimiento. Es decir:

$$\Delta K_{\text{corr}} = \Delta K_{\text{eff}}^{\text{th}} - \Delta K_0$$

Esta corrección se realiza igualmente con distintos valores del factor de constricción α . Los valores de ΔK_{corr} y las constantes promediadas C_1^* y C_2^* obtenidas en el nuevo ajuste de la ecuación de crecimiento, obtenidas como se detalla en el procedimiento de la figura 5.20, junto con las constantes C_1 y C_2 obtenidas en el ajuste previo se muestran en la tabla 5.13. La figura 5.21 muestra en coordenadas semilogarítmicas los valores individuales de C_1^* y C_2^* ajustados en las 18 curvas de crecimiento con cargas de amplitud constante.

Tabla 5.13: *Parámetros C_1 y C_2 obtenidos en los dos ajustes para distintos valores de α .*

α	ΔK_{corr} (MPa m ^{1/2})	C_1^*	C_2^*	C_1	C_2
1.2	1.3	5.86551E-11	3.84353	4.82351E-10	3.10695
1.5	1.45	3.94002E-11	3.85765	3.52793E-10	3.11679
1.73	1.56	2.91295E-11	3.87176	2.96267E-10	3.12207

Nota: Estos valores de las constantes corresponden a la ecuación de crecimiento expresadas las velocidades en m/ciclos y ΔK_{eff} en MPa m^{1/2}

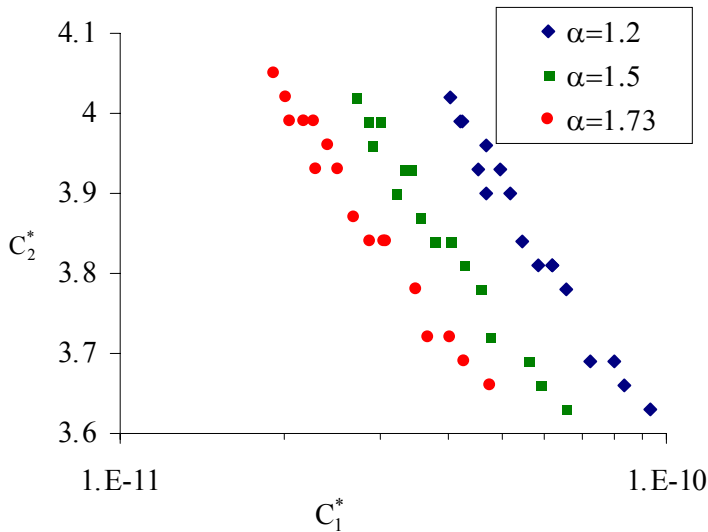


Figura 5.21: Parámetros C_1 y C_2 obtenidos en el ajuste modificado para distintos valores de α .

En la figura 5.22 se representa para $\alpha=1.73$ la curva de crecimiento da/dN frente a ΔK_{eff} con las constantes C_1 y C_2 obtenidas en el primer ajuste de los parámetros frente a la curva de crecimiento con dichas constantes obtenidas en el ajuste modificado, es decir, C_1^* y C_2^* . En dicha gráfica se observa la modificación considerada en la curva de crecimiento, que se traduce en una menor velocidad de crecimiento para un determinado valor del ΔK_{eff} . Dicha disminución de velocidad es mayor a bajos valores de ΔK_{eff} , de esta forma, la modificación permite tener en cuenta que para dichos valores la velocidad de crecimiento de la grieta disminuye debido al efecto de mecanismos tales como la bifurcación de la grieta, rugosidad u óxidos. En las curvas de crecimiento se modifican tanto el desplazamiento como la pendiente de ahí que en el ajuste modificado C_1 disminuye y C_2 aumenta. Por otra parte puesto que no se modifican los parámetros C_3 y C_4 , y por tanto ΔK_0 , ni C_5 las asíntotas de ambas curvas coinciden tanto para ΔK próximo al umbral como a K_C .

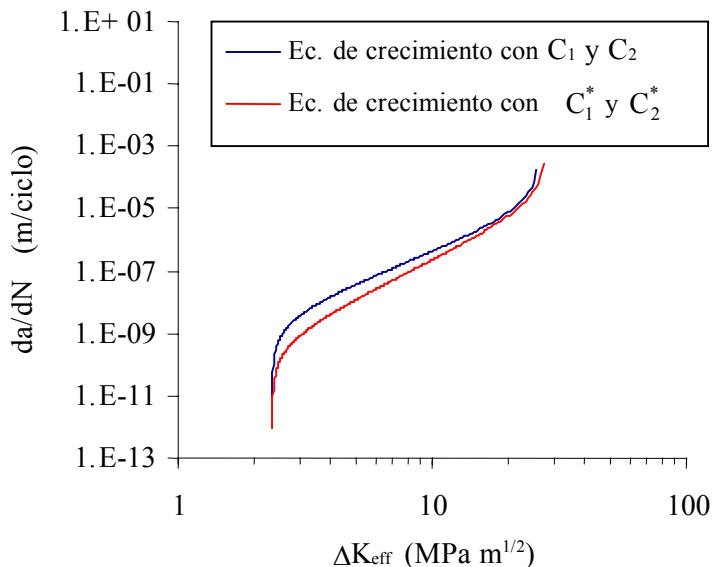


Figura 5.22: Ecuaciones de crecimiento obtenidas tanto con los parámetros obtenidos en el primer ajuste como en el modificado.

Con los nuevos parámetros obtenidos con el ajuste modificado se vuelven a realizar las simulaciones ciclo a ciclo para los registros de carga variable de los distintos procesos y niveles de carga considerados en los ensayos, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.14. Para valorar la precisión de los ajustes en la tabla 5.15 se presentan la relación entre la vida media estimada y la experimental, así como la relación entre la desviación estimada y la experimental. Con el fin de comparar los resultados obtenidos mediante la modificación del ajuste de los parámetros con los obtenidos previamente las anteriores relaciones se representan en la figura 5.23 para ambos ajustes con los distintos valores estudiados del parámetro α y para los dos niveles de carga considerados.

Tabla 5.14: Resultados de ensayos y simulaciones con el ajuste modificado.

PROCESO	(1)	ENSAYOS	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$
A-H25	μ_N	277151	284504	275269	273335
	σ_N	13377	27224	13453	8365
B-H25	μ_N	197114	205094	188037	187222
	σ_N	7686	16446	11254	5978
C-H25	μ_N	168287	185351	160575	161289
	σ_N	5124	11921	7283	4918
C-H100	μ_N	169923	186190	163098	160412
	σ_N	3769	8069	5091	2957
D-H25	μ_N	146981	170734	141800	136085
	σ_N	5363	18001	8859	4941
A-L25	μ_N	1163986	1183931	1346490	1710116
	σ_N	35447	96510	30418	20460
C-L25	μ_N	690667	682700	724056	899287
	σ_N	17715	63016	15623	9821
D-L25	μ_N	589569	582928	595562	701072
	σ_N	24525	55981	22009	14586

(1) μ_N =Vida media (ciclos), σ_N =Desviación estándar (ciclos).

Tabla 5.12: Comparación entre los resultados de ensayos y las simulaciones con el ajuste modificado.

PROCESO	$\frac{\mu \text{ estimada}}{\mu \text{ experimental}}$			$\frac{\sigma \text{ estimada}}{\sigma \text{ experimental}}$		
	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$
A-H25	1.03	0.99	0.99	2.04	1.40	0.63
B-H25	1.04	0.95	0.95	2.14	1.46	0.78
C-H25	1.1	0.95	0.96	2.33	1.42	0.96
C-H100	1.1	0.96	0.94	2.14	1.35	0.78
D-H25	1.16	0.97	0.93	3.36	1.65	0.92
A-L25	1.02	1.16	1.47	2.72	0.86	0.58
C-L25	0.99	1.05	1.3	3.56	0.88	0.55
D-L25	0.99	1.01	1.19	2.28	0.90	0.59

La primera conclusión que puede extraerse de los resultados de las tablas 5.14 y 5.15 es que tanto las vidas medias como las dispersiones obtenidas mediante la corrección de la tensión de cierre propuesta se acercan más a las obtenidas en los ensayos que las del modelo sin modificar. En general las estimaciones son mejores para el nivel alto de carga que para el nivel bajo.

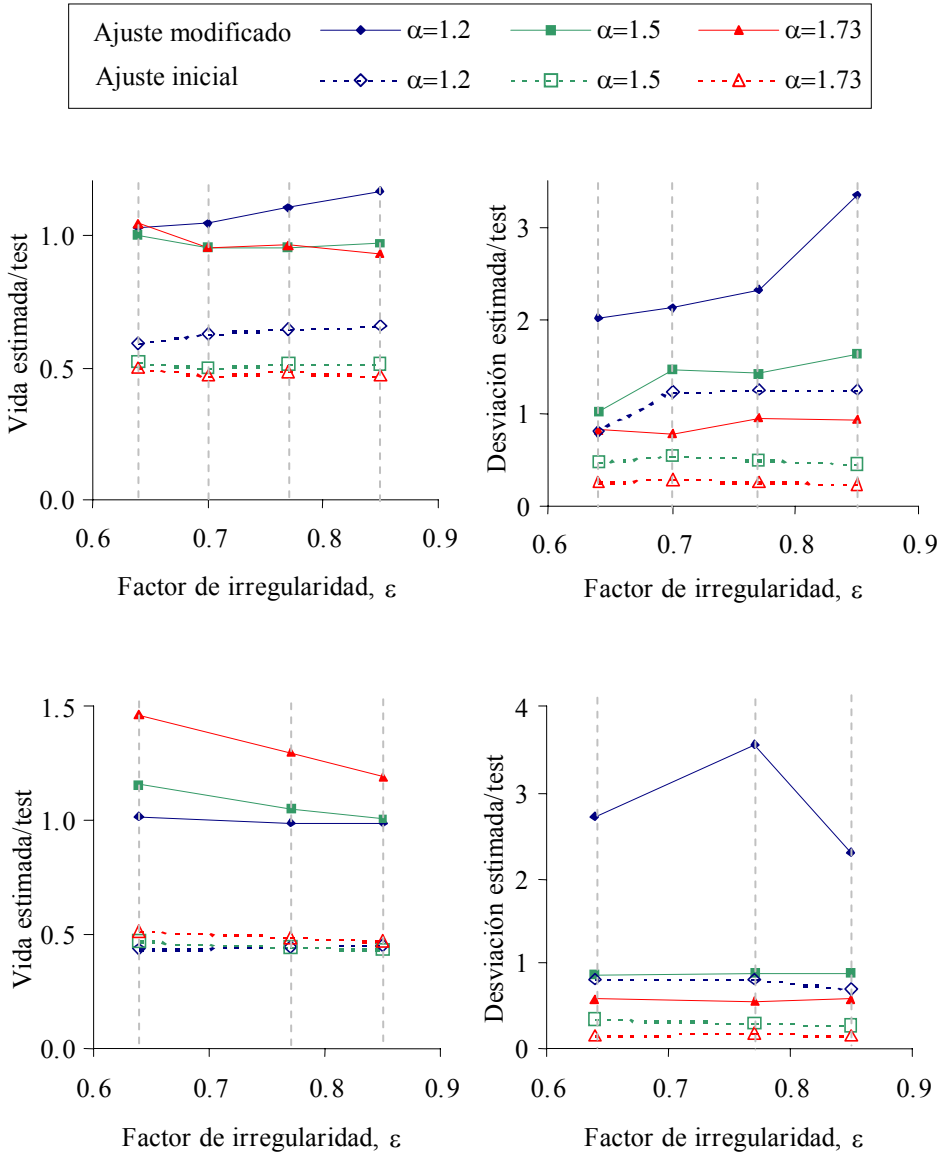


Figura 5.23: Comparación entre los dos ajustes realizados para el nivel alto y bajo de carga.

Del análisis de los resultados presentados en la figura 5.23 puede concluirse que la influencia del parámetro α es la misma en los dos tipos de ajustes y para todos los anchos de banda. Para el nivel alto de carga un aumento del parámetro α conduce generalmente a vidas más cortas aunque las variaciones son menores en el ajuste modificado, las relaciones vida estimada/experimental oscilan entre 0.93 y 1.16. Igualmente el aumento del parámetro α produce menores dispersiones, valores bajos de α producen dispersiones superiores a 2 veces las obtenidas en ensayos, mientras que con valores más altos de dicho parámetro se consiguen mejores aproximaciones.

Este comportamiento puede apreciarse en la figura 5.24 donde se representan los valores individuales obtenidos para cada registro del proceso C-H100 con distintos valores de α y las constantes de la ecuación de crecimiento obtenidas mediante el ajuste modificado.

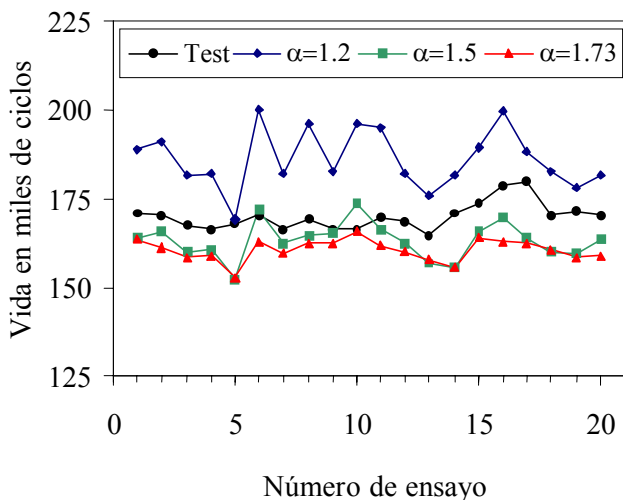


Figura 5.24: Resultados de ensayos y simulaciones con los parámetros del ajuste modificado para el proceso C-H100.

Para el nivel alto de carga puede afirmarse que mediante la corrección de la tensión de cierre del modelo es posible estimar, con muy buena aproximación tanto la vida media como la dispersión de los resultados. Además dicha afirmación es válida para todos los anchos de banda considerados, dado que la influencia de este factor en las estimaciones es pequeña.

Considerando el valor del parámetro $\alpha=1.5$ la estimación obtenida para vidas medias es en todos los casos conservadora, con relaciones vida estimada/experimental entre 0.95 y 0.99. Sin embargo, en este caso las dispersiones obtenidas superan las reales, especialmente para los procesos de banda estrecha, llegando a obtenerse relaciones entre la desviación estimada y experimental de 1.65. La mejor aproximación en cuanto a dispersión de los resultados resulta para $\alpha=1.73$, que correspondería según Irwin al estado de deformación plana, con relaciones dispersión estimada/experimental entre 0.63 y 0.96. Para dicho valor del parámetro de constricción la relación entre vida media estimada y experimental varía entre 0.93 y 0.99.

En todos los casos puede comprobarse que la relación entre vida estimada y vida experimental para cada historia particular de carga son similares como puede apreciarse en las figuras 5.25 y 5.26. En dichas figuras se muestran los valores individuales obtenidos experimentalmente para cada registro de 25000 ciclos en los cuatro tipos de procesos considerados y las estimaciones obtenidas mediante simulación ajustando los parámetros de la ecuación de crecimiento mediante la corrección de la tensión de cierre propuesta para un valor de $\alpha=1.5$ y $\alpha=1.73$ respectivamente.

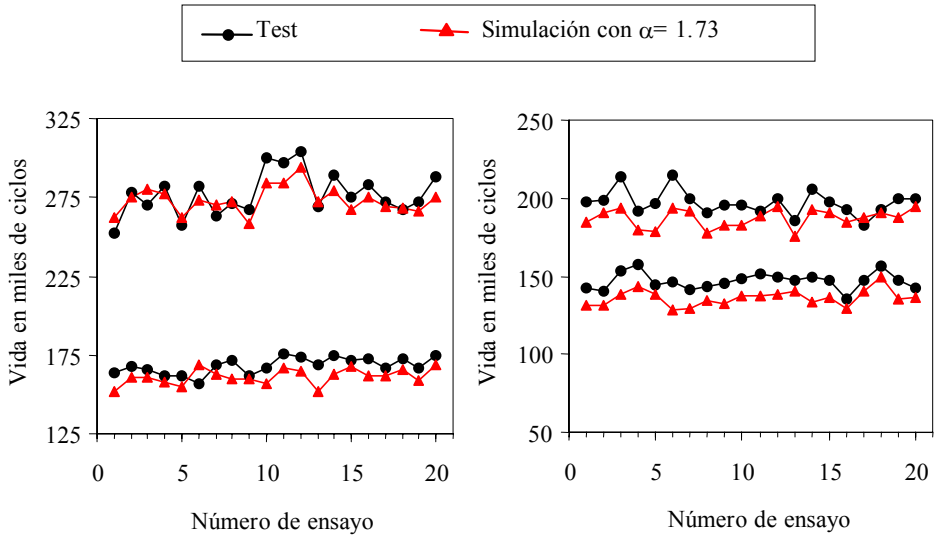


Figura 5.25: Resultados de ensayos y simulaciones con los parámetros del ajuste modificado para $\alpha=1.5$ y el nivel de carga H .

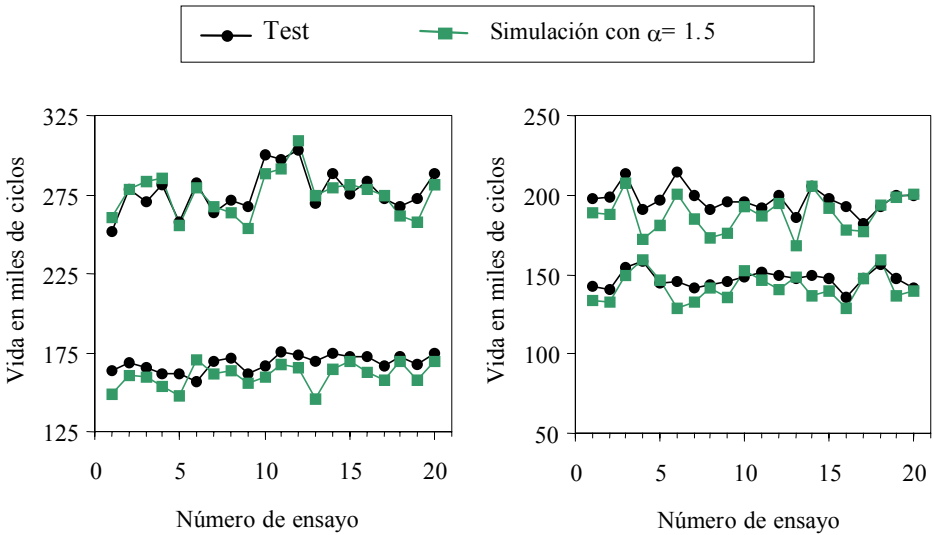


Figura 5.26: Resultados de ensayos y simulaciones con los parámetros del ajuste modificado para $\alpha=1.73$ y el nivel de carga H .

Para poder decidir qué parámetro estima en mejor medida tanto la vida media como la dispersión podrían analizarse los valores obtenidos del coeficiente de variación o relación entre la desviación y la vida media. En la figura 5.27 se representa como varía dicho coeficiente, para distintos valores del parámetro α , en función del factor de irregularidad ε que caracteriza el ancho de banda del proceso. En dicha gráfica se observa que para valores altos de α la tendencia de variación del coeficiente de correlación con el factor de irregularidad en los resultados estimados por el modelo no coincide con la obtenida experimentalmente. Si puede concluirse que la mejor estimación corresponde a los valores de simulación obtenidos con un valor de $\alpha=1.73$, los resultados son mejores para procesos de estrecha que para los de banda ancha. Para el proceso A-H la mejor estimación corresponde a los valores obtenidos con $\alpha=1.5$.

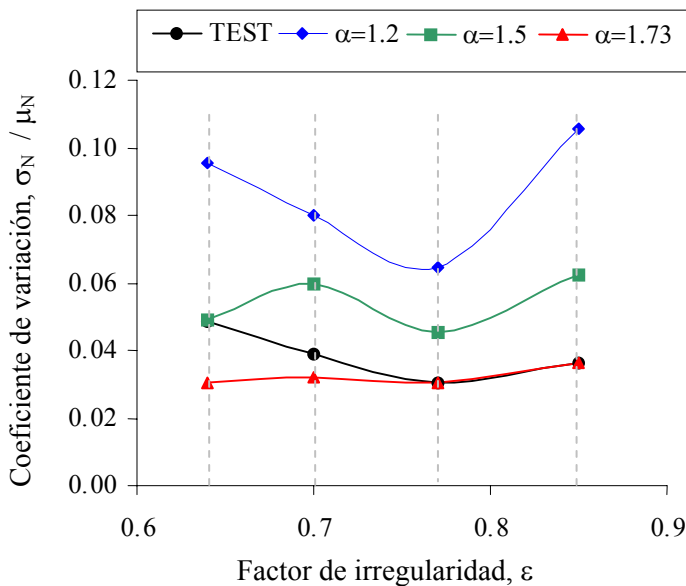


Figura 5.27: Coeficiente de variación frente al factor de irregularidad del proceso para el nivel de carga alto.

Sin embargo, para el nivel bajo de carga la simulación da como resultado peores estimaciones que en el caso del nivel alto. Al igual que en las estimaciones con el primer ajuste de los parámetros, el aumento de α produce vidas más largas con peores aproximaciones de la vida media de crecimiento, especialmente en el proceso de banda más ancha. Las relaciones vida estimada/experimental oscilan entre 0.99 y 1.47. Valores bajos de dicho parámetro que aproximan muy bien la vida media producen no obstante dispersiones muy alejadas de las obtenidas experimentalmente. Así, las mejores estimaciones de vida corresponden ahora a $\alpha=1.2$, sin embargo, las dispersiones superan en más de 3.5 veces las reales. Para un valor del parámetro $\alpha=1.5$ las relaciones vida estimada/experimental oscilan entre 1.16 y 1.01 y la desviación estimada/experimental entre 0.86 y 0.9. La figura 5.28 muestra para el nivel bajo de carga los valores individuales obtenidos en los tres procesos analizados para $\alpha=1.5$.

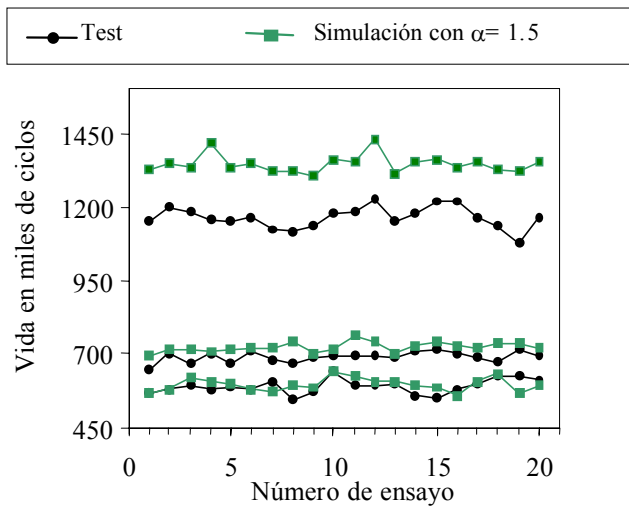


Figura 5.28: Resultados de ensayos y simulaciones con los parámetros del ajuste modificado para $\alpha=1.5$ y nivel de carga L .

La figura 5.29 muestra la variación del coeficiente de correlación con el factor de irregularidad del proceso de la que puede concluirse que el mejor ajuste corresponde en este caso a $\alpha=1.5$.

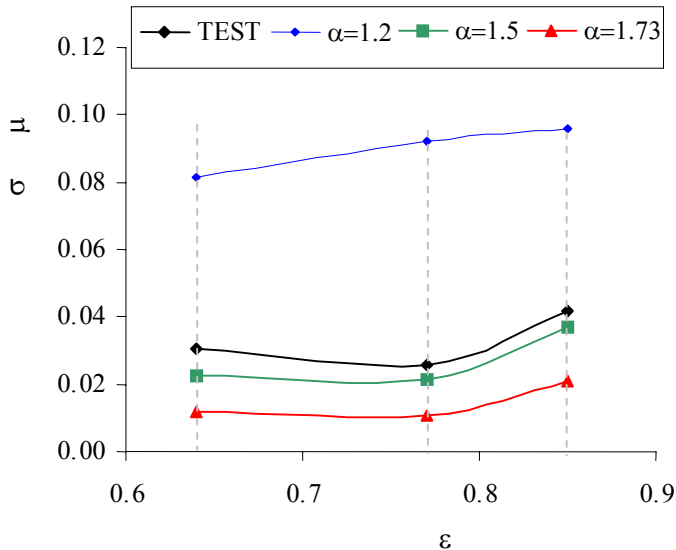


Figura 5.29: *Coeficiente de variación frente al factor de irregularidad del proceso para el nivel de carga bajo.*

La menor aproximación conseguida en las estimaciones para el nivel bajo de carga pueden deberse a distintas causas. Por una parte, influye el hecho de que en el nivel bajo de carga la influencia del parámetro α sobre la vida media de crecimiento sea contrario al encontrado para el nivel alto. En el primer caso (nivel L) la vida media aumenta con el aumento de α mientras que en el segundo (nivel H) disminuye. La dispersión en ambos casos disminuye al aumentar α . Esto hace que las mejores estimaciones para la vida media correspondan a valores bajos del parámetro o factor de constricción mientras que las mejores estimaciones para la dispersión correspondan a valores altos. No es posible por tanto mejorar simultáneamente la estimación de ambas variables con la variación del parámetro α .

Por otra parte, la fuente de error podría encontrarse en la estimación del rango del factor de intensidad de tensiones umbral efectivo ΔK_0 , obtenido en base a los resultados de otros autores. Esto justificaría que los resultados obtenidos sean peores dado que para el nivel bajo de carga se producen muchos ciclos pequeños con valores muy próximos al umbral. Sería necesario un análisis experimental para corroborar este hecho.

Por último, Newman propone [14] en cargas de amplitud constante para el ajuste del parámetro α , buscar el valor que produciría una única ecuación de crecimiento para distintos valores de la relación de cargas R . Esto representa buscar el parámetro para el cual las distintas curvas da/dN frente a ΔK_{eff} para cada R colapsan en una única. Sin embargo, el modelo, basado en el cierre de grieta inducido por plasticidad, no es capaz de obtener un único valor del umbral, es decir, las distintas relaciones $da/dN - \Delta K_{\text{eff}}$ colapsan en una única para todo el rango de ΔK_{eff} salvo en la zona del umbral. En ese caso sugiere adoptar el valor que corresponde a $R=0.5$, que podría ser inferior al adoptado en este análisis. Newman justifica este comportamiento como debido a la influencia de otros mecanismos de cierre como rugosidad u óxido y asegura que son necesarios más estudios para comprender la interacción entre los distintos mecanismos de cierre en regímenes con bajo ΔK .

