INFLUENCIA DE LOS MODELOS DE PLASTIFICACIÓN EN LA SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS DEL CIERRE EN FATIGA

J. García-Manrique, A. Cordero, J. Pascual, J. Zapatero, A. González-Herrera.

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

Resumen. El Método de los Elementos Finitos es uno de los procedimientos más precisos para el análisis numérico de las tensiones de cierre o apertura de grieta en fatiga. La simulación del fenómeno de cierre de grieta inducida por plasticidad exige la correcta modelización de la estela plástica. Ésta se produce por medio de la aplicación continua de una serie de ciclos de carga y descarga. El número de ciclos aplicados es muy inferior al real por lo que se debe comprobar si los ciclos no aplicados tienen influencia en los resultados. Hasta la fecha todos los estudios anteriores se han basado en modelos elasto-plásticos perfectos o con un muy leve endurecimiento. En este artículo se presentan los resultados del estudio del efecto que la consideración de un material con distintos modelos de endurecimiento por deformación, en concreto los modelos isótropo y cinemático, tiene en el fenómeno del cierre en probetas CT de aluminio. Se pretendía con ello eliminar la incertidumbre que pueda pesar sobre los resultados obtenidos hasta el momento así como modificar la metodología de cálculo actual. Se han combinado diferentes niveles de endurecimiento, modelos del material, diversos valores de la relación de tensiones y distintos procedimientos para generar la estela plástica en los casos bidimensionales de tensión plana y de deformación plana.

Abstract. The Finite Element Method is one of the most precise option for the fatigue crack closure numerical analysis. Any approach to the crack closure phenomenon needs the correct simulation of the plastic wake. This effect is simulated by the application of continuous loading and unloading cycles. The number of these cycles are less than real ones so it is necessary to prove how it affects the results obtained. So far today previous studies have being always based on elastic-perfectly plastic models or with a little hardening behaviour. In this work the influence in the fatigue crack growth of aluminium CT specimens with hardening rules are presented, in short the kinematics and isotropic models. Results of recent studies are validated as soon as necessaries modifications of the actual methodology are presented. Different hardening levels, material models, diverse R ratios and procedures to generate the plastic wake have been combined in bidimensional plane stress and plane strain.

1. INTRODUCCIÓN

A principios de los setenta, Elber definió por primera vez el fenómeno del cierre de grieta en fatiga, siendo desde entonces fundamental la determinación del punto preciso en el que éste se produce dentro del ciclo de carga y descarga para el estudio de la vida a fatiga de la grieta. Para ello se recurre al análisis numérico, siendo el Método de los Elementos Finitos una de las opciones que mayor precisión puede aportar [1,2].

Reproducir el fenómeno real no es factible haciéndose necesarias una serie de aproximaciones que cuestionan los resultados. Recientemente se han llevado a cabo una serie de trabajos orientados a desarrollar una metodología que permita modelizar el crecimiento de una grieta sometida a fatiga en probetas CT (Compact Tensión) [3-6].

Todas las conclusiones obtenidas en estos proyectos son la base del trabajo expuesto en este artículo que ahonda en un aspecto no tenido en cuenta hasta el momento como es la influencia del endurecimiento por deformación del material y de sus distintos modelos. Hasta la fecha todos los estudios se basaban en modelos elasto-plásticos perfectos o con un muy leve endurecimiento.

La longitud numérica de avance de grieta en cada ciclo que se desprende de esta metodología es de un orden mucho mayor (10-100 veces) de la real convirtiéndose en un punto de discontinuidad en el proceso de cálculo donde se dejan un gran número de ciclos sin simular.

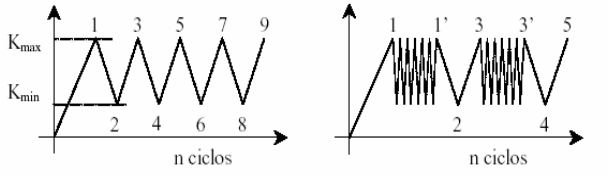


Fig. 1: Ciclos de carga-descarga en el avance de grieta.

