

MODELADO DEL CIERRE DE GRIETA EN FATIGA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

A. González, J. Zapatero, B. Moreno, J. Pascual

Universidad de Málaga
Dpto. de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación
E.T.S.I. Industriales. Plaza El Ejido s/n, 29013 Málaga

Resumen. Una de las vías de estudio del fenómeno de cierre de grieta en fatiga ha sido el enfoque numérico mediante modelos con elementos finitos. El artículo hace un repaso de trabajos anteriores más destacables en este sentido. A lo largo de todos estos trabajos han ido apareciendo una serie de aspectos claves en el modelado de este problema, es el caso del tamaño mínimo de elemento, tipo de elemento, modelado del contacto, efecto de la estela plástica, esquema de liberación de nodos al simular el crecimiento, criterio para la obtención de la tensión de apertura o cierre, etc. Estos aspectos son analizados en detalle en el presente artículo. Finalmente, se presentan algunos resultados preliminares, obtenidos con diversos modelos, en los que se han tenido en cuenta estos aspectos con objeto de estudiarlos y afinarlos con vistas a un análisis más profundo posterior. Igualmente se detallan las conclusiones obtenidas y las líneas de trabajo actuales.

Abstract. The numerical study by finite element models is one of the ways of approaching the fatigue crack closure phenomenon. An historical review of more important previous works is made in this paper. Through these works, key aspects on crack closure modelling have been shown: minimum element size, element type, contact modelling, plastic wake effect, crack tip node release scheme in crack advance, opening and closure stresses criterion, etc. These aspects are analysed in detail in the current work. Finally, some preliminary results are presented in which all these key aspects have been kept in mind and studied in order to tune them for later deeper analysis. The conclusions and future developments are detailed.

1. INTRODUCCIÓN

Son muchos los autores que desde principios de los años setenta han abordado el análisis del problema de fatiga por medio del método de los elementos finitos. Como referencia inicial debemos destacar el trabajo de Newman [1] consistente en un modelo de elementos finitos en tensión plana de propagación de grieta en el que se incluía el efecto del cierre de grieta.

Con este trabajo se inició una línea que poco a poco fue desarrollándose y ampliándose. Cabe señalar el análisis posterior en deformación plana realizado por Fleck [2], siendo el primero que aborda de manera estructurada y profunda este problema, y los trabajos de Chermahini [3] en los que se realizan modelos en tres dimensiones. En ellos se plantea, también por primera vez, la metodología de cálculo y de análisis de resultados en tres dimensiones. Se obtienen gráficas que relacionan el cierre en tensión plana, en deformación plana y con diferentes espesores de probeta. Toda esta serie de trabajos se caracterizan por utilizar modelos del material

elasto-plástico perfecto, el criterio de cierre es el contacto físico de las caras de la grieta, lo que simulan posicionando muelles.

Otra línea de trabajo importante, algo posterior, es la de autores como McClung y Sehitoglu [4,5,6], que unas veces juntos y otras por separado con otros colaboradores, han ido abordando distintos aspectos que en los trabajos anteriores no se habían tenido en cuenta (cierre fuera del régimen de plastificación de pequeña escala, condiciones umbrales, etc.).

Un artículo de gran importancia y referencia inevitable para cualquier trabajo posterior son los escritos por McClung y Sehitoglu en 1989 [4], ya que en ellos se hace un repaso metodológico del proceso de modelado por elementos finitos en fatiga. Hacen una revisión histórica y de ella y de su propia experiencia extraen una serie de recomendaciones prácticas para garantizar la validez de los resultados. Se exponen los resultados obtenidos y la influencia de los modelos en ellos. En

algunos aspectos pueden quedar desfasados pero en general es un trabajo muy valioso y de gran utilidad.

En esta época (finales de los ochenta, primeros de los noventa) se realizan una gran cantidad de trabajos consecuencia de las mayores posibilidades de acceso a medios computacionales más potentes.

Recientemente son dignos de mención trabajos como los de Ellyin y Wu [7] en los que se recoge la experiencia de los anteriores centrándose en aspectos no contemplados por estos. Utilizan un modelo de comportamiento plástico con endurecimiento y analizan la influencia de sobrecargas y subcargas en modelos bidimensionales.

De la lectura de los trabajos anteriores que, con distintas peculiaridades, han simulado el fenómeno de cierre en fatiga con elementos finitos, así como de la propia experiencia obtenida de los primeros cálculos realizados con modelos iniciales, se han extraído una serie de pautas y procedimientos de trabajo imprescindibles para abordar con éxito el problema que se nos plantea y los objetivos fijados.