5.6. PRECISIÓN DE LAS ESTIMACIONES PARA OTRAS LONGITUDES DE GRIETA.

Cabría ahora plantearse cual es el nivel de aproximación de las estimaciones no sólo para la longitud final de la grieta sino a otras longitudes intermedias, es decir, si el modelo es capaz de aproximar la evolución de la grieta durante todo el crecimiento. En la figura 5.30 se representa la vida media en ciclos para cada longitud de grieta obtenidos tanto de ensayos como de simulación para el proceso C-H25 y $\alpha=1.5$. La figura 5.31 expresa idénticos resultados para el proceso C-L25.

Del análisis de estos resultados, puede decirse que en ambos casos, para grieta corta la velocidad de crecimiento de grieta en los ensayos es superior a la obtenida por simulación mientras que para grieta larga, longitudes superiores a unos 20 mm, sucede justamente lo contrario. Esto puede entenderse analizando la variación del estado de tensiones con la longitud de grieta. Para grietas cortas el radio plástico es más pequeño que para grieta larga, porque K_{\max} es menor, esto significa que el estado de tensiones es más próximo a deformación plana, o lo que es lo mismo $\alpha=1.73$. A medida que la grieta avanza el factor de constricción debería ir disminuyendo para ir aproximando el estado de tensiones a condiciones más próximas a tensión plana. Puesto que en el análisis se considera un factor de constricción constante, para grieta corta es posible que el valor de $\alpha=1.5$ sea inferior al que debería considerarse, más próximo a 1.73 que produciría mayores radios plásticos, mayor tensión de cierre y por tanto menor ΔK_{eff} , es decir, menor velocidad de crecimiento. Para grieta larga el valor de $\alpha=1.5$ puede ser superior al que debería considerarse en base al estado de tensiones, y que por tanto, se estén considerando menores radios plásticos, menor tensión de cierre y por tanto mayor ΔK_{eff} , es decir, mayor velocidad de crecimiento que la obtenida experimentalmente.

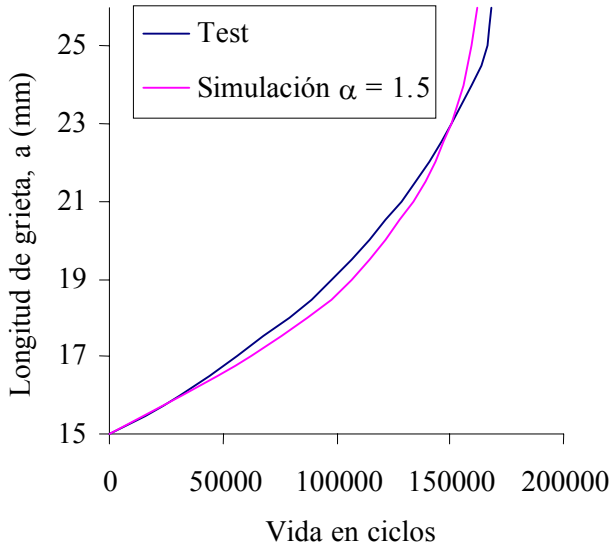


Figura 5.30: Vida media para cada longitud de grieta obtenidos en ensayos y simulación con $\alpha=1.5$ para el proceso C-H25.

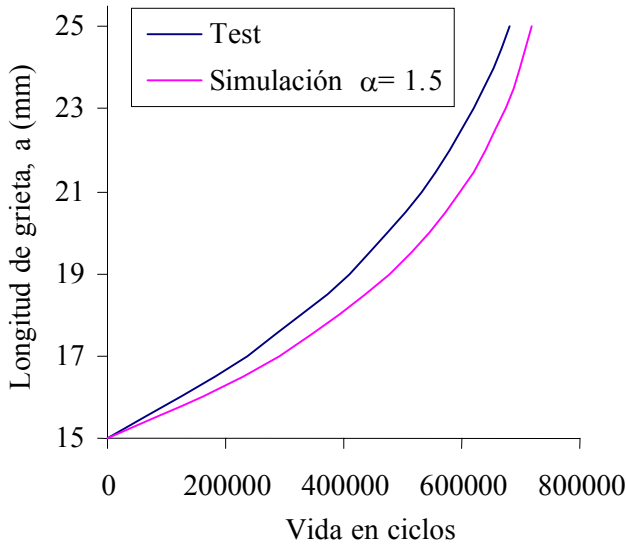


Figura 5.31: Vida media para cada longitud de grieta obtenidos en ensayos y simulación con $\alpha=1.5$ para el proceso C-L25.

Lo anterior está de acuerdo por lo obtenido por Newman [13] al ajustar los resultados de Hudson [29], Dubensky [30] y Phillips [31], en ensayos de amplitud constante. El mejor ajuste lo consigue para distintos valores de R usando un valor de α variable (figura 5.32), $\alpha = 1.73$ para valores bajos de ΔK y $\alpha = 1.3$ para valores altos. En ensayos de amplitud constante, ΔK sólo aumenta al aumentar la longitud de la grieta, luego lo anterior representa considerar valores más altos del factor de constricción, es decir estados más próximos a deformación plana, para grieta corta que para grieta larga.

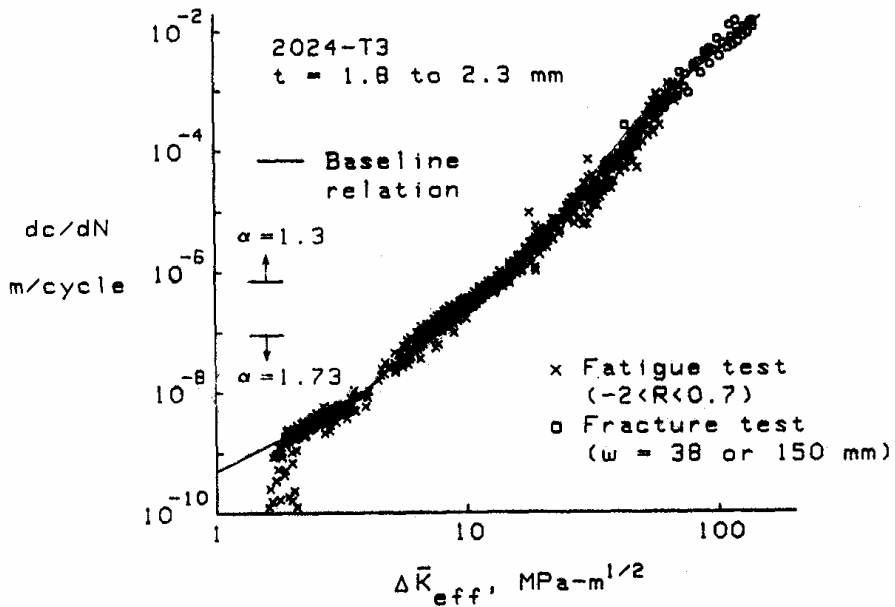


Figura 5.32: Ajuste de ΔK_{eff} frente a velocidad de crecimiento de grieta obtenidos por Newman en ensayos de amplitud constante para distintos R usando un parámetro α variable.

5.7. CONCLUSIONES

Se resumen a continuación las conclusiones generales que pueden extraerse sobre la bondad del modelo propuesto por Newman basadas en los análisis discutidos en este capítulo. En primer lugar se exponen las conclusiones obtenidas en base a los resultados de simulación usando los parámetros de la ecuación de crecimiento obtenidos en un primer ajuste como se detalla en 5.3.

1. Para cargas de amplitud constante el modelo estima con muy buena aproximación tanto la vida media hasta una longitud final como la evolución de la longitud de grieta a lo largo del crecimiento. Se han realizado distintos ajustes considerando diferentes valores del factor de constricción α encontrándose variaciones de la relación entre vida estimada y vida media experimental entre 1.06 y 0.96 al variar α entre 1.2 y 2.3. Estas variaciones son inferiores a la variabilidad de resultados obtenidos experimentalmente debido a la aleatoriedad de las propiedades del material.
2. En cargas de amplitud variable sin embargo las vidas estimadas por el modelo difieren marcadamente de las obtenidas en ensayos. Además, los resultados obtenidos dependen fuertemente de los valores usados para los factores de constricción α y β . Para el proceso de carga C-H5, tanto la vida media como la dispersión disminuyen a medida que aumenta α , para un valor constante del parámetro β . Las estimaciones de vida, siempre muy conservadoras, se ajustan mejor a los resultados experimentales para valores bajos de α , sin embargo, los valores de dispersión resultan muy superiores a los reales. En cuanto a la influencia del parámetro β , si bien un aumento del mismo aumenta la vida media mejorando dicha estimación, el efecto de dispersión se hace mucho más acusado alejándose en exceso de los resultados de los ensayos.

3. El uso de un factor de constricción α variable con la velocidad de crecimiento aumenta la vida estimada con cada registro pero sobrestima el efecto de las sobrecargas produciendo una variabilidad de resultados excesiva, o lo que es lo mismo una dispersión superior a 2.5 veces la real.
4. También para el proceso C-H5 se encuentra que las estimaciones del modelo dependen de los valores extremos del registro. Cuando predomina una sobrecarga en el registro las vidas obtenidas por simulación se aproximan más a las obtenidas experimentalmente que en el caso de registros con un gran número de picos con valores próximos al máximo.
5. En cuanto al efecto de la longitud del registro puede afirmarse que, al igual que sucede con los resultados experimentales, en las simulaciones las desviaciones se reducen enormemente. La influencia de los parámetros α y β es la misma en registros cortos que largos y el grado de aproximación conseguido tanto para vida media como dispersión es prácticamente el mismo.
6. No obstante, el modelo de simulación ciclo a ciclo propuesto por Newman es capaz de reproducir los efectos de secuencia, siendo capaz de reproducir la variabilidad como función de cada historia de carga individual. La variabilidad de los resultados sigue el mismo comportamiento en el sentido de que los registros que alcanzan mayor vida en ensayo son también los de mayor vida en simulación.
7. Los valores obtenidos por simulación para todos los procesos aleatorios de distintos anchos de banda considerados en este estudio y nivel de carga alto conducen a idénticas conclusiones. Valores pequeños de α conducen a mejores ajustes en relación a la variabilidad de la vida o dispersión pero con estimaciones muy conservadoras sobre la vida media, la consideración de parámetro α variable aumenta la vida media estimada pero con dispersiones muy alejadas de los valores experimentales. Puede afirmarse además que la influencia del ancho de banda del proceso en la precisión de las

estimaciones es pequeña, dado que el nivel de aproximación conseguido tanto en la estimación de la vida media como en la dispersión de los resultados es prácticamente el mismo para los distintos anchos de banda considerados.

8. Para el nivel bajo de carga se obtiene un grado de aproximación menor en la estimación de la vida media que en el caso del nivel alto de carga, encontrándose además que la vida media tiende a aumentar con el aumento del parámetro α al contrario de lo que sucede para el nivel alto. Un aumento del parámetro α si produce igualmente una disminución de las dispersiones, con valores en este caso siempre inferiores a los obtenidos en los ensayos.

Este primer análisis de las estimaciones obtenidas por simulación induce a pensar que la tensión de cierre que el modelo predice para el caso de cargas aleatorias es inferior a la tensión de cierre producida en la probeta durante el ensayo, que justificaría los resultados tan conservadores que se obtienen. El modelo determina la tensión de cierre suponiendo que ésta es solamente inducida por plasticidad, no obstante otros efectos como la bifurcación y deflexión de la grieta, rugosidad u óxido pueden influir en la tensión de cierre, influyendo apreciablemente en el efecto de secuencia para niveles bajos de ΔK . Con el fin de poder tener en cuenta la disminución de velocidad de crecimiento debido al efecto de esos otros mecanismos de cierre, y mejorar las estimaciones obtenidas, se plantea la modificación al ajuste de los parámetros de la ecuación de crecimiento que se detalla en 5.5. Se exponen a continuación las conclusiones sobre los resultados de simulación obtenidas los parámetros de la ecuación de crecimiento del ajuste modificado.

1. Las estimaciones del modelo mejoran sustancialmente, tanto las vidas medias como las dispersiones se acercan más a las obtenidas en los ensayos.

2. La influencia del parámetro α es la misma en los dos tipos de ajustes y para todos los anchos de banda. Un aumento del parámetro α conduce generalmente para el nivel alto de carga a vidas más cortas mientras que para el nivel bajo de carga sucede lo contrario. Para ambos niveles de carga y al igual que en el primer ajuste el aumento del parámetro α produce menores dispersiones.
3. La influencia del ancho de banda en las estimaciones obtenidas mediante el ajuste modificado propuesto sigue siendo pequeña. En todos los casos la relación vida estimada/experimental para cada historia particular de carga son similares.
4. Para el nivel alto de carga puede afirmarse que mediante la corrección de la tensión de cierre del modelo es posible estimar, con muy buena aproximación tanto la vida media como la dispersión de los resultados. Salvo para el proceso de banda más ancha, la mejor aproximación de los resultados resulta para $\alpha=1.73$, que correspondería según Irwin al estado de deformación plana, con relaciones entre vida media estimada y experimental entre 0.93 y 0.95 y relaciones entre desviación estándar estimada y experimental entre 0.78 y 0.96. Para el proceso A-H la mejor estimación corresponde a los valores obtenidos con $\alpha=1.5$, de los que resulta una relación vida media estimada/experimental de 0.99 y una relación desviación estándar estimada/experimental de 1.01.
5. Para el nivel bajo de carga el grado de aproximación a los resultados experimentales conseguido con la simulación es menor que en el caso del nivel alto. Al igual que en las estimaciones con el primer ajuste de los parámetros, el aumento de α produce vidas más largas con peores aproximaciones de la vida media de crecimiento, especialmente en el proceso de banda más ancha. Valores bajos de dicho parámetro que aproximan muy bien la vida media producen no obstante dispersiones muy alejadas de las obtenidas experimentalmente. La mejor aproximación corresponde en este caso a los resultados obtenidos para $\alpha=1.5$ con

relaciones vida media estimada/experimental que oscilan entre 1.16 y 1.01 y desviación estándar estimada/experimental entre 0.86 y 0.9.

6. En cuanto a la precisión de las estimaciones para otras longitudes de grieta los resultados parecen indicar que el modelo predice velocidades de crecimiento de grieta superiores a las obtenidas en los ensayos cuando la grieta es corta mientras que para grieta más larga sucede justamente lo contrario. Esto puede justificarse por el uso de un factor de constricción constante que no puede de esta forma representar la variación que se produce del estado de tensiones a medida que la grieta avanza.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Domínguez J., Zapatero J. and Pascual J., Effect of Load Histories on Scatter of Fatigue Crack Growth in Aluminum Alloy 2024-T351. *Engng. Fract. Mechs*, Vol. 50, pp.65-76, 1997.
- [2] Willemborg J. D., Engle R. M. and Wood H. A., A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept, AFFDL-TM-FBR-71-1, 1971.
- [3] Johnson W. S., Multi-Parameter Yield Zone Model for Predicting Spectrum Crack Growth, *Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading*, (Edited by J.B. Chang and C.M. Hudson) ASTM STP 748, pp. 85–102, 1981.
- [4] Chang J. B. and Hudson C. M. (Eds), *Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading*, ASTM STP 748, 1981.
- [5] Zhang S. J., Döker H., Nowak H., Schulte K. and Trautmann K. H., Exact Determination of ΔK_{eff} and Crack Propagation Prediction for Selected Loading Sequences, *Advances in Fatigue Life Predictive Techniques* (Edited by M.R. Mitchell and R.W. Landgraf), ASTM STP 1211, pp. 54-71, 1993.
- [6] Newman J. C., A Crack Closure Model for Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading, *Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading*, (Edited by J. B. Chang and C. M. Hudson) ASTM STP 748, pp. 53–84, 1981.
- [7] Newman J. C., *Advances in Fatigue Life Prediction Methodology for Metallic Materials, Theoretical Concepts and Numerical Analysis of Fatigue* (Edited by A.F. Blom and C.J. Beevers), pp. 301-325, 1992.

- [8] Newman J. C., Fatigue-Life Prediction Methodology Using a Crack-Closure Model, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 117, pp. 433-439, 1995.
- [9] Newman J. C., Fatigue-Life Prediction Methodology Using Small-Crack Theory, *International Journal of Fatigue*, Vol. 21, pp. 109-119, 1999.
- [10] Newman J. C., Crack Growth Under Variable Amplitude and Spectrum Loading in 2024-T3 Aluminum Alloys, *High Cycle Fatigue of Structural Materials*, Indianapolis, Indiana, September, 1997.
- [11] Newman J. C., An Assessment of the Small-Crack Effect for 2024-T3 Aluminum Alloy, *Small Fatigue Cracks*, Ritchie R.O. and Lankford J., Eds, pp. 427-452, 1986.
- [12] Newman J. C., Analyses of Fatigue Crack Growth and Closure Near Threshold Conditions for Large-Crack Behavior, NASA Tech. Memorandum 209133, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, 1999.
- [13] Newman J. C., Poe C. C. and Dawicke D. S., Proof Test and Fatigue Crack Growth Modeling on 2024-T3 Aluminum Alloy, *Fatigue 90*, pp. 2407-2416, 1990.
- [14] Newman J. C., FASTRAN II – A Fatigue Crack Growth Structural Analysis Program, NASA Tech. Memorandum 104159, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, 1992.
- [15] Lapetra C., Mayo J. and Domínguez J., The Randomness of Fatigue Crack Growth under Constant-amplitude Loads. *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, Vol. 17, pp. 589-600, 1996.
- [16] Taylor D., *Fatigue Tresholds*, Butterworth & Co. (Publishers) Ltd, 1989.

- [17] Virkler D. A., Hillberry B. M. and Goel P. K., The Statistical Nature of Fatigue Crack Propagation, Technical Report AFFDL-TR-78-43, Air Force Flight Dynamics Lab., Ohio, 1978.
- [18] Ostergaard D.F. and Hillberry B. M., Characterization of the Variability in Fatigue Crack Propagation Data. Probabilistic Fracture Mechanics and Fatigue Methods: Applications for Structural Design and Maintenance, ASTM STP 798, pp. 97-115, 1983.
- [19] Domínguez J. and Zapatero J., Effect of the Loading Spectrum and History Length on Fatigue Life Distribution under Random Loading, Engng. Fract. Mech., Vol. 42, No. 6, pp. 925-933, 1992.
- [20] Domínguez J., Zapatero J. and Bohorquez L., Effect of the Length of the Random Load History on the Fatigue Life Statistics, Fracture Behaviour and Design of Materials and Structures (edited by D. Firrao), pp. 1427-1434, 1990.
- [21] Zapatero J., Moreno B. and Domínguez J., On the Use of The Strip-Yield Model to Predict Fatigue Crack Growth under Irregular Loading, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol. 20, No 5, pp 759-770, 1997.
- [22] Domínguez J. and Zapatero J., Some Aspects of Fatigue Under Random Loading. Theoretical Concept an Numerical Analysis of Fatigue, (Edited by Blom and Beevers), pp. 237-253, 1993.
- [23] Domínguez J., Zapatero J. and Pascual J., Effect of Load Histories on Scatter of Fatigue Crack Growth in Aluminum Alloy 2024-T351. Engng. Fract. Mechs. Vol. 50, pp.65-76, 1997.
- [24] Davidson D. L., Dexter R. J. and Hudak S. J., Measurement and Analysis of Critical Crack Tip Processes During Fatigue Crack Growth, NASA Tech. Report 172597, 1985.

- [25] Zhang S. J., Döker H., Nowak H., Schulte K. and Trautmann K. H., Exact Determination of ΔK_{eff} and Crack Propagation Prediction for Selected Loading Sequences, *Advances in Fatigue Life Predictive Techniques*, (Edited by M.R. Mitchell and R.W. Landgraf) ASTM STP 1211, pp. 54-71, 1993.
- [26] Elber W., The Significance of Fatigue Crack Closure, *Damage Tolerance in Aircraft Structures*, ASTM STP 486, pp 230-242, 1971.
- [27] Schijve J., Some Formulas for Crack Opening Stress Level, *Engng Fract. Mech.*, Vol. 14, pp. 461-465, 1981.
- [28] Moreno B., Zapatero J. y Pascual J., Determinación Experimental del Cierre de Grieta en Fatiga, *Anales de Mecánica de la Fractura*, Vol. 14, pp. 159-163, 1997.
- [29] Hudson C. M., Effect of Stress Ratio on Fatigue Crack Growth in 7075-T6 and 2024-T3 Aluminum Alloy Specimens, NASA TN D-5390, 1969.
- [30] Dubensky R.G., Fatigue Crack Propagation in 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum Alloys at High Stress, NASA CR-1732, 1971.
- [31] Phillips E. P., The Influence of Crack Closure on Fatigue Crack Growth Thresholds ins 2024-T3 Aluminum alloy, *Mechanics of Fatigue Crack Closure*, eds. J. C. Newman and W. Elber, ASTM STP 982, pp. 505-515, 1988.

Capítulo 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La principal aportación de esta tesis la constituyen el conjunto de datos experimentales obtenidos sobre el crecimiento de grietas bajo cargas de amplitud variable. Estos resultados permiten realizar un análisis, como el expuesto en el capítulo precedente, sobre la bondad de los métodos de simulación de uso tan extendido. Así mismo, se hace paso obligado el análisis de dichos resultados con el fin de determinar la influencia de distintos factores sobre el propio proceso de crecimiento.

En primer lugar se estudia la influencia que sobre la variabilidad de la vida tiene la propia variabilidad de las propiedades del material. La naturaleza aleatoria de las propiedades del material es patente, tanto al utilizar distintas probetas obtenidas en un mismo proceso de fabricación, como en la aleatoriedad del crecimiento dentro de una misma probeta al avanzar la grieta. Este diferente comportamiento hace que la vida de crecimiento de grieta de distintos elementos obtenidos de un mismo material y sometidos a cargas idénticas pueda dar valores significativamente diferentes.

Además de la variabilidad del material, implícita en la propia probeta, la variabilidad de las cargas es la principal incertidumbre que afecta al proceso. En concreto, con relación a los procesos de carga, se analiza en primer lugar el efecto que produce sobre la dispersión de la vida de crecimiento el utilizar distintos registros de carga de un mismo proceso aleatorio. Por otra parte se analiza la influencia del propio tipo de proceso de carga caracterizado por el ancho de banda y nivel de carga empleado.

Por último se ha considerado el efecto de la longitud del registro o número de ciclos incluidos en los registros representativos del proceso; efecto que se analiza asociado con la posible influencia de los valores extremos de carga producidos en cada registro.

Para completar el análisis, otro aspecto considerado ha sido el estudio de la distribución estadística de vida producida en cada serie de ensayos. Para ello, se ha ajustado a las vidas de crecimiento obtenidas en los ensayos distintas funciones de distribución y analizado la bondad de los ajustes.

6.1. VARIABILIDAD DEBIDA AL PROPIO MATERIAL.

Como ya se ha comentado es objetivo de este trabajo estudiar el efecto sobre el crecimiento de grietas con cargas aleatorias del uso de distintos registros, así como el efecto de su longitud, del nivel de tensión de las cargas y del ancho de banda que caracteriza al tipo de proceso. No obstante, el efecto inherente de la variabilidad de las propiedades del material y otras variables asociadas al ensayo siempre estarán presentes. La influencia o posibles diferencias debidas al mecanizado, acabado superficial y diferencias en la geometría (tolerancias de fabricación) entre dos probetas, así como las debidas a la preparación y condiciones ambientales entre dos ensayos distintos, si bien no pueden evitarse, se consideran minimizadas con el control seguido en la medición y preparación de probetas y el gran cuidado en las condiciones de realización de cada ensayo. De esta forma, se ha intentado que los principales factores de influencia en el crecimiento de la grieta sean los derivados de las diferencias propias del material y del uso de distintos registros de carga de un mismo proceso, donde la diferencia fundamental es la debida a la secuencia de las propias cargas, dado que la estadística de los registros de cada serie apenas varía.

La variabilidad de resultados obtenidos debida al diferente comportamiento del material queda reflejada en la figura 6.1 donde se representan las vidas de crecimiento correspondientes a las series de ensayos C-H5* y C-H25*. En cada una de estas series todos los ensayos se realizaron con idéntico registro de carga, en el primer caso de longitud 5000 ciclos y 25000 ciclos en el segundo. Ambos registros representativos del mismo proceso, tipo C ($\epsilon=0.77$) para el nivel de carga alto, pueden considerarse estadísticamente idénticos como demuestran los parámetros de la tabla 6.1, en ella figuran media, desviación estándar y valor máximo de picos junto a media y desviación estándar de rangos.

Tabla 6.1: *Parámetros estadísticos de los registros C-H5-1 y C-H25-1.*

	μ_P (N)	σ_P (N)	P_{MAX} (N)	μ_R (N)	σ_R (N)
C-H5-1	5897	874	9437	2076	1240
C-H25-1	5896	875	9492	2081	1234

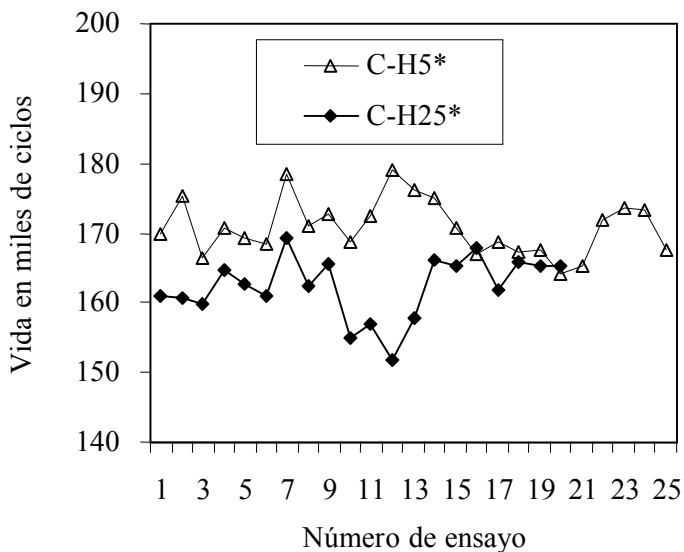


Figura 6.1: *Resultados de vida para las series de ensayos C-H5* y C-H25**

En la Tabla 6.2 se recogen los valores de vida media (μ_N) y coeficiente de variación (σ_N/μ_N) en los dos grupos de ensayos comparados con los obtenidos por otros autores en otros ensayos diferentes. Los resultados de la columna AC1 corresponden al conjunto de 18 ensayos realizados con carga de amplitud constante, empleando probetas idénticas a las de las series C-H5* y C-H25* y obtenidas de la misma placa [1]. Los valores representados en esa columna muestran los resultados obtenidos al crecer la grieta desde $a_0=17.5$ mm hasta $a_f=27.8$ mm con cargas de amplitud constante variando entre 882 y 4410.