Esta falta de información puede dar lugar a errores significativos en aquellos materiales donde el endurecimiento por deformación sea apreciable debido a la influencia en ellos de la historia de cargas del proceso y a fenómenos como el efecto Bauschinger.

En este artículo se presentan los resultados del estudio del efecto que la consideración de un material con distintos modelos de endurecimiento por deformación,

en concreto los modelos isótropo y cinemático (Fig. 2) [7], tienen en el fenómeno del cierre por medio de la simulación del crecimiento de la grieta en los casos bidimensionales de tensión plana y deformación plana mediante modelos de elementos finitos. Se ha puesto un especial énfasis en su influencia sobre los valores de las tensiones de apertura y cierre, aunque se considera también el efecto sobre otras variables del fenómeno. [8]

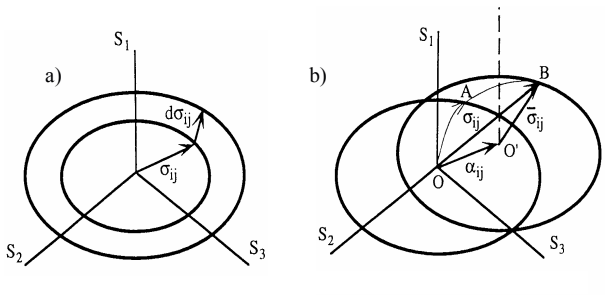


Fig. 2: a) Modelo isótropo. b) Modelo cinemático.

Se describe brevemente la metodología y los parámetros empleados y su justificación, haciendo especial hincapié en aquellos puntos que difieran de la metodología actual. A continuación se consideran los resultados obtenidos y se discuten las conclusiones más relevantes.

2. MODELADO DEL PROBLEMA.

Hay que destacar el elevado coste computacional de este tipo de problemas debido al carácter fuertemente no-lineal que presentan (comportamiento plástico, modelado del contacto, grandes deformaciones en el vértice y, ahora, endurecimiento por deformación) así como al nivel de discretización requerido en el vértice de grieta.

Se describe a continuación la metodología seguida de acuerdo a las recomendaciones y experiencia desarrollada en trabajos anteriores [2-6].

Como se ha comentado se trabaja con una probeta CT aplicando condiciones de simetría (Fig. 3), en concreto para valores de W = 50 mm y a =20 mm.

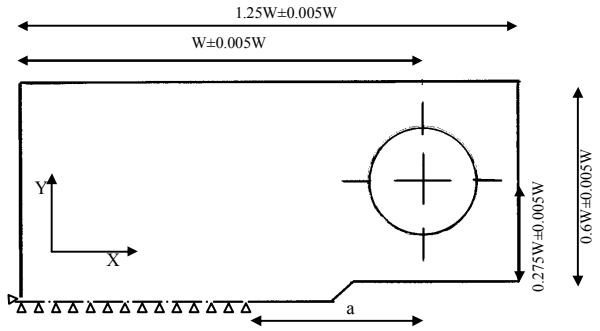


Fig. 3: Probeta Compact Tensión.

El crecimiento, previo a la medición, de la estela plástica es imprescindible para la medida del cierre y la apertura, especialmente en tensión plana. La longitud de estela necesaria se modela mediante una serie de ciclos de carga y descarga. La grieta se hace avanzar un elemento en cada ciclo de carga hasta alcanzar la longitud de grieta deseada. Los nodos se liberan en el punto de máxima carga entrando a formar parte de la superficie de grieta. Por último se añade un ciclo adicional con carga constante para estabilizar las nuevas condiciones de contorno (Fig. 4):

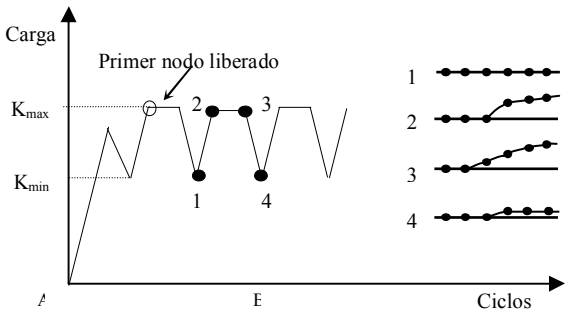


Fig. 4: Aplicación clásica de los ciclos de carga**.**

Esta historia de cargas también ha sido objeto de estudio en este trabajo. Partiendo de ésta se han llevado a cabo simulaciones donde se añaden una serie de ciclos de carga y descarga una vez simulada la estela y otras donde se incluyen además ciclos intermedios tras liberar cada nodo de la estela (Fig. 5).

