

MODELADO DE LA PROPAGACIÓN Y COALESCENCIA POR FATIGA DE DOS FISURAS COPLANARES

Hugo López Montenegro, Adrián P. Cisilino y José L. Otegui

*Grupo Soldadura y Fractomecánica, Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA),
Universidad Nacional de Mar del Plata, Juan B. Justo 4302, 7600 Mar del Plata, Argentina,
hmonte@fi.mdp.edu.ar, <http://www.intema.gov.ar>*

Palabras clave: Mecánica de fractura, Fatiga, Coalescencia de fisuras, Métodos numéricos.

Resumen. El estudio de la propagación y coalescencia de fisuras superficiales es un típico problema de la ingeniería estructural, de interés en el diseño y conservación de estructuras metálicas grandes y medianas. En el presente trabajo, un programa desarrollado por los autores en base al algoritmo de Oore y Burns, que permite calcular el factor de intensidad de tensiones en fisuras planas de geometría arbitraria bajo tensiones de apertura, es empleado para estudiar, de acuerdo a la ley de Paris, la propagación por fatiga de dos fisuras en un plano en las etapas previa y posterior a la coalescencia de las fisuras. El programa incorpora un factor de magnificación del factor de intensidad de tensiones en cada fisura realizado en base a soluciones existentes en la literatura; y es aplicado al estudio de tres casos de interacción de fisuras ya estudiados: el de dos fisuras semicirculares iguales y desiguales; y el correspondiente a dos fisuras de geometría irregular. El último ejemplo ya ha sido resuelto para la etapa post-coalescencia en un trabajo reciente, extendiéndose en este trabajo a la etapa previa a la coalescencia, con resultados satisfactorios.

1 INTRODUCCIÓN

La mecánica de fractura lineal-elástica utiliza el factor de intensidad de tensiones (FIT) K como parámetro de fractura. Soluciones estándar del FIT existen en la literatura para fisuras con geometría regular y cargas simples. Cuando condiciones complejas de carga son aplicadas a la fisura, el método de las funciones de peso (MFP) (Bueckner, 1970) permite calcular K en el modo de apertura para un punto genérico del frente de fisura por integración de la distribución de tensiones sobre la superficie de la fisura. Existen funciones de peso para muchas geometrías regulares 2-D y 3-D en la literatura especializada, pero cuando se estudian fisuras irregulares, debe recurrirse a algún procedimiento numérico. Esta limitación es superada mediante el algoritmo de Oore y Burns (Oore 1980) conocido como integral "O", obtenido a partir del examen de la estructura de las funciones de peso correspondientes a soluciones conocidas, y que permite obtener soluciones en general satisfactorias de K en fisuras irregulares inmersas en un volumen infinito y bajo cargas de apertura. En un trabajo reciente de los autores (López Montenegro, 2006) se mejora la aplicabilidad del algoritmo, se extiende al caso de fisuras interiores o superficiales de placas, y se implementa por medio del programa 'Calsyf', que brinda una herramienta numérica de bajo costo computacional al ser comparada con métodos estándar como el de elementos finitos o el de elementos de contorno, y capaz de aportar soluciones del FIT que resultan en general menos conservativas que las obtenidas con normas y prácticas recomendadas. Calsyf también permite resolver casos de cierre parcial de la fisura, como sucede cuando existen tensiones residuales producidas por soldadura o por tratamiento de superficies por granallado (*shot-peening*), en base a una técnica que determina la parte abierta de la fisura (fisura efectiva) imponiendo la condición $K = 0$ sobre el límite entre las partes abierta y cerrada de la fisura (López Montenegro, 1994 y 1996). En el presente trabajo, la propagación y la coalescencia de dos fisuras en un mismo plano es estudiada modelando el aumento del FIT en la frontera de cada fisura en función de la cercanía y el tamaño relativo de las mismas, e implementando el modelo con el programa Calsyf para tensión remota uniforme, por lo cual no se considera aquí que las fisuras presenten cierre parcial en su superficie.

2 LA FUNCION DE PESO DE DEFINICIÓN GEOMÉTRICA

La integral "O" aproxima la función de peso de fisuras con geometría arbitraria en un volumen infinito. Si Q' es un punto genérico del frente de fisura y un par de fuerzas simétricas de apertura P_Q actúan sobre un punto Q en las superficies de la fisura, el FIT $K_{QQ'}$ en Q' está dado por $K_{QQ'} = P_Q \cdot W_{QQ'}$, donde $W_{QQ'}$ es el FIT en Q' , por unidad de fuerza en Q , llamado la función de peso de la fisura, y dependiente sólo de su geometría. La integral "O" propone una función de peso de carácter general como sigue.

$$W_{QQ'} = \frac{\sqrt{2}}{\pi \cdot l_{QQ'}} \cdot \frac{1}{\left[\int_S \frac{ds}{\rho_Q^2} \right]^{1/2}} \quad (1)$$

Donde $l_{QQ'}$ es la distancia del punto de carga Q al punto Q' en el frente de la fisura, y ρ_Q es la distancia desde Q al centro del elemento de longitud ds de la frontera S (ver Fig. 1 a). Luego, para todo par de tensiones σ_Q actuando sobre las superficies de la fisura, el factor de intensidad de tensiones $K_{Q'}$ en el punto Q' es una integral calculada sobre el área A de la superficie de la fisura:

$$K_{Q'} = \int_A \sigma_Q \cdot W_{QQ'} \cdot dA \tag{2}$$

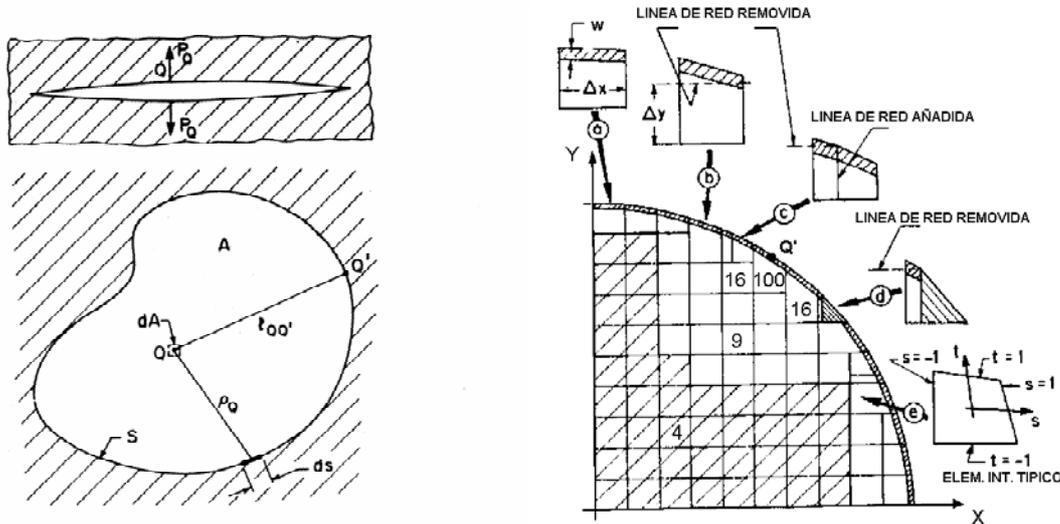


Figura 1. a) Definición de variables geométricas de la integral “O”; b) discretización con elementos interiores y de borde para una fisura circular.