La columna AC2 muestra los resultados obtenidos por Virkler [2]] con la aleación de aluminio 2024-T3 en probetas con grieta central, al crecer una grieta desde $a_0=9$ mm hasta $a_f=19.3$ mm.

Tabla 6.2: Comparación entre los valores de vida media y coeficiente de variación en ensayos de amplitud constante y variable.

	AC1 [1]	AC2 [2]	C-H5*	C-H25*
μ_N (ciclos)	56985	159464	170792	162301
σ_N/μ_N	0.04015	0.0759	0.0227	0.0268

Puede observarse que las vidas medias de los ensayos de amplitud variable y de Virkler son similares variando entre 159464 y 170792 ciclos, puesto que la comparación se realiza para incrementos de longitud de la grieta $\Delta a=10.3$ mm en todos los casos, la velocidad media de crecimiento de grieta en estos ensayos es prácticamente la misma. En el caso de AC1 la vida media para $\Delta a=10.3$ mm es de 56985 ciclos, del orden de un tercio que en los demás casos, por lo que la velocidad de crecimiento media en estos ensayos es del orden del triple que en los demás. Considerando la diferencia de velocidad de crecimiento es de esperar que a mayor velocidad menor dispersión, como sucede comparando los resultados de los ensayos AC2 con AC1, debido a que las altas cargas producen mayores zonas plásticas en el frente de grieta, disminuyendo el efecto de las heterogeneidades del material. La disminución del coeficiente de variación y por tanto de la dispersión con cargas aleatorias, en los ensayos C-H5* y C-H25* en comparación con AC1 y AC2, es de suponer que es debida por tanto a la utilización de este tipo de cargas. Comportamientos similares han sido observados por Schijve [3], quien asume que en cargas de amplitud variable la existencia de sobrecargas esporádicas puede eliminar el efecto de los pequeños

ciclos de carga, al mismo tiempo que la plasticidad local inducida por las sobrecargas tiende a suavizar las inhomogeneidades del material.

La menor dispersión obtenida en los ensayos con cargas de amplitud constante AC1, y los obtenidos con el mismo tipo de carga y material por Virkler (AC2) pueden deberse también en parte a la influencia o efecto del espesor de la probeta. Entre ambos ensayos existen dos diferencias fundamentales que son el tipo de probeta y el espesor de la misma: CT de 12 mm de espesor en la serie AC1 frente a grieta central en probetas CCT de 2.54 mm de espesor en la serie de ensayos AC2 de Virkler. Los resultados obtenidos por Yoon y Yang [4], con el mismo material y utilizando probetas CT pero con distintos espesores de probeta, muestran una gran variación en la dispersión de la vida en función del espesor de la probeta. Según estos resultados, a medida que aumenta el espesor la dispersión disminuye, al pasar de 3 mm a 12 mm la dispersión disminuye por un factor de dos, entre los resultados de Virkler y los de la serie AC1 hay una disminución de la dispersión de 1.89 veces. Esta diferencia de comportamiento puede ser debida al diferente número de granos implicados en el avance de la grieta, como consecuencia de la variación de espesor. A mayor número de granos implicados en el avance de grieta, las heterogeneidades de la microestructura del material son un menor porcentaje sobre el frente de la grieta, teniendo menos influencia sobre el crecimiento. Así mismo, el efecto de la orientación cristalográfica de los planos de deslizamiento se verá disminuido al existir más granos en la sección transversal, como consecuencia la diferencia de velocidad de crecimiento entre probetas será más pequeña.

6.2. VARIABILIDAD DEBIDA AL REGISTRO DE CARGA.

Para distinguir el efecto producido por la aleatoriedad de la respuesta del material del generado por la diferencia entre los registros empleados se comparan los dos conjuntos de ensayos C-H5* y C-H25* con los otros C-H5 y C-H25. Los primeros cuya principal variable son las propiedades del material, ya que se realizaron empleando siempre un mismo registro, y los segundos a los que se añaden la influencia del registro de carga empleado, ya que se realizaron con distintos registros si bien todos ellos representativos del mismo proceso. La siguiente tabla muestra tanto las características de cada serie de ensayos como los valores de vida media (μ_N), desviación estándar (σ_N) y coeficiente de variación (σ_N/μ_N) obtenidos.

Tabla 6.3: Características y resultados experimentales obtenidos para las series de ensayos C-H5*, C-H25*, C-H5 y C-H25.

Proceso	Tipo C $\varepsilon = 0.77$			
	Alto $\mu_c = 4851 \text{ N}$		$\sigma_c = 1080 \text{ N}$	
Nivel de carga	Idéntico registro		Distinto registro	
Tipo de registro	Idéntico registro		Distinto registro	
Serie	C-H5*	C-H25*	C-H5	C-H25
Longitud de registro	5000	25000	5000	25000
Número de ensayos	25	20	30	20
μ_N (ciclos)	170792	162301	169978	168287
σ_N (ciclos)	3874	4347	15272	5124
σ_N/μ_N	0.0227	0.0268	0.0898	0.0304

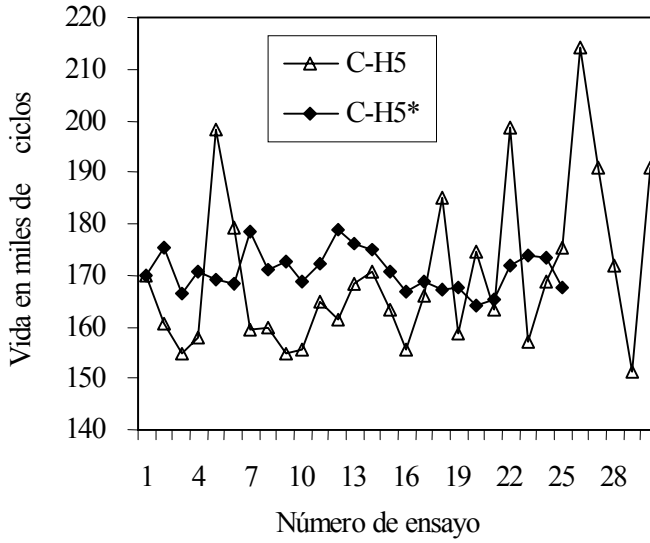


Figura 6.2: Resultados de vida para las series de ensayos C-H5 y C-H5*

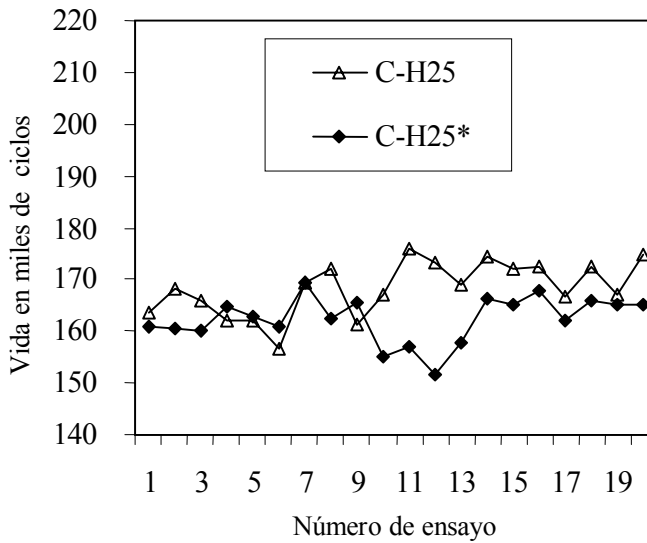


Figura 6.3: Resultados de vida para las series de ensayos C-H25 y C-H25*

Analizando los efectos de distintos factores sobre los resultados anteriores, puede decirse en las series de ensayos C-H5* y C-H25*, las dispersiones son producidas por variaciones en el material, en la geometría de las probetas, y condiciones de ensayo. En las series C-H5 y C-H25 además existe otra fuente de variación que es el registro de cargas. Para poder determinar el efecto de ésta sobre la vida de crecimiento de la grieta, que en el siguiente desarrollo denominaremos N , sería necesario conocer el efecto de cada variable sobre la dispersión. Teniendo en cuenta que se ha cuidado especialmente la fabricación de las probetas y las condiciones de ensayo, prácticamente se podría considerar que el material y el registro son las únicas variables aleatorias que influyen en la dispersión de los resultados, que dadas las características de éstas, se pueden considerar estadísticamente independientes.

Para estimar la influencia de uno y otro factor en la variabilidad de la vida de crecimiento, N , se puede emplear un modelo sencillo basado en la aplicación de la ley de Paris y modelos simples representativos de la aleatoriedad del crecimiento. Considerando la aleatoriedad del material solamente como la aleatoriedad del parámetro C en la ley de Paris, utilizando el modelo de aleatorización de la ley de crecimiento de grieta propuesto por Sobczyk [5] y considerando solamente la aleatoriedad del material y las cargas, se puede escribir:

$$\frac{da}{dN_{CS}} = \hat{C} (F(a))^m (\Delta \hat{S})^m \quad (6.1)$$

donde \hat{C} y $\Delta \hat{S}$ son dos variables aleatorias representativas del material y del registro de cargas respectivamente. La variable $\Delta \hat{S}$ puede interpretarse como el valor del rango de tensiones que aplicado con amplitud constante produce una vida igual a la del registro variable correspondiente. Puede ser considerado como un rango de tensión equivalente que será diferente para cada historia de carga. N_{CS} representa la vida considerando aleatoria la carga y el material.

Integrando la ecuación anterior para determinar los ciclos de crecimiento se obtiene:

$$N_{CS} = \frac{I}{\hat{C} (\Delta \hat{S})^m} \int_{a_o}^{a_f} \frac{da}{(F(a))^m} \quad (6.2)$$

tomando logaritmos:

$$\log N_{CS} = -\log \hat{C} - m \log \Delta \hat{S} + \log \int_{a_o}^{a_f} \frac{da}{(F(a))^m} \quad (6.3)$$

Aplicando la misma historia de carga variable en todos los ensayos la aleatoriedad del material puede considerarse independientemente. Así considerando solamente la aleatoriedad del material, la vida N_C puede expresarse:

$$\log N_C = -\log \hat{C} - m \log \Delta S + \log \int_{a_o}^{a_f} \frac{da}{(F(a))^m} \quad (6.4)$$

donde ΔS representa un rango de tensión equivalente, tal que con amplitud constante produciría una vida igual a la media del conjunto de ensayos.

Si se llevase a cabo la realización de un conjunto de ensayos con diferentes historias de carga, pero idénticas características del material, esto es, asumiendo que no tiene efecto la respuesta del material, la vida N_S podría expresarse como:

$$\log N_S = -\log C^* - m \log \Delta \hat{S} + \log \int_{a_o}^{a_f} \frac{da}{(F(a))^m} \quad (6.5)$$

donde C^* representa el valor de C que produciría en el conjunto de ensayos una vida igual a la media de las obtenidas en estos.

De las expresiones 6.3, 6.4 y 6.5 puede obtenerse:

$$\log N_{CS} = \log N_C + \log N_S + \log C^* + m \log \Delta S - \log \int_{a_o}^{a_f} \frac{da}{(F(a))^m} \quad (6.6)$$

donde únicamente N_{CS} , N_C y N_S son variables aleatorias.

Considerando que $\log N_C$ y $\log N_S$ son independientes, la varianza del $\log N_{CS}$ será:

$$Var [\log N_{CS}] = Var [\log N_C] + Var [\log N_S] \quad (6.7)$$

Las varianzas de $\log N_C$ se pueden obtener de los conjuntos de ensayos C-H5* y C-H25* mientras que las varianzas de $\log N_{CS}$ se pueden obtener de los grupos C-H5 y C-H25. Con estos valores y la anterior expresión se puede estimar $Var [\log N_S]$, estos resultados se muestran en la tabla 6.4.

Tabla 6.4: *Varianzas de $\log(N)$ para las series de ensayos C-H5*, C-H25*, C-H5 y C-H25.*

	C-H5* y C-H5	C-H25* y C-H25
$Var [\log N_{CS}]$	1.57×10^{-3}	1.78×10^{-4}
$Var [\log N_C]$	1.08×10^{-4}	1.38×10^{-4}
$Var [\log N_S]$	1.46×10^{-3}	4.0×10^{-5}

Los resultados indican, en el caso de los ensayos realizados, una influencia del registro de cargas sobre la dispersión de la vida muy superior al efecto producido por el material cuando la longitud de los registros es pequeña. En los ensayos realizados con registros de 5000 ciclos, la desviación típica del logaritmo de la vida considerando solamente el registro de carga ($\log N_S$) es 3.68 veces la estimada considerando únicamente el material ($\log N_C$). La gran dispersión debida al registro de cargas, hace suponer que en el caso de utilizar registros con poco número de ciclos pueden aparecer diferencias importantes en los resultados al utilizar distintos registros, aún siendo todos representativos de un mismo proceso.

A medida que el número de ciclos del registro de cargas aumenta, los datos anteriores indican que la influencia de éste sobre la dispersión disminuye pasando a ser la influencia del material superior a la de la carga. La desviación estándar del logaritmo de la vida ($\log N_S$), cuando sólo se tiene en cuenta la historia de carga, es en este caso 0.54 veces que cuando solamente se tiene en consideración el material ($\log N_C$), cambiando completamente el efecto de la carga y material a cuando los registros son de 5000 ciclos. De la tabla 6.4 se puede observar que los valores de $Var [\log N_C]$ obtenidos con registros de 5000 y 25000 ciclos son similares, lo que parece indicar que la influencia del material se mantiene constante.

La conclusión obtenida de estos datos es que la influencia de ambos factores conjuntamente sobre la dispersión depende en gran medida de la longitud de los registros utilizados. El valor de $Var [\log N_{CS}]$ prácticamente disminuye un orden de magnitud al pasar de utilizar registros de 5000 ciclos a historias de carga de 25000 ciclos, teniendo en cuenta que el efecto del material prácticamente se mantiene, esta diferencia de dispersión es debida principalmente al número de ciclos del registro.

Estas significativas diferencias entre los resultados obtenidos con los registros de 5000 y 25000 ciclos pueden observarse directamente en la tabla 6.3. Aunque la vida media en todos los casos es muy similar, lo cual parece lógico al tratarse del mismo material, nivel de cargas y proceso, sin embargo no ocurre lo mismo con las dispersiones. En el caso de registros de 5000 ciclos la dispersión es casi cuatro veces superior utilizando distintos registros de carga que al utilizar siempre el mismo. En el caso de registros de 25000 ciclos sin embargo, si bien es cierto que la dispersión es mayor usando distintos registros que uno único, como es lógico por otra parte, la diferencia no supera el 20%. La diferencia entre ambos resultados habrá que buscarla en la influencia de la longitud del registro y el efecto artificial de secuencia que produce que se discutirá más adelante.

6.3 INFLUENCIA DEL ANCHO DE BANDA DEL PROCESO

Para la caracterización estadística de la influencia del ancho de banda del proceso de carga se comparan los resultados experimentales obtenidos en un total de 140 ensayos. Dichos ensayos se agrupan en siete series distintas en función del tipo de proceso aleatorio y del nivel de carga aplicado. En la tabla 6.5 se resumen las características de cada una de las series.

Tabla 6.5: *Características de las series de ensayos.*

Serie	Tipo de proceso	Ancho de banda (ε)	Valor medio de carga	Nivel de carga	Longitud del registro (ciclos)	Nº de ensayos
A-H25	A	0.64				
B-H25	B	0.70	$\mu_c=4851$ N	$\sigma_c=1078$ N	25000	20
C-H25	C	0.77				
D-H25	D	0.85				
A-L25	A	0.64				
C-L25	C	0.77	$\mu_c=4851$ N	$\sigma_c=638$ N	25000	20
D-L25	D	0.85				

Para los cuatro procesos aleatorios considerados, caracterizados por diferentes formas de la función de densidad espectral de las cargas nominales, el ancho de banda del proceso se ha caracterizado en función del factor de irregularidad ε , definido como:

$$\varepsilon = \frac{M_2}{\sqrt{M_0 M_4}} \quad (6.8)$$

representando M_n el momento de orden n:

$$M_n = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega \quad (6.9)$$

Las figuras 6.4 y 6.5 muestran la vida de crecimiento de grieta para cada uno de los ensayos de las distintas series con el nivel alto y bajo de carga respectivamente. Los valores correspondientes a cada serie de ensayos se muestran unidos mediante líneas.

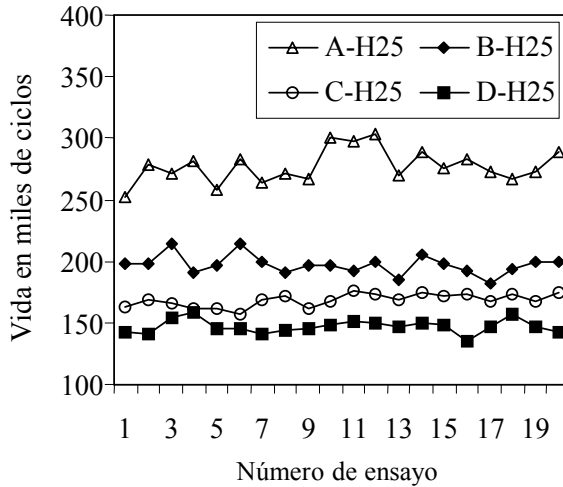


Figura 6.4: *Vidas de crecimiento de grieta para el nivel alto de carga.*

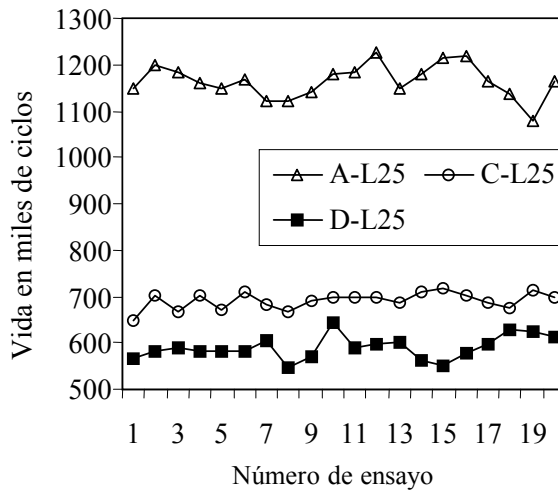


Figura 6.5: *Vidas de crecimiento de grieta para el nivel bajo de carga.*

Las figuras 6.4 y 6.5 muestran que el ancho de banda ejerce una gran influencia en relación a la vida media, incrementándose fuertemente la duración del proceso de crecimiento al aumentar el ancho de banda de los registros, con independencia del nivel de carga aplicado.

La justificación de este comportamiento está en que, aunque los registros para un mismo nivel de carga tienen la misma media y desviación estándar, al aumentar el ancho de banda del proceso los valores medios de picos y rangos disminuyen, disminuyendo por tanto la velocidad de crecimiento y dando vidas más largas. Este hecho puede comprobarse con los valores que se presentan en la tabla 6.6. En dicha tabla se muestran, para las siete series de ensayos, los valores de los siguientes parámetros estadísticos de los registros: factor de irregularidad del proceso (ε), valor medio de los picos de carga (μ_P) y valor medio de los rangos de carga (μ_R), junto a los resultados experimentales: vida media de crecimiento (μ_N), desviación estándar (σ_N) y coeficiente de variación (σ_N/μ_N).

Tabla 6.5: *Parámetros estadísticos de los registros y resultados experimentales de todas las series de ensayos.*

Series	A-H25	B-H25	C-H25	D-H25	A-L25	C-L25	D-L25
ε	0.64	0.70	0.77	0.85	0.64	0.77	0.85
$\mu_P^{(1)}$	5719	5808	5895	6007	5367	5471	5538
$\mu_R^{(1)}$	1725	1903	2077	2300	1022	1231	1363
$\mu_N^{(2)}$	277151	197114	168287	146981	1163986	690667	589569
$\sigma_N^{(2)}$	13377	7686	5124	5363	35447	17715	24525
σ_N/μ_N	0.0483	0.0390	0.0304	0.0365	0.0305	0.0256	0.0416

(1) valores expresados en Newtons.

(2) valores expresados en ciclos.

En trabajos realizados por Domínguez y Zapatero [6,7] con éstos y otros anchos de banda y con longitudes de las historias de carga desde 1000 hasta 100000 ciclos, estimando las vidas mediante simulación, se concluye que si bien la longitud del registro tiene poca influencia sobre las vidas medias, el ancho de banda del proceso si tiene una mayor influencia produciéndose igualmente un aumento del valor medio de vida al aumentar aquél.

Para determinar como varía la vida media en función del tipo de proceso dichos autores encuentran una sencilla relación entre el valor de vida media y el parámetro del proceso $\varepsilon_{1.5}$, donde

$$\varepsilon_n = \frac{M_n}{\sqrt{M_0 M_{2n}}} \tag{6.10}$$

representando M_n el momento de orden n definido en (6.9). Obsérvese que el factor de irregularidad, o parámetro ε , considerado hasta ahora para caracterizar el ancho de banda corresponde al parámetro ε_2 .

Mediante técnicas de ajuste de curvas se ha comprobado que la tendencia de la variación de la vida media con el ancho de banda puede aproximarse con bastante exactitud mediante la expresión:

$$\mu_{ij} \varepsilon_{1.5j}^2 = D_i \tag{6.11}$$

donde el subíndice j identifica el proceso y el subíndice i el nivel de carga, D_i es un valor constante para todos los procesos de idéntico nivel de carga, $\varepsilon_{1.5j}$ es el parámetro definido en (6.10) que caracteriza al proceso j , y μ_{ij} es el valor de vida media para el proceso j con nivel de carga i .

La relación (6.11) permite, estimando el valor del parámetro D_i a partir de los resultados experimentales de vida media para un determinado proceso y nivel de carga, estimar los valores de vida media que produciría cualquier otro proceso de idéntico nivel de carga. En las tablas 6.7 y 6.8 se comparan los

valores de vida media obtenidos usando la ecuación 6.11 con los resultados experimentales. Puede observarse que las estimaciones obtenidas para ambos niveles de carga son excelentes y conservativas con diferencias inferiores al 8%. La constante D se ha estimado a partir del valor experimental de vida media de la serie C-H25 para el nivel alto de carga y C-L25 para el nivel bajo, se ha considerado el proceso C por tener un parámetro ε o $\varepsilon_{1.5}$ intermedio en el rango considerado. El ajuste de este parámetro en base a los resultados de otro proceso distinto al C conducen igualmente a estimaciones con diferencias por debajo del 8% aunque en algún caso no conservadoras.

Tabla 6.7 : Comparación de los resultados experimentales con los estimados por la ecuación 6.11 para el nivel alto de carga.

SERIE	A-H25	B-H25	C-H25	D-H25
ε	0.64	0.7	0.77	0.85
$\varepsilon_{1.5}$	0.666	0.7736	0.826	0.8997
μ_N) experimental (1)	277151	197114	168287	146981
μ_N) estimada (1)	263586	191857	-	141845
$\frac{\mu_N$) estimada}{\mu_N) experimental	0.934	0.973	1	0.965

(1) valores expresados en ciclos.

La figura 6.6 representa la variación de la vida media con el parámetro $\varepsilon_{1.5}$ para los valores experimentales y como una línea continua los valores de vida media estimada según la ecuación 6.11, pudiendo apreciarse de esta forma el excelente acuerdo entre ambos valores.

Tabla 6.8 : Comparación de los resultados experimentales con los estimados por la ecuación 6.11 para el nivel bajo de carga.

SERIE	A-L25	C-L25	D-L25
ϵ	0.64	0.77	0.85
$\epsilon_{1.5}$	0.666	0.826	0.8997
μ_N) experimental ⁽¹⁾	1163986	690667	589569
μ_N) estimada ⁽¹⁾	1081785	-	582148
$\frac{\mu_N$) estimada}{\mu_N) experimental	0.929	1	0.987

(1) valores expresados en ciclos.

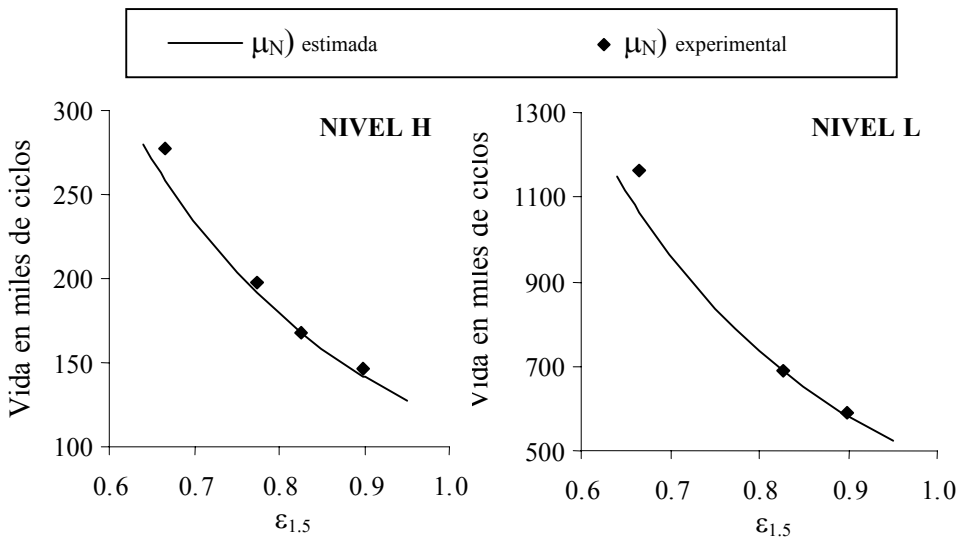


Figura 6.6: Resultados experimentales y estimados según la ecuación 6.11.