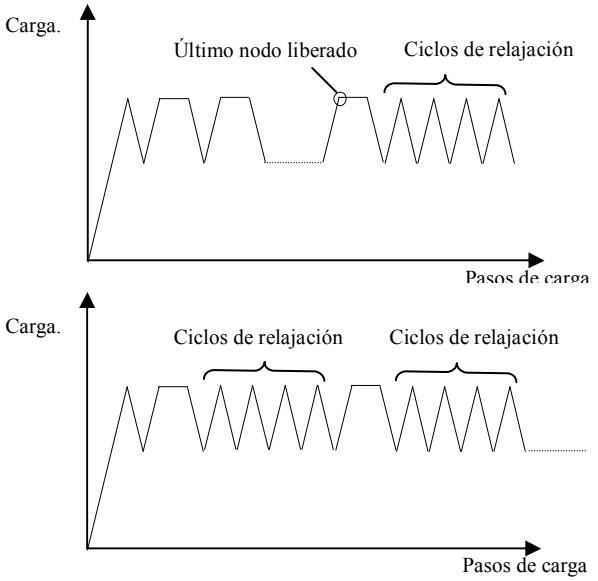


Fig. 5: Historia de carga con ciclos finales e intermedios.

Estos ciclos de carga y descarga añadidos pretenden acercar el modelo algo más a la realidad de la grieta. El número necesario de ellos variará en función del modelo y del nivel de endurecimiento y se establecen observando la estabilización de los parámetros del problema. Frente a esto hay que considerar que suponen aumentar las iteraciones y el costo computacional. Su influencia será discutida en el apartado de resultados.

Un aspecto clave y ya ampliamente recogido en la bibliografía es el tamaño de elemento en la región del vértice y la transición a lo largo de la probeta. Siguiendo las recomendaciones recogidas en ella [2, 5] se divide esta zona en una malla regular tomando como referencia para el tamaño de elemento el radio plástico definido por Dugdale. Así mismo se generan una serie de áreas que garanticen la mínima distorsión de elementos y la no plastificación en la zona de aplicación de la carga. Se han considerado casos entre 30 y 40 elementos por radio plástico.

En concreto, para el caso de 30, se ha desarrollado una malla de 4419 elementos cuadriláteros de cuatro nodos con modos incompatibles, lo que supone un ahorro significativo frente a mallados anteriores. En la Fig. 6 se muestra el mallado resultante.