El presente trabajo está dividido en tres partes muy diferenciadas, en primer lugar se analizan los distintos aspectos clave para la realización de un modelo en elementos finitos que reproduzca el cierre de grieta así como el procedimiento de cálculo que se ha de seguir para simularlo. A continuación se dedica especial atención al análisis que se pretende realizar a partir de los resultados que se obtienen y que criterios son los idóneos para ello, especialmente en lo relacionado con la tensión de cierre. Finalmente se describe de manera resumida los distintos resultados obtenidos por los autores hasta la fecha.

2. ASPECTOS CLAVE DEL MODELADO

A la hora de realizar un modelo del comportamiento de una grieta en fatiga hay que tener en cuenta diversos aspectos. En primer lugar hay que decidir si se va a hacer un modelo en dos o en tres dimensiones, siendo la primera opción más sencilla que la segunda. Hay que realizar un mallado lo suficientemente fino en la zona de interés (en torno al vértice de grieta, la zona plástica), por tanto el tamaño de elemento es un aspecto de gran importancia. Se debe, además, escoger el tipo de elemento adecuado y, por último, definir el comportamiento del material prestando especial cuidado al modelo de plastificación.

Junto a ello y en función de los objetivos planteados, se debe clarificar en que condiciones se va a simular la grieta, tipo y ciclos de carga, simulación del contacto, estela plástica, proceso de crecimiento de la grieta, etc.

A todo ello se dedica el presente apartado.

2.1 Dos o tres dimensiones

Prácticamente la totalidad de los modelos se han realizado en dos dimensiones ya que son mucho más fáciles y baratos de calcular con los medios computacionales disponibles.

La gran mayoría se han hecho en tensión plana ya que el modelado no planteaba ningún tipo de problema, la plastificación producida era debida a deformaciones en la dirección perpendicular al plano, la contracción del espesor aporta el material que se tracciona en la zona plástica. Además, esta es mayor y el cierre se puede visualizar de manera más clara sin tener un exceso de mallado. Todo ello sin olvidar, por supuesto, que en muchos casos este estado es el más parecido a la realidad.

Conforme se fue teniendo control sobre lo que se iba haciendo se empezaron a abordar modelos en deformación plana siendo los trabajos más destacados los de Fleck [2] y los de Sun y Sehitoglu [5]. En deformación plana el aspecto que exige la mayor atención es el estudio de donde procede el aporte de material que plastifica.

Los modelos en tres dimensiones se empezaron a hacer más tarde (años ochenta) y con un mallado bastante grande. No se han seguido haciendo posteriormente por el alto coste computacional y el hecho de que en muchos casos era preferible aumentar la precisión de los resultados aunque estos fueran en dos dimensiones. El trabajo de Chermahini [3] es muy meritorio dadas las limitaciones de cálculo de esa época.

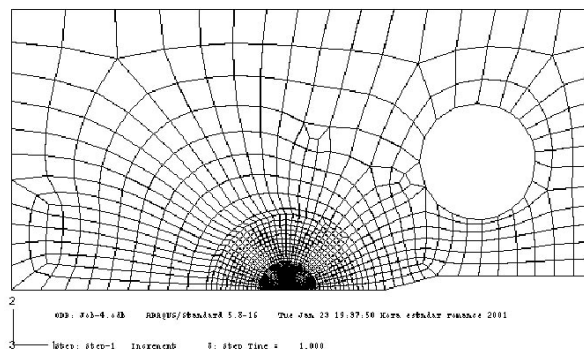


Fig. 1. Mallado de probeta CT.

2.2 Tamaño de elemento

Un aspecto crítico que nos encontramos en el modelado de problemas que presentan concentración de tensiones es que, si pretendemos captar el fenómeno de plastificación que se produce en el borde de grieta nos vemos obligados a mallar esta zona con un tamaño de elemento muy pequeño.

Esto tiene dos implicaciones, por un lado la necesidad de utilizar un gran número de elementos muy pequeños en esta zona y por otro, se hace imprescindible realizar una transición grande y violenta desde estas zonas hasta las más alejadas, lo que se traduce en grandes distorsiones en los elementos.

En la figura 1, en la que se presenta un mallado típico de las probetas CT que estamos analizando, podemos ver esta situación. Si suponemos un caso con estas probetas, $w = 50$ mm, en tensión plana, $K = 10$ Mpa·m^{1/2} y $a = 20$ mm, el radio plástico estimado mide 0.37 mm, si lo dividimos en 20 elementos el tamaño de estos está en torno a 0.02 mm, si suponemos elementos en la parte más exterior de 2 mm, tamaño más que razonable, incluso ampliable, dado el nivel de tensiones que se produce en esa zona, obtenemos una relación entre elementos de 100 a 1. En deformación plana las condiciones son más extremas aún.