Para cargas puntuales de apertura, la integral “O” coincide con la solución exacta de la fisura circular, la fisura de frente recto semi-infinito y la fisura de ligamento circular en volumen infinito; pero sólo provee soluciones aproximadas para geometrías generales. Una técnica computacional híbrida numérica-analítica para el cálculo de la integral “O”, que diferencia entre elementos interiores y de borde, empleando puntos de Gauss para el cómputo de los primeros (entre 4 y 100, ver Fig. 1 b) y una aproximación semi-analítica para los segundos, se ha mostrado eficiente para el cálculo del FIT (Desjardins, 1991). La figura 1 (b) muestra la discretización de un cuarto de circunferencia empleada por Desjardins. Estudios de calibración para elipses de factor de aspecto entre 1 y 0.1 bajo tensión uniforme y de flexión pura, revelaron un error máximo cercano al 18%, correspondiente a la región de mayor curvatura del frente de fisura, situada en el semieje mayor de la elipse de menor factor de aspecto. Este error se debe a la integral “O”, no al proceso de cálculo (Khattab, 1986). A fin de superar esta limitación de la integral “O”, los autores de este trabajo implementaron en el programa Calsyf una función correctora del FIT obtenido por la integral “O”, $K(Oore)$, mediante una técnica numérica similar a la empleada por Desjardins. La función correctora fue desarrollada por comparación con soluciones exactas para elipses de diferentes factores de aspecto; así como también con soluciones numéricas para fisuras rectangulares (Irwin, 1962; Isida, 1982). La función correctora, f_c , depende del factor de aspecto r de la geometría de fisura, obtenido como cociente de valores máximos de longitud y profundidad; y la curvatura normalizada adimensional χ_n del punto de interés del frente de fisura:

$$f_c(r, \chi_n) = \frac{K(\text{solución de referencia})}{K(Oore)} \tag{3}$$

Luego, el factor de intensidad de tensiones corregido K_{corr} resulta del producto:

$$K_{corr} = K(Oore) \cdot f_c \tag{4}$$

Otros factores de corrección incorporados a Calsyf dan cuenta de la superficie libre para el caso de fisuras superficiales situadas en volúmenes semi-infinitos o en placas, a partir de soluciones existentes en la literatura especializada (Newman-Raju, 1981 y 1983).

3 PROCEDIMIENTO NUMÉRICO PARA LA PROPAGACIÓN DE FISURAS

El procedimiento emplea la ecuación de Paris-Donahue para describir la propagación de fisuras, cuya forma incremental se muestra en la expresión siguiente:

$$\frac{\Delta a}{\Delta N} = C (\Delta K - \Delta K_{umb})^m \quad (5)$$

Donde $\Delta a/\Delta N$ es la propagación por ciclo de la fisura, $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ es la variación de K aplicada al ciclo, C y m son constantes del material, y ΔK_{umb} es el valor umbral de ΔK para que exista propagación. ΔK_{umb} depende con frecuencia del parámetro de carga $R = K_{min}/K_{max}$ (Anderson, 1995). Utilizando a Calsyf como subrutina, se desarrolló el programa 'Propaga', que permite obtener el contorno de la fisura propagada a partir de un contorno de fisura dado en forma de poli-línea. Cuenta además con la posibilidad de propagar contornos parcialmente cerrados por la acción de cargas en parte compresivas aplicadas sobre parte de la superficie de fisura. El procedimiento numérico para estudiar la evolución de la geometría de una fisura sometida a ciclos de carga de amplitud constante se detallan a continuación (ver Fig. 2).

- i) Dada la geometría inicial, se hallan las fronteras efectivas para cargas máxima y mínima.
- ii) Se obtienen valores de K_I en puntos equidistantes sobre la frontera de la parte abierta de la fisura nominal, para las cargas máxima y mínima del ciclo de carga.
- iii) Se ajustan curvas *spline* cúbica suave para ambos conjuntos de datos mencionados en ii).
- iv) Sobre la base de las curvas obtenidas en iii), se calcula la diferencia ΔK en el dominio común $[x_0, x_2]$.
- v) Dados los parámetros C , m , ΔK_{umb} y un número prefijado de ciclos de propagación ΔN , se obtiene Δa para cada punto del contorno nominal de la fisura. En la parte que permanece cerrada se establece que $\Delta a = 0$.
- vi) La evolución se obtiene desplazando cada punto de la fisura inicial una distancia Δa en dirección normal al contorno.
- vii) Los puntos definidos en vi) pueden ingresarse en i), iniciando otro paso de propagación.

Como se observa en la figura 2(a), la acción de cargas cíclicas en parte compresivas produce los contornos de cierre Γ_1 y Γ_2 , correspondientes respectivamente a las tensiones mínima ($\sigma_{min.}$) y máxima (σ_{may}) del ciclo de carga. La parte abierta de la frontera (Γ_0) se halla entre x_0 y x_1 para la tensión mínima, y entre x_0 y x_2 para la carga máxima. $K = 0$ en Γ_1 y Γ_2 . En 2 (b) se muestran las curvas resultantes de ajustar los valores de K_I en puntos de la parte abierta de la frontera para las tensiones mínima y máxima del ciclo de carga. En 2 (c) se muestra la curva $\Delta K_I(x)$ para: $x_0 < x < x_2$, y en 2 (d) la curva $\Delta a(x)$ obtenida sobre la base de la curva anterior, mediante la ecuación (5). Cada punto del contorno es desplazado perpendicularmente al mismo sobre la base del valor de Δa correspondiente dado en 2 (d). Si no hay cierre parcial, el procedimiento se simplifica ya que toda la frontera nominal queda abierta, con valores de $\Delta K_I > 0$ para todos los puntos del contorno inicial. Sin embargo, puede existir una parte del frente que no propague según el valor de ΔK_{umb} , ya que si $\Delta K_I < \Delta K_{umb}$ es $\Delta a = 0$. El procedimiento ha mostrado un muy buen desempeño en la estimación de la vida a la fatiga, a partir de los defectos iniciales, de un gran compresor de etileno (Otegui, 2005).

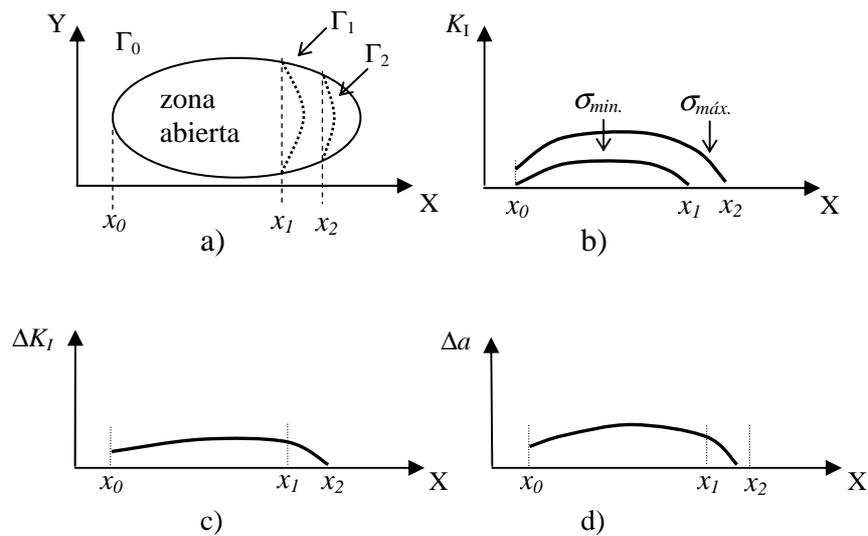


Figura 2. Secuencia en la propagación de fisuras parcialmente cerradas.