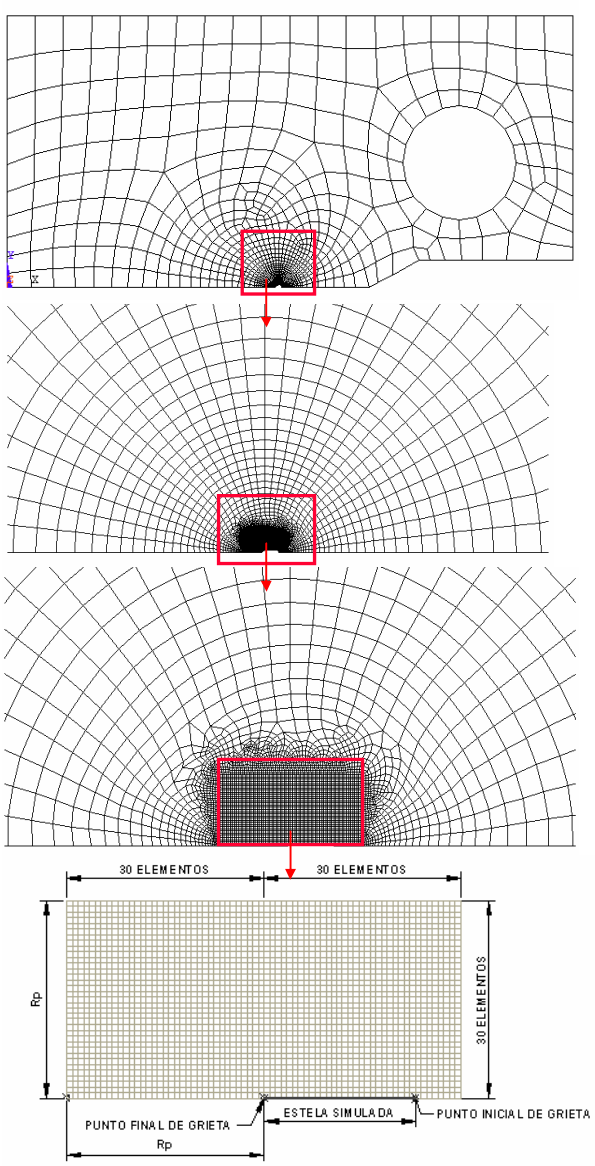


Fig. 6: Mallado del modelo.

La aplicación de la carga se ha repartido en partes iguales entre cinco nodos de tal forma que se simulen ciclos de carga máxima fija correspondientes a un valor del factor de intensidad de tensiones de K_{max} = 10 Mpa·$m^{1/2}$ mientras que se ha hecho variar la carga mínima estudiando distintos valores de la relación de tensiones R, en concreto 0.3 y 0.1 que se consideran suficientemente representativos.

El material empleado en la probeta es una aleación de aluminio denominada Al-2024-T35 con E= 73.5 GPa, módulo de Poisson 0.35 y límite elástico 470 MPa. Se considera endurecimiento por deformación isótropo y cinemático. Para estudiar la influencia del nivel del endurecimiento se considera como parámetro representativo la relación entre el módulo de Young y el módulo plástico H/E.

Se tomarán valores desde H/E = 0.003, valor real del material cercano a la hipótesis de no endurecimiento, hasta H/E = 0.07, valor representativo de materiales con gran endurecimiento.

Para la determinación del cierre y la apertura se ha considerado tanto el criterio de tensiones de apertura (cierre) (K_{tt}) como el de contacto en el nodo anterior al vértice (K_{nc}). El primero de ellos establece que la grieta abre cuando las tensiones en el vértice pasan de compresión a tracción mientras que el segundo considera que esta apertura ocurre cuando el nodo más cercano al vértice deja el eje de simetría (deja de estar en contacto). Se demuestra que ambos son convergentes siendo K_{tt} menos dependiente del mallado [4].

3. RESULTADOS OBTENIDOS.

Como se desprende del apartado anterior se han simulado una gran cantidad de modelos tanto en deformación plana como en tensión plana, se han estudiado los casos de H/E =[0.003, 0.006, 0.01, 0.04, 0.07] para modelos isótropos y cinemáticos, con valores de R = [0.1, 0.3] para distintos niveles de discretización. Además de esto se ha estudiado en cada caso la conveniencia de la inclusión de los mencionados ciclos finales e intermedios de carga. Se mantienen constantes los valores geométricos y de K.

Todas las simulaciones se han programado en el entorno del programa ANSYS, siendo en todo momento referencia y contraste los resultados y la experiencia de trabajos anteriores con ABAQUS.

Como consecuencia lógica de la gran cantidad de datos recogidos, nos limitaremos en adelante a presentar con brevedad aquellos que nos resultan más relevantes [8].

En primer lugar destacar que, aunque en principio pudiera parecer lo contrario, la consideración de endurecimiento por deformación por pequeño que sea éste repercute muy positivamente en el tiempo de cómputo al conseguir una relación unívoca tensión-deformación que modelos como el elasto-plástico perfecto no tienen, facilitando la convergencia en cada una de las iteraciones.

3.1 Ciclos añadidos de carga-descarga.

Se observa la necesidad de modificar la metodología expuesta hasta el momento añadiendo picos finales de carga-descarga sin avance de grieta antes de tomar mediciones de apertura o cierre. El número de ciclos en cada caso aumenta conforme lo hace la relación E/H y es algo superior para modelos isótropo que para el cinemático y para el estado de tensión plana que para el de deformación plana.