La dispersión de los resultados en cada serie de ensayos puede analizarse mediante la desviación estándar o bien mediante el coeficiente de variación. En la figura 6.7 se puede observar que el efecto del ancho de banda sobre dicho coeficiente es pequeño. El coeficiente de variación disminuye al hacerlo el ancho de banda del proceso, aumentando nuevamente para los procesos de banda más estrecha, tipo D. Este efecto es más acusado para el nivel de carga L, sin embargo, las diferencias para un mismo nivel de carga son pequeñas.

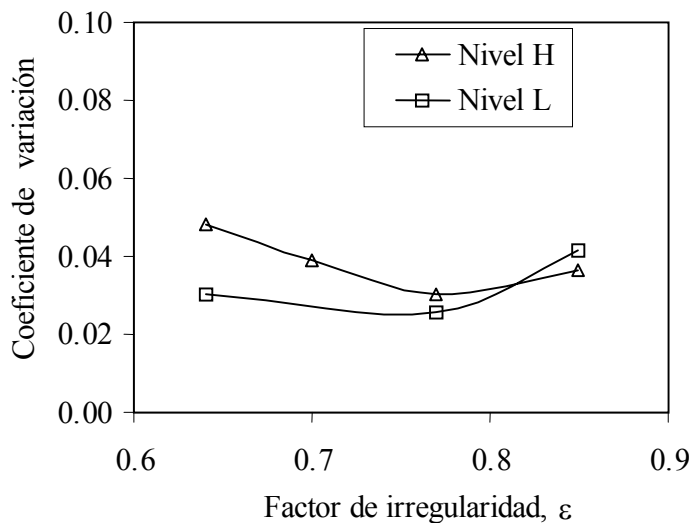


Figura 6.7: *Coeficiente de variación en función del ancho de banda del proceso.*

Los resultados obtenidos por Domínguez y Zapatero [7], estimando las vidas mediante simulación, muestran que la reducción del coeficiente de variación al reducir el ancho de banda del proceso es apreciable con registros de corta longitud y bastante menor en casos de registros de longitud suficientemente grande. Un resultado similar obtiene Newman mediante simulación con un modelo que tiene en cuenta las tensiones de cierre [8,9].

6.4 INFLUENCIA DE LA LONGITUD DEL REGISTRO Y LOS VALORES EXTREMOS DE CARGA EN CADA REGISTRO.

Como ya se ha comentado el uso de distintas longitudes de registro, o número de ciclos incluidos en los registros representativos que serán repetidos hasta el fallo de la probeta, afecta fundamentalmente a la dispersión de los resultados obtenidos. En la tabla 6.9 figuran los valores de vida media (μ_N) y desviación estándar (σ_N) de la vida de crecimiento para el proceso tipo C con nivel alto de carga usando registros de 5000, 25000 y 100000 ciclos.

Tabla 6.9: *Vida media, desviación estándar y coeficiente de correlación vida - carga máxima del registro en las series C-H5, C-H25 y C-H100.*

SERIE	C-H5	C-H25	C-H100
μ_N (ciclos)	169978	168287	169923
σ_N (ciclos)	15272	5124	3769
ρ_1	0.96	0.51	0.22

Como parece lógico, por tratarse del mismo material, nivel de cargas y proceso, y en concordancia con los resultados obtenidos por simulación por Domínguez y Zapatero, la vida media en todos los casos es muy similar. Sin embargo, las diferencias en cuanto a la dispersión de resultados si son significativamente importantes. En todos los casos, cualquiera que sea la longitud del registro empleado, las estadísticas en cuanto a valores medios, dispersiones o distribución tanto de rangos como de picos resultan prácticamente idénticas. Las posibles diferencias para cada registro habrá que buscarlas en los valores concretos, distribución y frecuencia de aparición de los valores más altos o extremos de carga, que hemos dado en llamar sobrecargas. Algunas de esas diferencias quedan reflejadas en la tabla 6.10 en la que figuran para las tres series de ensayos C-H5, C-H25 y C-H100 el valor promedio entre todos los registros del valor máximo de carga alcanzado en cada uno de ellos ($\mu_{P_{max}}$) y la desviación estándar de estos valores ($\sigma_{P_{max}}$), la media de picos (μ_P), la relación $\mu_{P_{max}}/\mu_P$ y el número medio de picos de valor superior a $1.5\mu_P$. Se

puede observar que los valores extremos más altos se alcanzan en los registros de 100000 ciclos, lo cual es lógico, puesto que estadísticamente es más probable que aparezca un pico muy alto cuando se generan registros largos que cortos. Obviamente la dispersión de los valores extremos o picos máximos alcanzados en cada registro es bastante superior en la serie C-H5 que en las otras dos, cuyos valores de desviación estándar además coinciden. Esto es debido a que se han realizado un total de 30 ensayos, y generado pues otros tantos registros, para la serie C-H5 frente a los 20 realizados en el caso de las series C-H25 y C-H100.

Por otra parte, si consideramos que actuarán como sobrecargas aquellos picos cuyo valor supere 1.5 veces el valor medio de los picos (μ_P), el número de sobrecargas que actuarían a lo largo de la vida de la probeta es similar con independencia de la longitud del registro. Obsérvese que para registros de 25000 ciclos el número de picos mayores a $1.5\mu_P$ es aproximadamente 5 veces el correspondiente a registros de 5000 ciclos y en 100000 ciclos aproximadamente 4 veces el correspondiente a registros de 25000 ciclos.

Tabla 6.10: *Valor medio de las cargas máximas ($\mu_{P_{max}}$), desviación estándar de las cargas máximas ($\sigma_{P_{max}}$), media de picos (μ_P), relación $\mu_{P_{max}}/\mu_P$ y número medio de picos de valor superior a $1.5\mu_P$.*

SERIE	C-H5	C-H25	C-H100
$\mu_{P_{max}}$ (N)	9359	9584	9983
$\sigma_{P_{max}}$ (N)	397	248	247
μ_P (N)	5894	5895	5895
$\mu_{P_{max}}/\mu_P$	1.588	1.626	1.694
nº picos $> 1.5\mu_P$	3	16	70

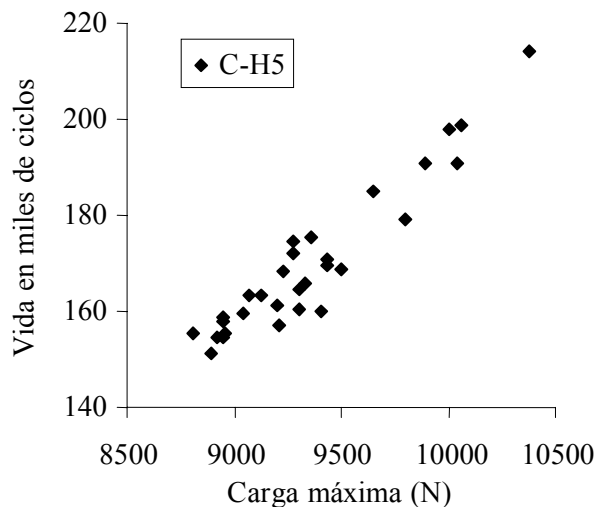
Es sabido que el efecto de las sobrecargas es producir una deceleración en el crecimiento con los ciclos posteriores a la sobrecarga, con el consiguiente aumento de la vida. Altos niveles de carga posteriores a la sobrecarga eliminan el efecto creado por la misma. En cargas de variación irregular cabe esperar que los efectos sean pequeños, ya que serán eliminados por sobrecargas posteriores que puedan aparecer después de un pequeño número de ciclos de haberse producido la sobrecarga anterior. Este efecto está muy influenciado por la longitud del registro como demuestran los datos de la tabla 6.10.

Para determinar la influencia de las cargas más altas del registro sobre la vida de crecimiento se ha determinado en primer lugar el coeficiente de correlación entre el valor extremo de carga, es decir, el pico máximo de cada registro y la vida obtenida en los ensayos (ρ_1). Dichos valores se recogen también en la tabla 6.9.

Para la serie de ensayos C-H5 el coeficiente de correlación encontrado entre valor extremo y vida es muy alto, $\rho=0.95$. Por una parte, esto significa que en este caso la vida de crecimiento y la distribución de dichos valores va a venir determinada por los valores y distribución de los valores extremos de los registros empleados. La figura 6.8 pone en evidencia este mismo hecho. La gran dispersión de los valores extremos justifica en parte porqué se produce una gran dispersión de vidas en la serie C-H5. Por otra parte, este resultado evidencia la existencia de fuertes efectos de retardo producidos por dichos valores extremos. La longitud de los registros en esta serie de ensayos es de 5000 ciclos, esto significa que las sobrecargas son repetidas cada 5000 ciclos durante todo el ensayo. Para el tipo de espectro de cargas, nivel de tensiones y longitudes de grieta de esta serie, el incremento medio de longitud cada 5000 ciclos es del orden del 20 % del tamaño de la zona plástica en tensión plana producida por el valor extremo de cada registro. Considerando el valor extremo como una sobrecarga, el número de ciclos de cada registro con valores iguales o superiores al 90% de la sobrecarga es muy bajo. En el caso de los registros con los valores extremos más altos, dicho número llega a ser inferior a cuatro. Lo anterior significa que muy pocos picos de cada registro son los responsables del

efecto secuencia, disminuyendo el número de éstos a medida que aumenta el valor extremo. Esto implica mayor efecto de retardo por combinación de dos factores: mayor sobrecarga y menor número de picos posteriores suficientemente altos para eliminar el retardo producido.

Figura 6.8: *Carga máxima frente a vida para la serie C-H5*



Con lo expuesto anteriormente cabría pues esperar que esta fuerte correlación entre el valor extremo y la vida sea menor a medida que se incrementa el número de ciclos de los registros empleados. En efecto, así sucede como puede comprobarse de los resultados que figuran en la tabla 6.9, al aumentar la longitud del registro la correlación pasa de 0.96 para los registros de 5000 ciclos a 0.51 en el caso de registros de 25000 ciclos y a 0.22 con registros de 100000 ciclos. Esto significa que la influencia del valor extremo de cada registro disminuye al aumentar la longitud de los mismos siendo prácticamente nula para los registros de 100000 ciclos.

Por otra parte, puesto que los valores de vida media son muy similares, es lógico pensar que en los registros de mayor longitud también habrá efectos de retardo, pero que en el proceso de crecimiento influirá no solamente el valor extremo del registro sino también los picos más altos alcanzados en el mismo. Para comprobarlo se ha obtenido el coeficiente de correlación ρ_n entre la vida a fatiga y la media de los n picos más altos de un registro, dichos datos quedan reflejados en la tabla 6.11. Para el proceso C-H5 se encuentra que la máxima correlación corresponde al valor de $n=1$, mientras que para los procesos C-H25 y C-H100 el coeficiente ρ_n aumenta al aumentar n , produciéndose el valor máximo para $n=2$ y $n=5$ respectivamente. Dichos valores de correlación máxima siguen siendo decrecientes a medida que aumenta el número de ciclos del registro, demostrando que la influencia de los picos más altos es menor en registros largos. En la figura 6.9 puede observarse como el mayor efecto de retardo que se produce con registros cortos conduce a que las vidas más altas coincidan con los valores extremos más altos, cosa que no sucede en el caso de registros de 25000 o 100000 ciclos.

Tabla 6.11: *Coeficiente de correlación entre la vida de crecimiento y la media de los n picos más altos para las series C-H5, C-H25 y C-H100.*

n	1	2	3	4	5	6	7	8
C-H5	0.95	0.94	0.92	0.88	0.84	0.82	0.79	0.77
C-H25	0.51	0.58	0.58	0.57	0.55	0.52	0.49	0.46
C-H100	0.22	0.30	0.34	0.33	0.35	0.35	0.34	0.33

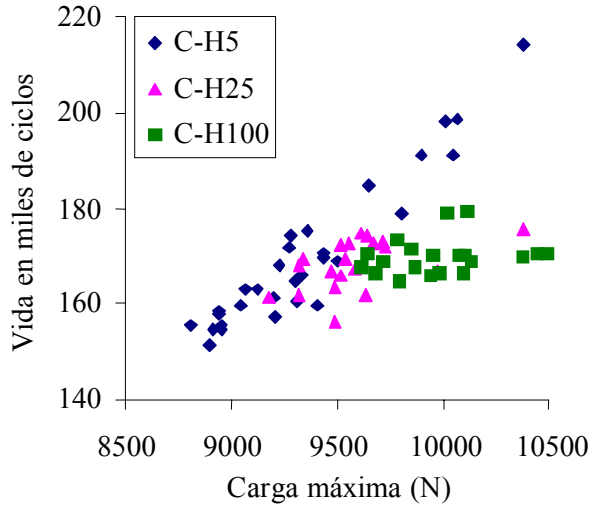


Figura 6.9: Carga máxima frente a vida para las series C-H5, 25 y 100.

Para comparar los datos correspondientes a las series C-H5 y C-H100 resulta útil linealizar entre 0 y 1 los valores tanto de carga máxima como de vida, con un cambio de variable lineal. De esta manera se ha obtenido la representación de la figura 6.10 que pone claramente de manifiesto una mayor correlación vida-carga máxima en el caso de registros cortos.

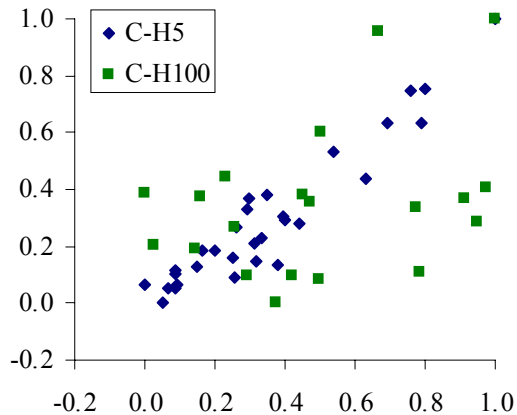


Figura 6.10: Carga máxima frente a vida para las series C-H5 y 100 linealizadas ambas variables entre 0 y 1.

Los efectos de retardo no se observan fácilmente en las curvas a-n, sin embargo, es posible identificarlos si se obtienen las variaciones en velocidad de crecimiento, da/dN , frente al número de ciclos a lo largo de la vida de la probeta. Puesto que no se dispone de las curvas a-n de la serie de ensayos realizados con registros de 5000 ciclos no se puede obtener dicha relación pero si las correspondientes a las series de ensayos de 25000 y 100000 ciclos, C-H25 y C-H100 respectivamente. Para obtener las velocidades de crecimiento se ha optado por calcularlas según se recomienda en la norma ASTM E647 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, para ello se ajusta una parábola a un conjunto de $(2n+1)$ puntos sucesivos en la curva a-n y se calcula la velocidad de crecimiento a partir de la derivada de dicha parábola. En este caso se usó $n=3$. Este es el procedimiento aplicado a las curvas a-n, una vez filtradas digitalmente y tomando el valor de longitud de grieta cada 1500 ciclos para la obtención de las curvas que se muestran a continuación.

En la figura 6.11 se representa como varía la velocidad de crecimiento frente al número de ciclos en los ensayos realizados con los registros C-H25_11 y C-H25_9, que corresponden a los registros de mayor y menor carga máxima respectivamente. En dicha figura puede observarse el retardo producido cada 25000 ciclos con el registro 11 y cómo este efecto no aparece en el caso del registro 9. Para justificar este comportamiento basta analizar los datos de estos registros que figuran en la tabla 6.12. Obsérvese que en el registro 11 no existe ninguna carga de valor superior al 95% de la carga máxima y sólo 1 por encima del 90%, el efecto de retardo está aquí potenciado por la mayor sobrecarga y el que no existan picos posteriores suficientemente altos para eliminar el retardo producido. En el registro 9 al hecho de tener un valor extremo mucho menor se une el que muchos picos tienen valores próximos al máximo capaces pues de eliminar su efecto, no siendo apreciables efectos de secuencia en este caso. En la figura 6.11 también se pone de manifiesto que cuando hay efectos de retardo la velocidad de crecimiento son siempre inferior al caso en que dicho efecto no existe, conduciendo a vidas más largas. En este caso el registro 11 es el que produce la vida más larga y el 9 la segunda vida más corta.

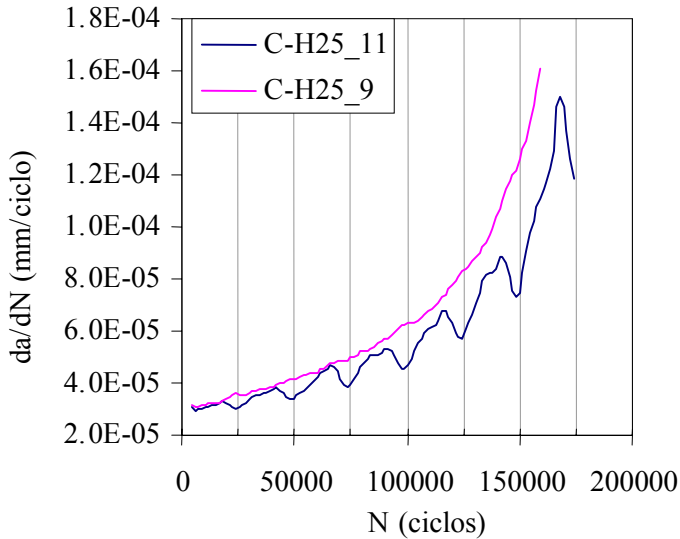


Figura 6.11: Velocidades de crecimiento de grieta en los ensayos realizados con los registros C-H25_9 y C-H25_11.

Tabla 6.12: Estadísticas de los registros número 9 y 11 de la serie C-H25.

REGISTRO	C-H25_9	C-H25_11
P_{\max} (N)	9182	10374
μ_p (N)	5895	5892
P_{\max} / μ_p	1.56	1.76
n° picos $> 0.95 P_{\max}$	23	0
n° picos $> 0.9 P_{\max}$	109	1
n° picos $> 1.5\mu_p$	14	14

En el caso de registros más largos, serie C-H100, también puede observarse lo descrito anteriormente. Los efectos de retardo son fácilmente detectables en registros donde el valor extremo es más alto y donde existen además pocos picos capaces de eliminar dicho efecto. Es lo que sucede en el

caso por ejemplo de los registros número 2 ó 11. Sin embargo, dicho retardo se produce una o a lo sumo dos veces en la vida de la probeta a diferencia de lo que sucede en la serie C-H25 donde la repetición del registro produce la repetición del retardo cada 25000 ciclos. En la figura 6.12 se muestra la variación de la velocidad de crecimiento en los ensayos C-H25_11 y C-H100_11. Ambos registros tienen idéntico valor extremo porque de hecho los 25000 primeros ciclos del registro C-H100_11, en los cuales se alcanza el valor máximo, coinciden con el registro C-H25_11. Puede observarse como el efecto de secuencia producido por la repetición del registro, que produce la repetición del retardo conduce a unas velocidades de crecimiento más bajas y por tanto a una vida más larga con el registro de 25000 ciclos que con el de 100000.

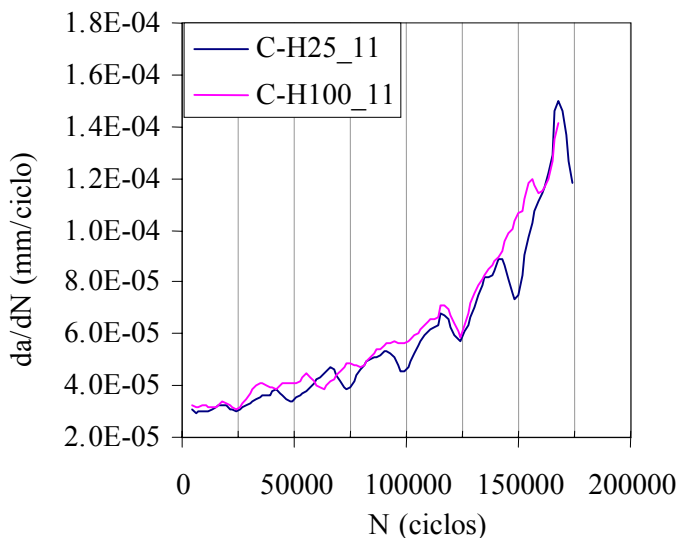


Figura 6.12: *Velocidades de crecimiento de grieta en los ensayos realizados con los registros C-H25_11 y C-H100_11.*

Con el uso de registros largos se elimina el efecto secuencia, esto conduce a que las vidas más largas se dan con registros que tienen sobrecargas suficientemente altas como para producir retardo, pero en un número y frecuencia de aparición tales que no interaccionan entre ellas, es decir, sin eliminar unas el efecto que producen otras. Esto es lo que sucede con el registro 17 que corresponde a la vida más larga. Las vidas más cortas, por el contrario, se dan con registros de valores extremos bajos y muchos picos de valores próximos a dicho extremo. De esta forma por un lado los posibles retardos son menores por serlo las sobrecargas y además su efecto será en parte anulado por cargas posteriores de similar valor. Este es el caso de los registros 3 y 13, que corresponden respectivamente al registro de menor valor extremo y al que produce la vida más corta respectivamente. En la figura 6.13 se representa la variación de la velocidad de crecimiento para los registros 2 y 3 que corresponden al de mayor y menor valor extremo respectivamente, y puede verse como ambos conducen a vidas muy similares. En la figura 6.14 se representa la variación de la velocidad de crecimiento para los registros 17 y 13 que corresponden al de mayor y menor vida respectivamente. En la tabla 6.13 se recogen las características de todos estos registros.

Tabla 6.13: *Estadísticas de los registros número 2, 3, 11, 13 y 17 de la serie C-H100.*

REGISTRO	P_{\max} (N)	μ_p (N)	P_{\max} / μ_p	nº picos >0.95 P_{\max}	nº picos >0.9 P_{\max}	nº picos >1.5 μ_p	vida (ciclos)
C-H100_2	10488	5894	1.78	1	2	67	170383
C-H100_3	9609	5892	1.63	23	134	64	167646
C-H100_11	10374	5895	1.76	1	7	68	169773
C-H100_13	9792	5892	1.66	8	79	77	164803
C-H100_17	10109	5894	1.72	5	28	71	179527

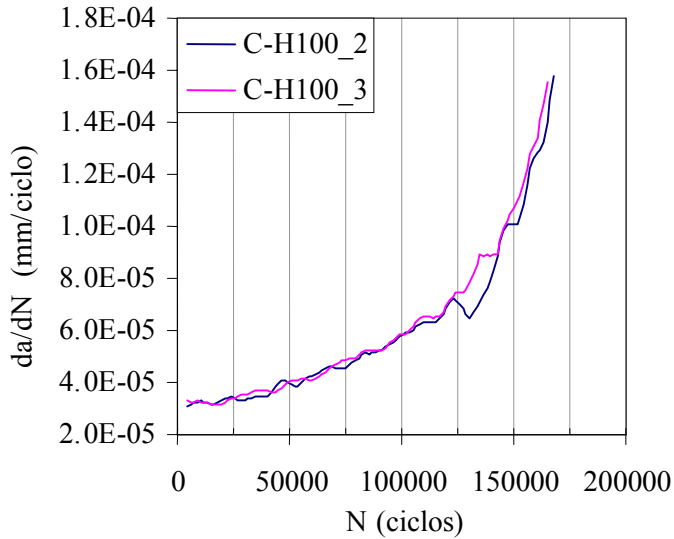


Figura 6.13: Velocidades de crecimiento de grieta en los ensayos realizados con los registros C-H100_2 y C-H100_3.

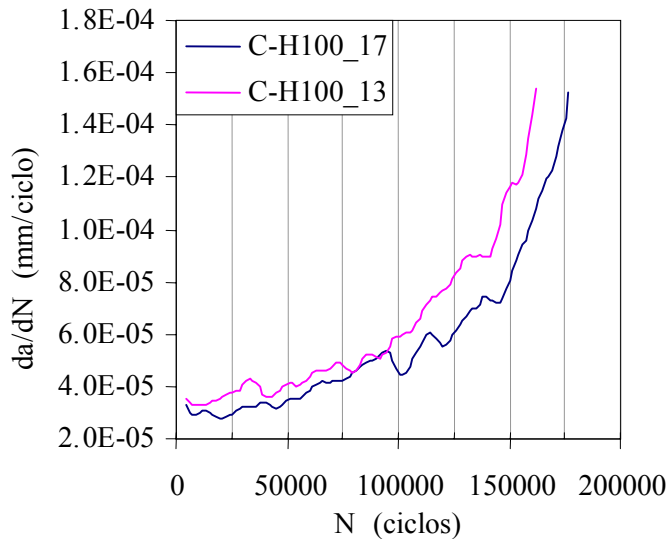


Figura 6.14: Velocidades de crecimiento de grieta en los ensayos realizados con los registros C-H100_17 y C-H100_13.

Para estudiar la influencia de las sobrecargas en procesos de distinto ancho de banda se ha realizado un análisis similar para el resto de procesos y los dos niveles de carga considerados. La tabla 6.14 es análoga a la 6.10, en este caso para los cuatro procesos de distinto ancho de banda y nivel de carga alto. En dichos datos se observa que para los procesos de banda ancha (tipo A) la relación entre el valor medio de las cargas máximas o extremos y la media de picos ($\mu_{P_{max}}/\mu_P$) es mayor que en el caso de procesos de banda estrecha (tipo C). Cabe esperar que a medida que esta relación sea mayor, mayor será el efecto del valor extremo sobre el crecimiento, y por tanto el coeficiente de correlación entre dicho valor y la vida de crecimiento, para registros de la misma longitud. Sin embargo el número de picos de valor superior a $1.5\mu_P$ es mayor en el caso de banda ancha que estrecha, esto puede suponer una mayor posibilidad de eliminación de los efectos de retardo por la interacción entre las sobrecargas valores similares.

Tabla 6.14: Valor medio de las cargas máximas ($\mu_{P_{max}}$), desviación estándar de las cargas máximas ($\sigma_{P_{max}}$), media de picos (μ_P), relación $\mu_{P_{max}}/\mu_P$ y número medio de picos de valor superior a $1.5\mu_P$.

SERIE	A-H25	B-H25	C-H25	D-H25
$\mu_{P_{max}}$ (N)	9573	9704	9584	9696
$\sigma_{P_{max}}$ (N)	279	286	248	226
μ_P (N)	5719	5808	5895	6007
$\mu_{P_{max}}/\mu_P$	1.674	1.672	1.626	1.615
nº picos $> 1.5\mu_P$	35	26	16	10

También en estos procesos, para analizar la influencia de las cargas más altas del registro o sobrecargas, se ha calculado el coeficiente de correlación entre la vida de crecimiento y el valor extremo o carga máxima del registro (ρ_1), así como el coeficiente de correlación ρ_n entre la vida y la media de los n picos más altos de un registro. Igualmente se encuentra que ρ_n aumenta al aumentar n

hasta alcanzar un máximo a partir del cual disminuye. En el caso del proceso tipo B el valor máximo realmente se alcanza en ρ_1 , la tendencia anterior se sigue a partir de n igual a 2, es decir, ρ_n aumenta al aumentar n alcanzándose un valor máximo muy próximo a ρ_1 para $n=6$ disminuyendo a partir de dicho valor. Dichos datos quedan reflejados en la tabla 6.15, en la que figura el valor máximo de ρ_n y el número n de picos al que corresponde dicho máximo.

