

CAPITULO 4

FASTRAN II – A FATIGUE CRACK GROWTH STRUCTURAL ANALYSIS PROGRAM

4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

El programa **FASTRAN II**, Newman (1992), es un código de predicción de la vida a fatiga basado en el concepto de cierre de grieta y usado para predecir el crecimiento de la grieta desde una longitud inicial hasta el fallo para las configuraciones de grieta más habituales en los componentes mecánicos. El método de predicción de vida a fatiga utilizado en **FASTRAN II** está construido sobre el modelo analítico de cierre de grieta desarrollado por Newman (The Strip Yield Model) y revisado en el capítulo 3 de este proyecto.

El programa permite la utilización de una gran variedad de tipologías de carga, como son:

- *Cargas de amplitud constante.*
- *Cargas de amplitud variable.*
- Secuencia de cargas de vuelo FALSTAFF.
- Secuencia de cargas de vuelo Space Shuttle (transbordador espacial).
- Secuencia de cargas Gaussiana.
- Secuencia de cargas de vuelo de helicóptero Felix-28.
- *Espectros de carga.*

El programa dispone además de 17 configuraciones de grieta diferentes, entre las que se encuentran la tipología de probetas y disposiciones de grieta más frecuentes. Sin embargo, el usuario tiene la posibilidad, modificando el factor de corrección superficial, de particularizar o añadir otras diferentes.

A continuación se revisan algunos de los aspectos más interesantes del programa: ley de crecimiento utilizada, tensión de apertura, modelo de cierre de grieta y finalmente se incluyen algunas de las configuraciones de grieta disponibles.

Ley de crecimiento: El programa FASTRAN II utiliza la ley de crecimiento propuesta por Newman:

$$\frac{da}{dN} = C_1 \Delta K_{eff}^{C_2} \frac{1 - \left(\frac{\Delta K_0}{\Delta K_{eff}} \right)^2}{1 - \left(\frac{K_{max}}{C_5} \right)^2} \quad \text{donde} \quad \Delta K_0 = C_3 \left(1 - C_4 \frac{S_{min}}{S_{max}} \right) \quad (20)$$

Sin embargo, también es posible definir la velocidad de crecimiento, $\frac{da}{dN}$, en función de ΔK_{eff} , con la interpolación lineal de un conjunto de puntos definidos. Permitiendo utilizar leyes de crecimiento obtenidas experimentalmente.

Tensión de apertura: Los ensayos de fatiga en materiales metálicos muestran que la grieta permanece cerrada durante una parte del ciclo de carga. El concepto de cierre de grieta se ha usado para correlacionar la velocidad de crecimiento de la grieta con las cargas de amplitud constante y ha demostrado que es un factor importante en el efecto de interacción de las cargas con la velocidad de crecimiento para ciclos de carga de amplitud variable. El programa, haciendo uso del modelo The Strip Yield Model, cuantifica los efectos de interacción de las cargas, tanto de aceleración como de retardo, sobre la velocidad de crecimiento de la grieta a través de la tensión de apertura, S_{op} , calculada en función de la historia de carga aplicada anteriormente.

Activación del modelo de cierre: El tiempo de calculo ciclo a ciclo de la tensión de apertura hace excesivamente lento el análisis, y a veces, imposible. Sin embargo, es conocido que el valor de la tensión de apertura producida por una sobrecarga varía muy poco en los ciclos de menor amplitud que siguen a ésta. El programa calcula la tensión de apertura en función de la anterior historia de carga aplicada; sin embargo, durante el crecimiento de la grieta, la tensión de apertura permanece constante para un determinado incremento de longitud, Δc , y de esta forma el programa se ejecuta más rápidamente y evita realizar cálculos en la mayor parte innecesarios. Las cargas aplicadas que durante este

intervalo de crecimiento se registran son la máxima tensión aplicada, la mínima tensión aplicada entre todos los ciclos previos al de la máxima tensión y la mínima tensión entre los ciclos posteriores a la máxima almacenada. Cuando la grieta ha crecido ese Δc se activa el modelo de cierre y se calcula el nuevo valor de S_{op} usando las cargas registradas y Δc . Es posible que otras circunstancias activen el modelo antes de que se produzcan los ciclos necesarios para que la grieta avance Δc . Una de ellas puede ser el elevado número de ciclos necesario para alcanzar el crecimiento deseado; el programa activa automáticamente el modelo de cierre cuando se exceden los 1000 ciclos, evitando de esta forma que una sobrecarga producida en los primeros ciclos de carga tras una actualización no sea tomada en cuenta. También se activa el modelo si aparecen grandes sobrecargas.