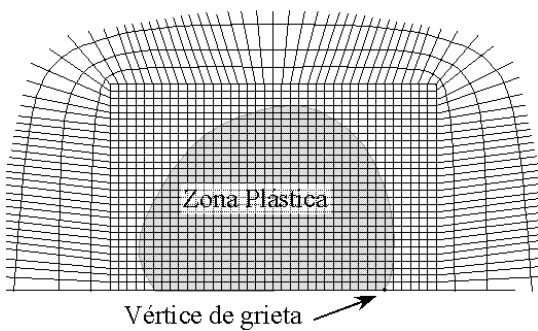


Fig. 2. Mallado zona plástica.

La referencia de escala para decidir el tamaño mínimo de elemento es el radio plástico (que podemos estimar con distintas fórmulas, por ejemplo la de Dugdale). Esta distancia deberá estar dividida en el número de elementos que consideremos oportuno en función de los resultados que queramos obtener y del tipo de elemento utilizado.

Ha sido práctica habitual dividir esta zona en un número de nodos en torno a diez, generalmente con elementos lineales triangulares, con los medios disponibles actualmente parece recomendable subir en torno a 15 ó 20 ó mayores tal y como se muestra en la figura 2 de manera esquemática.

McClung [4] hace una recomendación en este sentido que oscila entre 20 elementos triangulares ó 10 elementos lineales. En esta misma referencia se hace un pequeño estudio de las repercusiones que el incumplimiento de estas condiciones puede tener en los resultados, indicando incluso algunos trabajos anteriores que no las cumplían y cuyos resultados se pueden considerar cuestionables.

2.3 Modelo de comportamiento del material

Debido a las importantes deformaciones plásticas que se producen y a que estas suelen ser reversibles en muchos puntos, un aspecto de gran trascendencia es el modelado del comportamiento plástico del material.

En la mayoría de los casos se han utilizado modelos elasto-plásticos perfectos que facilitan en gran medida el cálculo y se corresponden bastante bien, en una primera aproximación, con el comportamiento de la mayoría de los metales empleados (especialmente el aluminio). Es el caso de muchos trabajos importantes, por ejemplo los de Newman, Fleck o Chermahini [1-3].

Cuando el material considerado no responde de manera realista a este comportamiento es necesario utilizar modelos con endurecimiento, ya sea isotrópico, cinemático o mixto, con lo que se complica el cálculo ostensiblemente. En función de lo que se pretenda analizar, según la reversibilidad del ciclo y el nivel de las tensiones alcanzadas, puede resultar un factor más o menos crítico en los resultados. Siempre y cuando responda al comportamiento real del material, la mejor recomendación es usar aquel más sencillo [4].

2.4 Ciclos de carga

En los análisis por elementos finitos a fatiga, normalmente se simulan ciclos de carga continuos, con o sin avance de grieta. Muchos trabajos han simulado el efecto de sobrecargas, subcargas, cambios “high-low” o “low-high”.

Cada rampa del ciclo, ya sea la de carga o la de descarga, supone la resolución de un problema altamente no lineal lo que implica un coste computacional alto. Queda por ello descartado, por el momento, el uso del método de elementos finitos como medio de cálculo ciclo a ciclo de la vida a fatiga.

Un factor a tener en cuenta en cada estudio es el valor de R y la relación de la carga máxima con la tensión de fractura.

2.5 Simulación del contacto

Uno de los aspectos más difíciles de modelar y que es intrínseco al fenómeno que se quiere simular (el cierre de grieta) es la modelización del contacto de las superficies que cierran. Se trata de un fenómeno que introduce en el modelo una discontinuidad brusca y por tanto una no linealidad muy violenta.

Desde los primeros modelos se ha ido salvando con diversos procedimientos de manera que el coste computacional no fuera muy alto. Lo más corriente, desde los trabajos de Newman, ha sido la introducción de muelles en las posibles zonas de contacto de manera que cuando los nodos no sobrepasaban las zonas límites la constante del muelle era prácticamente cero y cuando llegaban a sobrepasarla esta constante cambiaba bruscamente pasando a ser muy grande, de esta manera se permitía una leve penetración que suavizaba las

condiciones de continuidad a un coste computacional muy reducido.

Hoy día casi todos los programas comerciales disponen de procedimientos que simulan el contacto de manera sencilla para el analista, siendo únicamente destacable el hecho de que se le debe prestar la atención debida con objeto de no tener problemas numéricos ó de convergencia de resultados.