Tabla 6.15: *Coefficientes de correlación entre la vida de crecimiento y las más altos del registro, para el nivel de carga H.*

SERIE	A-H25	B-H25	C-H25	D-H25
ρ_1	0.68	0.71	0.51	0.72
ρ_n	0.84	0.70	0.58	0.82
n	4	6	2	7

En los datos de la tabla 6.15 se puede apreciar que no hay una tendencia clara de variación de la correlación con el ancho de banda. Inicialmente el coeficiente de correlación disminuye al disminuir el ancho de banda que puede atribuirse como se comentó anteriormente a la disminución de la relación entre el valor medio de las cargas máximas y la media de picos. Sin embargo para el proceso tipo D el coeficiente de correlación aumenta. Esto podría deberse a que al disminuir el número de sobrecargas, n° de picos $> 1.5\mu_p$, el efecto de las mismas se prolongue un mayor número de ciclos dado que hay una menor probabilidad de que el retardo que producen sea eliminado por sobrecargas posteriores. De esta manera el retardo producido aumenta y el coeficiente de correlación también. Resultados similares han sido obtenidos por Domínguez y Zapatero [7] con estimaciones de vida mediante simulación.

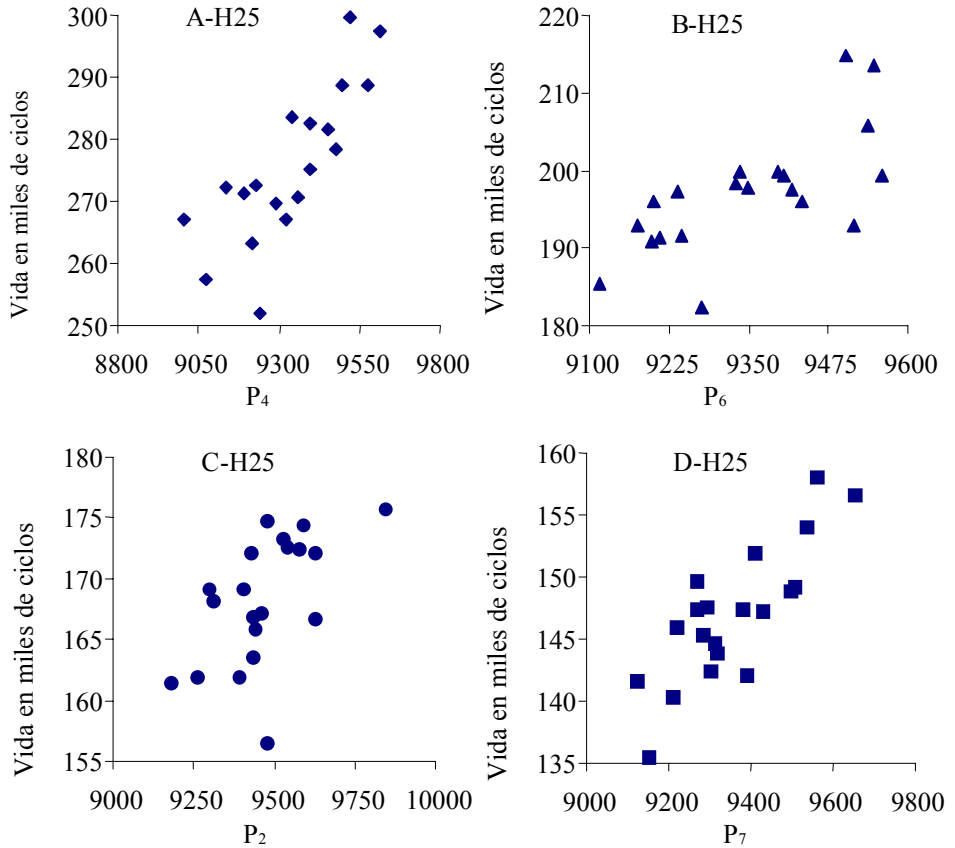


Figura 6.15: Vida frente a cargas máximas, donde P_n representa la media de las n cargas más altas de cada registro.

En la figura 6.15 puede observarse una mayor correlación para los proceso de banda más ancha (tipo A) y más estrecha (tipo D), entre la vida de crecimiento y la media de los n picos más altos del registro. Dichas correlaciones corresponden a los valores máximos alcanzados al aumentar n , datos que figuran en la tabla 6.15. En la gráfica P_n representa la carga media de los n picos más altos del registro, siendo n el número que produce el mayor valor de ρ_n para cada ancho de banda.

Al igual que para el proceso C-H25 se han obtenido las velocidades de crecimiento de grieta para los otros tres procesos con los registros de mayor y menor valor extremo o pico máximo. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 6.16, 6.17 y 6.18. Las características de todos los registros considerados se muestran en la tabla 6.16. En todos los casos puede observarse que cuando el valor extremo del registro es alto, se producen grandes retardos que se repiten cada 25000 ciclos. Esto conduce a que el registro con el mayor pico máximo produzca la vida más larga en el proceso tipo A y a la segunda vida más alta en los procesos B y D. Cuando el valor extremo del registro es bajo no se produce este efecto y en general dan vidas de las más bajas.

Tabla 6.16: Estadísticas de los registros considerados para el análisis de velocidades de crecimiento en los procesos A, B y D con el nivel H de carga.

REGISTRO	P_{max} (N)	μ_p (N)	P_{max}/μ_p	nº picos >0.95 P_{max}	nº picos >0.9 P_{max}	nº picos >1.5 μ_p	vida (ciclos)
A-H25_12	10427	5724	1.82	1	3	32	303699
A-H25_5	9133	5718	1.6	18	98	27	257509
B-H25_3	10331	5810	1.78	1	4	27	213463
B-H25_8	9325	5808	1.61	15	69	31	190720
D-H25_18	10090	6006	1.68	3	10	12	156687
D-H25_2	9416	6009	1.57	1	9	6	140334

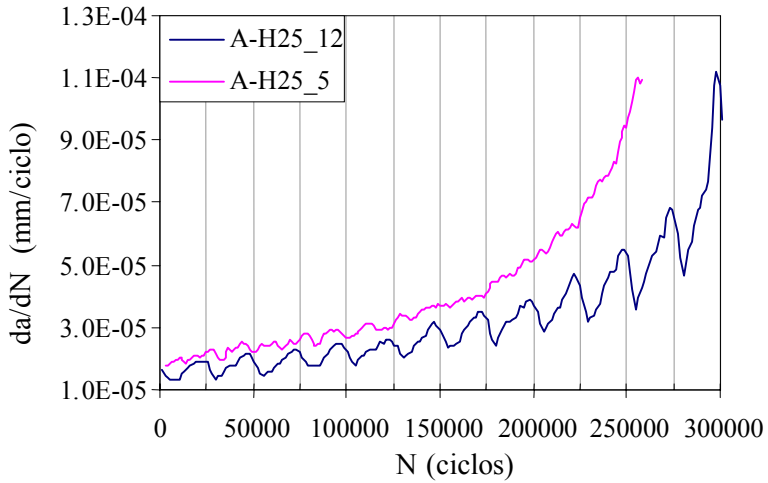


Figura 6.16: Velocidades de crecimiento de grieta en los ensayos realizados con los registros A-H25_12 y A-H25_5.

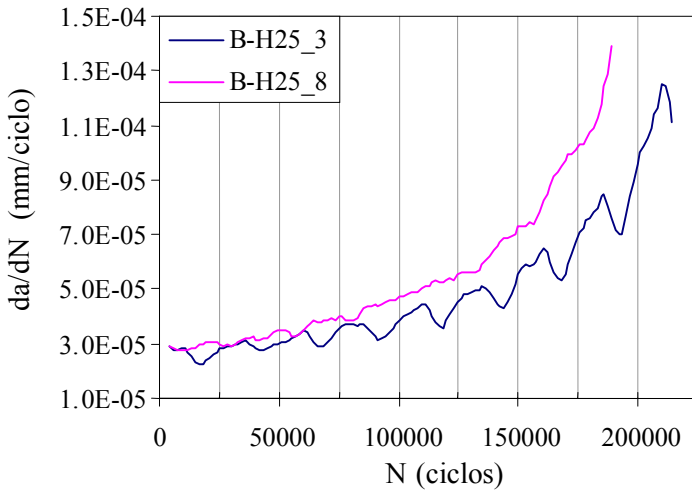


Figura 6.17: Velocidades de crecimiento de grieta en los ensayos realizados con los registros B-H25_8 y B-H25_3.

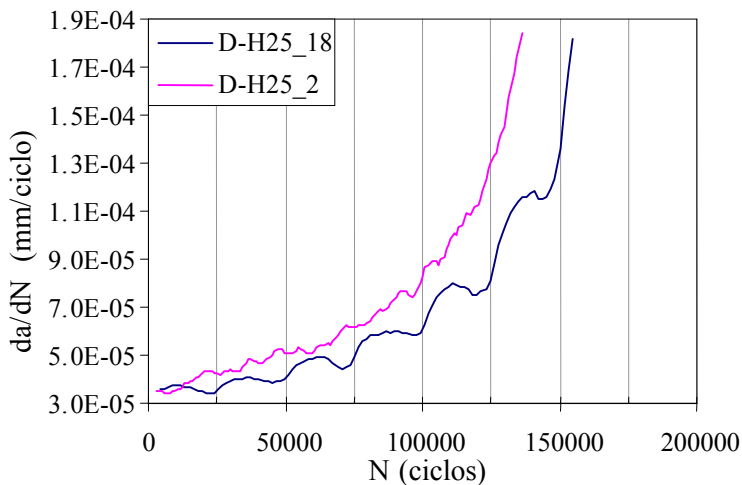


Figura 6.18: *Velocidades de crecimiento de grieta en los ensayos realizados con los registros D-H25_18 y D-H25_2.*

En el caso del nivel bajo de carga todos los datos analizados se presentan juntos en la tabla 6.17. Comparando estos valores con las tablas 6.14 y 6.15 se observa en primer lugar, que para este nivel de carga, también aumenta la relación entre el valor medio de las cargas máximas ($\mu_{P_{max}}$) y la media de picos (μ_p) al aumentar el ancho de banda del proceso. Este valor no obstante, es en todos los casos inferior a 1.5, es decir, que no existe ningún pico que pueda ser considerado como tal como una sobrecarga. Lógicamente al no existir ningún pico de valor superior a $1.5\mu_p$, en su lugar se ha optado por mostrar aquí el número medio de picos cuyo valor supera el 90 % del valor extremo. Este valor es del orden de 3 veces el correspondiente al nivel alto de carga, lo que significa que para niveles bajos de carga existen muchos más picos próximos al valor extremo, pero ninguno suficientemente alto como para ejercer un gran efecto como sobrecarga. Igualmente muestra la mayor posibilidad de eliminación de los efectos de retardo por la interacción entre las sobrecargas de valores muy similares.

Tabla 6.17: Estadística de los valores extremos y correlaciones para el nivel de carga bajo.

SERIE	A-L25	C-L25	D-L25
μ_{\max} (N)	7650	7656	7723
σ_{\max} (N)	165	147	134
μ_p (N)	5367	5471	5538
μ_{\max} / μ_p	1.425	1.399	1.395
n° picos $> 0.9P_{\max}$	115	127	107
ρ_1	0.54	0.09	0.2
ρ_n	0.75	0.27	0.42
n	13	21	14

Tras lo expuesto parece lógico que los coeficientes de correlación muestren la misma tendencia con el ancho de banda del proceso que en el caso del nivel alto de carga, si bien ahora los valores de correlación encontrados son más bajos. Esta disminución es debida a que en efecto la relación entre el valor medio de las cargas máximas y la media de picos es menor. Esta disminución es menos acusada para el proceso de banda más ancha (tipo A). La comparación puede hacerse fácilmente con la figura 6.19. Otra diferencia a resaltar es que mientras para el nivel alto de carga ρ_n alcanzaba el máximo para n entre 3 y 7 para el nivel bajo el máximo se produce para n entre 13 y 21. Esto significa que un mayor número de picos afectan al retardo, aunque éste sea pequeño, por un lado porque esos picos son bajos con relación a la media de picos y por otro porque al ser muchos la interacción entre ellos elimine sus efectos.

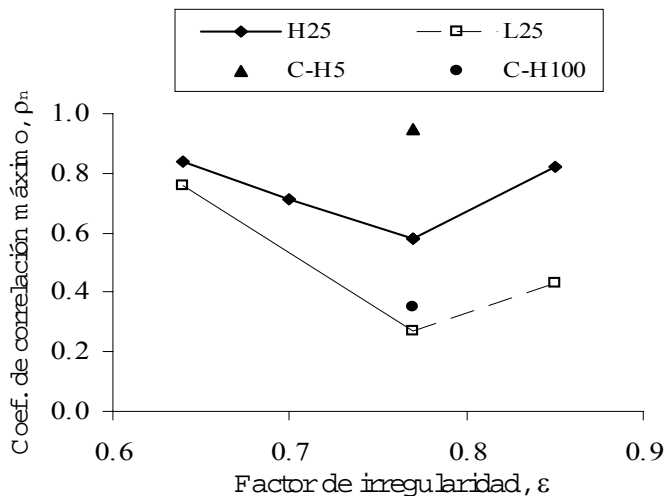


Figura 6.19: Variación de ρ_n máximo con el factor de irregularidad, ϵ , para los dos niveles de carga

Si se analiza la variación de la velocidad de crecimiento con el número de ciclos también para este nivel de carga son apreciables los efectos de retardo. Las figuras 6.19, 6.20 y 6.21 muestran las curvas correspondientes al registro de mayor y menor pico máximo. Las características de todos los registros considerados se muestran en la tabla 6.20. Las conclusiones que pueden extraerse de dichos diagramas son las mismas que las discutidas en el caso del nivel alto de carga. Resulta interesante destacar, comparando ambos niveles de carga, que las disminuciones de velocidad producidas en el nivel bajo de carga son menores que en el nivel alto, debido a que es menor la relación entre valores extremos y media de picos. Esto último lleva a una menor diferencia entre las velocidades de crecimiento que producen registros de valores extremos altos, y por tanto efectos de retardo, y las que producen registros de valores extremos bajos. En definitiva esto significa una menor dispersión de los resultados, y por tanto un menor coeficiente de variación.

Tabla 6.20: Estadísticas de los registros considerados para el análisis de velocidades de crecimiento en los procesos A, C y D con el nivel L de carga

REGISTRO	P_{\max} (N)	μ_P (N)	P_{\max}/μ_P	n° picos >0.95 P_{\max}	n° picos >0.9 P_{\max}	vida (ciclos)
A-L25_12	8156	5370	1.52	1	9	1226894
A-L25_5	7389	5237	1.38	33	271	1150015
C-L25_11	8124	5470	1.49	1	7	697675
C-L25_9	7418	5471	1.36	43	306	690063
D-L25_18	7956	5537	1.44	4	33	627754
D-L25_2	7557	5539	1.36	17	195	582102

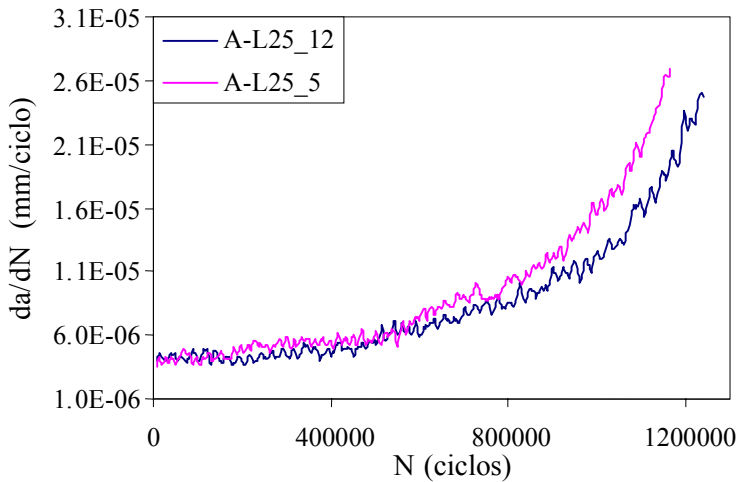


Figura 6.20: Velocidades de crecimiento de grieta en los ensayos realizados con los registros A-L25_12 y A-L25_5.

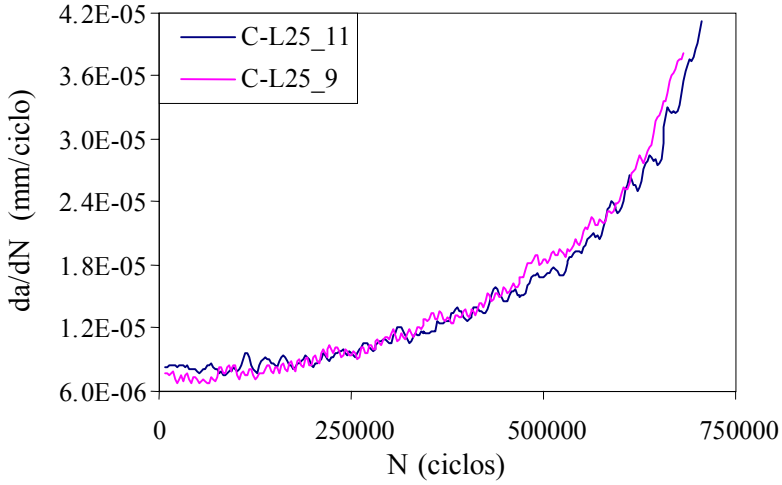


Figura 6.21: Velocidades de crecimiento de grieta en los ensayos realizados con los registros C-L25_11 y C-L25_9.

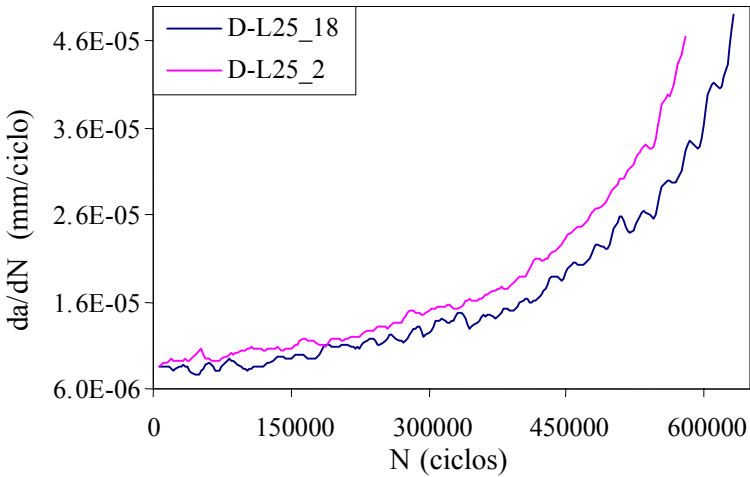


Figura 6.22: Velocidades de crecimiento de grieta en los ensayos realizados con los registros D-L25_18 y D-L25_2.

6.5 DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA DE LA VIDA

La vida de crecimiento de grieta está influenciada por múltiples factores, la gran mayoría de naturaleza aleatoria, lo que conlleva a que el estudio del proceso deba de hacerse desde un punto de vista estadístico. El conocimiento, por tanto, de la distribución estadística de la vida es fundamental para poder estimar no sólo valores medios de la misma, sino también la variabilidad del proceso. Es importante conocer cual es la distribución estadística que mejor se ajusta al tiempo que tarda en crecer una grieta desde un valor inicial, hasta un cierto valor determinado.

Como en la mayoría de las aplicaciones ingenieriles, la distribución estadística de la variable aleatoria de interés no es conocida y sólo se dispone de los resultados experimentales. Existen numerosas distribuciones que los ingenieros aplican en diversas situaciones reales algunas tan comunes que reciben nombres especiales y están tabuladas [11,12]. La familiaridad de estas distribuciones conduce a adoptarlas frecuentemente sólo por facilidad de cálculo, aún cuando no haya razones que sugieran que una distribución particular es la apropiada. En tales situaciones, la selección entre distribuciones comunes, se basa en la comparación entre la forma del histograma de datos y la forma de la función de densidad de probabilidad de la distribución matemática. Sin embargo, con el fin de realizar dicha selección de forma racional y de que las conclusiones sean lo más exactas y útiles posibles, es preferible que la selección de la distribución se base, siempre que sea posible, en un conocimiento de cómo la situación física pudo dar lugar a la distribución más que en el hecho de que sea una buena aproximación matemática. En esta sección se pretende justificar la selección de distribuciones utilizadas en el estudio, sobre la base del estudio de los mecanismos mediante los cuales puede surgir la distribución, teniendo en cuenta también la experiencia previa de otros autores.

Los modelos probabilísticos considerados corresponden a las distribuciones logarítmico-normal, y varias distribuciones típicas de valores extremos. Todas ellas corresponden a modelos que surgen como límite de un razonamiento sobre la relación entre el fenómeno de interés y sus muchas causas. La incertidumbre en la variable física puede ser el resultado de los efectos combinados de muchas causas, cada una de las cuales es difícil de aislar y observar. En varias situaciones importantes si conocemos el mecanismo por el cual las causas individuales afectan la variable de interés, podemos determinar un modelo para esta última sin estudiar en detalle los efectos individuales. Puede considerarse el caso en que las causas son aditivas, multiplicativas o donde sus extremos son críticos.

La conocida distribución normal representa el primero de los casos en el que la incertidumbre de la variable aleatoria está asociada a la suma de los efectos individuales de muchas causas independientes. Sin embargo, la simetría de la distribución la hace inapropiada para representar la vida a fatiga. La simetría o asimetría de las distribuciones es una variable importante a la hora de seleccionar una distribución, como candidata al ajuste de los datos de crecimiento de grieta. La asimetría se puede determinar cualitativamente mediante la representación del histograma de frecuencias, o se puede medir mediante el coeficiente de asimetría, k , definido en la expresión:

$$k = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}}$$

donde μ_n representa el momento central o momento respecto a la media de orden n . Los valores positivos de k indican que la distribución es asimétrica con la cola hacia la derecha, y los valores negativos indican que la cola es hacia la izquierda. La tabla 6.21 muestra los valores obtenidos para todas las series de ensayos realizadas. Como se observa de los datos de la tabla, no hay una tendencia clara en cuanto a la asimetría de las distribuciones, un estudio realizado por Kozin y Bogdanoff [13] recopilando datos de distintos autores, encuentran también ambas tendencias. En los resultados del trabajo que se

presenta, las distribuciones que presentan la cola a la izquierda aparecen prácticamente todas en el proceso tipo C. En la figura 6.22 se representan algunos de los histogramas de vida de los procesos analizados en los que pueden observarse asimetrías bien diferentes.

Tabla 6.21: *Coefficientes de asimetría obtenidos para todas las series de ensayos realizadas.*

Series	coeficiente de asimetría
A-H25	0.27
A-L25	-0.25
B-H25	0.54
C-H5	1.17
C-H5*	0.41
C-H25	-0.48
C-H25*	-0.67
C-H100	1.32
C-L25	-0.65
D-H25	0.16
D-L25	0.30

La diferencia más significativa de la distribución logarítmico-normal comparada con la normal es precisamente su forma asimétrica. Dicha distribución representa un efecto que es el producto de muchas causas cada una de poca importancia respecto a las demás e independiente. Un ejemplo típico de este tipo de mecanismos ocurre en los procesos de rotura, para la representación de la vida a fatiga de un componente también se ha utilizado ampliamente esta distribución.

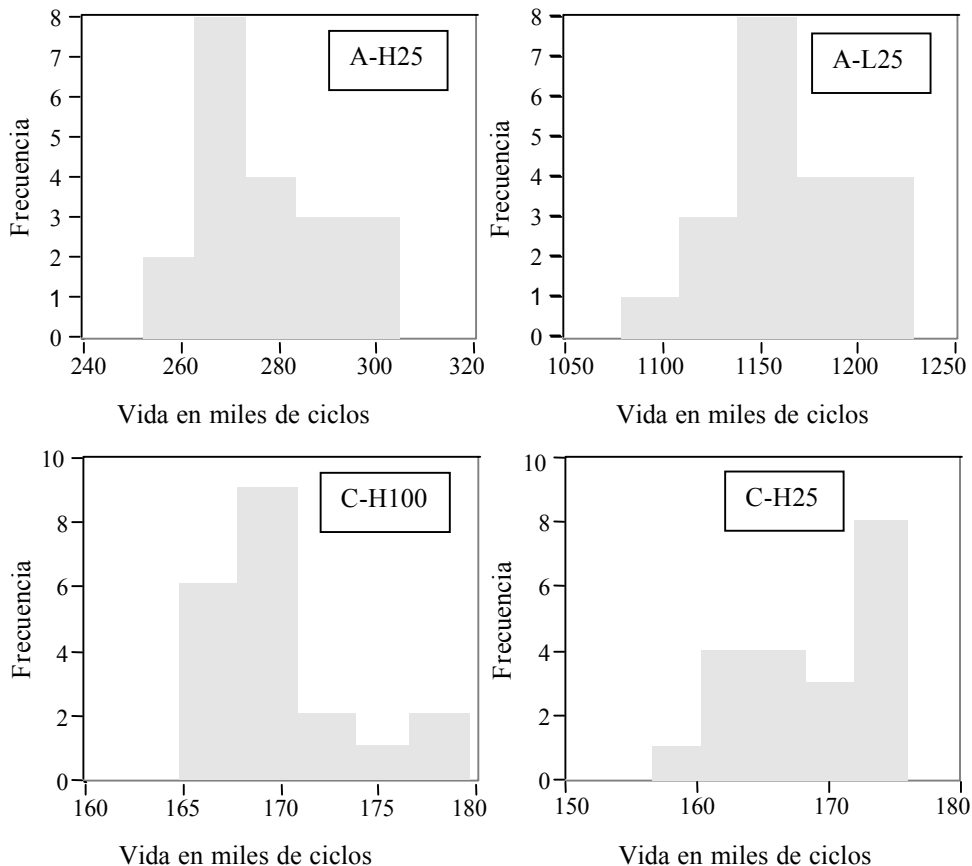


Figura 6.22: Histogramas de vida para algunos de los procesos analizados.

