

ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE GRIETAS POR FATIGA EN EL DISEÑO DE COMPONENTES NUCLEARES

Angel PALMERO POSTIGO

Uno de los problemas mayores con que se enfrenta el diseñador de un componente nuclear es la correcta selección de los materiales cuyas propiedades deben asegurar que soporta, sin romperse, las cargas para las que fue diseñado.

Para capacitar al diseñador en esta operación se necesita conocer las cargas a que va a estar sometido el componente durante el servicio, el medio ambiente donde trabajará, la duración de la vida de trabajo y lo que costará el conseguirlo

Esta información permite establecer el rango de materiales a partir del cual se elegirán los materiales para un diseño específico. Por último, el diseñador necesita conocer cómo se comportarán los materiales bajo cargas diversas en distintos medios ambientes. Una vez conocidas estas propiedades, el diseñador debe saber relacionarlas con la capacidad del componente en soportar las cargas. Para cumplir con este objetivo se han desarrollado el cálculo de tensiones y la mecánica de la fractura.

Sin embargo, existen factores indeterminados, como son el hecho de que las cargas realmente aplicadas en servicio son parcialmente conocidas, el que las propiedades de los materiales utilizados en fabricación pueden ser diferentes de las supuestas en el diseño o también la inducción de tensiones residuales originadas en los procesos de fabricación, cuya magnitud se desconoce a nivel de diseño.

Todo esto hace que el diseño tradicional se haya basado en el concepto de los factores de seguridad que servían para cubrir los factores desconocidos o parcialmente conocidos. Era el único camino posible cuando se conocía poco acerca de las propiedades de los materiales, mecanismos de fractura, cálculo detallado de tensiones y cargas originadas en servicio.

Sin embargo, los diseñadores se dieron cuenta de que los factores de seguridad apropiados a un acero determinado no conducían necesariamente a un comportamiento satisfactorio en servicio cuando se aplicaban a otros aceros más resistentes.

En la ingeniería de diseño siempre se ha reconocido la necesidad de conocer los diferentes métodos por los cuales un material puede fallar. El fallo siempre ha sido asociado con la fractura o con la excesiva deformación, por lo que el fallo producido por cargas estáticas de tracción, compresión y cortadura llegó a ser muy conocido.

Sin embargo, con el desarrollo de los motores térmicos y el transpote mecánico comenzó a ser frecuente el fallo de partes móviles, sometidas a cargas aplicadas repetidamente. Se encontró que estos fallos ocurrían a tensiones bajas, pero en situaciones donde la carga cambiaba en forma periódica y en puntos donde existía una discontinuidad geométrica.

Los materiales que rompían bajo cargas repetidas no mostraban una gran deformación y presentaban una apariencia de fragilidad característica. Debido a que estos fallos ocurrían en partes que habían funcionado satisfactoriamente por un cierto tiempo, la opinión general era que

el material se había fatigado de soportar la carga, o que la continua reaplicación de la carga había exhausto, de alguna manera, la capacidad de soportar la carga por el material.

Así pues, la palabra «fatiga» fue empleada para describir tales fallos y la misma ha sobrevivido hasta hoy.

Las razones por las cuales se produce el fallo de materiales bajo la aplicación continuada de una tensión, la cual si se aplicara una vez no causaría fallo, ha ocupado la atención de ingenieros y metalúrgicos durante mucho tiempo. Hace más de cien años que Wohler publicó los resultados de sus clásicos experimentos sobre fatiga. Realizó los primeros ensayos de fatiga en probetas metálicas, poniendo una gran atención en la magnitud de las cargas aplicadas.

Wohler llegó a la conclusión de que lo que determinaba la vida de una probeta era el rango de las tensiones aplicadas más que la máxima de tensión de tracción existente en el ciclo. Por otra parte, determinó la existencia de un rango de tensiones por debajo del cual la probeta no rompía, sin importar el número de veces que se aplicara el rango de tensiones.