4 MODELADO DE LA INTERACCIÓN DE DOS FISURAS EN UN PLANO

Cuando se produce la interacción de dos fisuras en un plano y sometidas a igual tensión remota uniforme, la influencia mutua se caracteriza por un factor de magnificación γ , definido como el cociente entre el FIT normalizado en un punto genérico A del frente, F_{IA} , y el correspondiente a la misma fisura sin interactuar con la otra, y sujeta a la misma carga remota σ_∞ (ver ecuaciones 6 y 7).

$$F_{IA} = \frac{K_{IA}}{\sigma_\infty \cdot \sqrt{\pi a}} \quad (6)$$

$$\gamma_A = \frac{F_{IA}(\text{fisura en presencia de la otra})}{F_{IA}(\text{fisura sola})} \quad (7)$$

La interacción en un plano de dos fisuras elípticas iguales y desiguales ha sido estudiada numéricamente empleando el BFM (*Body Force Method*) en fisuras con distintos factores de aspecto y cercanía (Murakami, 1981 y 1982). El caso de dos fisuras semicirculares de diferente tamaño relativo y distancia entre sus centros ha sido resuelto por el autor citado obteniendo los factores de magnificación correspondientes a tres puntos característicos en cada fisura: A, B y C (ver sub-figura en Fig. 3). La distancia entre los centros de las fisuras se caracteriza por el parámetro λ , definido como el cociente de la suma de los radios de ambas fisuras y la distancia entre sus centros. Por otra parte, la variación del factor de magnificación a lo largo del frente de dos fisuras semicirculares ha sido abordado por M. Isida para distintos coeficientes de Poisson ν (Isida, 1982). En la figura 3 puede observarse que la curva correspondiente a $\nu = 0$ y $\lambda = 0.8$ en función del ángulo β , presenta el aspecto de una parábola. Por ello, se propone en este trabajo un modelo del factor de magnificación consistente en extender los resultados de Murakami para tres puntos característicos de la fisura semicircular a todo el frente de la fisura, obteniendo la parábola correspondiente que pasa por los puntos. En la figura, se comparan ambas curvas, mostrando buena aproximación.

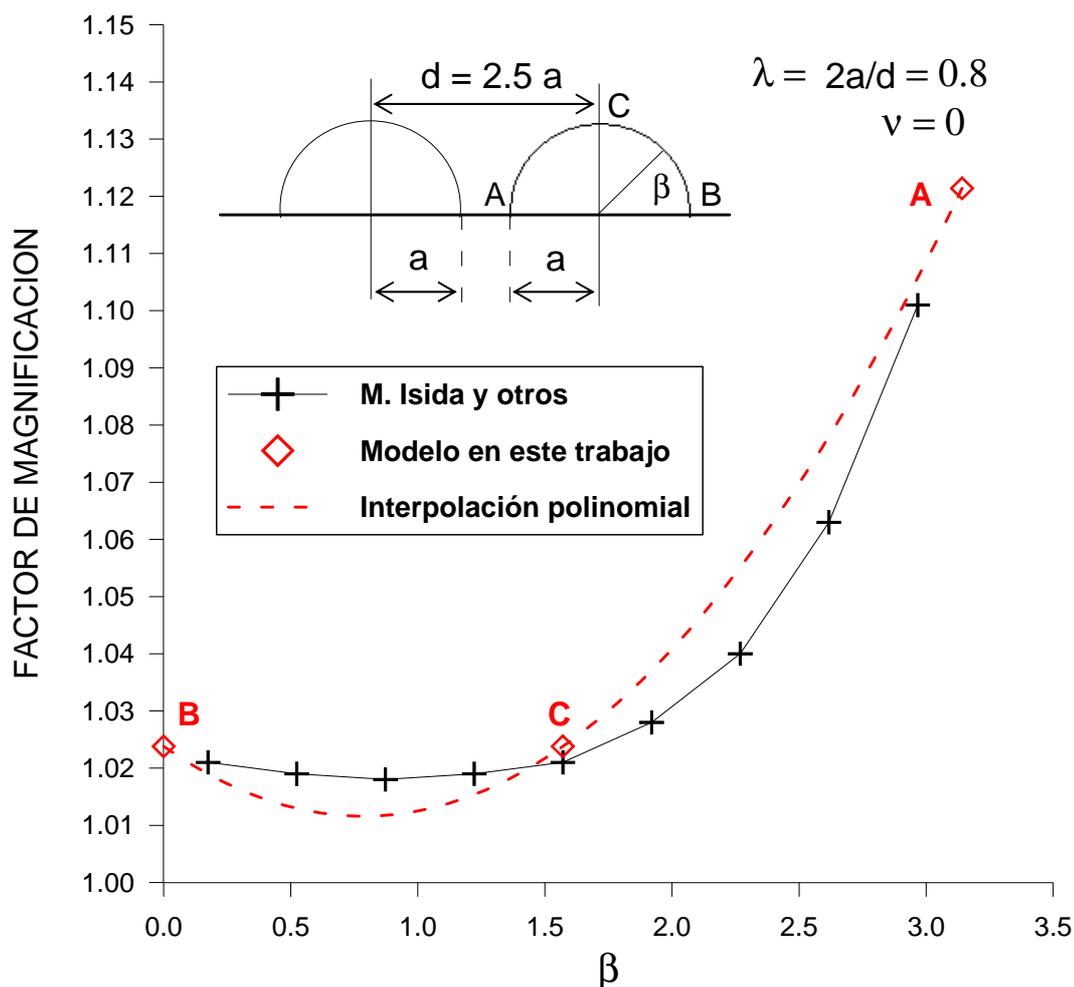


Figura 3. Modelado del factor de magnificación para dos fisuras semicirculares.

Puede también observarse en la figura, que los puntos B y C presentan igual ordenada, por lo cual bastan dos puntos para obtener la parábola que caracteriza γ en función del ángulo β . Asimismo, partiendo de los resultados de Murakami, se obtuvieron funciones que aportan las ordenadas de los puntos característicos A, B y C para dos fisuras semicirculares de radios a_1 y a_2 en función de la distancia, λ , y el tamaño relativo de las fisuras, $\rho = a_1/a_2$, donde a_1 corresponde al radio menor.

5 EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL MÉTODO

El programa Calsyf fue provisto de subrutinas que calculan el factor de magnificación en el frente de fisura, y la evolución del frente de fisura obtenida aplicando la ley de Paris. En todos los casos se consideró ΔK_{umb} y el parámetro de carga R como nulos. Tres casos de interacción y coalescencia de fisuras fueron estudiados con esta metodología: el de dos fisuras semicirculares iguales, dos fisuras semicirculares desiguales, y dos fisuras irregulares distintas pero con igual longitud superficial.

5.1 Dos fisuras semicirculares iguales

En este ejemplo se estudia la propagación por fatiga hasta coalescencia y posterior de dos fisuras superficiales semicirculares e iguales en un plano. Este caso ha sido estudiado por A.

Cisilino en su trabajo de tesis doctoral (Cisilino, 1997), donde se comparan los resultados para la propagación sobre la superficie y en la dirección de máxima profundidad de la fisura, con los obtenidos por Kishimoto y colaboradores (Kishimoto, 1989). En su trabajo, Cisilino ubica las fisuras de radio a , en una de las caras de un prisma según se observa en la figura 4.

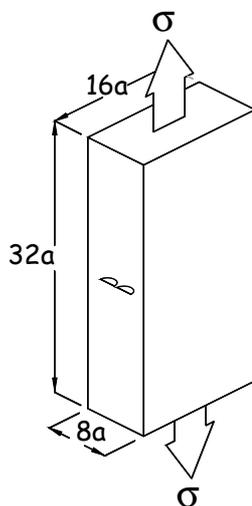


Figura 4. Dos fisuras semicirculares de radio a en un plano.