2.6 Estela plástica

El cierre de la grieta se produce cuando entran en contacto las superficies por donde avanzó la grieta dejando a su paso una zona plastificada, la estela plástica. Resulta por tanto imprescindible simular esta estela si se desea que se produzca el contacto físico.

En muchos casos puede ser suficiente conocer el cierre (o la apertura) simplemente a partir de los datos del perfil de tensiones en la dirección de la grieta (ver la figura 6), sin embargo en muchos otros no.

La mayoría de los trabajos realizados simulan esta estela plástica haciendo avanzar la grieta de un ciclo de carga a otro. La longitud de avance en cada ciclo está determinado por el propio mallado y no se suele analizar si el efecto de la estela simulada es el mismo que el de la estela real, únicamente se busca la estabilización de los resultados obtenidos, momento en el que se dan por válidos estos.

2.7 Crecimiento de grieta

En los casos en que se produce avance de grieta hay que definir un esquema de liberación de nodos que es el mecanismo utilizado para modelar este avance.

Al analizar este aspecto, no se debe perder de vista que la longitud numérica de avance es una longitud de un orden mucho mayor a la que se produce realmente en cada ciclo en el crecimiento continuo real de la grieta, siendo por tanto este punto una discontinuidad en el proceso de cálculo. Ello hace que desde que se libera el nodo hasta que el modelo vuelve a comportarse de manera que responda a la realidad hay un pequeño periodo transitorio de ajuste en el que los resultados no serían correctos y que, en nuestra opinión, en muchos estudios no se ha tenido en cuenta.

Todo esto ha dado lugar a una profunda discusión y análisis sobre la idoneidad del instante en que se libera el nodo. Los dos momentos posibles serían al finalizar el ciclo de carga o al finalizar el ciclo de descarga. Cualquier punto intermedio queda descartado por el hecho de que lo que se pretende es tener información durante la evolución de cada rampa (de carga o descarga).

Existen trabajos en los dos sentidos aunque finalmente parece que el punto idóneo para liberar el nodo es el

momento de máxima carga [4,7]. En este punto existen menos posibilidades de inestabilidades numéricas ya que el nodo liberado está traccionado y la tendencia será a separarse del contacto.

Palazoto [8] hizo un estudio del punto idóneo de liberación del nodo llegando finalmente a la conclusión de que este se encuentra al cumplirse el 95 % del ciclo de carga, aspecto que encaja con la recomendación anterior. En este trabajo analiza cuantos ciclos de carga son necesarios, sin avance de grieta, para que el comportamiento del material del borde de grieta se pueda considerar estable.

En este sentido, hay que destacar que el modelo de comportamiento del material tiene especial importancia en este caso. En modelos elasto-plásticos perfectos, sin endurecimiento, la estabilización es casi inmediata.

2.8 Criterio de crecimiento de grieta

El crecimiento de la grieta viene determinado, como ya se ha comentado, por el propio mallado y además no se utiliza, en ninguno de los casos estudiados, criterio alguno para decidir la liberación o no del nodo del vértice de grieta.

3. RESULTADOS A OBTENER

A parte de los resultados normales que se obtienen en cualquier análisis estructural por medio de elementos finitos (campo de tensiones, de deformaciones, de desplazamientos, etc.), en un análisis de fatiga como este, hay un segundo tipo de resultado elaborado a partir de los primeros que son el objetivo real perseguido.

Es el caso, por ejemplo, de la determinación del radio plástico y de las tensiones de apertura y cierre. La obtención de estos valores requiere el procesamiento de los resultados primarios y, para que tengan validez, exigen que el procedimiento de extracción cumpla una serie de criterios. En unos casos este proceso no es complejo y simplemente nos dedicaremos a describirlo, y en otros será un factor crítico y según como se haga los resultados variarán.

3.1 Medida del radio plástico

La medida del radio plástico es directa, no hay más que medir hasta que elemento se ha producido la plastificación en la línea de avance de grieta. Depende directamente del tamaño del mallado, cuanto más pequeño sea mayor será la definición de la medida y menor el error. En principio debe ser suficiente la comprobación de la plastificación en los nodos.

Otro aspecto es la determinación de la zona plástica completa. En la mayoría de los casos en fatiga en que el nivel de tensiones no sea alto y se pueda considerar que estamos en régimen de pequeña plastificación, la forma de la zona plástica será sencilla, cuando nos salgamos

de aquí si requerirá mas atención esta zona y por tanto su mallado.

Puesto que aquí es donde se van a producir las mayores tensiones y deformaciones hemos considerado interesante mallar esta zona de la manera más regular posible de manera que los elementos no queden distorsionados (figura 2).

