

MODELADO DE LOS MECANISMOS DE INTERACCIÓN Y COALESCENCIA DE MICROFISURAS EN ADI UTILIZANDO LOS MÉTODOS DE LOS ELEMENTOS DE CONTORNO Y DE LOS ELEMENTOS DISCRETOS

Adrián P. Cisilino^a, Ignacio Iturriz^b y J. E. Ortiz^a

^aDivisión Soldadura y Fractomecánica, INTEMA Univ. Nacional de Mar del Plata – CONICET
Av. Juan B. Justo 4302 (7600) Mar del Plata, Argentina
e-mail: cisilino@fi.mdp.edu.ar

^bDepartamento de Mecánica, Universidad Federal de Río Grande del Sur
R. Osvaldo Aranha 99 3er Piso, CEP90035-190, Porto Alegre, Brasil
e-mail: ignacio@mecanica.ufrgs.edu.br

Palabras clave: mecánica de fractura, elementos de contorno, elementos discretos

Resumen: *Las prominentes propiedades mecánicas de las fundiciones nodulares austemperizadas (ADI) son una consecuencia de su microestructura, dada por una matriz metálica con nódulos de grafito. Resultados de experimentos desarrollados para examinar los mecanismos de iniciación, propagación y arresto de fisuras por fatiga han demostrado el importante papel que desempeñan en los mismos los efectos de la interacción entre fisuras, nódulos y microfisuras. Se utilizan en este trabajo dos técnicas para el estudio de este fenómeno: el Método de los Elementos de Contorno (BEM) y el Método de los Elementos Discretos (DEM).*

El BEM se caracteriza por requerir sólo de la discretización del contorno del problema, lo que lo hace especialmente apto para modelar la propagación automática de fisuras. Así el BEM se emplea en este trabajo para modelar el efecto del microfisurado que se desarrolla a partir de los nódulos y que acompaña la propagación de la fisura principal. Estos modelos, si bien efectivos, presentan la limitación de que la iniciación de las microfisuras debe ser introducida al modelo en forma artificial. Este último aspecto del problema es estudiado mediante modelos de DEM, donde la falla de una determinada región del modelo se traduce en la desactivación de elementos que agotan su resistencia. De esta forma se permite a las microfisuras iniciar de forma natural en la periferia de los nódulos. El estudio provee información valiosa para validar hipótesis y modelos fractomecánicos.

1 INTRODUCCION

Las prominentes propiedades mecánicas de las fundiciones nodulares austemperizadas (ADI) son una consecuencia de su microestructura, dada por una matriz metálica con nódulos de grafito. Resultados de experimentos desarrollados para examinar los mecanismos de iniciación, propagación y arresto de fisuras por fatiga han demostrado el importante papel que desempeñan en los mismos los efectos de la interacción entre fisuras, nódulos y microfisuras^{1,2}. Se presenta en este trabajo el modelado numérico del fenómeno de la iniciación, interacción y propagación de las microfisuras utilizando los métodos de los Elementos de Contorno (BEM) y de los Elementos Discretos (MED).

El BEM se caracteriza por requerir sólo de la discretización del contorno del problema, lo que lo hace especialmente apto para modelar la propagación automática de fisuras. Así el BEM se emplea en este trabajo para modelar el efecto del microfisurado que se desarrolla a partir de los nódulos y que acompaña la propagación de la fisura principal. Estos modelos, si bien efectivos, no permiten obtener una estimación cuantitativa del fenómeno dado que la iniciación de las microfisuras debe ser introducida al modelo en forma artificial.

Por otro lado, la formulación del MED se basa en discretizar el continuo a través de un arreglo de barras articuladas donde las mismas tienen una rigidez equivalente al continuo que se desea representar, las masas son concentradas en los nodos y la ecuación de movimiento resultante de la discretización espacial se realiza a través de un esquema explícito de integración. La ruptura en una determinada región del modelo se traduce en la desactivación de las barras que agotaron su resistencia. A su vez el método tiene en cuenta el balance energético durante la simulación de todo el proceso. Este esquema contempla que las fisuras inicien en forma natural a partir de los nódulos de grafito.