Desde los trabajos de Wohler, las propiedades de fatiga de diferentes materiales ensayadas para diversas condiciones de carga y medio ambiente han sido estudiadas con gran intensidad.

Sin embargo, a pesar del hecho de que existe una gran cantidad de datos experimentales y de que la mayor parte de ingenieros y diseñadores tienen en cuenta el fenómeno de la fatiga, todavía se producen hoy día gran número de fallos por este mecanismo.

Los factores que contribuyen a este estado de cosas son, por una parte, la no disponibilidad de información exacta para un conjunto particular de circunstancias y el diseñador debe estimar el comportamiento a fatiga a partir de cualquier dato que tiene a mano. Por otra parte, las propiedades de fatiga de un material siguen raramente una relación general al comportamiento del componente en servicio. Las cargas en servicio son, en muchas ocasiones, desconocidas por sobrecargas accidentales o por cambio en los requisitos de servicio después de que el componente ha sido construido.

Un factor adicional es que el diseño tradicional supone que el material es un continuo desprovisto de defectos. Muchos materiales, componentes y estructuras contienen defectos inherentemente debido a los procesos de fabricación, o los desarrollan en algún momento de su vida.

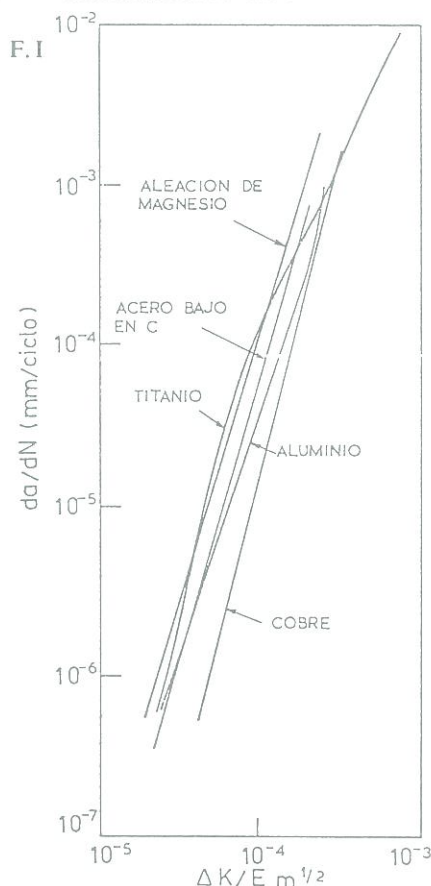
Por lo tanto, un conocimiento de cómo

Angel PALMERO POSTIGO es Ingeniero Industrial por la ETSII de Madrid. Realizó el curso de Ingeniería Nuclear en la Junta de Energía Nuclear. Ingresó en Equipos Nucleares en el año 1974 como jefe del Departamento de Cálculo de Tensiones, puesto que ocupa en la actualidad. Es responsable de la preparación, revisión y aprobación de los informes de tensiones que justifican el diseño de los componentes de una Central Nuclear.

se comporta un material con defectos bajo cargas es esencial para la comprensión de cualquier problema de fatiga.

En el mecanismo de la fatiga se pueden diferenciar las tres etapas siguientes:

- Período de iniciación de la grieta en zonas donde se producen deformaciones plásticas cíclicas al existir concentración de tensiones.



- Propagación inicial de la grieta a través de la zona plástica en que se originó.
- Propagación de la grieta fuera de la zona de influencia de la concentración de tensiones originaria.

La vida total de un componente viene dada por la suma de estas tres etapas. La importancia relativa de cada una de ellas en la vida del componente es muy variable, dependiendo de muchos factores. Así, en el caso de que el rango de tensiones sea pequeño, el fallo por fatiga se produce a un alto número de ciclos y la vida del material está ocupada principalmente por el período de iniciación de la grieta que constituye el 90 % más de la vida total.

