

CAPÍTULO 2

EFEECTO DE SECUENCIA

Diversos trabajos experimentales realizados en la década de los 60 pusieron de manifiesto el efecto de la secuencia de cargas sobre el crecimiento de grietas; demostrando que la aplicación de una sobrecarga origina una disminución de la velocidad de crecimiento en los ciclos posteriores, llegando incluso para algunos valores de la sobrecarga a detener la grieta. Este fenómeno se conoce como retardo.

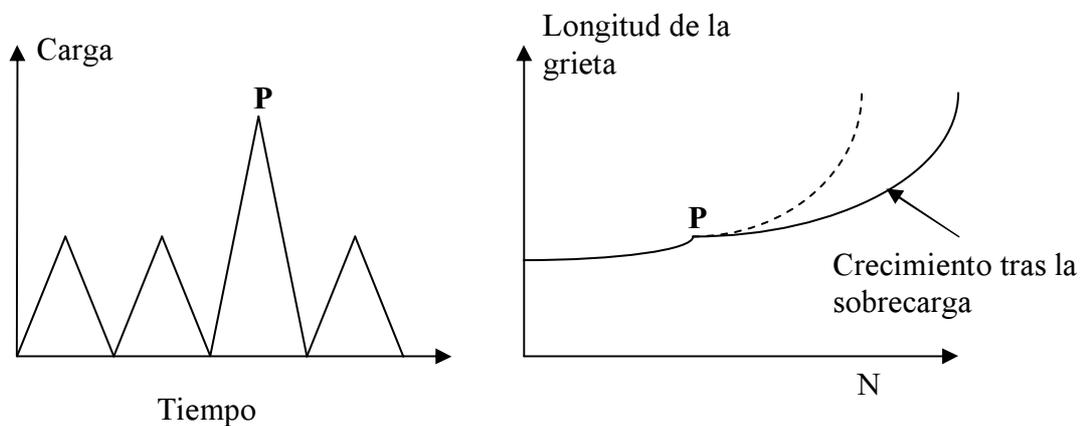


Figura 2.1: *Efecto de una sobrecarga sobre el crecimiento de grieta.*

Cuando en un proceso de carga de amplitud constante se aplica un ciclo de menor carga mínima, se produce ahora el efecto contrario y la velocidad de crecimiento aumenta. Sin embargo, esta aceleración tiene menor importancia en comparación con el retardo producido por una sobrecarga.

En este capítulo se realizará una revisión de los mecanismos responsables del efecto de secuencia y se indicarán algunos de los modelos analíticos propuestos para cuantificarlo.

2.1. MECANISMOS RESPONSABLES DEL EFECTO DE SECUENCIA.

Desde que se observó la existencia del efecto de secuencia se han propuesto diversos mecanismos como responsables del mismo:

- Cierre de grieta inducido por plasticidad.
- Frente de grieta irregular.
- Cierre de grieta inducido por oxido.
- Cierre de grieta inducido por rugosidad.

A continuación se analizarán cada uno de ellos.

Cierre de grieta inducido por plasticidad: El concepto de cierre de grieta permite explicar el efecto de la secuencia de aplicación de las cargas sobre el crecimiento de la grieta. La velocidad de crecimiento está, no sólo influenciada por las condiciones delante del frente de la grieta, sino también por la naturaleza del contacto entre las superficies de ésta. Y puesto que las condiciones en la zona próxima a las superficies de la grieta dependen de factores tales como la historia de carga, la longitud de la grieta y el estado de tensiones se puede explicar la dependencia de la velocidad de crecimiento con la historia anterior de carga.