2 CARACTERISTICAS DE LA FUNDICIÓN AUSTEMPERIZADA (ADI)

El ADI (Austempered Ductile Iron) pertenece a la familia de las fundiciones esferoidales. La misma combina buenas propiedades de elongación y tenacidad con una elevada tensión de rotura. Esta combinación de propiedades incrementa su resistencia al desgaste y a la fatiga en relación con otras fundiciones. Las prominentes propiedades del ADI son consecuencia de su microestructura, dada por una matriz metálica con nódulos de grafito. La misma se denomina ausferrita³ y se obtiene mediante a partir del tratamiento térmico de austemperizado.

La cantidad, tamaño y forma de los nódulos de grafito son respectivamente caracterizados por el conteo nodular, el tamaño nodular y la nodularidad. Figure 1(a) ilustra un esquema de una micrografía típica de ADI 60-100%. Esto significa 60 nódulos por mm^2 con 100% de nodularidad, es decir todos los nódulos de grafito son aproximadamente esféricos. El contenido de carbono del ADI es de aproximadamente 3.36% en peso, lo que corresponde a una fracción de alrededor de 9% en volumen. El cociente r/d , es el parámetro geométrico característico de la microestructura (ver Figura 1(b)), donde r es el radio promedio de los nódulos y d la distancia mínima promedio entre los centros de los nódulos. Resultados de un

análisis estadístico realizado a partir de mediciones relevadas sobre micrografías de ADI utilizando un software de procesamiento de imágenes⁴ demostraron que para un rango amplio de conteos nodulares el promedio del cociente r/d y su desviación standard se mantienen aproximadamente constantes. El valor promedio $r/d=0.25$, con una desviación standard del 35% (ver Tabla 1). Valores típicos de las propiedades mecánicas del ADI son: modulo de Young $E=180.000$ MPa, tensión de fluencia 898 MPa y tensión de rotura 1135 MPa con una elongación a la falla del 11%.

N_{area} nódulos/mm ²	Nodularity [%]	Average r/d	Standard deviation [%]
60	100	0.27682	31.18
100	100	0.26175	37.56
150	100	0.25294	35.43
600	100	0.25625	32.62

Tabla 1: resultados del análisis estadístico realizado sobre las dimensiones características de la microestructura del ADI.

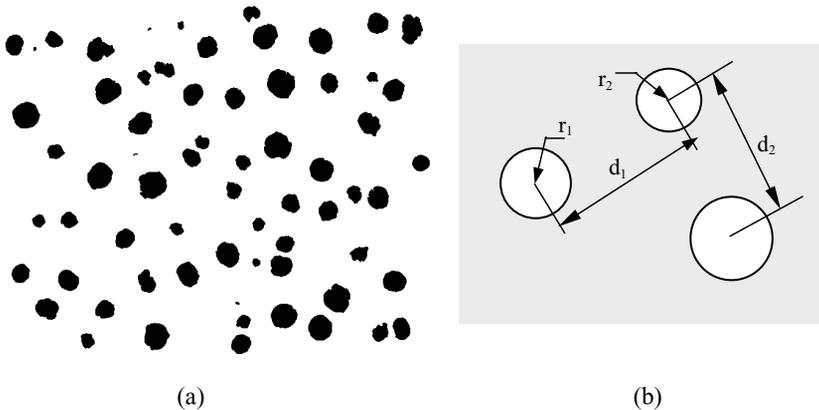


Figura 1: (a) Micrografía de la microestructura del ADI. (Blanco: matriz, Negro: nódulos de grafito) (b) Dimensiones características del problema