3.2 Medida del cierre o la apertura

La determinación con garantía de la tensión de apertura o cierre de grieta, es un factor importante en el estudio de los procesos de fatiga, puesto que es el dato fundamental que permite conocer en que rango de tensiones trabaja la grieta y como crece esta.

Vamos a referirnos en todo momento a la determinación de la tensión de apertura que es realmente la que marca el punto en el que la grieta empieza a trabajar, todo lo que se diga para esta es válido y fácilmente trasladable para la tensión de cierre.

Puesto que para calcular lo que ocurre al final del ciclo es necesario haber calculado paso a paso, de manera incremental, las etapas intermedias de carga, se puede determinar fácilmente la tensión de apertura siguiendo la evolución de cada paso hasta encontrar el punto en el que se produce la apertura (o cierre). La precisión en la determinación del punto dependerá de la discretización del paso de carga, que es controlable por nuestra parte, y del criterio que usemos para considerar que se ha producido la apertura.

A lo largo de toda la bibliografía revisada se han encontrado dos tendencias muy definidas en torno a este aspecto tan importante cuya influencia en la interpretación de los resultados es grande.

La diferencia fundamental está en considerar que la grieta abre cuando las superficies libres dejan físicamente de estar en contacto (K_{op}), ó en considerar que la apertura se produce cuando el vértice de grieta, comprimido por el ciclo anterior, deja de trabajar a compresión y empieza a trabajar a tracción (K_{tt}).

Esta última interpretación está actualmente muy extendida y parece la más razonable puesto que la relevancia del fenómeno del cierre o la apertura viene dado por el hecho de que la grieta vea reducido el tramo del ciclo en el que trabaja.

Aunque aparece inicialmente en algunos trabajos, fue definida y estudiada a fondo por primera vez por Sehitoglu y Sun [6].

Otra ventaja del uso de este parámetro es que no está influenciado por el tamaño de la discretización delante de la grieta y es previsible que tampoco por la simulación más o menos precisa de la estela plástica o

incluso sin ella (aspecto que pretendemos comprobar con el desarrollo de un trabajo actual).

Existen otros criterios encontrados en la bibliografía, bastante más complejos y en algunos casos discutibles. Parece recomendable, de cualquier forma, trabajar con todos ellos, al menos los dos más representativos (K_{op} y K_{tt}), observando las divergencias que produzcan e interpretándolas.

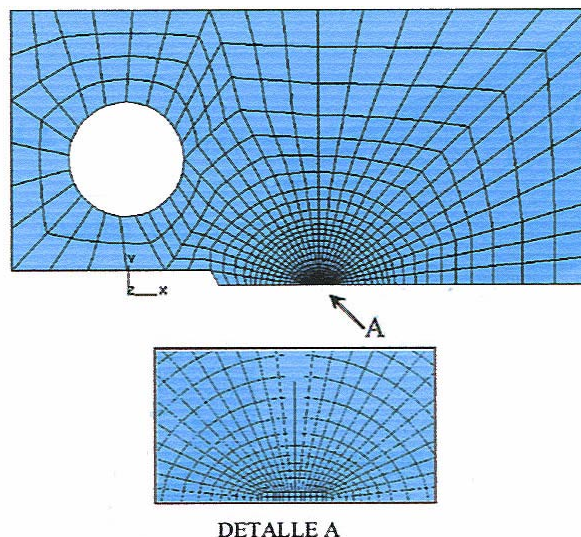


Fig. 3. Mallado bidimensional en probetas CT.

4. CALCULOS INICIALES

Se ha obtenido mediante modelos tridimensionales con distintos espesores de probeta, estimar un factor de constricción equivalente que representa de una manera concentrada el comportamiento de la grieta real que se encontrará entre los extremos de tensión o deformación plana.

Esta primera aproximación realizada por los autores [9] no respondía realmente a un problema de fatiga puesto que solo se modeló el proceso de carga. No obstante reunía ya una serie de características e incluía aspectos que son dignos de ser reseñados.

Fueron modeladas probetas CT con $w = 50$ mm, de aluminio Al-2024-T35, con $E = 73$ GPa y $\mu = 0.35$, en dos dimensiones, en tensión y deformación plana, y en tres dimensiones con espesores de 6 y 12 mm. El comportamiento del material era elasto-plástico perfecto con tensión de plastificación $\sigma_y = 325$ MPa. El rango de carga variaba entre 12.5 y 71.25 $\text{Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$ y se trabajó con grietas de 15, 20 y 25 mm.

En las figuras 3 y 4 se pueden ver algunos modelos bidimensionales y tridimensionales calculados con ABAQUS.