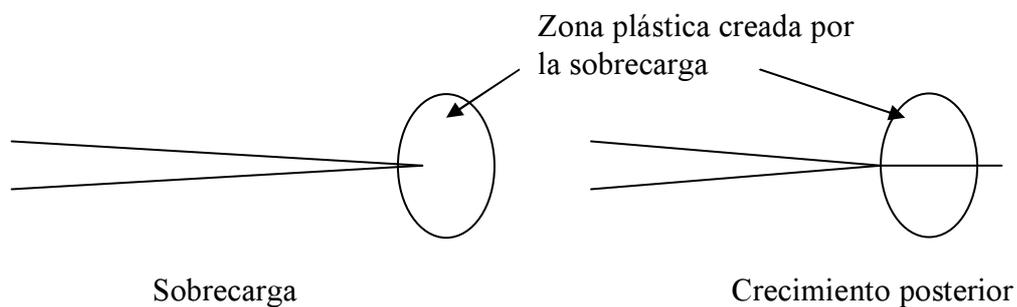


Figura 2.2: Cierre de grieta producido por una sobrecarga.

Elber postuló que la aplicación de una sobrecarga induce una gran zona deformada plásticamente delante del frente de la grieta con deformaciones plásticas residuales de

tracción. Cuando la grieta crece a través de esta zona plástica se generan mayores presiones entre las superficies de la grieta, aumentando la tensión de apertura S_{op} -se observa que las grietas producidas por fatiga cierran durante la descarga antes de ser nula la tensión- y considerando que sólo puede producirse crecimiento de la grieta cuando ésta está completamente abierta, el aumento de la tensión de apertura provoca una disminución de la velocidad de crecimiento. Elber sugirió que este fenómeno de cierre de grieta determina básicamente el valor de la velocidad de crecimiento de grietas bajo ciclos de carga de amplitud constante y variable.

Existe mucha controversia sobre la relevancia del cierre de grieta en ciclos de carga de amplitud variable o de amplitud constante y también para probetas delgadas o gruesas. Por ejemplo, algunos investigadores han encontrado que el modelo de cierre de grieta es válido para calcular cuantitativamente el retardo de la velocidad de crecimiento tras un pico de sobrecarga en probetas tanto delgadas como gruesas, mientras que otros han observado que el modelo de cierre de grieta falla para calcular el retardo del crecimiento. Mucha de la controversia proviene del uso de aparatos de medida ineficaces para medir el cierre de la grieta. Así, la dificultad de obtener una medida exacta de la tensión de apertura y de la longitud de la grieta en la zona central de la misma ha sido causa de mucha confusión.

Aunque este mecanismo no permite explicar toda la variedad de comportamientos, sí puede decirse que el cierre de grieta producido por plasticidad es el principal causante de los efectos de secuencia producidos en metales.

Frente de grieta irregular: El factor de intensidad de tensiones no es sólo función de la carga aplicada sino también depende de las irregularidades del frente de grieta: saturación del frente de grieta, microgrietas en la punta de la grieta, incremento de la longitud del frente de grieta asociado con la rotura de rugosidades en la superficie. Algunos trabajos han sugerido que esas irregularidades en el frente de la grieta tienen un efecto dominante y otros un papel secundario en el retardo del crecimiento.

De todo lo anterior se comprueba que las bifurcaciones y las microgrietas que aparecen tras la aplicación de la sobrecarga contribuyen al retardo en el crecimiento de la grieta para

probetas tanto delgadas como gruesas. Se sabe que el factor de intensidad de tensiones (K) en el frente de una grieta bifurcada en materiales elástico-lineales es menor que en frentes de grieta rectos en un factor de $\sqrt{2}$. Sin embargo, Lankford y Davidson han encontrado que sobrecargas que inducen la bifurcación de la grieta han generado la aceleración del crecimiento en probetas delgadas para algunas aleaciones de aluminio. Ellos observaron que inicialmente la grieta después de la sobrecarga se mueve con mayor velocidad a lo largo de las líneas de deslizamiento más tensionadas por la sobrecarga. El retardo ocurrirá solamente después de que la grieta vuelva al plano normal a la carga aplicada. En este 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.

Otros autores llegan a la conclusión de que este fenómeno no es una causa dominante de retardo cuando los valores de ΔK son altos, mientras que con valores bajos, si se produce la deflexión de la grieta, ésta puede ser una de las causas de retardo conjuntamente con otros mecanismos.

Cierre de grieta inducido por óxido: En determinados ambientes y con valores de ΔK próximos al umbral de crecimiento, se puede llegar a plantear la posibilidad de que se produzca un efecto de cierre de grieta debido a la oxidación de las superficies de la misma.