Por otra parte, cuando el rango de las tensiones es elevado se produce el fallo de fatiga a un número bajo de ciclos. En

TABLA 1

Número de ciclos	Longitud inicial de grieta (mm)	$\Delta\sigma$ (MPa)	ΔK (MPa $m^{1/2}$)	Δa (mm)	Nueva longitud de grieta (mm)
1	25.000	250	72.06	0.0037	25.004
2	25.004	175	50.45	0.0013	25.005
3	25.005	175	50.45	0.0013	25.006
4	25.006	250	72.07	0.0037	25.010
5	25.010	175	50.46	0.0013	25.011
6	25.011	175	50.46	0.0013	25.012
7	25.012	175	50.46	0.0013	25.014
(50 ciclos a $\Delta\sigma = 175$)					
53	25.072	175	50.52	0.0013	25.073
54	25.073	175	50.52	0.0013	25.074
55	25.074	250	72.17	0.0037	25.078

este caso la vida del material está ocupada preferentemente por la etapa de propagación de la grieta en régimen plástico.

Los materiales que forman parte de componentes soldados tienen defectos que se producen en los procesos de fabricación y el diseño de los mismos se hace en base a la propagación de las grietas en régimen elástico. En este caso deben arbitrarse criterios periódicos de inspección en base a la propagación de la grieta para asegurar su detección y la sustitución o reparación del componente antes del fallo.

INICIACION DE GRIETAS

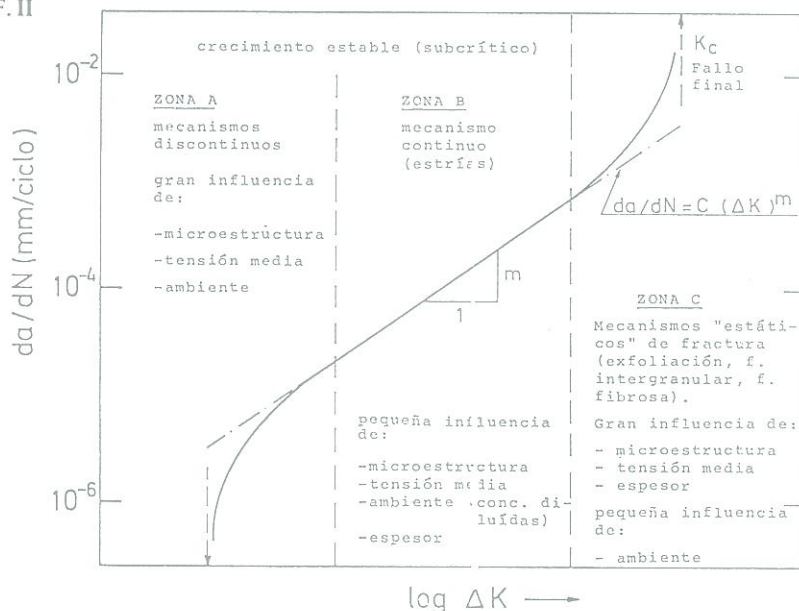
Las primeras teorías que surgieron para explicar el mecanismo de la fatiga se pueden clasificar en dos categorías. La primera se basaba en un deslizamiento repetido que conducía a alguna forma de daño a lo largo de planos de deslizamiento preferentes y, por lo tanto, aparecía eventualmente una grieta. La segunda teoría se basaba en el endurecimiento por

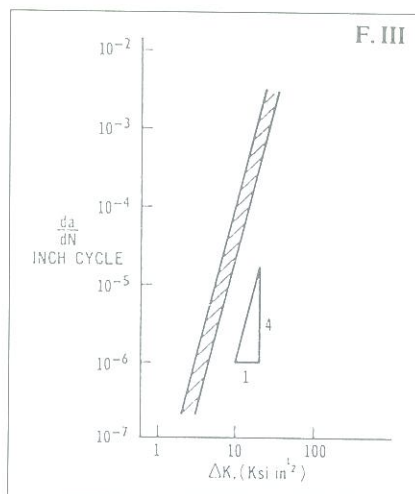
trabajo repetido de un material blando rodeado de una matriz elástica. El grano endurecido podía alcanzar un estado estable sin producir fractura o se endurecía hasta que alcanzaba su tensión de fractura.