En aplicaciones de ingeniería civil, en muchos casos la capacidad del sistema puede depender sólo de los valores extremos, máximos o mínimos de varias variables aleatorias, surgen así las distribuciones de valores extremos. El ejemplo típico lo constituye la resistencia de un sistema que viene dada por la del más débil de muchos componentes elementales. Pueden encontrarse formas límite de la distribución de máximos o mínimos, aún cuando no se conozca con precisión la forma exacta de la distribución de la variable aleatoria cuyos máximos o mínimos estamos considerando. Las distribuciones límites

dependen, no sólo de si consideramos máximos o mínimos, sino también de la forma general como se comporta la cola apropiada de la distribución fundamental. En estudios previos [6,7,14-17] realizados en base a datos de simulaciones y con algunos de los registros de carga utilizados en este trabajo después de realizar ajustes con las distribuciones de: Rayleigh, Gumbel, Frechet, Weibull, log-Normal y Gamma, se concluyó que los mejores resultados se conseguían con las tres distribuciones de valores extremos (Gumbel, Frechet y Weibull) y con la log-normal.

Basándose en estos resultados y trabajos realizados por otros autores [18-20] se eligen para este estudio las distribuciones de: Gumbel, Frechet, Weibull de dos y tres parámetros y log-normal de dos y tres parámetros.

Un modelo probabilístico sigue siendo una abstracción mientras no se relacione con observaciones de un fenómeno físico. Una vez planteado un modelo del fenómeno físico que conduce a una forma de la distribución de probabilidades que los gobierna es necesario estimar sus parámetros y juzgar la validez del modelo.

A partir de una simple sucesión finita de observaciones no es posible obtener el valor exacto de los parámetros del modelo, puesto que los datos mismos son producto de la aleatoriedad del fenómeno. Los parámetros deducidos de los datos son sólo una estimación del verdadero valor, se trata de buscar los estimadores que hacen que el modelo se ajuste mejor al comportamiento observado. Estos estimadores, que son simplemente funciones de la muestra, no son únicos sino que pueden deducirse de forma diferente por reglas generales como el método de los momentos o el método de la máxima verosimilitud. La naturaleza de estos estimadores como variables aleatorias puede estudiarse para analizar la incertidumbre asociada a los valores de los parámetros.

Para evaluar la validez del modelo se pueden usar los datos comparando las predicciones del modelo con ocurrencias observadas. En vez de comparar el histograma observado con los datos de la función de densidad de probabilidades

(FDP) del modelo hipotético se puede comparar el polígono de frecuencias acumuladas con la función de distribución acumulada. Tiene la ventaja de que con las formas acumuladas no hay necesidad de agrupar los datos en intervalos, que implica ignorar parte de la información en la muestra, ya que se pierden los valores exactos de las observaciones. Las formas acumuladas se comparan representando cada observación como un punto específico con la FDA continua, completa del modelo.

En la práctica, la representación y comparación de curvas acumuladas se puede simplificar mediante cambios de escala, es decir, mediante una representación en papel especial denominado papel probabilístico. La idea es elegir en ordenadas una escala tal, que la función de distribución acumulada de la ley de probabilidad queda representada por una recta. En esta representación, el ajuste de los valores observados a una recta, proporciona además la base de un método para estimar los parámetros de la distribución. Este ha sido el método elegido en este trabajo para la estimación de los parámetros de cada distribución. A continuación se detallan cada una de las funciones de densidad de probabilidad, seleccionadas para representar la distribución de las vidas de crecimiento, y los cambios de variable aplicados para linealizar la función de distribución acumulada.

Para comprobar la hipótesis realizada sobre la forma de la distribución es necesario contrastarla. Una hipótesis se contrasta comparando sus predicciones con la realidad, si coinciden, dentro del margen de error admisible, la hipótesis se mantiene y en caso contrario se rechaza. El contraste más popular es el contraste χ^2 de bondad de ajuste, que cuantifica las desviaciones del histograma respecto de los valores predichos. Sin embargo, este test requiere de un número mínimo de observaciones en torno a 30 que permita obtener un histograma con al menos cinco intervalos y un número de muestras superior a 3 por cada intervalo. El número de observaciones en los ensayos realizados, en general 20, no permite la aplicación fiable de este método. Otro contraste cuantitativo de bondad de ajuste (contraste de Kolmogorov-Smirnov) se basa en las desviaciones entre la función de distribución acumulada hipotética y el

histograma acumulado observado. Este es el método elegido para juzgar la bondad de los ajuste en este estudio.

6.5.1. Ajuste de los parámetros de las distribuciones y contraste de bondad del ajuste.

El ajuste de los parámetros de las distribuciones se realiza mediante trazado en papel probabilístico. El papel probabilístico es simplemente un papel en el cual las escalas han sido cambiadas de manera que la FDA para una familia de distribuciones dada se transforme en una línea recta.

Sea $y = F(x;\theta)$ una familia FDA, donde θ es el vector de parámetros, consideremos la transformación:

$$\begin{aligned} \xi &= g(x) \\ \eta &= h(y) \end{aligned} \quad \text{tales que } y = F(x;\theta) \text{ sea una familia de rectas}$$

si $h(y)$ es invertible: $y = h^{-1}(\eta)$

$$y = F(x;\theta) = h^{-1}(\eta) = h^{-1}(a g(x) + b) \Rightarrow h(y) = a g(x) + b \quad \eta = a\xi + b$$

la variable reducida $\eta = a\xi + b$ representa una línea recta.

A partir de los datos observados (x_1, x_2, \dots, x_n) , una vez ordenadas las observaciones por valores crecientes $(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n)})$, las frecuencias acumuladas observadas pueden obtenerse como i/n que representa una observación obvia de $F(x^{(i)})$. Sin embargo es preferible, y así se adoptó en este caso, tomar como estimador de las frecuencias acumuladas el valor $i/(n+1)$ evitando de esta manera el problema de que en alguna distribución ilimitada la escala del papel de probabilidad no puede mostrar el valor 1. Para cada distribución considerada se hace el cambio de variables que linealiza la FDA [11,12]. Para cada valor observado $x^{(i)}$ se representa:

$$\eta^{(i)} = h\left(\frac{i}{n+1}\right) \text{ frente a } \xi^{(i)} = g(x^{(i)})$$

El ajuste por mínimos cuadrados permite obtener la ecuación de la recta $\eta = a\xi + b$, a partir de los valores de a y b se estiman los parámetros de la distribución.

Para valorar la bondad de los ajustes comparando la función de distribución acumulada hipotética y el polígono de frecuencias acumuladas observadas se calcula el parámetro de Kolmogorov:

$$D_1 = \max_{i=1}^n \left| \frac{i}{n+1} - F(x^{(i)}) \right|$$

6.5.2. Distribuciones consideradas.

Distribución logarítmico-normal:

La variable aleatoria X se distribuye con una ley logarítmico-normal si la variable $Z=\ln(X)$ lo hace según una ley normal. La función de distribución de probabilidad FDP es:

$$f(z; \theta) = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - \mu_z}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad -\infty \leq z \leq \infty$$

θ es el vector de parámetros, donde μ_z es la media y σ_z la desviación típica de la variable $Z=\ln(X)$. La función de distribución acumulada FDA es:

$$y = F(z; \theta) = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - \mu_z}{\sigma_z}\right)^2\right] dx = \Phi\left(\frac{z - \mu_z}{\sigma_z}\right)$$

Distribuciones de valores extremos:

Surgen cuando el valor que interesa es el máximo o mínimo de n variables aleatorias, planteando el comportamiento asintótico cuando $n \rightarrow \infty$ se obtienen tres tipos de distribución límite.

Distribución tipo I o distribución de Gumbel.

Surge cuando deseamos conocer la distribución límite del máximo de n valores de U_i , cuando n es grande, suponiendo que de la distribución de los U_i sólo se conoce que es ilimitada en la dirección positiva y que la cola derecha decrece de forma exponencial, es decir, que en la cola superior, al menos, la FDA común de las U_i , se puede escribir de la forma:

$$F_u(u) = 1 - \exp(-g(u))$$

donde $g(u)$ es una función creciente. Considerando ahora la distribución de $X_n = \max(U_1, U_2, \dots, U_n)$ analizando el comportamiento asintótico cuando $n \rightarrow \infty$ se puede demostrar que:

$$f(x; \lambda, \delta) = \frac{1}{\delta} \exp \left[-\frac{x-\lambda}{\delta} - \exp \left(-\frac{x-\lambda}{\delta} \right) \right]$$

y

$$y = F(x; \lambda, \delta) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-\lambda}{\delta} \right) \right] \quad -\infty \leq x \leq \infty$$

Distribución tipo II o distribución de Frechet.

También surge cuando deseamos conocer la distribución límite del máximo de n valores de U_i , limitada a la izquierda en cero pero ilimitada a la derecha, esta cola disminuye de modo que la FDA de las U_i es de la forma:

$$F_u(u) = 1 - c \left(\frac{1}{x} \right)^\beta \quad x \geq 0$$

La distribución asintótica de $X_n = \max (U_1, U_2, \dots, U_n)$ es de la forma:

$$f(x; \beta, \delta) = \frac{\beta}{\delta} \left(\frac{\delta}{x}\right)^{\beta+1} \cdot \exp \left[-\left(\frac{\delta}{x}\right)^\beta \right]$$

y

$$y = F(x; \beta, \delta) = \exp \left[-\left(\frac{\delta}{x}\right)^\beta \right] \quad x \geq 0$$

Distribución tipo III o distribución de Weibull.

Surge a partir de distribuciones fundamentales limitadas en la cola que interesa. La mayoría de las aplicaciones útiles de este modelo tratan con el valor mínimo. Esta distribución es conocida también como distribución de Weibull, quien estudió la resistencia a tracción de un material y la resistencia a fatiga representando el parámetro λ las colas inferiores de la resistencia y del número de ciclos hasta el fallo. En este caso deseamos conocer la distribución límite del mínimo de n valores de U_i , suponiendo que la cola de la izquierda de la FDP de las U_i parte desde cero, para valores de $x \geq \lambda$, de modo que la FDA tiene la siguiente forma cerca de λ :

$$F_u(u) = c(x - \lambda)^\beta \quad x \geq \lambda$$

Si las U_i son independientes e idénticamente distribuidas con igual distribución, la distribución de X , mínimo de muchos valores, es:

$$f(x; \beta, \delta, \lambda) = \frac{\beta}{\delta} \left(\frac{x - \lambda}{\delta}\right)^{\beta-1} \cdot \exp \left[-\left(\frac{x - \lambda}{\delta}\right)^\beta \right]$$

y

$$y = F(x; \beta, \delta, \lambda) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{x - \lambda}{\delta}\right)^\beta \right] \quad \lambda \leq x \leq \infty$$

6.5.3 Ajuste de las distribuciones.

Dentro de las distribuciones consideradas se han ajustado distribuciones de dos y tres parámetros, dado que la habilidad del ajuste para una misma distribución depende en gran medida del número de parámetros, se compararán entre si distribuciones con un mismo número de parámetros. Para determinar la bondad de cada ajuste se ha utilizado el test de Kolmogorov, a medida que el parámetro de Kolmogorov es más pequeño indica un mejor ajuste de la distribución. En la tabla 6.22, se recogen los valores de este test para las distribuciones de dos parámetros. En negrita se indica el valor del test que consigue un mejor ajuste. De estos resultados se puede ver, que las diferencias de ajuste entre las distribuciones de: Frechet, Gumbel y log-normal de dos parámetros son muy reducidas, aunque no existe una clara tendencia, podría decirse que la log-normal es la que en general representa mejor la distribución estadística de la vida.

Tabla 6.22: *Valores obtenidos en la prueba de ajuste de Kolmogorov, para las distribuciones de dos parámetros log-normal, Gumbel y Frechet.*

Series	Log-normal	Gumbell	Frechet
A-H25	0.0876	0.0809	0.0843
A-L25	0.0769	0.1141	0.1204
B-H25	0.1832	0.1439	0.1385
C-H5	0.1192	0.1099	0.0916
C-H5*	0.0654	0.0465	0.0466
C-H25	0.1136	0.1323	0.1318
C-H25*	0.1125	0.1407	0.1432
C-H100	0.1854	0.1404	0.1362
C-L25	0.1301	0.1707	0.1726
D-H25	0.0933	0.0972	0.1032
D-L25	0.0604	0.0944	0.1011

En las distribuciones de tres parámetros, el tercer parámetro representa el desplazamiento del origen de la misma, el ajuste se ha realizado mediante un proceso iterativo variando el desplazamiento para conseguir el menor valor del parámetro de Kolmogorov. Dicho parámetro representa la máxima diferencia entre los valores del polígono de frecuencias acumuladas y la función de distribución acumulada. El criterio adoptado para determinar el tercer parámetro podía haber sido otro en función de qué es lo que se considera el mejor ajuste. Podría, por ejemplo, minimizarse la suma de las diferencias entre los valores del polígono de frecuencias acumuladas y la función de distribución acumulada valorando el ajuste en todos los puntos, o también, minimizar esa diferencia en alguna zona concreta. Sin embargo, si estamos evaluando la bondad de los ajustes en base al parámetro de Kolmogorov, parece que el criterio coherente para obtener el tercer parámetro de la distribución sea justamente el elegido, es decir, minimizar dicho valor. En la tabla 6.23, se recogen los valores de Kolmogorov para este conjunto de distribuciones, estando en negrita los valores que producen el mejor ajuste.

De los resultados de la tabla 6.23, puede observarse que, salvo para la serie A-L25, la distribución de Weibull se ajusta mejor que la log-normal para las series con coeficientes de asimetría negativos. procesos A, B y D, sin embargo para el proceso tipo C parece ajustarse mejor Weibull que log-normal, las diferencias, sin embargo, son en general pequeñas.

Comparando los valores de Kolmogorov de las tablas 6.22 y 6.23, se observa que en todas las series, el mejor ajuste realizado con distribuciones de tres parámetros, es siempre mejor que el mejor ajuste de cualquier distribución de dos parámetros. También se han realizado ajustes para longitudes intermedias de crecimiento, encontrándose las mismas tendencias en los ajustes de las distribuciones.

Tabla 6.23: *Valores obtenidos en la prueba de ajuste de Kolmogorov, para las distribuciones de tres parámetros log-normal y Weibull.*

Series	Log-normal 3 parámetros	Weibull 3 parámetros
A-H25	0.0753	0.0793
A-L25	0.0769	0.0954
B-H25	0.1540	0.1855
C-H5	0.0456	0.0583
C-H5*	0.0384	0.0371
C-H25	0.1063	0.0879
C-H25*	0.1125	0.0883
C-H100	0.1109	0.1339
C-L25	0.1301	0.0876
D-H25	0.0802	0.1065
D-L25	0.0583	0.0585

En la figura 6.23 se representa sobre papel probabilístico log-Normal el ajuste de la serie de ensayos A-H25, donde se puede observar el buen ajuste de los datos. En la figura 6.24 se comparan el polígono de frecuencias acumuladas con la función de distribución acumulada log-normal y Weibull ambas de 3 parámetros, en ella se pone de manifiesto que no existen prácticamente diferencias entre uno y otro ajuste. Hay que tener en cuenta en estos ajustes que el número de datos de la muestra (20) es en general pequeño, pudiendo producirse variación en la tendencia del ajuste si el tamaño de la muestra aumenta.

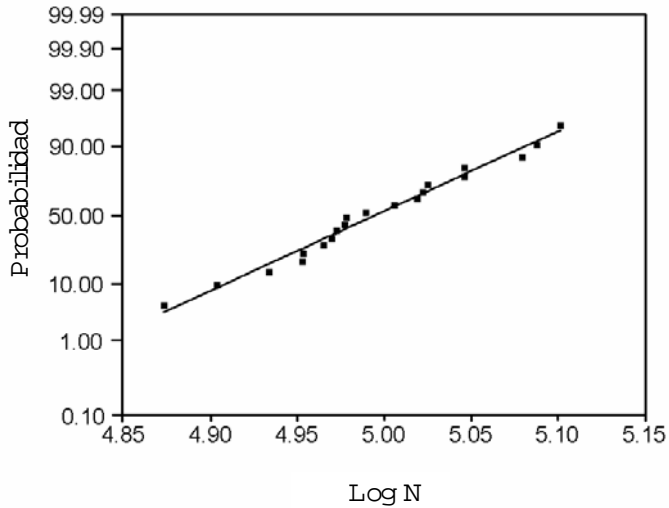


Figura 6.23: Ajuste sobre papel probabilístico normal de los datos correspondientes a la serie de ensayos A-H25.

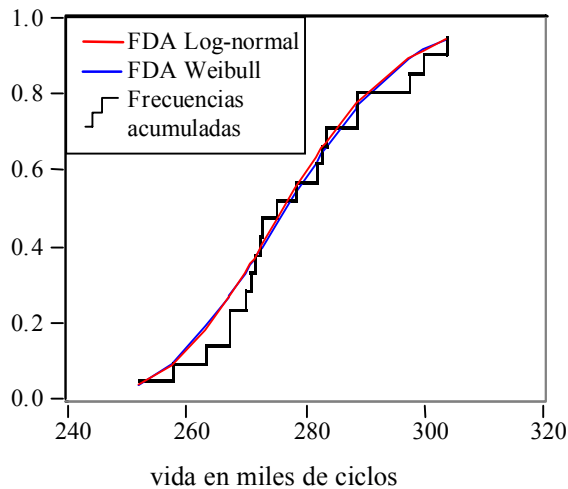


Figura 6.24: Comparación entre el polígono de frecuencias acumuladas y las funciones de distribución acumulada log-normal y Weibull ambas de 3 parámetros para el proceso A-H25.

Para disponer de un mayor número de datos, podrían considerarse agrupadas todas la muestras correspondientes a las series de ensayos C-H25, C-H25* y C-H100, dado que en definitiva en todos los casos se trata de resultados obtenidos para el mismo tipo de proceso y nivel de cargas. No se han considerado los resultados de las series de ensayos realizadas con registros de 5000 ciclos porque en este caso, como ya se discutió previamente, la marcada influencia de los valores extremos de cada registro hace que la distribución de la vida de crecimiento de la grieta venga determinada por la distribución de dichos valores extremos. De hecho se comprueba la enorme similitud entre el polígono de frecuencias acumuladas de los valores extremos y el correspondiente a los valores de vidas.

En la figura 6.25 se comparan, para los datos agrupados de las tres series, el polígono de frecuencias acumuladas con la función de distribución acumulada log-normal y Weibull ambas de tres parámetros. En este caso también las diferencias encontradas son pequeñas.

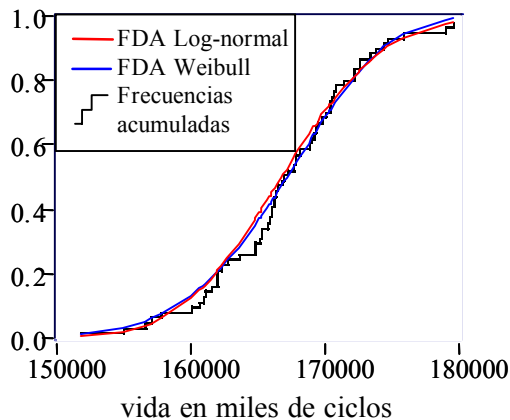


Figura 6.25: Comparación entre el polígono de frecuencias acumuladas y las funciones de distribución acumulada log-normal y Weibull para los procesos C-H25, C-H25* y C-H100.

En este caso puede usarse también el contraste χ^2 para evaluar la bondad del ajuste, el parámetro χ^2 se obtiene como el sumatorio del cuadrado de las diferencias entre el histograma de los datos observados y los valores estimados. En la figura 6.26 se representan el histograma de valores observados junto a los valores predichos por las funciones de densidad de probabilidad de Weibull y log-normal. El mejor ajuste corresponde a la distribución tipo Weibull ya que tanto el parámetro χ^2 como el de Kolmogorov son menores para esta distribución que para la log-normal.

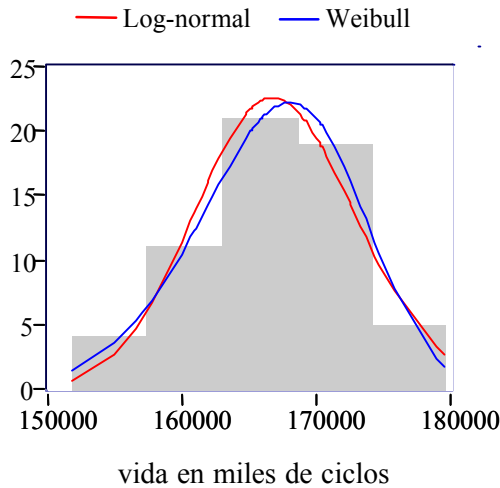


Figura 6.26: *Histograma de valores observados junto a los valores predichos por las funciones de densidad de probabilidad Weibull y log-normal.*

6.6. CONCLUSIONES

Este trabajo proporciona nuevos datos en crecimiento de grieta obtenidos al someter distintas probetas a ensayos con registros de carga de naturaleza aleatoria, se incluyen procesos de carga con cuatro anchos de banda distintos y para dos niveles de carga. Proporciona una contribución más para el estudio de la influencia de distintos parámetros en el proceso o para el estudio de la fiabilidad de modelos de estimación de este fenómeno, entre otros. A la vista del estudio presentado y de la discusión expuesta anteriormente, las siguientes conclusiones resumen los resultados obtenidos sobre la influencia de los distintos factores analizados sobre la vida media de crecimiento de la grieta, la dispersión de las vidas de crecimiento y la distribución estadística de las mismas.

En cuanto a la vida media de crecimiento de la grieta se concluye lo siguiente:

1. En los tipos de procesos analizados, la vida media de crecimiento de la grieta viene determinada fundamentalmente por el ancho de banda del proceso y el nivel de carga considerado. La duración del proceso de crecimiento se incrementa en gran medida con el ancho de banda del proceso, con independencia del nivel de carga aplicado. La justificación de este comportamiento está en que, aunque los registros para un mismo nivel de carga tienen la misma media y desviación estándar, al aumentar el ancho de banda del proceso los valores medios de picos y rangos disminuyen, disminuyendo por tanto la velocidad de crecimiento y dando vidas más largas.
2. Se ha encontrado que dicha vida media está relacionada con el parámetro $\epsilon_{1.5}$. La relación encontrada, que corresponde a la expresión (6.11), permite,

a partir de los resultados experimentales de vida media para un determinado proceso y nivel de carga, estimar los valores de vida media que produciría cualquier otro proceso de idéntico nivel de carga. Las estimaciones de vida así obtenidas son excelentes para todos los procesos estudiados y en ambos niveles de carga.

3. La longitud de los registros de carga empleados, así como el uso de un mismo o distintos registros de carga de un determinado proceso producen una vida media en todos los casos muy similar, por lo que puede decirse que no tienen influencia.

En cuanto a la dispersión de las vidas de crecimiento de grietas se han analizado como factores de influencia: la aleatoriedad de las propiedades del material y la debida al uso de distintos registros de carga, el ancho de banda del proceso, nivel de carga, la longitud del registro y los valores extremos de carga alcanzados en cada registro, concluyéndose:

1. La influencia conjunta de la aleatoriedad de las propiedades del material y la debida al uso de distintos registros de carga sobre la dispersión de los resultados depende en gran medida de la longitud de los registros empleados. El registro de cargas ejerce una influencia sobre la dispersión de la vida muy superior al efecto producido por el material cuando la longitud de los registros es pequeña. A medida que el número de ciclos del registro aumenta la influencia de éste sobre la dispersión disminuye pasando a ser la influencia ejercida por el material superior a la producida por la carga.
2. El efecto del ancho de banda del proceso sobre la dispersión de los resultados es pequeño, no encontrándose una tendencia clara de variación de la desviación estándar o el coeficiente de variación con este parámetro. El nivel de carga tiende a disminuir ligeramente la dispersión, los valores del coeficiente de variación disminuyen ligeramente al disminuir el nivel de carga.

3. El tamaño del registro utilizado influye de manera importante sobre la dispersión de las vidas de crecimiento de grietas. A medida que crece el número de ciclos de un registro la dispersión de las vidas tiende a disminuir. Dado que las estadísticas en cuanto a valores medios, dispersiones o distribución tanto de rangos como de picos resultan prácticamente idénticas con independencia de la longitud del registro, dicha influencia cabe atribuirla al efecto de los valores concretos, distribución y frecuencia de aparición de los valores más altos o extremos de carga alcanzados en cada registro, que si dependen de la longitud del mismo.
4. La longitud del registro empleado influye de manera importante creando fuertes efectos de secuencia especialmente con registros muy cortos, es el caso de los ensayos realizados con registros de 5000 ciclos. En este caso la vida de crecimiento viene determinada por los valores y distribución del valor extremo del registro, encontrándose una correlación entre vida y carga máxima del registro muy alta (0.95). Con el uso de registros largos dicho efecto se elimina encontrándose correlaciones entre la vida de crecimiento y la media de los picos más altos del registro decrecientes a medida que aumenta la longitud del mismo.
5. El efecto de las sobrecargas o valores extremos del registro se ha analizado buscando la máxima correlación entre la vida de crecimiento y la media de los n picos más altos del registro. Para el nivel alto de carga dicha correlación alcanza el máximo para n entre 3 y 7 mientras que para el nivel bajo dicho máximo se produce para n entre 13 y 21, esto significa que un mayor número de picos se involucran en los efectos de retardo. Aunque no se ha encontrado una tendencia clara de cómo varía dicha correlación con el ancho de banda del proceso si puede decirse que los valores más altos corresponden a los procesos de banda más ancha (tipo A) y de banda más estrecha (tipo C). En el proceso de banda más ancha esto se explica porque la relación entre el valor extremo del registro y la media de picos es superior que en el resto de procesos. Esto implica valores más altos de las

sobrecargas lo que produce un mayor efecto de retardo y por tanto una mayor correlación entre vida y valores extremos del registro. En el caso del proceso de banda más estrecha, con la menor relación entre el valor extremo del registro y la media de picos, una mayor correlación se justifica con el hecho de que los efectos de retardo aunque puedan ser menores no son eliminados pues existen muy pocas sobrecargas posteriores capaces de ello. Las correlaciones disminuyen al disminuir el nivel de carga justificado por la disminución de la relación entre el valor extremo del registro y la media de picos.