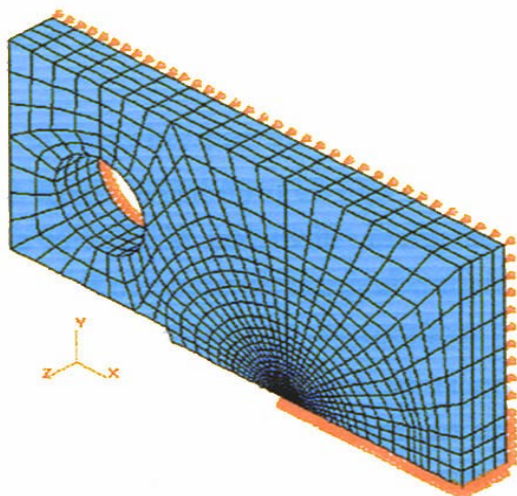


Fig. 4. Mallado tridimensional en probetas CT.

El objetivo primordial de este trabajo era comparar las distintas zonas plásticas generadas en cada uno de los casos, así como medir el radio plástico, obteniendo así una visión de la influencia del espesor en los modelos en tres dimensiones en relación con los casos de tensión y deformación plana también calculados.

Uno de los aspectos más destacables es que en este trabajo se aborda por primera vez la estimación del factor de constricción a través del cálculo de unos volúmenes equivalentes de plastificación.

En la figura 5 se puede ver un resultado típico en tensiones.

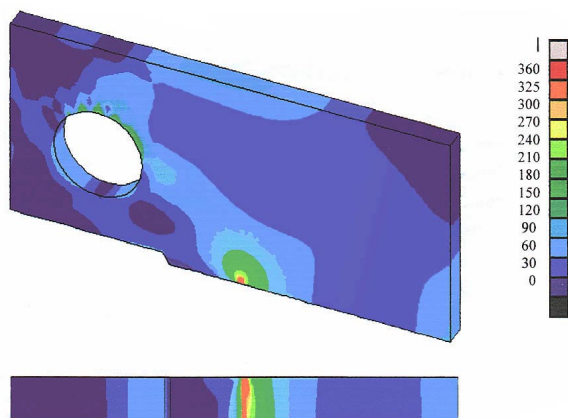


Fig. 5. Campo tensional tridimensional en probetas CT. $K = 43 \text{ Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$. $a = 20 \text{ mm}$. $b = 6 \text{ mm}$.

El siguiente paso ha sido el modelado completo de un ciclo de carga, descarga y nueva carga, repitiendo este último las veces que se considere necesario. Los niveles de estas últimas marcan la carga máxima y mínima y por tanto R. De esta manera se simula el comportamiento a

fatiga de una grieta preagrietada siendo el comportamiento cíclico y no monotónico como en el caso anterior. En algunos casos se simuló también el avance de grieta. Se usó el mismo tipo de probeta.

El objetivo de estos trabajos ha sido realizar cálculos exploratorios por medio de los cuales se pudieran establecer las pautas de trabajo necesarias para abordar con garantías la realización de grandes series de modelos para obtener resultados en diversas situaciones y en una mayor extensión.

Con ello se ha tratado de analizar la influencia de los parámetros descritos en los apartados anteriores y se han fijado criterios para el desarrollo de nuestro trabajo actual.

Uno de los puntos más críticos es el tamaño de elemento, siendo este uno de los aspectos al que más atención se ha prestado. Se han tratado de seguir las recomendaciones hechas en la bibliografía [4] y a partir de ellas tratar de afinar el cálculo. En la tabla 1 se observa un caso particular para $K = 10 \text{ Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$ y $a = 20 \text{ mm}$, en tensión plana. Se ha tomado como parámetro de referencia la medida del radio plástico estimado por la fórmula de Dugdale:

$$r_p = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_I}{\sigma_p} \right)^2 \quad (1)$$

En dicha tabla podemos ver como el aumento de número de elementos en la zona plástica hace tender la medida del radio plástico hacia la estimada. Obsérvese que no tiene sentido aumentar el mallado de manera global como ocurre en el caso 2. Los resultados del último caso se consiguen afectando a la distribución de los elementos dentro de la zona plástica, no aumentando su número.

Otro aspecto a destacar es que, en contra de las recomendaciones de McClung y Sehitoglu [4], que se cumplen en todos los casos excepto el primero (se han usado elementos lineales), la medida del radio plástico si se ve influenciada por estos mallados, y solo en el último caso podríamos decir que el resultado es preciso. De cualquier forma hay que decir que estas recomendaciones estaban enfocadas a efectos de no obtener desviaciones posteriores para la obtención de la tensión de apertura y en el momento en que fueron formuladas no compensaba afinar en la obtención del radio plástico.