Los centros de las semicircunferencias distan $2.4 a$, y equidistan de los bordes de la cara en que se encuentran. La barra está sujeta a una tensión remota σ en sus extremos en dirección perpendicular al plano de las fisuras. La ley de Paris empleada para estimar el crecimiento de las fisuras es:

$$\frac{da}{dN} = 3 \cdot 10^{-11} (\Delta K)^{2.92} \quad (8)$$

Se empleó un cociente de carga media $R = 0$, y cada paso de propagación corresponde a un número fijo de ciclos $\Delta N_0 = 750$ cs. Los valores numéricos para la tensión remota y el radio fueron: $\sigma = 100$, $a = 10$. El factor de magnificación del método propuesto en este trabajo actúa hasta la coalescencia de ambas fisuras. Una vez coalescidas las fisuras, se estudian los valores de ΔK_I normalizado y de la propagación aplicando el programa Calsyf a la fisura resultante. Los resultados se comparan con los obtenidos por Cisilino empleando Elementos de Contorno (BEM), y con los de Kishimoto empleando Elementos Finitos (FEM). En la figura 5 se muestran los contornos en seis pasos de propagación. Las fisuras entran en coalescencia en el segundo paso de propagación, comprobándose una buena correspondencia entre ambos métodos. Esta afirmación se corrobora cualitativamente sobre la base de resultados experimentales que se muestran en la figura 6, correspondiente a la propagación por fatiga de dos fisuras superficiales semicirculares en un plano, producidas sobre una probeta de acero ferrítico y ensayada a la flexión en tres puntos. Las marcas de tinta muestran el proceso de coalescencia y evolución de las fisuras, y los números en la figura 6 corresponden a la posición de los “strain-gages” empleados en la determinación experimental.

Tanto los resultados de Cisilino como los de este trabajo, muestran que la geometría de las fisuras una vez coalescidas tiende rápidamente a una curva elíptica.

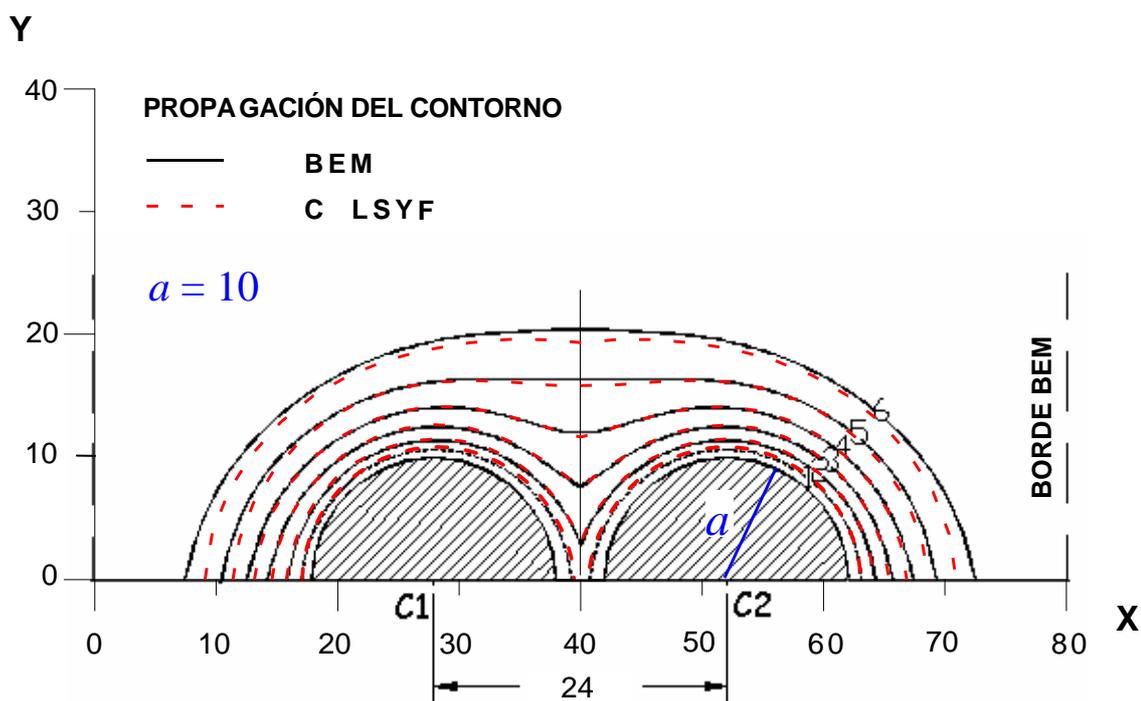


Figura 5: Evolución a la fatiga de dos fisuras semicirculares iguales.

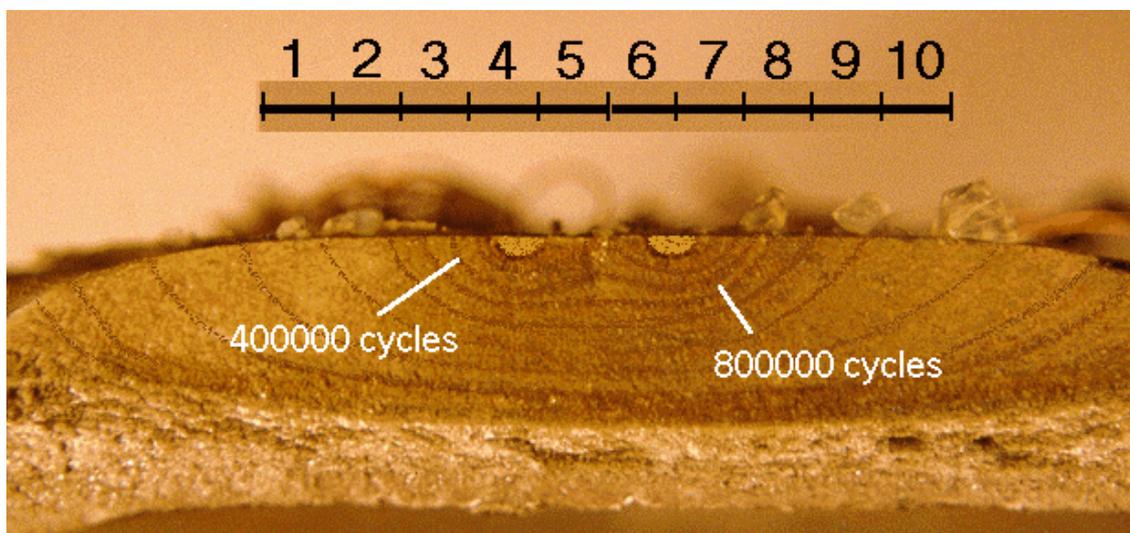


Figura 6. Propagación de la fisura proveniente de dos entallas semicirculares.

Las extensiones máximas de la fisura sobre la superficie y en profundidad son parámetros de interés en el estudio de la propagación de fisuras superficiales. En la figura 7 se comparan estos resultados con los obtenidos por Cisilino y por Kishimoto a partir de la coalescencia de la fisura. La figura muestra una muy buena correlación en la evolución de las distancias máximas de la fisura en este trabajo y en el de Kishimoto, sobre la base de Elementos Finitos. Hay diferencias en cuanto a la profundidad máxima respecto de los resultados obtenidos por Elementos de Contorno, que podrían estar mostrando la influencia de los bordes, ya que este trabajo refiere a un volumen semi-infinito.