Conviene destacar los aspectos siguientes:

- El fallo por fatiga es una consecuencia de la iniciación de una grieta y la subsecuente propagación de la misma.
- En los metales homogéneos las grietas se inician en una superficie libre y no se produce daño lejos de esta superficie por el tensionado cíclico.
- La iniciación de una grieta en una banda de deslizamiento solamente es posible en los metales dúctiles.
- Otros materiales pueden exhibir características de fatiga, pero esto es debido a la propagación de una grieta que proviene de un defecto inicial.

F.II





En los metales dúctiles, mediante el tensionado cíclico, se detecta el comienzo de deformación plástica o deslizamiento en un grano superficial determinado. No es necesario que la mayoría de los granos en una pieza de metal se deformen plásticamente para fallar por fatiga, es suficiente que continúe la deformación plástica cíclica en una región superficial localizada.

El hecho de que el fallo por fatiga es la consecuencia de un suceso extremadamente localizado en la superficie es lo que distingue a la fatiga de otros modos de fallo mecánico.

Las características básicas del fallo por fatiga son la iniciación de microgrietas superficiales y su subsiguiente extensión y penetración en el resto del material. La dirección de estas microgrietas es inicialmente la de dos planos de deslizamiento, permaneciendo así hasta que la microgrieta es de un tamaño tal que la cantidad que se abre y se cierra bajo la acción de las tensiones cíclicas es suficiente para afectar un gran volumen del material a lo largo de su borde. El proceso de crecimiento, entonces, se asocia con la magnitud del rango de deformación a tracción en el volumen del material justo delante del borde de la grieta. La dirección del crecimiento de la grieta es ahora aquella que permite la máxima apertura y cierre de la grieta durante el ciclo. Idealmente, ésta es aproximadamente perpendicular a la máxima tensión cíclica de tracción y es independiente de cualquier plano de deslizamiento cristalino.

La grieta puede ser ahora considerada una macrogrieta, su crecimiento es mucho más rápido que la microgrieta inicial y se extiende rápidamente a través del metal. El crecimiento de las macrogrietas y su comportamiento se discute con más detalle en la siguiente sección.

PROPAGACION DE GRIETAS

Hasta hace poco se había dedicado un esfuerzo pequeño a la determinación experimental de las leyes que gobiernan la velocidad de crecimiento de una grieta por fatiga. Esto puede haber sido debido a que las tensiones de diseño han estado casi siempre basadas en el límite de fatiga obtenido en probetas sin entalla. El propósito de estas tensiones de diseño era el

Un diseño seguro supone que se puede establecer una longitud crítica de grieta, la cual debe ser detectada por inspección.

prevenir la iniciación de grietas bajo las cargas de trabajo manteniendo todas las tensiones cíclicas por debajo de un valor crítico. Sin embargo, esto sólo es posible en componentes de una geometría relativamente sencilla y cuyas cargas de trabajo se conocen con toda precisión.

La necesidad de producir componentes de forma compleja y que operan en condiciones no definidas de forma precisa ha conducido a la posibilidad de formación de grietas en zonas de concentración de tensiones. Esto significa que existen componentes que deben funcionar satisfactoriamente aún cuando contengan grietas por fatiga.

La selección de un material que da la velocidad más pequeña del crecimiento de grieta, bajo una carga externa dada, conduce a un margen de seguridad mayor entre inspecciones de rutina. Así pues, un conocimiento de las características de un material, en cuanto a velocidad de crecimiento de grieta, junto con inspecciones regulares puede capacitar a un componente con grietas a tener una larga vida útil de trabajo antes de ser reemplazado.