Hay que decir también que en dos dimensiones no es crítico este parámetro, no se han realizado mallados más finos porque realmente no han sido necesarios, pero no hubieran implicado ninguna dificultad ni limitación de cálculo. No obstante, con vistas a los cálculos en tres

dimensiones, si resulta interesante acotar este tamaño mínimo.

Tabla 1. Medida del radio plástico en relación al tamaño de elemento mínimo en la zona plástica. Caso: Tensión plana, $K = 10 \text{ Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$. $a = 20 \text{ mm}$. $R = 0$. $r_p = 0.37 \text{ mm}$ (Dugdale).

Tamaño elemento (mm)	r_p (mm)	Relación r_p / t_{elem}	Nº de elementos
0.05	0.25	7.4	2305
0.025	0.27	14.8	8868
0.02	0.31	18.5	2737
0.0125	0.387	29.6	2305

Otro aspecto que se ha estudiado es la apertura y el cierre. En la figura 6 se puede ver la evolución del perfil de tensiones en la grieta seguido durante la carga. En ella se ha indicado el punto que correspondería a la tensión de apertura (en este caso a un 25 % de la carga). Puesto que no se simula en este caso la estela plástica (no hay avance de grieta), el criterio seguido para la determinación de la tensión de apertura corresponde al punto en el que la tensión en el borde se hace nula (K_{tt}).

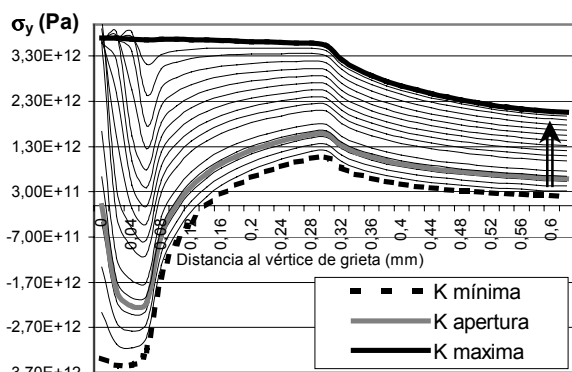


Fig. 6. Perfil de tensiones en la grieta durante la carga. $K = 10 \text{ Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$. $a = 20 \text{ mm}$. $R = 0$. Tensión plana.

También se han simulado el avance de la grieta. Este tiene algunas implicaciones que no aparecen cuando la grieta es estática. En primer lugar se produce contacto y por tanto hay que modelarlo, esto no supone ninguna dificultad en ABAQUS pero si supone una discontinuidad que retrasa el cálculo y la convergencia, aunque de manera moderada.

Otro aspecto, que si que supone dificultades de convergencia es el esquema de liberación de los nodos. En el momento en que estos se liberan, lo que se hace es cambiar de manera brusca las condiciones de contorno en unos puntos que soportan tensiones elásticas altas y que, además, están sometidos a las comprobaciones que imponen las condiciones de no penetración en el contacto. Esto supone graves dificultades numéricas que se han tratado de salvar y que indudablemente habrá que precisar más adelante.

En estos primeros cálculos, se ha optado por liberar los nodos en el punto más alto de la carga (al estar a tracción no tienden a penetrar el contacto) y permitir un cierto periodo de ajuste sin disminuir mucho la carga (al estar ya en el ciclo de descarga).

En la figura 7 se puede ver la evolución de un perfil típico de descarga cuando la grieta a avanzado del nodo 6 al 11 (0.25 mm) por medio de tres ciclos con $R = 0$, $K = 30 \text{ Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$, $a_{inicial} = 20 \text{ mm}$. En este caso la determinación de la tensión de apertura se ha hecho mediante el criterio de la separación del contacto (K_{op}).

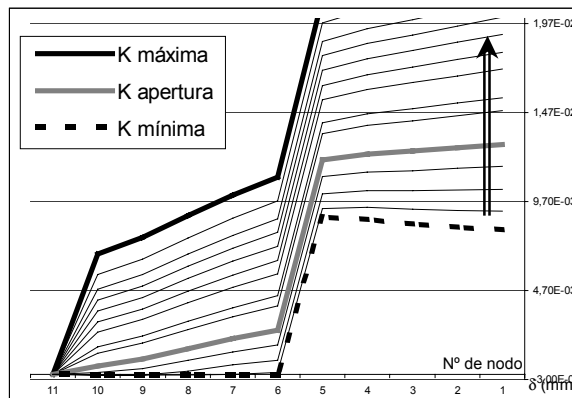


Fig. 7. Desplazamiento del perfil de la grieta en descarga con contacto.