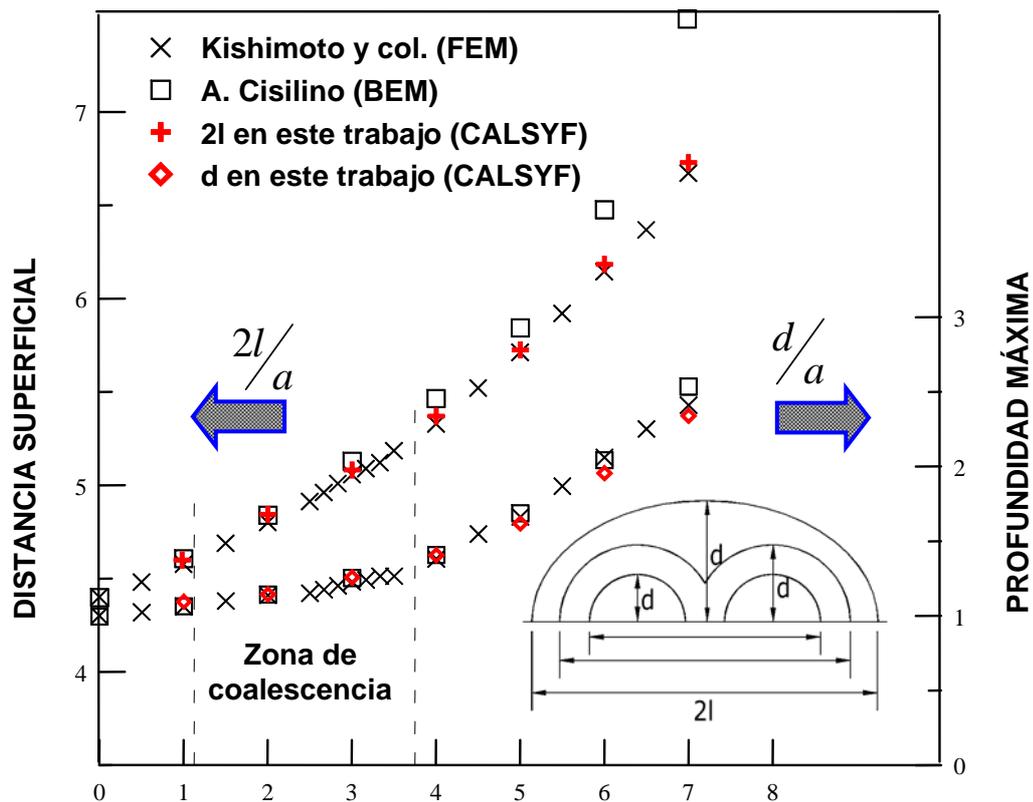


Figura 7. Evolución de las dimensiones máximas en cada paso.

La evolución de ΔK_I normalizado en el frente de fisura puede apreciarse en la figura 8. En esta figura se comparan los valores numéricos directos e interpolados obtenidos por Calsyf y los interpolados correspondientes a BEM. La figura 8 muestra una buena aproximación entre los resultados por Elementos de Contorno y los del método propuesto para los primeros pasos de propagación, pero los primeros muestran mayor magnitud de ΔK_I en todo el frente de fisura en el paso N° 5, particularmente en la propagación sobre la superficie. Esto puede ser explicado por la cercanía de los bordes en la geometría resuelta por Elementos de Contorno, pero la buena aproximación del método presentado en este trabajo con los resultados de Kishimoto en la Fig. 7 indica la influencia de la cercanía de bordes sobre la magnitud del FIT en el frente de fisura.

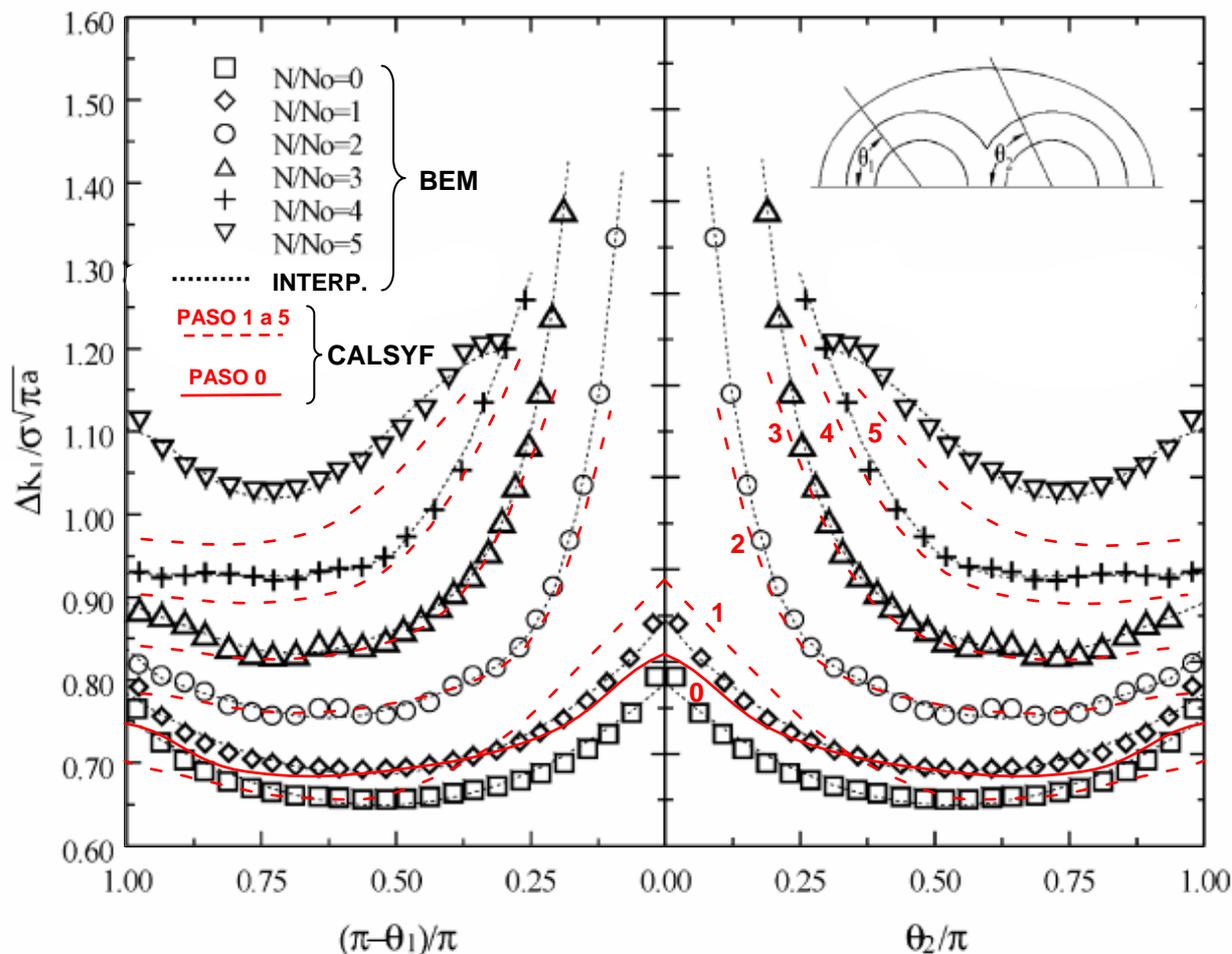


Figura 8. Evolución de ΔK_I normalizado en el frente, pasos 0 a 5.

5.2 Dos fisuras semicirculares desiguales

Este ejemplo se diferencia del presentado en la sección anterior sólo en cuanto al tamaño relativo de las fisuras semicirculares originales y en la ubicación de sus centros. En la figura 9 puede verse la geometría y la evolución del contorno una vez coalescido en ocho pasos de propagación. Como ocurre en el ejemplo de dos semicírculos iguales, vemos en la figura 9 que los resultados para la propagación mediante el modelo presentado y los correspondientes a Elementos de Contorno son próximos en casi todo el frente, mostrando diferencias en la propagación sobre la superficie. Los valores de ΔK_I normalizado a lo largo del frente para los sucesivos contornos se observan en la figura 10.

Las mayores diferencias entre los resultados expuestos en la figura 9 y 10 corresponden al contorno correspondiente al paso N° 8, en la dirección superficial, con una diferencia en ΔK_I de aproximadamente 7.5% para $\theta_2 = \pi$ en la figura 10. Puede también observarse que por ambos métodos la coalescencia comienza en el paso N° 3, si bien en la solución empleando Calsyf el avance es algo mayor.