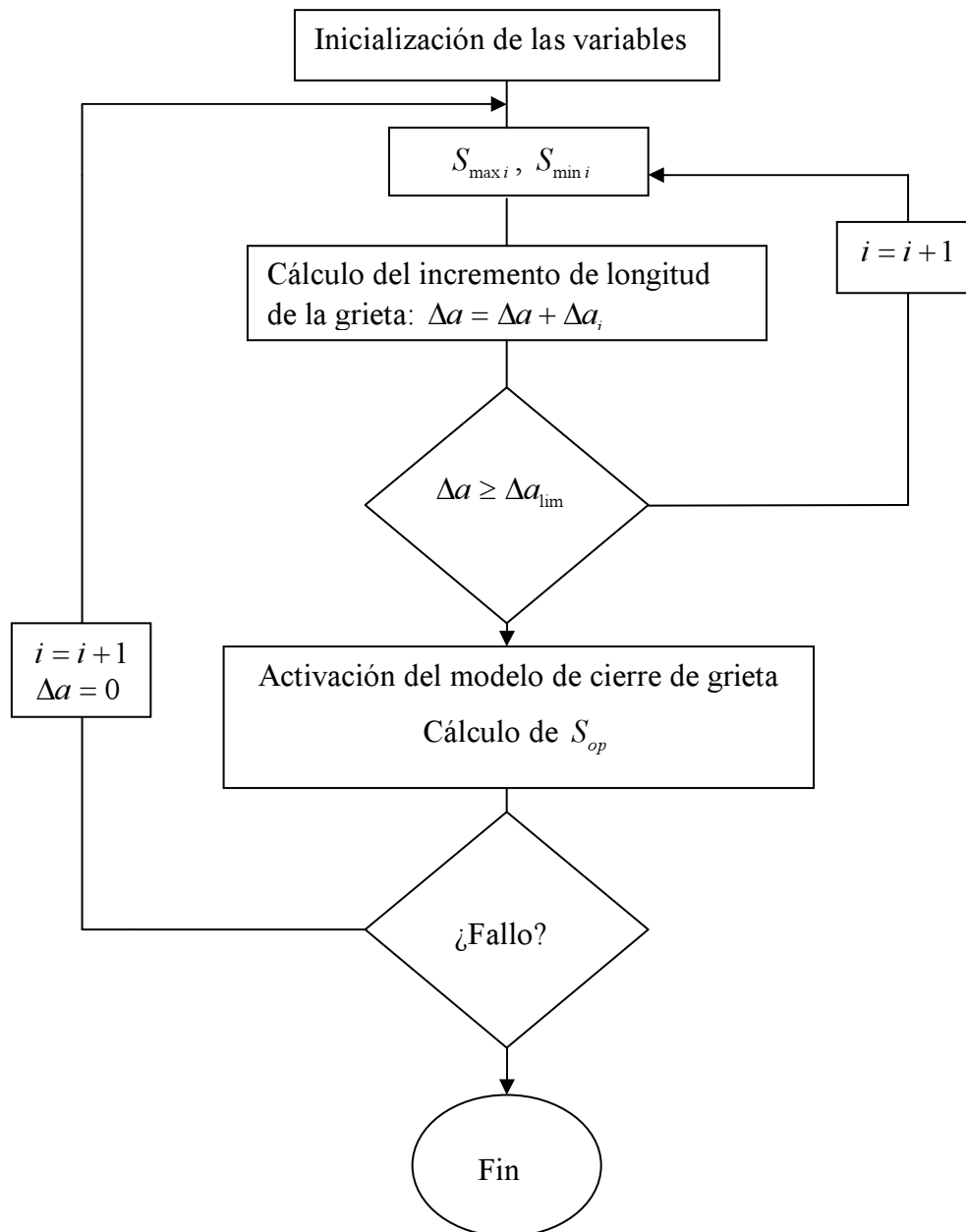


Figura 4.1: Diagrama de flujo del algoritmo de activación del modelo de cierre.