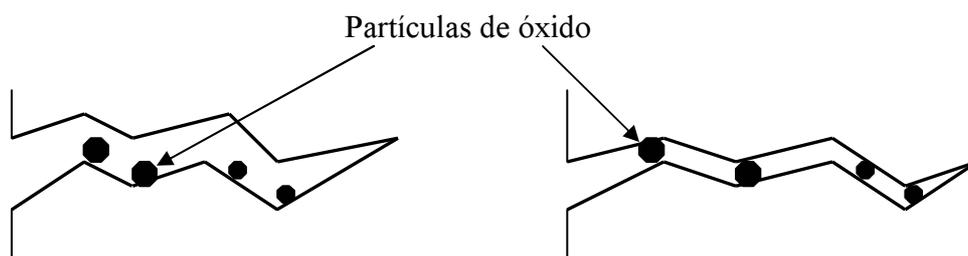


Figura 2.3: *Cierre de grieta inducido por óxido.*

La presencia de una atmósfera corrosiva produce la oxidación de las nuevas superficies producidas por el avance de la grieta y las partículas desprendidas de óxido tienen un efecto

de cuña, aumentando el factor de intensidad de tensiones al que se produce el cierre, reduciendo ΔK_{eff} y reduciendo por tanto la velocidad de crecimiento.

Cierre de grieta inducido por rugosidad: Con niveles bajos de tensión la zona plástica tiene dimensiones menores que una dimensión microestructural característica, por ejemplo, el tamaño de grano. En estas condiciones, el crecimiento de la grieta se produce a lo largo de un solo sistema de deslizamiento, típico del crecimiento de grietas pequeñas. Esta forma de crecimiento da origen a una morfología de la grieta altamente irregular que provoca un aumento del valor de K_{cl} .

Los factores que potencian el cierre de grieta inducido por rugosidad son: zona plástica menor que el tamaño de grano, tamaño de grano grande y deflexiones frecuentes. Este mecanismo, al igual que el cierre inducido por oxido, puede influir en mayor medida cuando una sobrecarga disminuye la velocidad de crecimiento a valores próximos al umbral.

Se puede concluir que de los cuatro mecanismos considerados responsables del efecto de secuencia el más importante y cuyo efecto está más probado es el de cierre de grieta inducido por plasticidad. Los otros tres sólo tienen importancia cuando la velocidad de crecimiento disminuye hasta valores cercanos al umbral.

2.2. MODELOS ANALÍTICOS QUE CONSIDERAN EL EFECTO SECUENCIA.

Existen 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 la MFEL y se encuadran dentro de algunos de los siguientes grupos:

Modelos basados en la plastificación del frente de grieta: El efecto de retardo tiene lugar debido a la gran zona plástica desarrollada durante la sobrecarga y permanece activo hasta que la zona plástica desarrollada por los siguientes ciclos sale de la zona plástica de la sobrecarga. Entre ellos destacan los modelos propuestos por Wheeler y por Willemborg.

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

Modelos basados en el cierre de grieta: Los efectos de aceleración y retardo están causados por el cierre de la grieta, el cual causa las variaciones en la tensión de apertura y en el factor de intensidad de tensiones efectivo.

Estos modelos consideran el concepto de cierre de grieta para determinar la magnitud del retardo producido por una sobrecarga, proponen una ecuación de crecimiento en función del rango del factor de intensidad de tensiones efectivo y basan la determinación de este ΔK_{eff} en obtener las tensiones de cierre mediante ecuaciones empíricas basadas en valores experimentales obtenidos a partir de ensayos de amplitud constante y de ensayos de una sobrecarga.

El programa **FASTRAN II** utiliza el modelo *The Strip Yield Model*, modelo basado en el cierre de grieta y desarrollado por Newman, para considerar los efectos de secuencia en la predicción del crecimiento de grietas por fatiga. En el Capítulo III se tratará dicho modelo en profundidad y en el Capítulo IV se analizará su implementación dentro de la estructura programa.