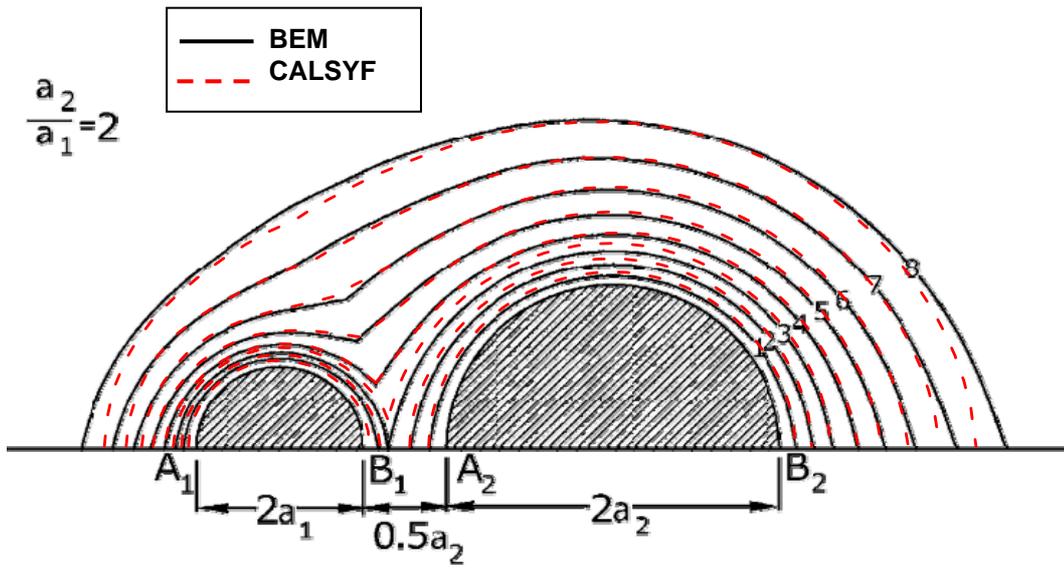


Figura 9. Evolución de dos fisuras circulares desiguales.

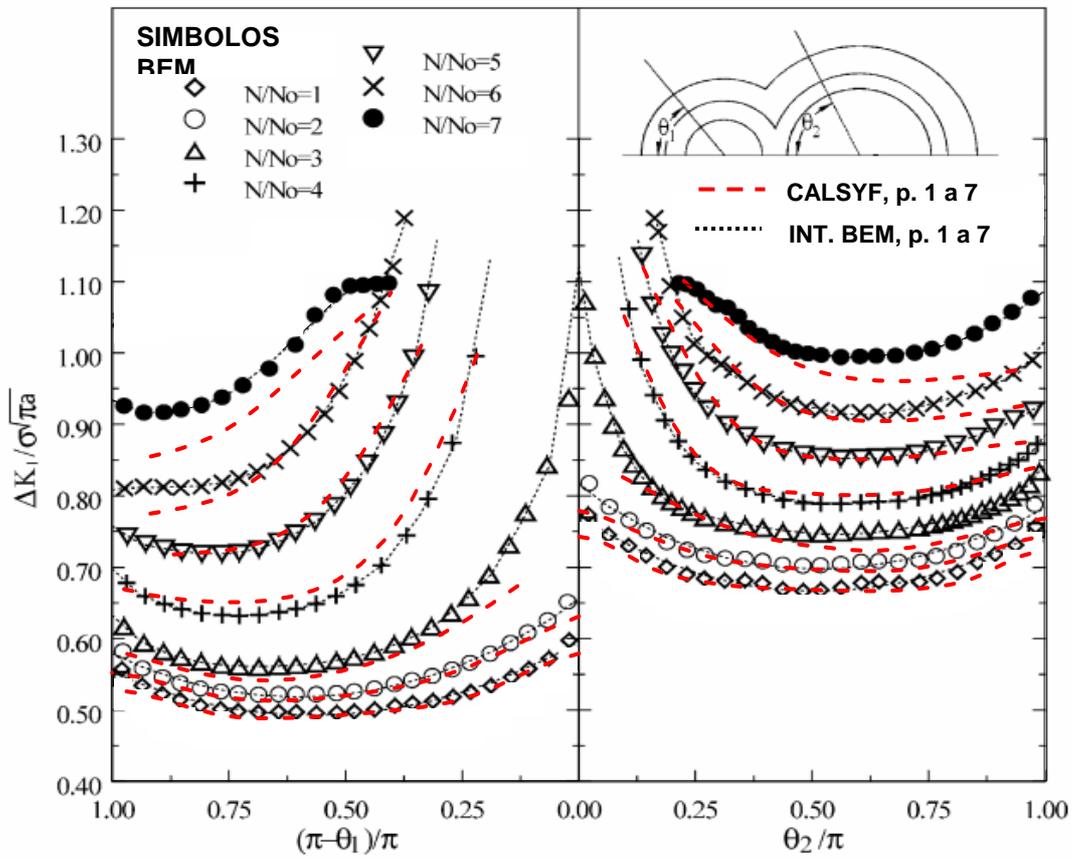


Figura 10. Variación de ΔK normalizado en el frente de fisura para cada paso de propagación.

5.3 Dos fisuras irregulares

En este tercer ejemplo se trata el caso de la coalescencia y propagación de dos fisuras superficiales irregulares en un plano. Para estos casos, procedimientos recomendados como el del documento [API 579](#) (API RP, 2000) establece criterios para la interacción de fisuras múltiples, idealizando la geometría de la fisura resultante sobre la base de las dimensiones máximas de las fisuras reales. Otros códigos usuales, como la norma británica ([BS PD 6493](#), 1991) se proponen también para el análisis de la interacción de fisuras. Sin embargo, investigadores como Soboyejo ([Soboyejo, 1990](#)) señalan que las recomendaciones brindadas por los documentos mencionados resultan muy conservativas y no parecen estar basadas en experimentos y análisis teóricos detallados, ni dan cuenta de los cambios geométricos de las fisuras durante la coalescencia. Por otra parte, los análisis basados en elementos finitos o de contorno resultan por lo general costosos y deben ser realizados a medida del problema particular estudiado.

Para el caso de dos fisuras superficiales en el mismo plano, el documento [API 579](#) establece criterios para la interacción e idealiza la geometría de la fisura resultante sobre la base de dimensiones máximas, como puede verse en la figura 11.

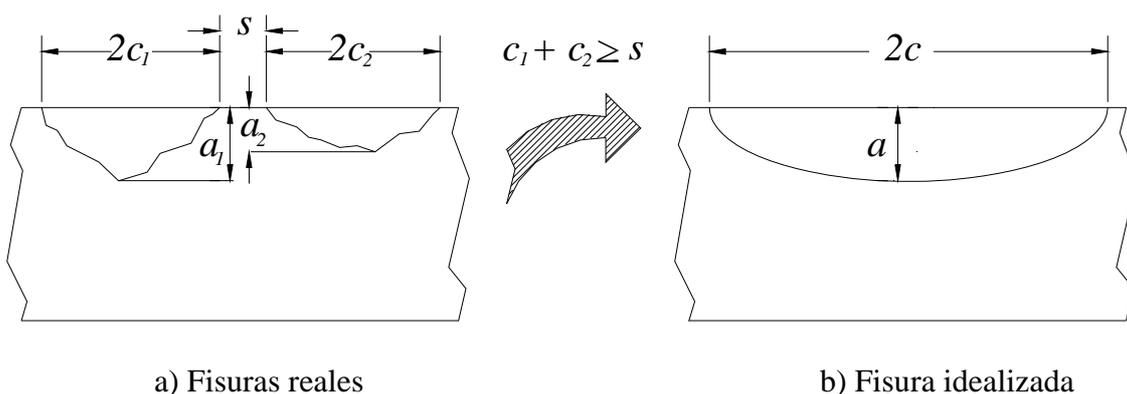


Figura 11. Interacción de dos fisuras en un plano (API 579).