Configuraciones de grieta: Uno de los problemas de los métodos basados en el Strip Yield Model es que necesitan conocer previamente las funciones f y g utilizadas en la ecuación de compatibilidad de movimientos para la geometría y forma de carga utilizada, hecho que no ocurre en la mayoría de los casos. Este problema se resuelve con el desarrollo de aproximaciones para nuevos casos. El programa **FASTRAN II** dispone de 17 configuraciones de grieta diferentes. Algunas de estas configuraciones se muestran a continuación:

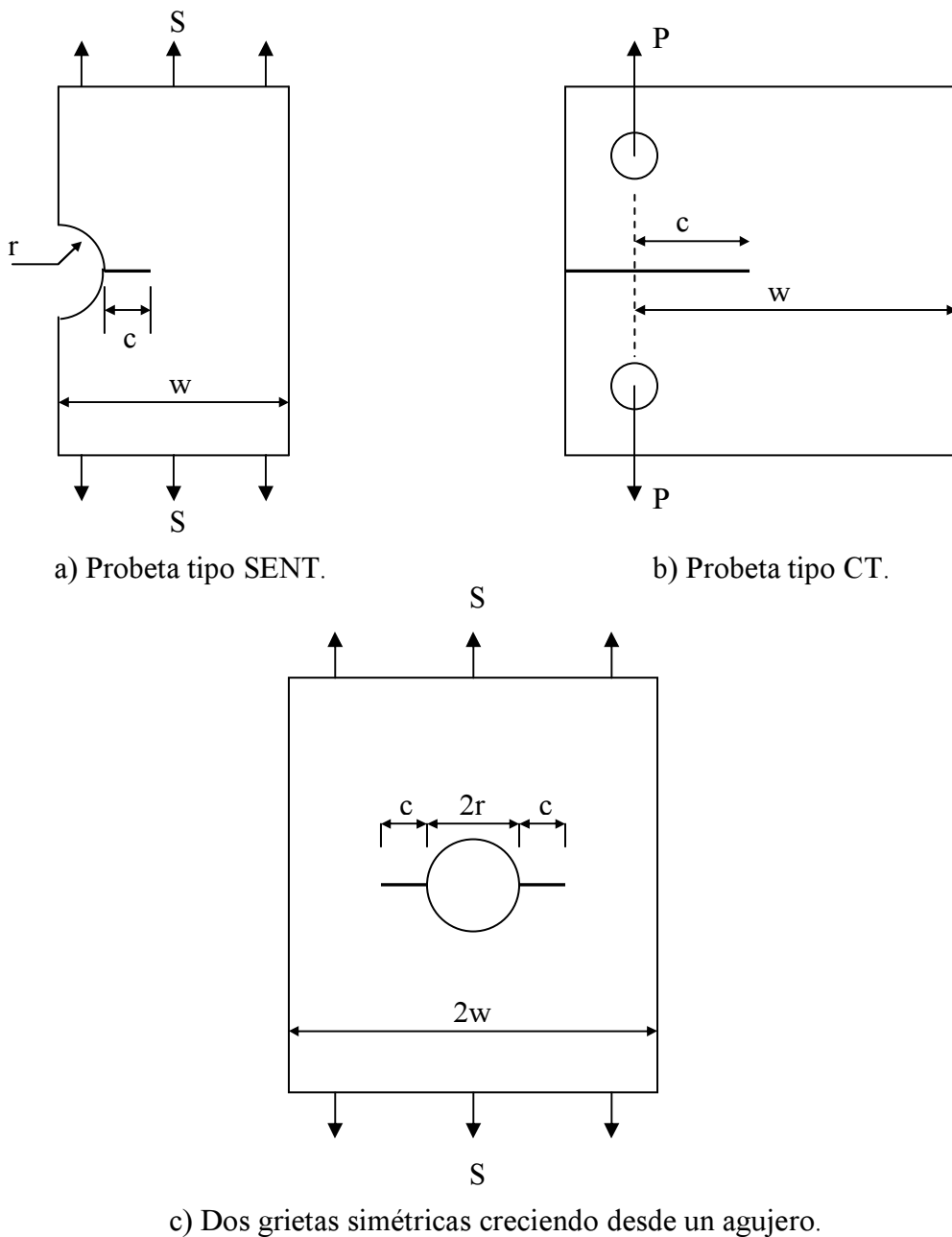


Figura 4.2 Varias configuraciones de grieta definidas en el programa.

FASTRAN II permite al usuario definir nuevas configuraciones de grieta programando en la subrutina *SIF4* el factor de corrección superficial empleado en la ecuación del factor de intensidad de tensiones para la geometría de grieta deseada. En la figura siguiente se muestra la geometría que incluye por defecto dicha subrutina.