Un diseño seguro supone que se puede establecer una longitud crítica de grieta, la cual debe ser detectada por inspección para que la grieta, al extenderse, no produzca fallo antes de la inspección siguiente.

Se han desarrollado numerosas leyes, indicadas en la bibliografía, para cuantificar el crecimiento de grietas por fatiga. todas ellas pueden considerarse válidas, dado que describen un conjunto particular de datos experimentales sobre el crecimiento de grietas y pueden ser utilizadas para predecir velocidades de crecimiento en situaciones similares a las que se emplearon para coleccionar los datos.

Por fin, en 1961, París y sus colaboradores propusieron una ley empírica que, utilizando conceptos de la mecánica lineal de la fractura, unificaba todos los

datos experimentales de crecimiento de grietas por fatiga. Esta ley conocida como ecuación de París se expresa de la forma:

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

donde:

$\frac{da}{dN}$ = incremento de longitud de la grieta, por ciclo.

$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ = rango del factor de intensidad de tensión K_I durante el ciclo de tensiones.

$K_{\max}$ = valor máximo de K_I durante el ciclo de tensiones.

$K_{\min}$ = valor mínimo de K_I durante el ciclo de tensiones.

C y m = Constantes del material.

La constante C puede depender ligeramente de la llamada tensión media en el ciclo

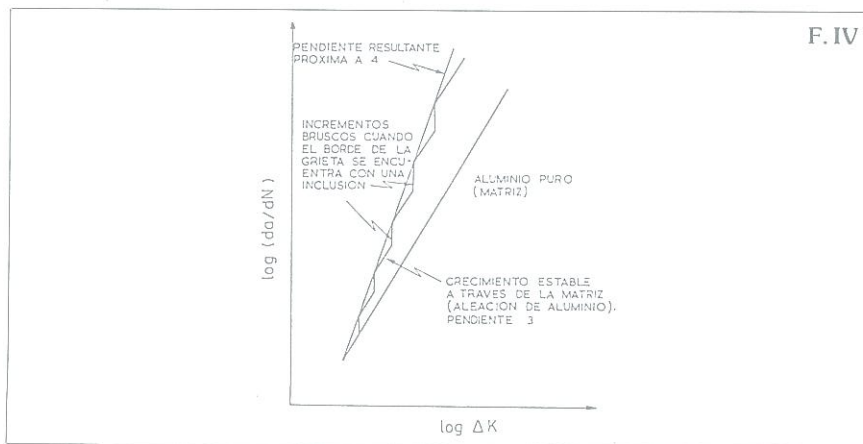
$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$$

El exponente m varía generalmente entre 2 y 4, siendo su valor más frecuente próximo a 3.

La ecuación de París suele representarse en coordenadas doble logarítmicas presentándose en la fig. 1 varios ejemplos.

MECANICA DEL CRECIMIENTO DE GRIETAS

La validez de la ecuación de París se limita al crecimiento de grietas en secuencias de carga con ciclos iguales. La forma del ciclo y la frecuencia deben ser tales que no se alcancen las condiciones de impacto y en ningún momento del mismo



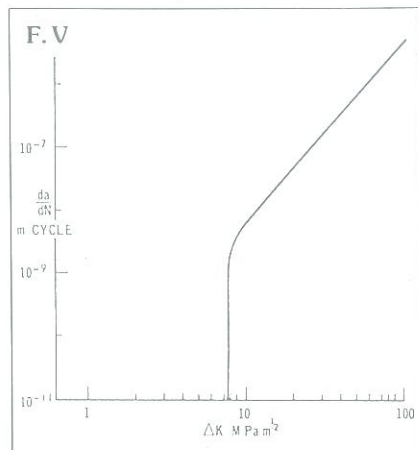
debe alcanzarse el valor crítico del factor de intensidad de tensión K_c . Por lo tanto, se trata de propagación subcrítica (estable) de grietas.