La consideración de ciclos intermedios durante la formación de la estela plástica no afecta a los valores de apertura o cierre mientras que aumenta en gran medida el costo computacional. No obstante, a través de ellos, se soluciona un desajuste del campo de desplazamientos de la grieta detectado en deformación plana. En la Fig. 7 se puede observar el perfil de la grieta en función de la distancia adimensionalizada al vértice de grieta. En la primera, a lo largo de 5 picos finales de carga y descarga necesarios para estabilizar la medida del cierre. A continuación se recoge el mismo caso una vez añadidos estos picos en cada uno de los nodos de la estela y se representan 1º, 3º y 6º ciclo. (0% y 100% se corresponde con K_{min} y K_{max}).

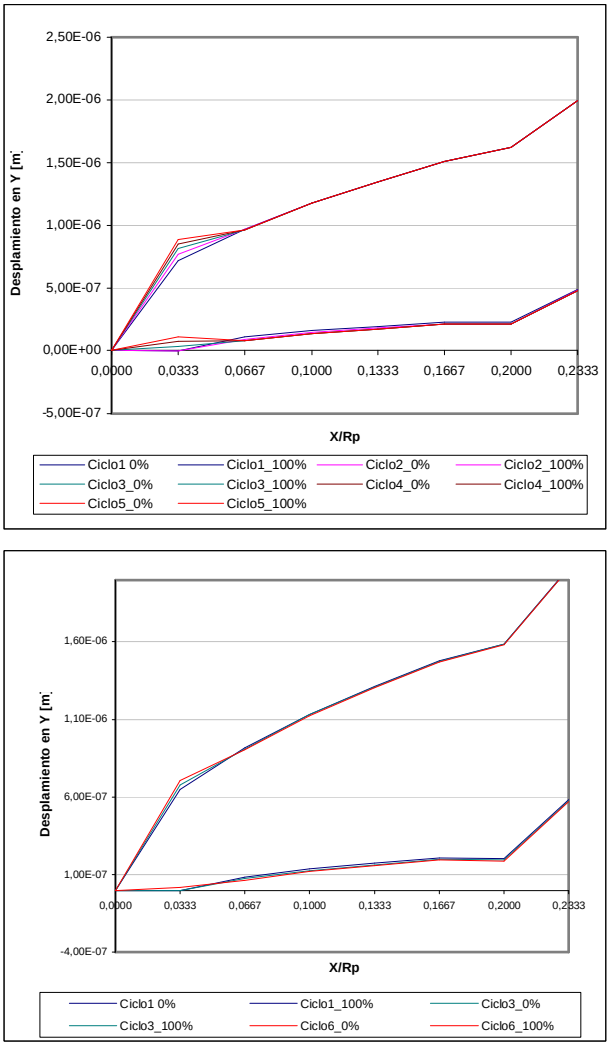


Fig. 7: Perfil de desplazamientos en la grieta sin y con picos intermedios de relajación en Deformación Plana.

3.2 Valores de apertura y cierre de grieta.

Aunque se ha estudiado tanto el criterio K_{tt} como el K_{nc}, se descarta el uso del segundo de ellos en deformación plana donde no se consigue una estabilización adecuada de la salida de datos.

Se han elaborado una serie de gráficas donde se recogen los resultados obtenidos en función del parámetro H/E y el modelo utilizado. A modo de ejemplo se presentan en la Fig. 8 los correspondientes a R = 0.3 y tensión plana. Se añaden a los subíndices las terminaciones ‘op’ para la apertura y ‘cl’ para el cierre.