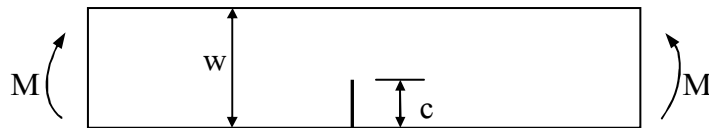


Figura 4.3 *Ejemplo de una configuración definida por el usuario.*

4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

El programa **FASTRAN II** emplea para obtener el crecimiento de la grieta una aproximación basada en su determinación ciclo a ciclo. Calculados los incrementos de longitud de grieta producidos en cada ciclo, se suman sucesivamente para obtener la evolución del crecimiento con el número de ciclos.

Existen métodos ciclo a ciclo que no consideran el efecto de secuencia de las cargas y otros que sin embargo consideran algún tipo de efecto de secuencia. Entre estos últimos los más utilizados son los derivados del método de Willemborg y los que aplican el concepto de cierre de grieta. Los programas de análisis ciclo a ciclo incluyen una serie de pasos que responden, en general, al esquema que se indica a continuación:

- Definición de las propiedades del material utilizado, de las dimensiones del elemento y de la longitud inicial de la grieta.
- Determinación del factor de corrección superficial $f(g)$ que permitirá determinar K en función de la longitud de la grieta y de la tensión nominal. Para obtener este

factor de corrección superficial, el programa **FASTRAN II** incluye en su código librerías de funciones para las diversas geometrías de grieta.

- Definición de la ley de crecimiento y del modelo de retardo a aplicar (the strip yield model).
- Definición de los parámetros del modelo de crecimiento: factores de intensidad de tensiones umbral y crítico, constantes de la ley de crecimiento, etc.
- Definición de los parámetros del modelo de retardo y del criterio de fallo.
- Obtención de la historia de tensiones, cuyos valores de salida serán una secuencia de valores de $S_{\max}$ y $S_{\min}$ a aplicar. La historia de carga suministrada al programa **FASTRAN II** podrá estar en forma de bloques de ciclos de carga, definida punto a punto, ciclo a ciclo o seleccionada entre las disponibles en el código del propio programa.
- Determinación de $K_{\max}$ y ΔK .
- Aplicación del modelo de retardo si es necesario.
- Determinación del incremento de longitud de la grieta producido y cálculo de la nueva longitud.

Este modelo puede considerarse general para cualquier método de predicción. Los elementos diferenciadores serán por ejemplo: el método empleado para considerar el efecto secuencia, el tipo de ley de crecimiento empleada, el método de contar ciclos, la determinación del factor de corrección superficial o el criterio de fallo utilizado. En la figura 4.4 se muestra el diagrama de flujo de un programa genérico de crecimiento de grietas basado en un modelo de crecimiento ciclo a ciclo.