La ecuación de París se trata, como se ha indicado anteriormente, de la ley empírica más simple que satisface la mayor parte de los resultados experimentales. De hecho las mediciones del crecimiento de grietas en el laboratorio se expresan en gráficos donde se indica la longitud de la grieta en función del número de ciclos aplicados.

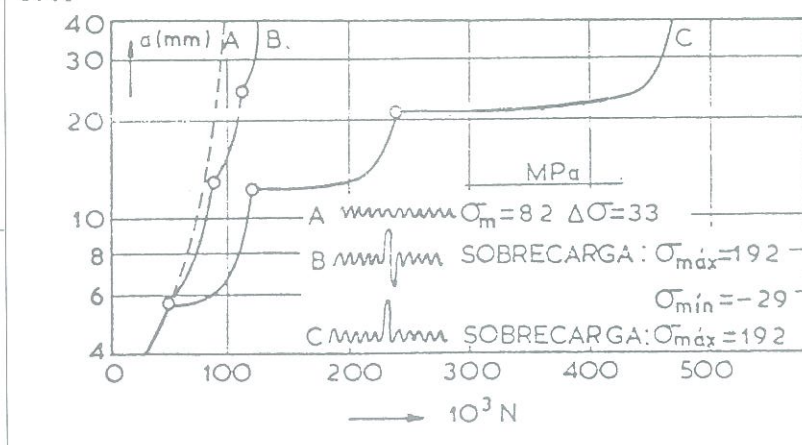
Cuando los datos anteriores se transcriben en términos de velocidad de crecimiento en función del rango del factor de intensidad de tensión se obtiene la curva de la fig. 2. Esta curva tiene forma sigmoïdal y se puede dividir en tres zonas, la inicial y final son de crecimiento rápido y la intermedia es lineal descrita por la ecuación de París. La utilización de esta ecuación para la zona A daría lugar a una subestimación de la vida en esa zona y, por lo tanto, se estaría del lado de la seguridad. No ocurre así en la zona C, donde la propagación se acelera fuertemente respecto de la ecuación de París. Esto no tiene importancia, ya que la zona C no se considera en cuanto a la estimación de la vida de piezas diseñadas en base a la propagación subcrítica de grietas.

La zona A está asociada con un valor umbral del rango del factor de intensidad de tensión, por debajo del cual el crecimiento es cero o extremadamente bajo y por encima del mismo el crecimiento se acelera grandemente. En la zona C se alcanza la fractura cuando el factor de intensidad de tensión máximo $K_{m\max}$ del ciclo se aproxima al valor crítico K_c .

Análisis de datos procedentes de varias fuentes dan, para la zona B, valores del exponente m del orden de 4 o incluso mayores (fig. 3). En muchos casos ese valor corresponde a aproximar con una sola ecuación todos los datos medidos, incluyendo las zonas A y C, pero, en



F. VI



otros casos, esos valores del exponente se refieren a la zona B. Esto se debe a que junto a la propagación de la grieta, en las zonas dúctiles, existe fractura estática cuando el frente de la grieta se encuentra con zonas frágiles, para las cuales el factor de intensidad de tensión máximo del ciclo supera el valor local de K_c .

La curva de crecimiento de la grieta puede interpretarse como un promedio de tramos en que la velocidad de crecimiento es la correspondiente al crecimiento estable (m igual a 3) y tramos de incremento súbito del tamaño de la grieta (fig. 4).

Una experimentación cuidadosa, junto con un control de la mecánica del crecimiento de grieta, demuestra que la ecuación de París describe un comportamiento promediado y la verdadera forma de la relación que gobierna el crecimiento de las grietas es como se indica en la fig. 2.