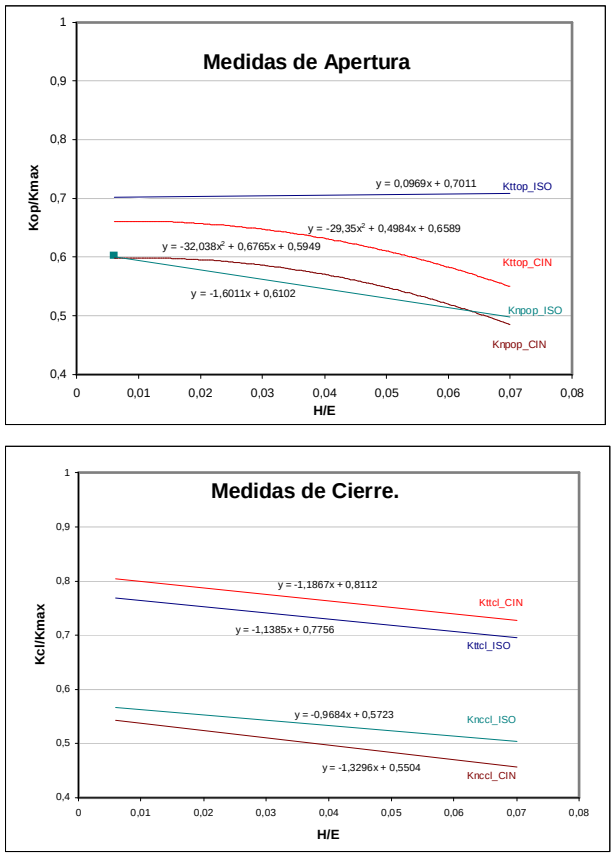


Fig. 8: Medidas de apertura y cierre de grieta en función de H/E para modelos cinemático e isótropo en tensión plana y R=0.3.

Se observa en la figura anterior como el cierre de grieta presenta las mismas tendencias para ambos criterios independientemente del modelo, con desviaciones del 4-5% despreciables. Sin embargo en la medida de la apertura si se observa un comportamiento diferenciado entre el modelo cinemático e isótropo, comportamiento que el criterio K_{nc} no es capaz de detectar. No se recogen conclusiones distintas de simulaciones con R=0.1.

Lo mas destacable de estas gráficas así como de las obtenidas en deformación plana es la importancia de la correcta caracterización del modelo de endurecimiento del material a la hora de determinar la apertura de grieta, llegándose a diferencias cercanas al 15% de la K_{max}.

El comportamiento diferenciado de ambos modelos en cuanto a sus tensiones en el vértice se refiere aumenta conforme lo hace el nivel de endurecimiento. Para visualizar de forma precisa este efecto se exponen en la Fig. 9 dos gráficas donde se representan sendas evoluciones a lo largo de los picos finales de estabilización del valor de la tensión en Y y la deformación plástica en Y en el nodo correspondiente al vértice de grieta para distintos niveles de endurecimiento.

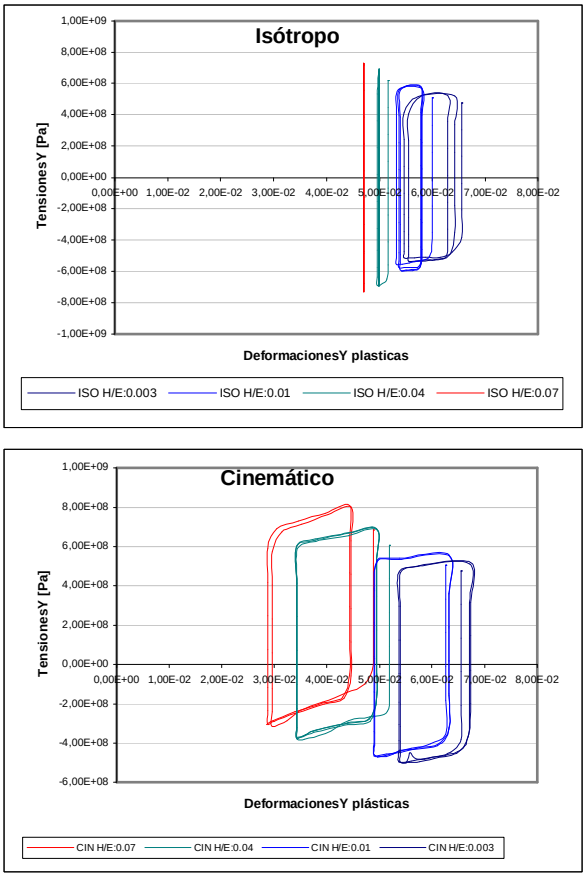


Fig. 9: TensionY frente a Deformación plásticaY en el vértice de grieta.