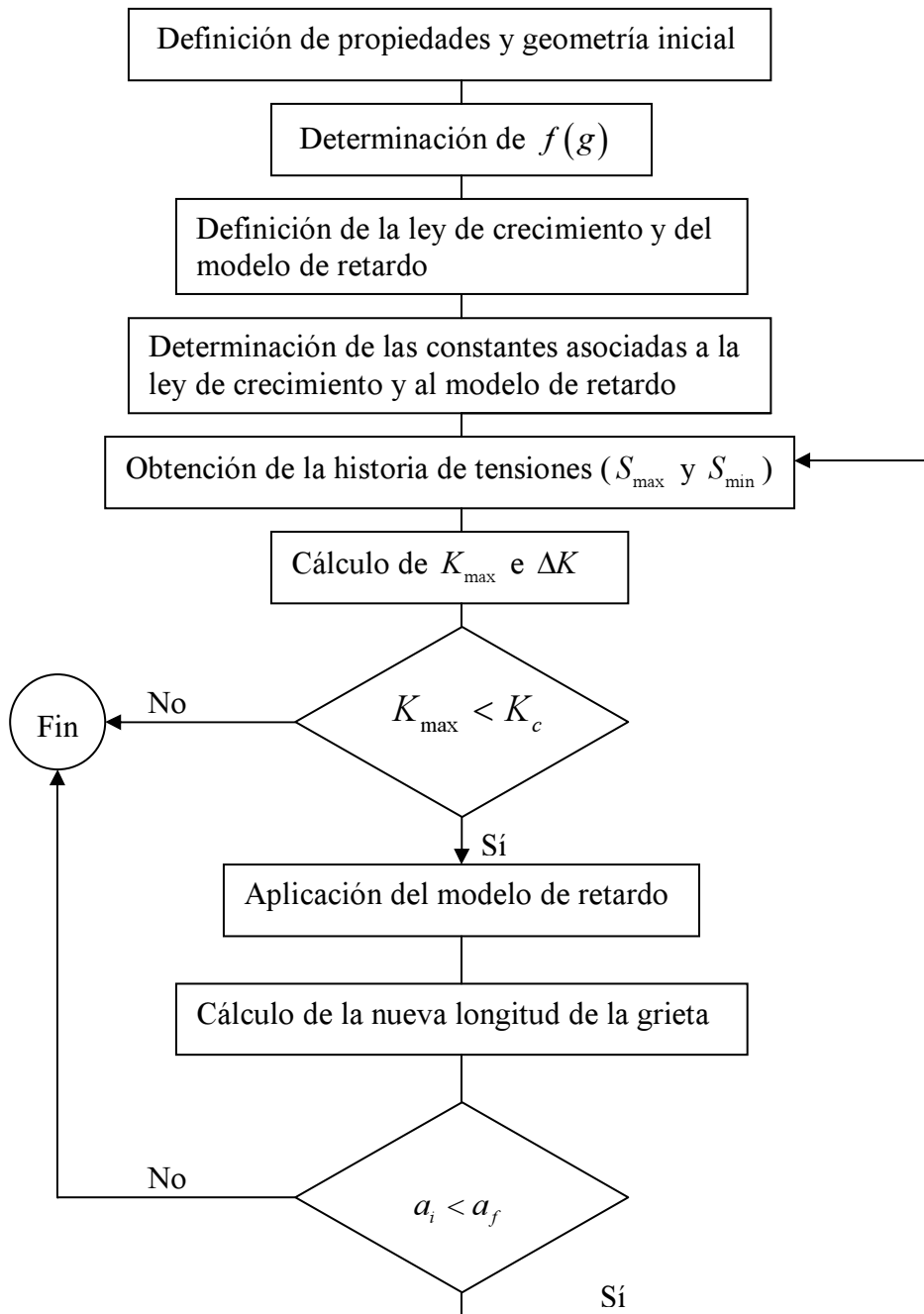


Figura 4.4: Diagrama de flujo genérico de un programa de crecimiento de grietas ciclo a ciclo.

4.3. VARIABLES DE ENTRADA Y DATOS DE SALIDA

Parámetros de entrada: El programa **FASTRAN II** requiere la definición de una serie de parámetros y datos de entrada para definir completamente el problema. Serán necesarios parámetros para establecer las propiedades del material, la ley de crecimiento, el tipo de probeta y de carga utilizada, las dimensiones iniciales de la grieta, etc. Aunque aquí se analizan algunos de los principales parámetros de entrada que el programa requiere, existe una exposición más completa de todos ellos en el *Anexo I*.

Cada uno de los puntos que se detallan se corresponden con una línea en el archivo de entrada.

- Título del problema: Título descriptivo del problema de un máximo de 80 caracteres.
- Nombre del archivo del espectro de carga y tiempo límite permitido para la resolución del problema.
- Material: Descripción del material en un máximo de 80 caracteres.
- Propiedades del material: Se especifican límite elástico, límite de rotura, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, factor de constricción, etc.
- Opciones de la velocidad de crecimiento: Aquí se establece si la velocidad de crecimiento es igual en las dos direcciones del plano o si su relación con el rango efectivo del factor de intensidad de tensiones es diferente según la dirección de crecimiento de la grieta.
- Constantes de la ley de crecimiento: Si se utiliza la ecuación propuesta por Newman, aquí se establecerá el valor de sus 5 constantes.