La zona B puede ocurrir en un intervalo grande del factor de intensidad de tensión. En la fig. 5 se indica la curva correspondiente a un acero típico poco aleado. De acuerdo con los datos obtenidos para una gran cantidad de aceros (ref. 2) se pueden utilizar los siguientes valores de las constantes $C = 10^{-11}$ y $m = 3$, cuando el crecimiento se mide en $m/ciclo$ y ΔK en $MPa m^{1/2}$.

EVALUACION ANALITICA DEL CRECIMIENTO DE GRIETAS

La complejidad del análisis depende de la importancia de la evaluación que va desde el chequeo sencillo al cálculo sofisticado por ordenador en el examen de la seguridad de una vasija nuclear durante sus cuarenta años de vida. Sin embargo, en los dos casos se emplea la ecuación de París. En los diversos ejemplos que se indican se utilizarán como valores de las constantes los indicados en el apartado anterior, es decir, $C = 10^{-11}$ y $m = 3$.

A nivel de cálculo simplificado, sea una grieta sometida a una carga de presión que hace aumentar el factor de intensidad de tensión en el extremo de la grieta de cero a $10 MPa m^{1/2}$. En este caso, la cuantía del crecimiento de la grieta en el ciclo da/dN es $10^{-11} \times 10^3 m = 10^{-5} mm$.

Un simple cálculo como el anterior

proporciona una indicación de la cuantía de rotura instantánea para un ciclo particular. Sin embargo, es necesario a menudo sumar la extensión del crecimiento de la grieta que resulta en los ciclos de carga que se espera se apliquen durante la vida del componente.

Esto requiere una iteración sencilla del cálculo anterior, considerando todos y cada uno de los transitorios que resultan de las condiciones de operación, las cuales imponen la presión o las tensiones térmicas cíclicas sobre el componente. La amplitud de las tensiones debe ser calculada en el defecto para cada uno de los transitorios. Utilizando la ecuación de París se calcula el crecimiento del defecto Δa para el primer transitorio y se añade a la longitud inicial a , ΔK se recalcula para la nueva longitud de grieta $a + \Delta a$. El incremento en la longitud de la grieta se calcula ahora, para esta grieta, ligeramente más larga, como resultado del transitorio siguiente. Así pues, la longitud del defecto se actualiza progresivamente para cada uno de los transitorios aplicados en orden cronológico. La longitud final de la grieta es el tamaño del efecto al final de la vida a_f el cual tiene que ser comparado con el tamaño crítico. Un ejemplo de un cálculo iterativo de un crecimiento de grieta se presenta en la tabla 1.

Aunque el proceso iterativo para calcular el crecimiento de grietas es tedioso tiene la ventaja de que tiene en cuenta el cambio de características de la estructura a medida que la grieta aumenta en longitud.

La iteración de la ecuación de París es simple y, mediante la misma, se obtiene directamente el crecimiento total de la grieta sobre el número total de ciclos requeridos. Sin embargo, la integración puede ser hecha solamente si el factor de intensidad de tensión no varía de forma significativa en el rango de variación de la longitud de la grieta.

En el caso particular de que $K = a^{1/2}$ integrando la ecuación de París entre un tamaño inicial de grieta a_0 y el tamaño final a_f que se alcanza para un número de ciclos N_f se tiene la ecuación:

$$\frac{1}{a_0^{1/2}} + \frac{1}{a_f^{1/2}} = 2.8 \times 10^{-11} \Delta \sigma^3 N_f$$

La ecuación de París se trata de la ley empírica más simple que satisface la mayor parte de los resultados experimentales.

Al aplicar esta ecuación al ejemplo anterior de la tabla 1 se observa que la extensión del crecimiento de grieta es muy pequeño y el cambio correspondiente en los parámetros geométricos que intervienen en la expresión de K es insignificante. Empleando la ecuación obtenida por integración para el cálculo del crecimiento desde el ciclo 5 al 54 de la tabla 1 se obtiene un tamaño final $a_f = 25.070$ mm en comparación con el valor $a_f = 25.074$ mm obtenido por el método de iteración.