5. CONCLUSIONES Y LINEAS DE TRABAJO

A partir de los diversos resultados obtenidos, aún no se pueden sacar conclusiones importantes en relación a ellos, sin embargo si que se puede decir que han servido para tener un control preciso de todos los parámetros involucrados en el problema.

Bajo un mismo objetivo común, el estudio de la influencia del espesor en el cierre y por tanto en la vida de las grietas, se están llevando, actualmente, a cabo dos líneas de trabajo bien definidas.

En una primera se está realizando un amplio estudio del comportamiento de las probetas CT sometidas al ciclo sencillo de carga, descarga y nueva carga pero bajo muy diversas situaciones. Con ello se pretende obtener una visión completa de la relación entre el cierre en tensión plana, en deformación plana y en tres dimensiones con diversos espesores (inicialmente 6 y 12 mm). Este trabajo exige un gran número de cálculos puesto que las cuatro situaciones descritas se van a combinar con al menos dos niveles de carga ($K = 10$ y $30 \text{ Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$), tres longitudes de grieta ($a = 15, 20$ y 25 mm) y con R variando entre 0, 0.25, 0.50 y 0.75.

Estos resultados están limitados por el hecho de que no está interviniendo el efecto de la estela plástica, por tanto, es importante determinar que influencia real tiene. Esta es la segunda línea de trabajo la cual implica cálculos más complejos y largos y por tanto no es

posible realizar en tanta profundidad y extensión como en el caso anterior. Se trataría de modelar el proceso completo de avance de grieta de manera que en el punto en el que tomemos los resultados podamos considerar que el efecto de la estela simulada es equivalente a la real.

Esto, a parte de las dificultades de convergencia descritas en los apartados anteriores, tiene muchas implicaciones entre otras el obligar a tener en consideración otros parámetros como las tensiones de preagrietamiento, la longitud de avance de grieta total y en cada ciclo, de manera que garanticemos la continuidad y estabilidad de los resultados.

Con los resultados obtenidos de estos análisis se tendría una visión precisa y amplia de la influencia del espesor en el comportamiento del cierre de grieta. La manera de parametrizar este aspecto sería por medio de la obtención de un factor de constricción que nos diga, por ejemplo, en que situación equivalente nos encontraríamos en el caso de trabajar con modelos de simulación ciclo a ciclo bidimensionales del tipo del de Newman (FASTRAN) [10], actualmente estos parámetros se ajustan sin mucho criterio y por tanto sería de interés tratar de obtener alguna regla de decisión cuando se simulan cargas de amplitud variable.

6. REFERENCIAS

- [1] Newman, J.C., "Finite-element analysis of fatigue crack propagation – including the effects of crack closure", Ph. D. thesis, VPI&SU, Blacksburg, VA (1974).
- [2] Fleck, N.A. y Newman, J.C., "Analysis of crack closure under plane strain conditions", ASTM STP 982, Philadelphia, PA, pp. 319-341 (1988).
- [3] Chermahini, R.G., "Three-dimensional elastic-plastic finite-element analysis of fatigue crack growth and closure", Ph.D. thesis, Old Dominion University, Norfolk, VA (1986).
- [4] McClung, R.C. y Sehitoglu, H., "On the finite-element analysis of fatigue crack closure", (partes 1 y 2), Engineering Fracture of Mechanics, 33, pp. 237-272 (1989).
- [5] Sehitoglu, H. y Sun, W., "Modelling of plane strain fatigue crack closure", ASME Journal of Engineering Materials & Technology, 113, pp. 31-41 (1991).
- [6] Sun, W. y Sehitoglu, H., "Residual stress fields during fatigue crack growth", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 15, pp. 115-128 (1992).
- [7] Wu, J. y Ellyin, F., "A study of fatigue crack closure by elastic-plastic finite element for constant-amplitude loading", International Journal of Fracture, 82, pp. 43-65 (1996).
- [8] Palazotto, A. N. y Mercer, J.C., "A finite-element comparison between short and long cracks within a plastic zone due to a notch", Engineering Fracture of Mechanics, 35, pp. 967-986 (1990).
- [9] Martín-Lomeña, P., "Estudio del estado tensional en probetas CT preagrietadas mediante el método de los elementos finitos", P.F.C., E.T.S.I. Industriales, Universidad de Málaga, (1999).
- [10] Moreno, B., Zapatero y Pascual, J., "El uso de modelos de simulación ciclo a ciclo en la predicción del crecimiento de grietas en fatiga con cargas aleatorias", Anales de Mecánica de la Fractura, Vol. 15, pp. 67-72 (1998).