- Tabla de la ley de crecimiento: Si por el contrario la relación entre la velocidad de crecimiento de la grieta y el rango efectivo del factor de intensidad de tensiones se quiere introducir punto a punto, a partir de esta línea y por parejas de puntos se introducirán los valores de la tabla.
- Factor de constricción variable: Si el factor de constricción es variable se indicará su relación con la velocidad de crecimiento.
 - Para velocidades de crecimiento menores que v_1 , $\alpha = \alpha_1$.
 - Para velocidades de crecimiento mayores que v_2 , $\alpha = \alpha_2$.
 - Para velocidades de crecimiento intermedias entre v_1 y v_2 el factor de constricción será:

$$\alpha = \alpha_2 + (\alpha_1 - \alpha_2) \left(\frac{\log(v) - \log(v_2)}{\log(v_1) - \log(v_2)} \right) \quad (21)$$

- Opciones de salida: Diversos parámetros que establecerán la estructura de los datos de salida.
- Tipo de probeta y de carga: Se podrá seleccionar el tipo de probeta entre las diferentes configuraciones del programa. Aquí también se seleccionan parámetros referentes al modelo de cierre, como el número de elementos en los que se discretizará la entalla inicial. El tipo de carga podrá ser seleccionada entre cargas de amplitud constante; cargas formadas por diferentes bloques de carga constante que se repiten; cargas características de ensayos, como las secuencias de carga de vuelo TWIST o FALSTAFF; espectros de carga que contienen una secuencia de niveles de tensión o espectros formados por una secuencia de ciclos.

-
- Diagrama de la secuencia de bloques de tensión aplicada. El eje vertical representa la **Tensión aplicada** y el eje horizontal representa el **Tiempo**. La secuencia se divide en una **Secuencia de 4 bloques** y una **Repetición de la secuencia**.
- La **Secuencia de 4 bloques** consiste en:
- Bloque 1:** Contiene los puntos S_1 y S_2 .
 - Bloque 1:** Contiene los puntos S_3 y S_4 .
 - Bloque 2:** Contiene el punto S_5 .
 - Bloque 1:** Contiene el punto S_6 .
- La **Repetición de la secuencia** se indica por una línea punteada que continúa el patrón de la secuencia original.

- Variables de entrada para el test de reducción de la carga.
- En la última línea del archivo, la palabra HALT detendrá la ejecución del programa.

La *figura 4.6* muestra un ejemplo de archivo de entrada proporcionado al programa durante la realización de los ensayos.

```

2. Ensayo sobre una probeta SENT
cstamp      200.0
Aluminio 7075-T6
503.0  572.0  71656.0  0  1.8  0  1  1
1
3.2304E-10  3.12  0.8  0  13.1  2.0  9999  0
5  0
0.8  1E-11
1.5  1E-09
3.5  1E-08
7  1E-07
16  1E-06
0  5  1  0  0.02
-7  0  0  2  3  0  0
0.05  0.00115  0.003186  0.000006  0.003186  0.000006  0  0.00318
0.05
3.15  1
0.0  0.0
0  0
4000  10  0  0
180
0  0.0  0.0  0.0  0.0
HALT
    
```

Figura 4.6: *Ejemplo de un archivo de entrada.*

En el caso de que la tipología de carga utilizada sea la de proporcionar al programa un espectro de carga, será necesario dotar al archivo correspondiente de la estructura que se indica en el apartado siguiente.

Archivo del espectro de carga: La estructura del archivo del espectro de carga es diferente si se desean introducir los valores de la carga punto a punto o ciclo a ciclo. A continuación se muestra el ejemplo de un archivo del espectro de carga definido punto a punto. En él aparece en la primera línea el título; en la segunda, 5 variables que definen el número de

puntos, la máxima y la mínima tensión del espectro, el orden en el que aparecerán los puntos de tensión ($S_{\max}$, $S_{\min}$, $S_{\max} \dots$ o $S_{\min}$, $S_{\max}$, $S_{\min} \dots$) y su formato. Finalmente, a partir de la tercera línea en adelante se introducirán los valores de tensión del espectro de carga.

REGISTRO A-H25									
50000	14564	1855	0	3					
6723	4219	9830	4901	11846	6957	12724	12728	9907	13457
12825	9009	11884	8019	9414	6474	7868	5907	6767	6457
6838	6452	7761	6980	8586	7496	9150	7704	9126	7549
8670	7134	8510	6381	8644	6152	8423	6927	8200	7269