6. Se observan fácilmente efectos de retardo en las variaciones en velocidad de crecimiento frente al número de ciclos a lo largo de la vida de la probeta en todos los procesos analizados. Estos efectos se producen con registros de valores extremos altos y con pocos picos posteriores suficientemente altos para eliminar el retardo producido por aquellos. Estas variaciones de velocidad se repiten a intervalos iguales a la longitud del registro haciendo patente el efecto de secuencia que produce la repetición del registro de cargas hasta el fallo del componente. Cuando el valor extremo del registro es bajo no se produce este efecto y se obtienen por tanto las vidas más cortas.
7. La decisión sobre truncar o no un espectro de cargas para eliminar o no algunas sobrecargas puede tener una gran importancia en las estimaciones de la vida de crecimiento obtenidas en ensayos o estimadas mediante simulación con este registro. La elección correcta del número de ciclos y de las sobrecargas de los registros estándar, ha de ser función del ancho de banda del proceso estudiado.

En cuanto a la distribución estadística de las vidas de crecimiento se ha encontrado:

1. No existe una tendencia clara en cuanto a la asimetría de las distribuciones, en los resultados de este trabajo aparecen distribuciones que presentan tanto la cola a la derecha como a la izquierda. También se encuentran grandes diferencias en los polígonos de frecuencias acumuladas lo que hace suponer que es difícil que todos los conjuntos de datos puedan ser ajustados razonablemente con la misma función de distribución.
2. Se han considerados las distribuciones estadísticas de Frechet, Gumbel y log-normal de dos parámetros, encontrándose que las diferencias del ajuste son muy reducidas. Aunque no existe una clara tendencia, podría decirse que la log-normal es la que en general representa mejor la distribución estadística de la vida.
3. Se han considerado también las distribuciones log-normal y de Weibull de tres parámetros encontrándose que el ajuste mejora al aumentar el número de parámetros de la distribución. Ambas distribuciones se ajustan razonablemente bien a las vidas de crecimiento de grieta obtenidas experimentalmente, siendo la log-normal la que consigue ajustar mejor un mayor número de procesos, con más anchos de banda. En general, para las series de ensayos que presentan coeficientes de asimetría negativos, se ajustan mejor a la distribución de Weibull. En concreto también resulta así para el conjunto de datos correspondientes al proceso tipo C con registros de 25000 y 100000 ciclos agrupados. No obstante, las diferencias encontradas comparando los polígonos de frecuencias acumuladas a las funciones de distribución acumulada log-normal y Weibull son pequeñas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lapetra C., Mayo J. and Domínguez J., The Randomness of Fatigue Crack Growth under Constant-amplitude Loads, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 17, pp. 589-600, 1996.
- [2] Virkler D. A., Hillberry B. M. and Goel P. K., The Statistical Nature of Fatigue Crack Propagation, in Technical Report AFFDL-TR 78-43, 1978.
- [3] Schijve J., Fatigue Predictions and Scatter, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 17, No 4, pp. 381-396, 1994.
- [4] Yoong J. H. and Yang Y. S., Stochastic Fatigue Crack Propagation, in *Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures*, (Edited by A. Carpinteri), Elsevier, pp. 515-549, 1994.
- [5] Sobczyk K., Modeling of Random Fatigue Crack Growth, *Engng. Fract. Mech.*, Vol. 24, No 4, pp. 609-623, 1986.
- [6] Domínguez J. and Zapatero J., Effect of the Loading Spectrum and History Length on Fatigue Life Distribution under Random Loading, *Engng Fract. Mech.*, Vol. 42, No 6, pp. 925-933, 1992.
- [7] Domínguez J. and Zapatero J., Some Statistical Aspects of Fatigue under Random Loading, *Theoretical Concepts and Numerical Analysis of Fatigue*, A. F. Bloom and C. J. Beevers (Eds.), EMAS, pp. 237-253, 1992.
- [8] Newman J. C. Jr., A Nonlinear Fracture Mechanics Approach to the Growth of Small Cracks, *Behavior of Short Cracks in Airframe Components*, AGARD-CP-328, 1983.

- [9] Newman J. C. Jr., A Crack Closure Model for Predicting Fatigue Crack Growth under Aircraft Spectrum Loading, *Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading*, J. B. Chang and C. M. Hudson (Eds), ASTM STP 748, pp 53-84, 1981.
- [10] ASTM E 647-91, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.
- [11] Castillo E., *Extreme Value Theory in Engineering*, Academic Press. 1980.
- [12] Benjamin J. R., *Probabilidad y Estadística en Ingeniería Civil*, Mc Graw Hill, 1981.
- [13] Kozin F. and Bogdanoff J. L., Recent Thoughts on Probabilistic Fatigue Crack Growth, *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 42, No 11, Part 2, pp 121-127, 1989.
- [14] Domínguez J., Zapatero J., Bohorquez L., Effect of the Length of the Random Load History on the Fatigue Life Statistics, *Fracture Behaviour and Design of Materials and Structures* (edited by D. Firrao), pp. 1427-1434, 1990.
- [15] Moreno B., Zapatero J. y Domínguez J., Experimental Statistical Analysis of Scatter in Fatigue Crack Growth Life under Stationary Random Loading, *Fracture From Defects*, EMAS, pp 49-54, 1998.
- [16] Domínguez J. y Zapatero J., Distribución de la Vida a Fatiga en Función del Espectro de Cargas y de la Longitud del Registro Utilizado, *Anales de Mecánica de la Fractura*, Vol. 8, 1991.
- [17] Zapatero J. y Domínguez J., Aleatoriedad del Crecimiento de Grietas ante Cargas Irregulares, *Anales de Mecánica de la Fractura*, Vol. 10, 1993.

- [18] Virkler D.A., Hillberry B.M. and Goel P.K., The Statistical Nature of Fatigue Crack Propagation, Technical Report AFFDL-TR-78-43, Air Force Flight Dynamics Lab., Ohio, 1978.
- [19] Schijve J, A Normal Distribution or Weibull Distribution for Fatigue Lives. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol. 16, No 8, pp 851-859, 1993.
- [20] Schijve J., Fatigue Predictions and Scatter, Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. Vol. 17, No 4, pp 381-396, 1994.

Capítulo 7

CONCLUSIONES GENERALES Y DESARROLLO FUTURO

La predicción con cierta exactitud de la duración del proceso de crecimiento de una grieta por fatiga, y especialmente en el caso real de cargas de amplitud variable, presenta gran dificultad debido a los numerosos parámetros que influyen en el proceso. Esto justifica las investigaciones tanto experimentales como analíticas llevadas a cabo para estudiar el fenómeno y es lo que ha motivado la realización de esta tesis. Este trabajo proporciona nuevos datos experimentales sobre el crecimiento de grietas por fatiga bajo cargas aleatorias contribuyendo al estudio de la influencia de algunos de los factores que afectan a la variabilidad de la vida y analizando uno de los métodos de simulación de uso más extendido. Las conclusiones obtenidas se exponen en los capítulos 5 y 6, en este capítulo se pretende resumir las conclusiones generales y apuntar las posibles líneas a desarrollar en futuros trabajos.

Por un lado, se ha constatado que el modelo de simulación ciclo a ciclo propuesto por Newman es capaz de estimar con muy buena aproximación tanto la vida media como la dispersión de los resultados, además para todos los procesos y niveles de carga considerados. El modelo es capaz de reproducir la

variabilidad de la vida como función de cada historia de carga individual, reproduciendo los efectos de secuencia.

No obstante, también se ha comprobado que el comportamiento del modelo depende fuertemente de los valores de los coeficientes de constricción. En este trabajo el ajuste de los parámetros del modelo se realiza a partir de un conjunto de resultados con cargas de amplitud constante con una única relación de carga R . Cabría plantearse la realización de ensayos con distintas relaciones de carga. Esto serviría, por una parte, para ajustar los coeficientes de constricción o analizar en mayor profundidad el ajuste con un factor de constricción α variable, y por otra, para obtener datos sobre los valores umbral, dado que los usados en este trabajo corresponden a los obtenidos por otros autores. También en el sentido de poder establecer un parámetro de constricción en función de la geometría del problema, se ha iniciado ya una nueva línea de investigación centrada en el análisis mediante elementos finitos del estado de tensiones en la probeta [1-3]. Dicho análisis serviría para poder fijar los coeficientes de constricción, limitándose el ajuste de los parámetros del modelo al ajuste de los coeficientes de la ecuación de crecimiento. También se pretende obtener numéricamente con dicho estudio las tensiones de cierre, inducidas por plasticidad, que se producen para poder contrastarlas con las calculadas por el modelo de simulación.

El procedimiento propuesto para el ajuste de los parámetros del modelo, que produce tan buenos resultados, se hace en base a la hipótesis de que el modelo predice tensiones de cierre inferiores a las producidas realmente. Esta hipótesis está justificada en el hecho de que el modelo solamente contempla el cierre de grieta inducido por plasticidad, no obstante otros mecanismos adicionales de cierre pueden influir, especialmente para bajos niveles de ΔK . Como línea futura de desarrollo podría plantearse obtener las tensiones de cierre que se producen realmente en la probeta durante los ensayos mediante medidas experimentales.

Por otro lado, los resultados experimentales y conclusiones que la presente Tesis aporta, para comprender la influencia de algunos de los factores que afectan a la variabilidad en el crecimiento de grietas por fatiga, puede suponer el punto de partida en el desarrollo de nuevas líneas de investigación, que completen, complementen y generalicen algunas conclusiones de la misma. Estas líneas se podrían concretar en las siguientes:

- 1.- Determinación experimental de la influencia en la variabilidad de la vida con procesos de carga distintos a los considerados en este estudio. En concreto, usando procesos con distinta forma de la función de densidad espectral de las cargas, con distintos anchos de banda y nivel medio de carga o desviación estándar.
- 2.- Determinación experimental de la influencia de la longitud del registro con distintos procesos de carga al aquí analizado. Obtención de relaciones entre dispersión y longitudes de registro, para distintos niveles de carga y procesos aleatorios.
- 3.- Elaboración de recomendaciones en la preparación de registros estándar, representativos de sistemas mecánicos, en cuanto a la longitud que deban de tener estos registros, y la necesidad de obtener varias muestras estándar, o posibilidad de combinación de los distintos ciclos para obtener diferentes registros de un proceso.
- 4.- Análisis de los efectos de secuencia con procesos de carga distintos a los considerados en este estudio.
- 5.- Similares análisis para otro tipo de material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] González, A., Zapatero, J., Moreno, B. y Pascual, J., Modelado del cierre de grieta en fatiga mediante elementos finitos, *Anales de Mecánica de la Fractura*, Vol. 18, pp. 438-445, 2001.

- [2] González, A., García, D., Melgar, A., Moreno, B. y Zapatero, J., Obtención de la tensión de cierre en fatiga mediante el método de los elementos finitos, *Anales de Mecánica de la Fractura*, Vol. 19, pp. 445-450, 2002.

- [3] González Herrera, A., García Vallejo, D., Moreno, B., Pascual, J. y Zapatero, J., Simulación de la estela plástica mediante elementos finitos en el crecimiento de grieta en fatiga, *V Congreso de Métodos Numéricos en la Ingeniería*, 2002.

APÉNDICE A

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE LOS REGISTROS DE CARGA

En este apéndice se recogen los valores máximos y mínimo, el valor medio, desviación estándar y raíz media cuadrática de los picos, valles y rangos de la secuencia de cargas de todos registros usados en este trabajo. Todos los valores están expresados en Newtons.

Tabla A.1: Parámetros estadísticos de los registros correspondientes a la serie A-H25 (valores expresados en Newtons)

VARIABLE	PICOS					VALLES					RANGOS				
	max	min	μ_p	σ_p	RMS	max	min	μ_v	σ_v	RMS	max	min	μ_r	σ_r	RMS
1	9458	1928	5718	945	5796	7401	432	3994	936	4102	6136	0	1724	929	1959
2	9624	1850	5717	942	5794	7561	120	3993	937	4101	6409	0	1724	928	1958
3	9678	1872	5717	945	5794	7527	300	3996	941	4106	6905	0	1721	940	1961
4	9797	2008	5721	944	5798	7618	120	3993	936	4101	6401	0	1728	932	1964
5	9133	1796	5718	937	5795	7599	120	3993	939	4102	5904	0	1726	925	1958
6	9613	1891	5718	937	5794	7967	212	3994	943	4104	5986	0	1724	934	1961
7	9667	2290	5720	942	5797	7390	191	3993	934	4100	5954	0	1728	929	1962
8	9371	2019	5720	943	5797	7484	120	3993	933	4101	5953	0	1726	931	1961
9	9157	2340	5719	939	5795	7505	120	3992	944	4102	6111	0	1726	926	1959
10	9795	2060	5719	938	5796	7216	120	3993	940	4102	6013	0	1727	929	1960
11	9790	1683	5717	945	5794	7818	120	3995	938	4104	5901	0	1722	934	1959
12	10427	2199	5724	936	5800	7442	413	3994	943	4104	6196	0	1730	927	1962
13	9436	2238	5717	937	5793	8051	120	3993	944	4103	6190	0	1724	931	1959
14	9613	2184	5719	941	5795	7107	434	3994	940	4103	6118	0	1724	929	1958
15	9477	2427	5718	942	5795	7445	227	3990	932	4098	6085	0	1727	924	1959
16	9438	1506	5719	948	5797	7698	192	3993	935	4102	5786	0	1726	934	1962
17	9463	2481	5716	940	5793	7439	120	3990	942	4099	6607	0	1726	931	1961
18	9715	2516	5719	941	5796	8019	211	3992	942	4102	6701	0	1726	933	1963
19	9183	2040	5717	942	5794	7394	209	3992	940	4102	6124	0	1725	931	1960
20	9629	2141	5718	936	5794	7580	120	3998	946	4109	6152	0	1720	933	1957

Tabla A.2: Parámetros estadísticos de los registros correspondientes a la serie A-L25 (valores expresados en Newtons)

VARIABLE	PICOS				VALLES				RANGOS							
	max	min	μ_p	σ_p	RMS	max	min	μ_v	σ_v	RMS	max	min	μ_r	σ_r	RMS	
n° registro																
1	7582	3122	5367	560	5396	6363	2235	4345	555	4381	3635	0	1021	551	1160	
2	7680	3075	5366	558	5395	6458	2050	4345	555	4380	3797	0	1021	550	1160	
3	7713	3088	5366	560	5395	6438	2157	4347	557	4382	4090	0	1019	557	1161	
4	7783	3169	5368	559	5397	6492	2050	4345	554	4380	3792	0	1024	552	1163	
5	7389	3043	5367	555	5395	6481	2050	4345	556	4380	3498	0	1022	548	1160	
6	7674	3100	5367	555	5395	6699	2105	4345	559	4381	3545	0	1021	553	1162	
7	7706	3336	5368	558	5397	6357	2092	4344	553	4380	3527	0	1023	551	1162	
8	7531	3175	5367	559	5396	6413	2050	4345	553	4380	3527	0	1023	551	1162	
9	7404	3366	5367	556	5396	6425	2050	4344	559	4380	3482	0	1022	549	1160	
10	7781	3200	5367	556	5396	6254	2050	4345	557	4380	3561	0	1023	550	1161	
11	7778	2976	5366	560	5395	6611	2050	4346	556	4381	3495	0	1020	554	1160	
12	8156	3282	5370	555	5399	6388	2224	4345	559	4381	3671	0	1025	549	1162	
13	7569	3305	5366	555	5395	6748	2050	4345	559	4381	3667	0	1021	552	1161	
14	7674	3273	5367	557	5396	6189	2237	4345	557	4381	3624	0	1021	550	1160	
15	7593	3417	5366	558	5395	6390	2114	4343	552	4378	3604	0	1023	547	1160	
16	7570	2872	5367	562	5396	6539	2093	4345	554	4380	3427	0	1022	553	1162	
17	7585	3449	5365	557	5394	6386	2050	4343	558	4379	3832	0	1023	552	1162	
18	7734	3470	5367	557	5396	6730	2105	4344	558	4380	3969	0	1023	553	1163	
19	7419	3188	5366	558	5395	6360	2103	4344	557	4380	3628	0	1022	551	1161	
20	7684	3248	5367	555	5395	6469	2050	4348	561	4384	3644	0	1019	553	1159	

Tabla A.3: Parámetros estadísticos de los registros correspondientes a la serie B-H25 (valores expresados en Newtons)

VARIABLE	PICOS					VALLES					RANGOS				
	max	min	μ_p	σ_p	RMS	max	min	μ_v	σ_v	RMS	max	min	μ_r	σ_r	RMS
1	9684	2182	5809	910	5880	7213	266	3909	912	4014	7557	0	1901	1181	2238
2	9473	2723	5807	909	5877	7176	119	3903	911	4008	7402	0	1904	1179	2239
3	10331	2021	5810	913	5881	7198	119	3904	907	4008	7438	0	1905	1178	2240
4	9457	2160	5808	910	5879	7409	119	3906	913	4011	6939	0	1902	1176	2236
5	9510	2333	5808	907	5878	7303	119	3909	917	4016	7112	0	1898	1182	2236
6	10145	2585	5810	911	5881	7344	222	3903	910	4008	7405	0	1907	1180	2242
7	9534	2159	5806	911	5877	7363	175	3907	913	4012	7708	0	1900	1181	2237
8	9325	2622	5808	912	5879	7060	119	3904	911	4009	7095	0	1904	1174	2237
9	9435	2512	5809	910	5879	7474	221	3903	911	4008	7241	0	1905	1172	2237
10	9714	2446	5805	913	5877	7298	119	3907	913	4012	7358	0	1899	1183	2237
11	9901	2328	5806	912	5877	7436	186	3905	911	4010	8633	0	1901	1178	2237
12	9755	2218	5805	913	5876	7176	163	3900	907	4004	8123	0	1905	1174	2238
13	9342	2575	5810	907	5880	7394	119	3901	910	4006	7763	0	1909	1180	2244
14	9876	2398	5808	911	5879	7895	270	3903	910	4008	6952	0	1905	1178	2240
15	9604	2605	5815	905	5885	7260	119	3902	911	4007	7172	0	1913	1183	2249
16	9485	2112	5808	908	5879	7366	295	3902	909	4006	7965	0	1906	1172	2237
17	9501	2109	5807	913	5878	7188	119	3906	911	4011	7205	0	1901	1180	2238
18	9815	2674	5807	911	5878	7433	166	3905	912	4010	7645	0	1902	1178	2238
19	10218	2420	5807	910	5877	7213	285	3906	912	4011	7287	0	1900	1179	2236
20	9984	2575	5808	909	5879	7585	119	3905	911	4010	6933	0	1903	1171	2235

Tabla A.4: Parámetros estadísticos de los registros correspondientes a la serie C-H5 (valores expresados en Newtons)

VARIABLE	PICOS					VALLES					RANGOS				
	max	min	μ_p	σ_p	RMS	max	min	μ_v	σ_v	RMS	max	min	μ_r	σ_r	RMS
1	9437	3086	5897	874	5962	6748	202	3821	877	3920	8120	0	2076	1240	2419
2	9307	2920	5897	872	5961	6932	121	3815	877	3915	6728	0	2082	1229	2417
3	8917	2183	5894	872	5958	7034	197	3814	875	3913	6782	0	2080	1225	2414
4	8948	3045	5888	870	5952	6837	119	3822	881	3922	6630	0	2067	1233	2407
5	10005	2791	5893	882	5958	6537	198	3823	878	3923	7744	0	2069	1243	2414
6	9802	2406	5897	875	5961	6430	285	3818	872	3917	6885	0	2079	1237	2419
7	9045	2869	5897	878	5962	6965	285	3823	874	3922	7299	0	2074	1232	2412
8	9405	2836	5891	878	5956	7203	549	3830	881	3930	6522	0	2061	1241	2406
9	8949	2981	5898	876	5962	6470	351	3812	866	3909	7399	0	2085	1213	2413
10	8955	3012	5889	877	5954	6834	708	3819	873	3917	7575	1	2070	1243	2414
11	9301	2816	5891	884	5957	6432	608	3820	871	3918	7155	0	2071	1241	2414
12	9201	2917	5896	873	5960	6486	697	3812	868	3909	6620	0	2084	1235	2422
13	9225	2628	5893	875	5957	6847	722	3819	882	3920	7855	0	2073	1235	2414
14	9434	3070	5897	875	5961	6594	553	3818	875	3918	7605	0	2078	1235	2417
15	9067	3065	5895	871	5959	6689	321	3815	876	3915	7262	0	2079	1246	2424
16	8811	2778	5904	861	5966	6520	355	3811	874	3910	6900	1	2093	1231	2428
17	9334	3035	5891	884	5957	6972	660	3813	864	3909	7050	0	2078	1230	2415
18	9653	3106	5900	868	5963	6713	396	3813	871	3911	6550	0	2086	1231	2422
19	8948	2454	5888	886	5954	7152	391	3820	879	3920	6857	0	2068	1250	2416
20	9280	2808	5894	884	5960	6623	796	3811	859	3907	7264	0	2083	1234	2421

Tabla A.4: Parámetros estadísticos de los registros correspondientes a la serie C-H5 (Continuación)

VARIABLE	PICOS					VALLES					RANGOS				
	max	min	μ_p	σ_p	RMS	max	min	μ_v	σ_v	RMS	max	min	μ_r	σ_r	RMS
21	9125	2933	5894	874	5959	6984	238	3816	873	3914	7431	0	2079	1233	2417
22	10064	2695	5896	880	5962	6653	386	3817	867	3914	8390	0	2080	1243	2423
23	9211	3014	5889	881	5955	6887	741	3826	886	3927	6992	0	2063	1243	2409
24	9500	3265	5895	868	5959	6815	702	3823	881	3923	7050	0	2072	1230	2410
25	9356	2941	5891	886	5958	6599	813	3812	857	3907	7352	0	2079	1234	2418
26	10379	2705	5893	883	5959	6725	417	3824	880	3924	7164	0	2070	1258	2422
27	9897	2764	5891	883	5957	7102	603	3828	876	3927	8070	0	2063	1245	2410
28	9272	3176	5890	875	5955	6912	582	3819	882	3920	7046	1	2071	1231	2409
29	8892	2801	5901	866	5964	6598	642	3825	881	3925	6726	0	2076	1226	2411
30	10046	2724	5892	859	5954	6483	172	3826	899	3930	8510	0	2066	1238	2409

Tabla A.5: Parámetros estadísticos de los registros correspondientes a la serie C-H25 (valores expresados en Newtons)

VARIABLE	PICOS					VALLES					RANGOS				
	max	min	μ_p	σ_p	RMS	max	min	μ_v	σ_v	RMS	max	min	μ_r	σ_r	RMS
1	9492	2436	5896	875	5961	7280	119	3815	872	3914	7514	0	2081	1234	2419
2	9318	2825	5893	883	5959	7148	119	3817	869	3914	7243	0	2077	1239	2418
3	9518	2385	5889	883	5955	6866	119	3821	877	3921	7855	0	2068	1250	2416
4	9628	2742	5900	868	5964	7014	119	3816	880	3917	8123	0	2084	1236	2423
5	9323	2976	5898	873	5962	6943	119	3819	873	3917	8145	0	2079	1233	2417
6	9488	2424	5891	884	5957	7378	119	3818	867	3915	7216	0	2073	1231	2411
7	9338	2848	5897	866	5960	7078	119	3820	884	3921	7851	0	2077	1238	2418
8	9730	2736	5896	877	5961	7098	119	3817	874	3916	7378	0	2079	1235	2419
9	9182	2829	5895	876	5960	7077	119	3814	869	3912	7363	0	2081	1228	2416
10	9475	2463	5892	877	5957	7075	164	3819	878	3918	7397	0	2073	1241	2416
11	10374	2730	5892	875	5957	6671	119	3820	876	3919	7610	0	2072	1235	2413
12	9714	2742	5894	873	5958	6829	173	3817	875	3916	7785	0	2077	1234	2416
13	9537	2910	5893	873	5957	7091	119	3819	880	3919	7673	0	2074	1234	2413
14	9642	2867	5896	873	5961	6796	119	3816	874	3915	8631	0	2080	1228	2416
15	9517	2712	5898	869	5962	6912	387	3818	877	3917	7435	0	2081	1231	2417
16	9555	2706	5895	873	5960	6885	455	3815	874	3914	7395	0	2080	1237	2420
17	9973	2429	5892	876	5957	6915	119	3820	873	3918	7964	0	2072	1236	2413
18	9671	2993	5895	870	5959	6867	326	3816	877	3915	7957	0	2079	1230	2416
19	9587	2478	5893	876	5958	6953	405	3815	872	3913	7519	0	2078	1233	2416
20	9614	2578	5898	878	5963	7118	119	3817	871	3915	8339	0	2081	1233	2419

Tabla A.6: Parámetros estadísticos de los registros correspondientes a la serie C-H100 (valores expresados en Newtons)

VARIABLE	PICOS					VALLES					RANGOS				
	max	min	μ_p	σ_p	RMS	max	min	μ_v	σ_v	RMS	max	min	μ_r	σ_r	RMS
1	10444	2436	5895	875	5959	7664	302	3816	873	3914	7596	0	2079	1232	2416
2	10488	2439	5894	876	5959	7148	302	3818	875	3917	8146	0	2076	1238	2418
3	9609	2272	5892	878	5957	7294	302	3820	877	3919	8013	0	2073	1240	2415
4	9682	2427	5897	871	5961	7166	302	3817	878	3917	8123	0	2080	1237	2420
5	9865	2288	5897	874	5961	7285	302	3817	874	3915	7962	0	2080	1235	2419
6	10101	2424	5895	877	5960	7567	302	3817	872	3916	8183	0	2078	1233	2416
7	9982	2777	5894	871	5958	7078	302	3819	881	3920	8193	0	2075	1236	2415
8	10135	2635	5895	876	5959	7205	302	3817	874	3916	7762	0	2078	1234	2416
9	9945	2390	5896	874	5960	7439	302	3816	875	3915	8381	0	2080	1231	2417
10	10094	2463	5894	876	5959	7323	302	3817	876	3916	8310	0	2076	1237	2417
11	10374	1827	5895	874	5960	7018	302	3818	874	3917	8285	0	2077	1234	2416
12	9714	2613	5895	874	5959	7125	302	3816	873	3915	8922	0	2079	1232	2417
13	9792	2837	5893	875	5958	7298	302	3819	876	3919	7673	0	2074	1235	2414
14	9642	2520	5895	872	5959	7070	302	3817	876	3916	8631	0	2079	1232	2416
15	9781	2694	5895	876	5960	7282	302	3818	874	3916	7839	0	2078	1231	2415
16	10022	2706	5895	874	5960	7123	302	3816	874	3915	8161	0	2079	1238	2419
17	10109	2397	5894	873	5958	7150	302	3819	876	3918	7964	0	2075	1235	2415
18	10074	2499	5895	874	5960	7207	302	3817	873	3915	7957	0	2079	1231	2416
19	9847	2478	5894	874	5959	7312	302	3818	875	3917	8206	0	2076	1235	2416
20	9956	2026	5896	874	5961	7425	302	3816	874	3915	8257	0	2080	1234	2418