Cuando se cumple la condición indicada en la figura, los parámetros globales para la semielipse mostrada en b) son:

$$\begin{aligned} 2c &= 2c_1 + 2c_2 + s, \\ a &= \max [a_1, a_2] \end{aligned} \quad (9)$$

La metodología desarrollada en este trabajo, permite tratar la coalescencia de fisuras múltiples en un plano de modo menos conservativo que el expuesto en el documento [API 579](#) y estudiar la posterior propagación de las fisuras por fatiga. Como criterio de coalescencia se asumió que ambas fisuras entran en coalescencia bajo la misma condición que la dada por la API 579 (Fig. 11), pero la fisura idealizada resultante consiste en las fisuras originales conectadas por medio de una fisura de frente recto a una profundidad menor a 1/3 de la fisura menos profunda. En la Fig. 12 se ilustra este modelo, llamado por los autores *modelo de coalescencia restringida* (MCR) en un trabajo reciente ([SAM, 2007](#)), y se muestran las dimensiones de las fisuras superficiales del ejemplo en una placa de espesor supuesto infinito.

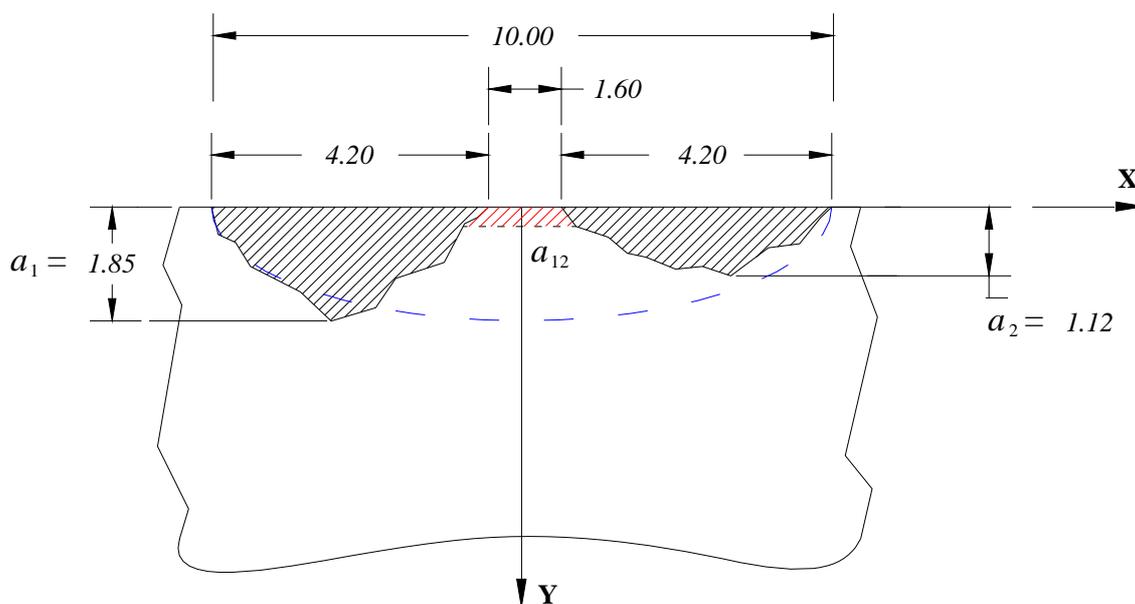


Figura 12. Modelado de dos fisuras irregulares por la norma API 579 y por MCR.

En la figura, las fisuras reales aparecen rayadas en negro; y con rayado rojo la zona de coalescencia del modelo, de profundidad $a_{12} = 0.318$. El frente de la fisura idealizada por MCR se diferencia del frente idealizado según las cotas máximas por la norma API 579, consistente en la semielipse azul en la figura. Ambos frentes fueron propagados por cargas cíclicas de tensión máxima $\sigma = 1$ y factor de carga $R = 0$; y con los parámetros de la ley de Paris: $C = 10^{-9}$ mm/ciclo, $m = 2.92$. Cada paso de propagación corresponde a $\Delta N_0 = 45$ Mc. El frente idealizado según este modelo evolucionó hasta que en el 6^{to} paso adoptó una geometría más suave y convexa, parecida a una semielipse; mientras que la semielipse idealizada por la API 579 se propagó manteniendo su forma elíptica, como ya se discutió en el capítulo 6, hasta superar levemente el primero en el 3^{er} paso. El resultado se muestra en la Fig. 13.

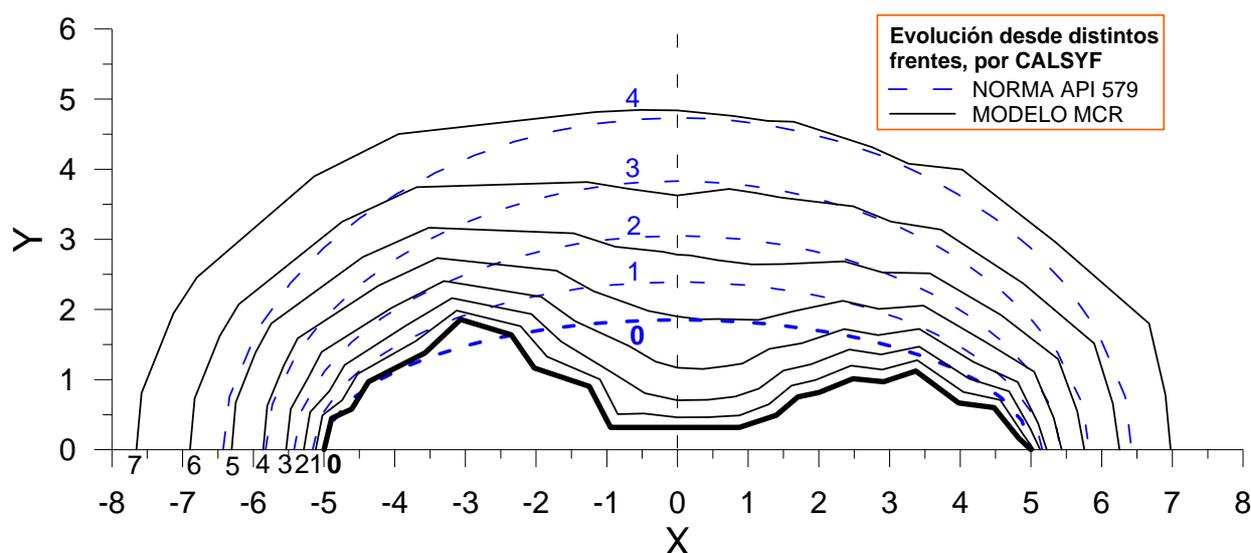


Figura 13. Evolución del frente modelado según la norma API 579 (pasos 1 a 4) y según el modelo MCR (pasos 1 a 7), empleando CALSYF.

Puede también observarse en la figura la distinta velocidad de propagación de ambos frentes en la dirección superficial, siendo mayor la correspondiente al modelo propuesto. Por este motivo, el factor de aspecto final de la semielipse resultó inferior al del MCR.

Como se ve en la Fig. 13, a una profundidad de fisura similar de ambos frentes, el modelo MCR muestra cerca del doble de ciclos de propagación que el modelo de la norma [API 579](#). Si bien es esperable que posteriormente ambos frentes evolucionen con velocidad similar, dada la cercanía de sus geometrías, la previa diferencia de los tiempos de propagación introduce un aspecto a tener en cuenta.

Por último, también se comparó la evolución prevista por el modelo MCR para las fisuras ya coalescidas, con la evolución de ambas fisuras previa y posteriormente a la coalescencia. Este resultado se muestra en la figura 14.