Mientras el modelo cinemático alcanza su ciclo característico de histéresis que desplaza conforme variamos el módulo plástico, en el modelo isótropo se alcanza el límite de endurecimiento del material comportándose elásticamente a partir de entonces.

Para valores altos de H/E se llega al extremo de que el propio frente de grieta produce una deformación plástica tal en los nodos posteriores al vértice que ya se encuentran saturados cuando los alcanza la grieta. Esto fundamenta la mayor capacidad de convergencia de este modelo.

Este comportamiento elástico da lugar a que los valores de las tensiones de apertura y cierre se acerquen llegando a igualarse para valores de H/E superiores a 0.4 como se comprueba en la Fig. 10 referente al caso de deformación plana.

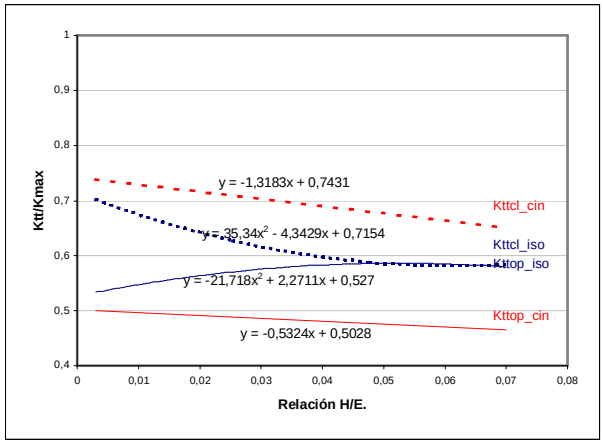


Fig. 10: Criterio Ktt en deformación plana para R=0.3.

3.3 Caracterización de la región plastificada.

Se ha trabajado en la caracterización de la estela plástica en función del modelo de endurecimiento y del valor de H/E. Así mismo se han estudiado distintos perfiles de deformación plástica tanto en la estela como en el frente de grieta estudiando su evolución.

En la Fig. 11 se muestra la parametrización llevada a cabo para estudiar la estela en tensión plana.

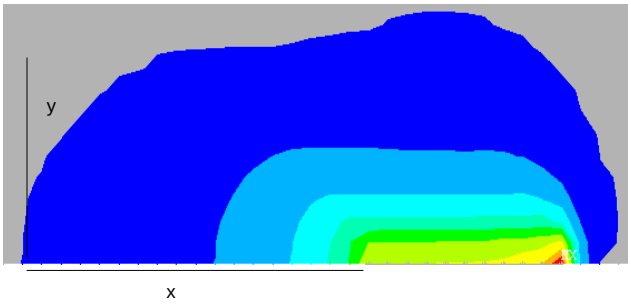


Fig. 11: Parámetros de la estela en tensión plana

Los resultados obtenidos muestran que la forma y tamaño de esta región es independiente del modelo de endurecimiento utilizado. No obstante si se producen variaciones a distintos niveles de endurecimiento como se refleja en la Tabla 1.

	Valor [m]	$(x,y)/Rp_{dugdale}$
x (H/E ≤ 0.01)	1.244E-04	0.700
y (H/E ≤ 0.01)	0.533-04	0.300
x (H/E ≥ 0.04)	1.126E-04	0.634
y (H/E ≥ 0.04)	0.652E-04	0.367

Tabla 1: Región plastificada en Tensión Plana. R=0.3.

Estas diferencias son aún de menor importancia si consideramos el caso de la región plastificada en el estado deformación plana. En la Fig. 12 se representan ya directamente los contornos superpuestos de estas regiones. Se diferencia entre valores altos de H (H/E≥ 0.04) y valores bajos de H (H/E≤0.01).