La ecuación que se obtiene por integración de la ecuación de París se puede emplear en varias maneras. En el cálculo anterior se ha calculado el tamaño final de grieta a_f para un número dado de ciclos. Se puede emplear también para calcular el número de ciclos N_f que serían necesarios para que una grieta de tamaño inicial a_0 creciera hasta el tamaño crítico.

Más aún, invirtiendo el orden se puede calcular el tamaño inicial del defecto que tiene que ser detectado mediante ensayos no destructivos antes de la puesta

en marcha del componente, conociendo el tamaño crítico que se tendría al final de la vida, después de aplicarse N_f ciclos.

Hasta ahora, en todos los ejemplos, se ha supuesto que el crecimiento de las grietas es acumulativo, es decir, que no hay interacción entre diferentes tipos de ciclos.

Esta hipótesis no es cierta, dado que un ciclo grande limita el crecimiento de la grieta cuando inmediatamente después se aplican ciclos menores. Por ejemplo, pruebas de sobrepresión repetidas en un recipiente a presión retarda el crecimiento de las grietas en los subsiguientes ciclos normales (fig. 6).

El efecto de las sobrecargas puede explicarse teniendo en cuenta que producirán una zona plástica en el borde de la grieta mucho mayor que la correspondiente a la carga máxima del ciclo. Al descargar el material elástico que rodea la zona plástica induce en esta zona tensiones residuales de compresión.

Al continuar la deformación a fatiga con ciclos de cargas menores que la sobrecarga, la amplitud de la tensión apli-

cada en el borde de la grieta es inferior a la nominal por efecto de la compresión residual y esto explica la deceleración de la propagación.

REFERENCIAS

1. Frost, N. E., Marsh, K. J. y Pook, L. P. **Metal Fatigue**, Clarendon Press, Oxford, 1974.
2. Paris, P. C., Gómez, M. P. y Anderson, W. E. **The Trend in Engineering**, 13.9.1961.
3. Paris, P. C. y Erdogan, F. **Journal of Basic Engineering**, ASME Transaction D, 85, 1963.
4. ASTM E 647-78 T. Tentative method of test for constant load amplitude fatigue crack growth rates above 10^{-8} m/cycle, 1978 Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1978.
5. Rolfe, S. T. y Barson, J. M. **Fracture and Fatigue Control in Structures. Applications of Fracture Mechanics**, Prentice-Hall, 1977.
6. Broek, D. **Elementary Engineering Fracture Mechanics**, Nordhoff Int. Publishing, 1974.

Si busca seguridad cuente con



**EMPRESA HOMOLOGADA POR LA DIRECCION
GENERAL DE SEGURIDAD DEL ESTADO N.º 236**

**Ponemos a disposición de la Empresa
Española los más modernos y eficaces
servicios de seguridad**

3S selecciona meticulosamente el personal operativo, cuyo historial es compendio de su actividad laboral y profesional, en donde figuran empleos anteriores, conducta y profesionalidad observada, cursillos realizados, aptitudes especiales, características, etc., y lo entrena en su Escuela de Vigilantes Jurados y Guardas de Seguridad, en la que imparten cursos de Seguridad, Primeros Auxilios, Contraincendios y Defensa Personal.

Nuestras prestaciones con equipos de Vigilantes Jurados de Seguridad, uniformados y armados, incluyen:

- = Seguridad Social, seguros privados.
- = Vacaciones, enfermedad y suplencias.
- = Vehículos e inspecciones.
- = Y cualquier otra carga que pudiera originar la prestación del servicio contratado.

3S VIGILANCIA Y PROTECCION, S. A.

General Martínez Campos, 15
Teléfs. 447 62 10 y 447 63 10. Telex 46668
MADRID-10