Figura 4.7: *Ejemplo de un registro de cargas.*

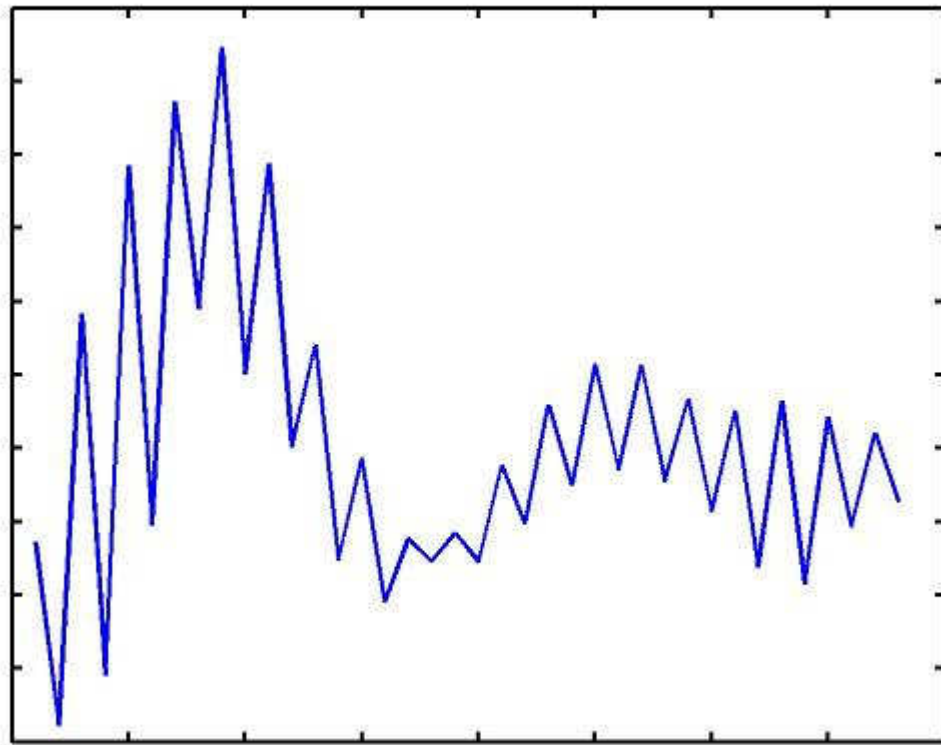


Figura 4.8: *Ejemplo de un espectro de carga.*

En el ejemplo, el registro A-H25 cuenta con 50.000 niveles de tensión, con una carga máxima de 14.564 y mínima de 1.855. El formato de los valores de tensión es el tercero de los 3 con los que cuenta el programa.

LFORMAT=1	20 puntos de tensión con formato entero de 4 caracteres en cada línea.
LFORMAT=2	16 puntos de tensión con formato entero de 5 caracteres en cada línea.
LFORMAT=3	10 puntos de tensión con formato entero de 8 caracteres en cada línea.

Tabla 4.1: *Formato de entrada del registro de cargas.*

Sistema de unidades: Todas las unidades utilizadas en el archivo de entrada y en el espectro de carga deben ser consistentes entre sí. Por ejemplo:

MEDIDA	SISTEMA INTERNACIONAL	U.S.
Longitud	m	in
Tensión	MPa	ksi
ΔK	$MPa \cdot m^{1/2}$	$ksi \cdot in^{1/2}$
$\frac{dc}{dN}$	$\frac{m}{ciclo}$	$\frac{in}{ciclo}$

Tabla 4.2: *Sistemas de unidades.*

Datos de salida: Los datos de salida, en función del valor de los parámetros introducidos en las opciones de salida del archivo de entrada, se estructuran en forma de tabla. En ella, los aspectos más interesantes a considerar son:

- La longitud de la grieta.
- El número de ciclos.
- La relación entre la tensión de apertura y la tensión máxima.
- La velocidad de crecimiento.

Un ejemplo de esta tabla puede ser el siguiente:

BLOCK	C	A/T	CYCLES	ALP	KO/KMAX	DC/DN	DA/DN
1	1,50E-02	1	1	1,2	0,12	9,10E-08	0,00E+00
1	1,50E-02	1	4	1,2	0,352	3,34E-07	0,00E+00
1	1,50E-02	1	36	1,2	0,436	3,66E-09	0,00E+00
1	1,50E-02	1	45	1,2	0,591	0,00E+00	0,00E+00
1	1,50E-02	1	781	1,2	0,289	1,26E-07	0,00E+00
1	1,50E-02	1	1119	1,2	0,279	1,17E-08	0,00E+00
1	1,51E-02	1	1768	1,2	0,337	5,69E-08	0,00E+00

Tabla 4.3: *Ejemplo de los datos de salida.*