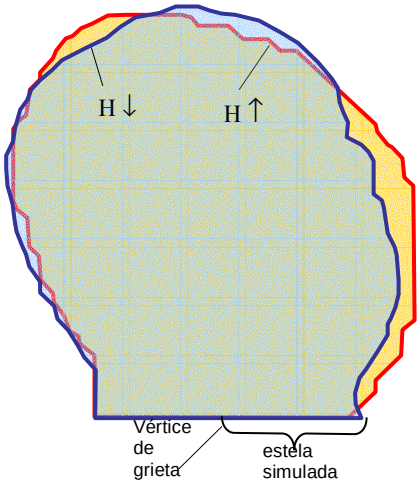


Fig. 12: Región plastificada en deformación plana para R=0.3.

4. CONCLUSIONES

La principal conclusión que se desprende de todo lo expuesto es la importancia de modelar correctamente el material, en especial en los casos que presentan alto endurecimiento, para obtener medidas correctas de la apertura de grieta, siendo su influencia menor en el caso del cierre.

Se validan los resultados de trabajos anteriores donde no se consideraba endurecimiento por deformación. Siendo las características reales de éste las de un modelo isótropo con H/E=0.003, las diferencias alcanzadas son de un 2-3%.

Se considera adecuada la metodología de trabajo actual para el tratamiento del endurecimiento con dos consideraciones. En primer lugar la introducción de los picos finales de carga y descarga hasta la estabilización de los resultados en el vértice, y la introducción de los picos intermedios solo en el supuesto de que se pretenda captar el perfil correcto de desplazamientos en la grieta.

Se propone la consideración del modelo de endurecimiento correspondiente aunque se trate de un material de bajo módulo plástico debido al beneficioso efecto en el tiempo de cómputo.

Se ofrece un conjunto de gráficas que recogen la evolución de las medidas de apertura y cierre para los modelos cinemático e isótropo en el rango de módulo plástico estudiado H/E=[0.003,0.07].

En Tensión Plana el modelo isótropo mantiene un valor parecido de la tensión de apertura para todo el rango de H/E mientras que la de cierre se retrasa hasta igualarse a la anterior una vez alcanzado su límite de endurecimiento. El modelo cinemático presenta la misma tendencia creciente en ambas medidas de tensión. El criterio de K_{nc} no es capaz de detectar este fenómeno.

En Deformación Plana se observan tendencias parecidas con algunas excepciones. El modelo isótropo retrasa su saturación en cuanto a deformación plástica hasta casi el H/E=0.07 así como presenta una variación en sus tensiones de apertura. Se necesitan en general más picos finales que en tensión plana no siendo posible su estabilización según K_{nc}.

En cuanto al comportamiento relativo de ambos modelos, en Tensión Plana presentan unos valores de cierre similares adelantándose la tensión de apertura del modelo cinemático conforme aumenta H/E. En Deformación Plana el modelo isótropo presenta retraso tanto en las tensiones de cierre como de apertura.

No se detectan diferencias sustanciales para los casos con R=0.1.

Se recogen tablas con las diferencias geométricas de las regiones plastificadas en cada caso.

7. REFERENCIAS

[1] Elber, W., "The significance of fatigue crack closure" Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM SRP 486, pp. 230-247 (1971).

[2] McClung, R.C. y Sehitoglu, H. " On the finite-element analysis of fatigue crack closure", Engineering Fracture of Mechanics, 33, pp. 237-272 (1989).

[3] González Herrera, A., García Vallejo, 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, 445-450 (2002).

[4] González Herrera, A., García Vallejo, D., Moreno B. y Zapatero J. "Análisis del tamaño de elemento mínimo para la determinación de la tensión de cierre en fatiga mediante elementos finitos". XV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Cádiz. (2002).

[5] González Herrera, A., García Vallejo, D., Melgar , A., Moreno B. y Zapatero J. "Simulación de la estela plástica mediante elementos finitos", V Congreso de Métodos Numéricos en la Ingeniería, 118,Madrid (2002).

[6] González Herrera, 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, 438-445, (2001).

[7] W.F. CHEN, H. ZHANG. "Structural Plasticity", Springer (1991).

[8] García-Manrique Ocaña, J. "Influencia de los modelos de plastificación con endurecimiento en la determinación numérica de tensiones de cierre en fatiga". P.F.C., E.T.S.I.I. Universidad de Málaga (2002).