Tabla A.7: Parámetros estadísticos de los registros correspondientes a la serie C-L25 (valores expresados en Newtons)

VARIABLE	PICOS					VALLES					RANGOS				
	max	min	μ_p	σ_p	RMS	max	min	μ_v	σ_v	RMS	max	min	μ_r	σ_r	RMS
1	7602	3422	5472	518	5497	6292	2050	4240	516	4271	4452	0	1232	731	1433
2	7499	3653	5471	523	5495	6214	2050	4240	515	4271	4290	0	1230	734	1432
3	7617	3392	5468	523	5493	6047	2050	4243	520	4275	4652	0	1225	740	1431
4	7682	3604	5475	514	5499	6134	2050	4240	521	4272	4811	0	1234	732	1435
5	7502	3743	5473	517	5498	6092	2050	4242	517	4273	4825	0	1232	730	1432
6	7600	3415	5469	524	5494	6350	2050	4241	513	4272	4275	0	1228	729	1428
7	7511	3667	5473	513	5497	6172	2050	4242	524	4274	4651	0	1231	733	1432
8	7743	3600	5472	520	5497	6184	2050	4240	518	4272	4371	0	1232	732	1433
9	7418	3655	5471	519	5496	6172	2050	4239	515	4270	4361	0	1233	728	1431
10	7592	3439	5469	519	5494	6171	2077	4242	520	4273	4381	0	1228	735	1431
11	8124	3597	5470	518	5494	5931	2050	4242	519	4274	4508	0	1228	732	1429
12	7734	3604	5471	517	5495	6025	2082	4241	518	4272	4611	0	1230	731	1431
13	7629	3703	5470	517	5495	6180	2050	4242	522	4274	4545	0	1229	731	1430
14	7691	3678	5472	517	5497	6005	2050	4240	518	4271	5113	0	1232	728	1431
15	7617	3586	5473	515	5498	6074	2209	4241	520	4273	4403	0	1232	729	1432
16	7639	3583	5472	517	5496	6058	2249	4240	518	4271	4381	0	1232	733	1434
17	7887	3418	5470	519	5494	6076	2050	4242	517	4274	4717	0	1227	732	1429
18	7708	3753	5472	516	5496	6047	2173	4240	519	4272	4713	0	1232	729	1431
19	7659	3447	5470	519	5495	6098	2219	4239	516	4271	4454	0	1231	730	1431
20	7674	3507	5473	520	5498	6196	2050	4240	516	4272	4939	0	1233	731	1433

Tabla A.8: Parámetros estadísticos de los registros correspondientes a la serie D-H25 (valores expresados en Newtons)

VARIABLE	PICOS					VALLES					RANGOS				
	max	min	μ_p	σ_p	RMS	max	min	μ_v	σ_v	RMS	max	min	μ_r	σ_r	RMS
1	9588	3182	6009	823	6065	6456	119	3703	822	3793	8595	0	2306	1338	2666
2	9416	3160	6009	823	6065	6622	119	3704	823	3794	8769	0	2306	1343	2668
3	9765	2756	6007	821	6063	6663	213	3707	828	3799	8974	0	2299	1346	2664
4	10036	3168	6003	833	6060	6485	119	3708	822	3798	8800	0	2294	1349	2661
5	9945	3166	6010	819	6065	6639	119	3702	822	3792	8846	0	2307	1333	2665
6	9503	3063	6006	821	6062	6805	119	3706	824	3796	8135	0	2300	1344	2664
7	9450	2813	6004	824	6060	6475	132	3708	823	3799	7718	0	2296	1341	2659
8	9461	2925	6008	824	6064	6458	160	3704	820	3794	8685	0	2304	1339	2665
9	9533	3037	6009	824	6065	6725	119	3705	826	3796	8336	0	2304	1346	2668
10	9972	3149	6007	822	6063	6640	284	3706	826	3797	8554	0	2302	1343	2665
11	9701	3147	6002	824	6059	6438	442	3711	829	3802	8519	0	2292	1349	2659
12	10029	3144	6004	822	6060	6680	119	3708	825	3798	8017	0	2297	1344	2661
13	9536	3334	6004	826	6061	6790	119	3708	825	3799	9044	0	2296	1348	2663
14	9843	2925	6009	823	6065	6716	367	3705	824	3795	8353	0	2304	1341	2666
15	9869	3111	6007	823	6064	6980	119	3703	821	3793	8664	0	2305	1345	2669
16	9443	3057	6007	824	6063	6589	119	3705	825	3796	8361	0	2302	1344	2666
17	9725	3424	6007	820	6063	6704	119	3708	828	3799	8689	0	2300	1346	2664
18	10090	2789	6006	824	6063	6321	119	3705	825	3796	8924	0	2301	1345	2665
19	9427	3134	6006	825	6063	6660	119	3708	825	3799	8239	0	2299	1346	2664
20	9585	3111	6007	826	6064	6368	119	3709	824	3800	8345	0	2298	1346	2663

Tabla A.9: Parámetros estadísticos de los registros correspondientes a la serie D-L25 (valores expresados en Newtons)

VARIABLE	PICOS					VALLES					RANGOS				
	max	min	μ_p	σ_p	RMS	max	min	μ_v	σ_v	RMS	max	min	μ_r	σ_r	RMS
1	7659	3864	5539	487	5560	5804	2050	4173	487	4201	5091	0	1366	793	1579
2	7557	3851	5539	488	5561	5902	2050	4174	488	4202	5194	0	1366	795	1580
3	7764	3612	5538	486	5559	5926	2106	4176	490	4204	5315	0	1362	797	1578
4	7924	3856	5535	493	5557	5821	2050	4176	487	4205	5212	0	1359	799	1577
5	7871	3855	5539	485	5561	5912	2050	4173	487	4201	5239	0	1367	790	1579
6	7608	3794	5537	487	5558	6010	2050	4175	488	4203	4819	0	1362	796	1578
7	7577	3646	5536	488	5557	5815	2058	4176	488	4204	4572	0	1360	795	1575
8	7584	3712	5538	488	5560	5805	2074	4174	486	4202	5145	0	1365	793	1579
9	7627	3779	5539	488	5560	5963	2050	4174	490	4203	4939	0	1365	797	1581
10	7886	3845	5538	487	5559	5912	2148	4175	489	4203	5066	0	1363	795	1578
11	7726	3844	5535	488	5557	5793	2242	4178	491	4206	5047	0	1357	799	1575
12	7920	3842	5536	487	5557	5936	2050	4176	489	4204	4749	0	1360	796	1576
13	7628	3954	5536	490	5558	6001	2050	4176	489	4204	5357	0	1360	799	1577
14	7810	3712	5539	488	5560	5957	2197	4174	488	4202	4948	0	1365	794	1579
15	7825	3823	5538	488	5559	6114	2050	4173	486	4201	5132	0	1365	797	1581
16	7573	3790	5538	488	5559	5882	2050	4174	489	4203	4952	0	1364	796	1579
17	7740	4008	5538	486	5559	5950	2050	4176	490	4204	5147	0	1362	797	1578
18	7956	3632	5537	488	5559	5724	2050	4174	489	4203	5286	0	1363	797	1579
19	7564	3836	5537	489	5559	5924	2050	4176	489	4204	4881	0	1362	797	1578
20	7657	3822	5538	489	5559	5752	2050	4177	488	4205	4943	0	1361	797	1578

APÉNDICE B

RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.

En este apéndice se incluyen los resultados obtenidos mediante simulación con el programa FASTRAN II, con todos los valores de los parámetros de la ecuación de crecimiento considerados en el capítulo 5, para todos los procesos de carga considerados en este estudio. Todos los resultados corresponden a vidas de crecimiento expresadas en ciclos.

Tabla B.1: Resultados de simulación para el proceso A-H25.

PROCESO	Simulación ajuste inicial				Simulación ajuste modificado			
	$\beta=1$		α variable		$\beta=1$		$\alpha=1.73$	
n° registro	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	
1	154978	136233	135610	227632	266497	260905	262023	
2	168413	149950	140925	261805	297939	278117	275475	
3	171561	151491	143430	248915	284295	283036	279931	
4	168964	145650	139780	300311	334953	285729	277541	
5	149121	137437	134552	214082	251377	256145	262181	
6	167031	148584	142229	252503	288545	279453	273311	
7	155760	140819	138797	228559	266537	267435	270046	
8	160651	144711	137557	212601	250642	263940	272099	
9	143986	135180	132819	205378	240488	253418	258662	
10	173640	149817	143677	265075	305118	288033	284457	
11	177277	157412	144799	252900	295908	290901	284048	
12	189831	155443	144874	334706	351177	309254	294334	
13	163433	143657	141076	236536	275928	274914	271951	
14	167092	152614	145177	244382	281158	279887	279005	
15	157741	141221	137419	276651	309532	280971	267249	
16	171066	147894	142285	245940	290773	278195	275597	
17	161371	139957	135847	240862	286508	274927	269589	
18	154399	142330	137533	227821	267735	261189	268046	
19	150408	137772	137430	213338	250953	257331	266061	
20	173543	146537	140590	256217	294009	281601	275095	
μ_N	164013	145235	139820	247311	284504	275269	273335	
σ_N	10731	6256	3573	30399	27224	13453	8365	

Tabla B.2: Resultados de simulación para el proceso B-H25.

PROCESO	Simulación ajuste inicial			Simulación ajuste modificado			
	$\beta=1$			$\beta=1$			
n° registro	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$
1	122420	100682	94208	196399	203217	188476	184475
2	126275	103491	95922	173300	208354	188250	191048
3	136150	104898	96777	239111	228732	207911	193690
4	110478	92575	89730	181502	180079	172285	179997
5	116669	94613	91251	169578	193671	180641	178241
6	139393	103385	95661	198304	232368	200676	193700
7	120914	97977	93672	170705	199992	185270	191484
8	111798	94898	90462	165358	186479	173634	177730
9	110416	94533	91026	166581	185499	175753	182168
10	128124	102551	93849	193331	210123	192497	183005
11	127236	97692	91955	192240	209939	187084	189056
12	128698	104007	96648	204743	213639	194695	195155
13	104978	94177	89973	162844	173214	168374	175255
14	135519	106543	96367	200383	227672	205246	192696
15	126857	98509	93245	181069	206777	191681	191008
16	114954	97828	92572	167298	190824	177880	185079
17	117857	95829	92625	171777	196468	176790	187365
18	126342	98939	93006	200292	208970	193647	191082
19	133674	103025	94284	214174	222968	199070	187877
20	132674	103586	95010	270612	222892	200882	194335
μ_N	123571	99487	93412	190980	205094	188037	187222
σ_N	9524	4118	2170	26451	16446	11254	5978

Tabla B.3: Resultados de simulación para el proceso C-H5.

PROCESO	Simulación ajuste inicial									
	$\beta=1$									
n° registro	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.3$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	$\alpha=1.9$	$\alpha=2.1$	$\alpha=2.3$	α variable		
1	120434	109817	85598	80959	81324	83419	88102	164692		
2	114640	102700	86033	78991	79275	81071	86550	159692		
3	91960	89416	80964	79085	79968	83011	87843	136291		
4	94758	90287	82880	79721	80062	83010	88683	132161		
5	146186	139946	116602	97429	91502	89835	91200	200045		
6	134259	129676	106637	91244	86152	87862	90038	192224		
7	94295	89300	79561	77190	79086	82135	87028	134117		
8	114005	102871	86582	80234	80697	83158	87861	178531		
9	94872	90081	80570	79065	81181	83113	87870	134270		
10	91372	85686	77919	75792	77556	80651	86360	134051		
11	106886	99518	88655	83511	82287	83272	87611	147445		
12	107598	98046	84984	79431	80304	82457	87014	154756		
13	106116	91853	91165	84879	83466	83745	87900	162904		
14	123862	96929	88168	83196	82679	84080	88168	195821		
15	105485	98653	88065	80769	80407	82203	86897	147524		

Tabla B.3: Resultados de simulación para el proceso C-H5 (continuación).

PROCESO		Simulación ajuste inicial									
C-H5		$\beta=1$									
n° registro		$\alpha=1.2$	$\alpha=1.3$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	$\alpha=1.9$	$\alpha=2.1$	$\alpha=2.3$	α variable		
16		94694	86039	75665	75701	77385	80447	86143	137780		
17		109143	102357	88145	83574	82810	84583	88845	163406		
18		134592	126650	100253	87518	85602	85630	89869	211161		
19		93976	87566	79153	78702	79618	82260	87829	136867		
20		115138	105715	93828	87152	85715	86239	90062	169457		
21		109772	104035	87119	81433	81955	83143	88390	142786		
22		165613	153663	128931	93520	88795	89304	92176	218301		
23		100480	86989	80522	76951	78889	81406	86889	166286		
24		118344	111378	90802	83100	82886	84079	88230	192501		
25		109023	98426	83767	80339	81287	83299	87910	168301		
26		194166	184859	143896	98792	91108	88777	90971	282432		
27		138904	128406	102728	89132	87478	86336	90125	227023		
28		114640	104745	87970	81998	80877	82589	87473	164138		
29		87646	82923	74708	75791	78072	81533	86844	135784		
30		162377	139084	107453	90876	87217	87876	91126	243495		
μ_N		116508	107254	91644	83203	82521	84017	88400	171141		
σ_N		24466	22993	15460	6111	3752	2539	1568	36479		

Tabla B.4: Resultados de simulación para el proceso C-H5.

PROCESO C-H5	Simulación ajuste inicial					
	$\alpha=1.5$ $\beta=1.3$	$\alpha=1.7$ $\beta=1.3$	$\alpha=1.5$ $\beta=1.4$	$\alpha=1.7$ $\beta=1.5$	$\alpha=1.9$ $\beta=1.5$	
1	146557	107572	174121	161632	116757	
2	134537	105435	177406	156045	112858	
3	111395	98734	129263	121728	105870	
4	114728	98853	134932	130120	106892	
5	200187	165404	239646	248225	184235	
6	183063	147961	221202	217678	166980	
7	115470	97652	140672	133725	106640	
8	141487	104822	167685	151345	112837	
9	109764	96546	126939	122720	101969	
10	106674	93112	125494	119707	100078	
11	138426	110855	165822	157958	123990	
12	129503	101913	158203	135442	109408	
13	134042	112448	157102	155820	120003	
14	147459	107542	175520	166610	114754	
15	125264	107730	152227	151673	118630	

Tabla B.4: Resultados de simulación para el proceso C-H5 (continuación).

PROCESO	Simulación ajuste inicial									
	$\alpha=1.5$	$\beta=1.3$	$\alpha=1.7$	$\beta=1.3$	$\alpha=1.5$	$\beta=1.4$	$\alpha=1.7$	$\beta=1.5$	$\alpha=1.9$	$\beta=1.5$
C-H5										
n° registro										
16	101302	88513	129931	115189	95572					
17	130341	110762	157956	147177	118587					
18	181655	133152	209532	200168	142306					
19	105534	95014	124457	117599	102744					
20	144615	120270	174868	165460	133521					
21	135226	109067	163477	156256	118945					
22	240091	183577	285391	290498	215626					
23	112277	93397	134582	127718	100497					
24	145674	112723	179824	170913	118796					
25	127471	105213	156931	139590	112880					
26	278316	219116	330239	332711	250408					
27	181174	142195	223486	211997	154840					
28	139705	108724	169984	161358	114838					
29	98209	87541	110764	111185	93233					
30	199803	151736	267879	227676	165667					
μ_N	145332	117253	175518	166864	128012					
σ_N	41185	29540	50599	51744	35662					

Tabla B.5: Resultados de simulación para el proceso C-H25.

PROCESO	Simulación ajuste inicial				Simulación ajuste modificado			
	$\beta=1$		α variable		$\beta=1$		$\alpha=1.73$	
C-H25	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	$\alpha=1.73$
n° registro								
1	98318	82051	77447	149724	168219	148940	151654	151654
2	105508	86439	80825	157963	184867	160265	160979	160979
3	107130	86223	80135	159803	190152	159529	160383	160383
4	104740	82241	78695	147100	173621	153859	157861	157861
5	96276	81737	79328	140707	167154	148116	154952	154952
6	118746	91676	83516	162519	186865	170798	169108	169108
7	108066	85619	79786	153669	181663	161608	163098	163098
8	107630	86344	81151	188841	206105	163178	159437	159437
9	102926	84850	79913	143881	170901	155778	159928	159928
10	106732	85257	80358	159069	183502	159531	156698	156698
11	112484	86425	81126	182455	206392	167534	166792	166792
12	113269	86748	81436	161724	189858	165558	164438	164438
13	95361	81762	78212	137225	159799	145355	152346	152346
14	107921	87590	81569	172786	196388	164516	163106	163106
15	115759	88841	81954	167308	193161	169604	167879	167879
16	111113	87131	81056	163503	190297	162934	162055	162055
17	104944	85636	80074	162815	190422	157609	161976	161976
18	114763	88776	80729	167068	190871	169572	165859	165859
19	100183	83780	79662	159278	188660	157606	158740	158740
20	115878	86055	82378	160495	188126	169600	168497	168497
μ_N	107387	85759	80468	159897	185351	160575	161289	161289
σ_N	6481	2497	1398	12452	11921	7283	4918	4918

Tabla B.5: Resultados de simulación para el proceso C-H25 (continuación).

PROCESO	Simulación ajuste inicial			
	C-H25			
	n° registro	$\beta=1$	$\alpha=1.5$ $\beta=1.2$	$\beta=1.3$
1	82051	131291	172085	
2	86439	137939	185992	
3	86223	143948	182997	
4	82241	135063	181591	
5	81737	129430	162609	
6	91676	157833	199394	
7	85619	141600	188205	
8	86344	141423	189573	
9	84850	139935	177754	
10	85257	136593	188394	
11	86425	150414	205822	
12	86748	147962	194567	
13	81762	126504	160223	
14	87590	147614	197283	
15	88841	153081	201305	
16	87131	145026	189345	
17	85636	139091	186949	
18	88776	154806	195130	
19	83780	136955	175029	
20	86055	152220	200027	
μ_N	85759	142436	186714	
σ_N	2497	8468	12113	

Tabla B.6: Resultados de simulación para el proceso C-HI00.

PROCESO	Simulación ajuste inicial				Simulación ajuste modificado			
	$\beta=1$				$\beta=1$			
	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	$\alpha=1.73$
C-HI00								
n° registro								
1	113302	88291	80582	160544	189043	163801	163619	163619
2	104580	86729	81763	174359	191246	165849	161053	161053
3	107325	86575	80446	161004	181619	159897	158168	158168
4	107364	84576	80498	159548	182098	160750	159134	159134
5	96989	82723	79555	149467	168826	151933	152901	152901
6	118433	88315	81832	175509	199919	171768	163067	163067
7	110878	86561	81697	160668	182215	162467	159415	159415
8	111867	87885	81437	173671	196305	164585	162194	162194
9	111093	86831	82346	159106	182770	164961	162041	162041
10	118013	88825	81296	173391	196024	173316	165545	165545
11	113525	86772	81107	172059	195192	166479	161677	161677
12	109089	86483	81435	152390	181860	162368	160066	160066
13	106018	86648	80792	151660	176114	156872	157727	157727
14	106458	84121	80428	159128	181555	155287	155459	155459
15	111230	89203	82194	168957	189494	165748	163770	163770
16	112986	89618	82292	173416	199338	169560	162897	162897
17	107600	89485	81767	165819	188173	163701	162039	162039
18	105580	84663	80760	162121	182755	160151	160431	160431
19	103106	85905	81594	159905	177904	159274	158242	158242
20	107230	87060	83538	157212	181343	163196	158800	158800
μ_N	109133	86863	81368	163497	186190	163098	160412	160412
σ_N	4909	1804	868	7944	8069	5091	2957	2957

Tabla B.7: Resultados de simulación para el proceso D-H25.

PROCESO	Simulación ajuste inicial				Simulación ajuste modificado			
	$\beta=1$				$\beta=1$			
	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	$\alpha=1.73$
D-H25								
n° registro								
1	89672	72552	67983	134908	152179	133433		131563
2	88117	71109	67524	137212	156481	132324		131755
3	101809	75032	68224	182654	197120	149674		138417
4	109242	78021	69627	170725	187797	159363		143335
5	101469	74410	67724	160011	170587	146165		138509
6	88523	71585	67477	141150	156185	129289		128589
7	89297	70598	67020	130110	153474	132349		129552
8	97341	74409	67798	144840	158537	142073		134743
9	92471	73884	68300	142358	162745	136106		132854
10	106576	74308	68471	171516	202332	152051		136951
11	101268	75391	69510	160425	179891	146496		137285
12	101807	75202	69749	196101	205474	140400		137980
13	102049	78541	70762	151538	169517	148096		140234
14	93971	73769	68983	140494	165191	136233		132969
15	98342	74812	69114	146137	157934	139339		136246
16	87980	72704	66947	127677	145832	129214		129288
17	101227	76684	70043	150288	170930	147764		140847
18	109953	80917	72299	179798	199645	159447		149178
19	93997	73562	68927	134530	154049	136798		135120
20	97380	76115	69407	147253	168786	139376		136282
μ_N	97625	74680	68794	152486	170734	141800		136085
σ_N	6765	2474	1299	18521	18001	8859		4941

Tabla B.8: Resultados de simulación para el proceso A-L25.

PROCESO	Simulación ajuste inicial			Simulación ajuste modificado			
	$\beta=1$			$\beta=1$			
	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$
n° registro							
1	501620	536101	597630	804645	1173757	1328365	1683378
2	524419	547938	606229	819637	1211845	1350402	1696556
3	519154	551504	604948	815963	1185028	1336441	1696701
4	562939	558872	608731	960897	1346615	1415654	1736645
5	476431	529391	605276	746870	1062597	1331958	1771138
6	505470	538804	601882	818533	1185734	1347556	1708044
7	508935	539483	605064	797245	1142691	1318925	1702421
8	492932	543226	605743	785913	1072552	1321205	1711860
9	464121	521880	598486	753905	1035771	1305726	1742229
10	532360	554164	611917	858609	1257439	1364821	1715804
11	543024	562862	611476	827506	1218413	1355443	1699530
12	596881	577397	622236	1001025	1465987	1430561	1732604
13	502074	542459	605268	787780	1113535	1316815	1697125
14	526044	557518	612706	827480	1201511	1354607	1688154
15	521007	549197	605761	870200	1234557	1361596	1714703
16	527489	553758	613550	814998	1134711	1336680	1703066
17	513105	538879	598371	813830	1173269	1352812	1704916
18	497215	541110	606154	838008	1171723	1326798	1696850
19	484247	530402	598253	771216	1080145	1318979	1700434
20	525954	550357	604865	813057	1210731	1354456	1700160
μ_N	516271	546265	606227	826366	1183931	1346490	1710116
σ_N	29069	12540	5930	59766	96510	30418	20460

Tabla B.9: Resultados de simulación para el proceso C-L25.

PROCESO	Simulación ajuste inicial			Simulación ajuste modificado			
	$\beta=1$			$\beta=1$			
n° registro	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$
1	292585	302843	335299	438800	644984	695167	883432
2	302221	307600	338493	453792	648315	713202	892163
3	311408	312098	340352	455920	657712	716596	891246
4	296985	302385	334379	448057	653977	711351	887113
5	290813	304644	339768	463444	645142	717622	901698
6	318881	317571	343789	472607	643208	724145	901212
7	308128	310897	340356	469228	658970	719182	891294
8	315462	313099	341937	517798	741588	742712	905937
9	294494	306977	338530	438217	622330	703899	893576
10	303677	303190	337041	462682	662285	717998	893042
11	341345	317693	344789	577800	922431	761386	919050
12	327040	315753	342969	525151	688240	743669	915783
13	279727	298684	334958	434614	624734	700524	888302
14	311117	310376	341777	472131	672256	728485	902247
15	325014	318044	346329	502668	685402	739336	911852
16	315021	310097	339103	487631	679099	726439	891095
17	306210	307994	339752	471702	733194	724103	898206
18	324115	314717	343372	505236	703007	734483	908323
19	311731	312940	344125	477351	696771	736574	910446
20	321090	315516	342626	493845	670363	724243	899718
μ_N	309853	310156	340487	478434	682700	724056	899287
σ_N	14276	5574	3295	33953	63016	15623	9821

Tabla B.10: Resultados de simulación para el proceso D-L25.

PROCESO	Simulación ajuste inicial				Simulación ajuste modificado			
	$\beta=1$				$\beta=1$			
	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	α variable	$\alpha=1.2$	$\alpha=1.5$	$\alpha=1.73$	$\alpha=1.73$
D-L25								
n° registro								
1	252629	250117	272998	373567	531489	567866		682277
2	258389	252782	273983	394747	540744	576142		688818
3	285818	268134	284471	444177	643644	620190		721201
4	296273	266068	282663	453110	611734	603585		701039
5	275315	260769	279640	432587	590643	599214		707025
6	250074	251881	275331	378706	546768	579598		689129
7	252732	250288	275404	387807	528252	572955		691181
8	266555	259546	277118	392722	549723	591110		699687
9	256049	251967	275525	386720	545007	583457		690097
10	301215	266138	282845	487295	667627	639005		730342
11	283733	267085	284276	456268	631462	625546		725131
12	278733	260420	279329	439528	697425	605200		704065
13	279745	263556	282166	427136	582453	607629		701099
14	262425	256205	278057	400764	569371	591999		699195
15	273886	261625	281575	416818	568574	587716		697605
16	245311	252461	275096	357950	499890	559373		680503
17	278174	267321	285585	426346	585545	607964		707658
18	306715	274523	286358	495281	692182	634945		725849
19	254515	254480	276044	373538	516372	567546		681053
20	268825	261706	280339	402517	559649	590202		698477
μ_N	271356	259854	279440	416379	582928	595562		701072
σ_N	17237	6893	4041	37177	55981	22009		14586