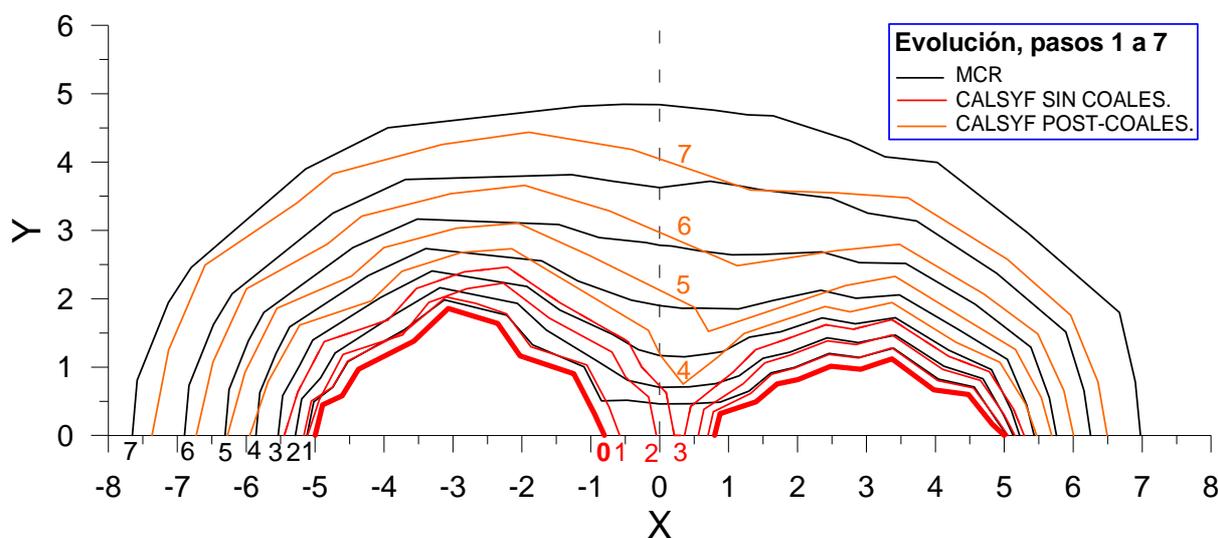


Figura 14. Evolución de dos fisuras irregulares.

Puede observarse en la figura, que en el paso 7 la fisura resultante de considerar la coalescencia resulta en una profundidad de avance algo menor que el previsto por MCR, y con una geometría más parecida a una elipse.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un método simple y eficiente para el modelado de la propagación y coalescencia de fisuras planas. El modelo se basa en el método de las funciones de peso, que es utilizado para hallar el factor de intensidad de tensiones K aplicado en la parte abierta de la fisura. El algoritmo empleado puede verse en el trabajo de los autores ([López Montenegro, 2006](#)), y puede ser empleado también para estudiar la geometría efectiva resultante del cierre parcial de fisuras por la acción de fuerzas compresivas, como se muestra en un trabajo reciente ([SAM, 2007](#)). El costo computacional del empleo de Calsyf es bajo; los casos presentados en este trabajo emplearon sólo unos pocos minutos en una PC *standard* para su resolución. Asimismo, es destacable la versatilidad de aplicación para evaluar la criticidad y evolución de fisuras irregulares bajo cargas complejas en modo de apertura, dentro de los límites de la mecánica de fractura lineal-elástica.

Otro aspecto importante a tener en cuenta, consiste en que la solución por Calsyf resulta claramente menos conservativa que el recomendado por la [API 579](#).

La importancia de los tiempos de coalescencia inicial de fisuras se destaca si se tiene en

cuenta que en casos reales más del 75% de la vida útil a la fatiga de un componente se consume para que la fisura propague aproximadamente el 10% del total (Otegui, 1988; Chapetti, 1995). Por ello, un factor 0.5 en la velocidad de propagación en la etapa de coalescencia redundaría en un 50% de aumento en la estimación de sobrevida del componente.

REFERENCIAS

- Anderson T.L. *Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications*, CRC Press, Inc., 1995.
- API Recommended Practice 579, Fitness for Service, First Ed. American Petroleum Institute, August 2000.
- Bueckner H.F. A novel principle for the computation of stress intensity factors. *Z. Angew. Math. Mech.*, 50: 52-9, 1970.
- Cisilino A. Boundary element formulations for 3D analysis of fatigue crack growth in linear and non-linear fracture mechanics, PhD thesis, Wessex Institute of Technology, University of Wales, October 1997.
- Chapetti M.D. Propagación subcrítica de fisuras en aceros estructurales soldados, Tesis para el Doctorado en Cs. de los Materiales, Univ. de Mar del Plata, 1995.
- Desjardins J.L., Burns D.J. and Thompson J.C. A weight function technique for estimating stress intensity factors for cracks in high pressure vessels. *J. Press. Vessel Technol.* 113: 55-64, 1991.
- Irwin G.R. The crack extension force for a part-through crack in a plate. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 651-654, 1962.
- Isida M., Yoshida T. y Noguchi H. *Prelim. Proc. Japan Soc. Mech. Engrs. and Japan Soc. Precision Engng., Mie District*, N° 823-3, 1982.
- Khattab M.A.A., Burns D.J., Pick R.J., and Thompson J.C. Opening mode stress intensity factors for embedded rectangular and irregular planar defects. *J. Press. Vessel Tech.* 108: 41-49, 1986.
- Kishimoto K., Soboyejo W.O., Smith R.A. and Knott J.F. A numerical investigation of the interaction and coalescence of twin coplanar semi-elliptical fatigue cracks. *Int. Journal of Fatigue*, 11/2: 91-96, 1989.
- Lopez Montenegro H., Cisilino A., Otegui J.L. A weight function methodology for the assessment of embedded and surface irregular plane cracks. *Engng. Fract. Mech.* 73: 2662-2684, 2006.
- Lopez Montenegro H., Cisilino A. and Otegui J.L. A simple LEFM method for the contact problem in partially closed cracks. *Engng. Fract. Mech.* 47: 743-752, 1994.
- Lopez Montenegro H., Cisilino A. and Otegui J.L. Application of a weight function method to assess partially closed cracks. *Engng. Fract. Mech.* 54: 679-691, N° 5, 1996.
- Murakami, Y. and Nisitani, H. Stress intensity factors for interacting two equal semi-elliptical surface cracks in tension. *Trans. Japan Soc. Mech. Engrs., Ser. A*, 47, N° 415: 295-303, 1981.
- Murakami, Y. and Nemat-Nasser, S. Interacting dissimilar semi-elliptical surface flaws under tension and bending. *Engng. Fract. Mech.*, 16: 373-386, 1982.
- Newman J.C., Raju I.S. An empirical stress intensity factor equation for the surface crack. *Eng. Fr. Mech.* 15 N° 1: 185-192, 1981.
- Newman J.C., Raju I.S. Stress intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies. *Fracture Mechanics: Fourteenth Symposium – Vol. I: Theory and Analysis*. ASTM STP 791, J.C. Lewis and G. Sines Eds. American Society for Testing and Materials, I-238, I-265, 1983.
- Oore M., Burns D.J. Estimation of stress intensity factors for embedded irregular cracks

- subjected to arbitrary normal stress fields. Transactions of the ASME, 102: 202-211, May 1980.
- Otegui J.L., López Montenegro H. and Márquez A.A. Numerical estimation after fatigue of a complex component. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 28: 547-556, 2005.
- Otegui J.L. Initiation and coalescence of fatigue cracks in welded joints in steel, Ph.D. Thesis, University of Waterloo, 1988.
- PD 6493: 1991. Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion welded Joints. British Standards Institution, August 1991.
- Soboyejo W.O., Knott J.F. Fatigue crack propagation of coplanar semi-elliptical cracks in pure bending. *Eng. Fr. Mech.* 37, N° 2: 323-340, 1990.
- Sociedad Argentina de Materiales, Congreso SAM/CONAMET 2007, S. Nicolás, 2007.