La relación entre la propagación de fisuras por fatiga y la microestructura fue objeto de un trabajo previo de los autores⁵. Un estudio cuantitativo de la morfología de la superficie de fractura probó que el camino de propagación preferentemente intercepta los nódulos de grafito, y que un proceso de microfisurado tiene lugar en la región de alta concentración de tensiones alrededor del vértice de la fisura principal. Finalmente la fisura principal propaga mediante un mecanismo de interacción y coalescencia con las microfisuras que se inician a

partir de los nódulos de grafito (ver Figura 2). Los autores proponen que a medida que las microfisuras propagan en la cercanía de la fisura principal generan un efecto de “apantallamiento” que disminuye la energía elástica disponible para la propagación de la fisura principal debido a la creación de nuevas superficies de fractura. Estudios similares reportados en la bibliografía aplicados a la microfisuración de materiales microporosos⁶ demuestran que la magnitud del fenómeno de apantallamiento depende de la densidad del microfisurado y de la forma de la zona microfisurada.

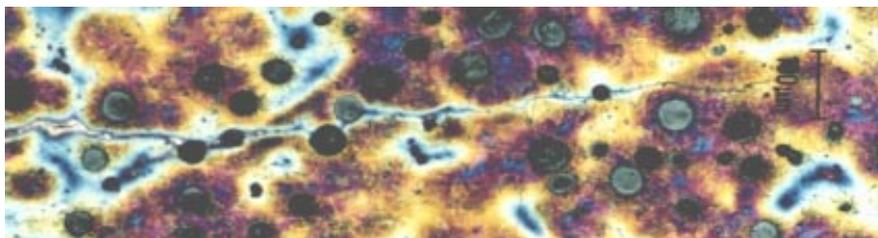


Figura 2: camino de propagación por fatiga de una fisura en ADI. Se observa como el mismo preferentemente intercepta los nódulos de grafito.

3. MODELO DE ELEMENTOS DE CONTORNO

La simulación numérica de la propagación de fisuras por fatiga requiere la capacidad de predecir la magnitud y la dirección de la extensión de fisura, al tiempo que el modelo debe ser lo suficientemente robusto para actualizar su geometría. El BEM, y en especial su formulación dual (DBEM) es reconocida por sus características especiales para atacar este tipo de problemas⁷. En el DBEM no solo limita la discretización del modelo a su contorno, sino que permite además analizar los problemas utilizando una única zona, facilitando de esta forma el proceso de remallado del modelo luego de cada incremento de la longitud de fisura. Los detalles de la formulación del DBEM pueden encontrarse en la Ref [8].

La evaluación precisa del factor de intensidad de tensiones K es de importancia en el análisis de propagación de fisuras. En particular para el tipo de problemas estudiado en este trabajo, en el que tiene lugar la propagación de fisuras muy próximas es además importante considerar los efectos de la interacción. Los factores de intensidad de tensiones son calculados en este trabajo a partir de los desplazamientos relativos de las caras de la fisura en la zona próxima a su vértice y utilizando la técnica de un punto⁹. Esta técnica fue preferida sobre metodologías basadas en integrales de camino o dominio, ya que para las características del problema analizado resultó dificultoso definir los dominios de integración en forma automática. Por otro lado, la eficiencia de la técnica de un punto depende fuertemente de la precisión con que son calculados los desplazamientos. Por esto se incorporaron al modelo elementos especiales de fractura que reproducen la variación \sqrt{r} en el campo de desplazamientos¹⁰.

El análisis incremental de la extensión de las fisuras utiliza una discretización lineal del camino de propagación. Para cada paso se lleva a cabo un análisis de tensiones para calcular los factores de intensidad de tensiones. A partir de este resultado se calcula la magnitud y dirección de la extensión de las fisuras y su geometría es actualizada colocando nuevos elementos en sus vértices. El procedimiento se repite un número predeterminado de pasos.

Entre los criterios disponibles para determinar la dirección de propagación se adoptó para este trabajo el propuesto por Sih¹¹. Este criterio establece que la dirección de propagación será en la dirección hacia la región con el mínimo valor de la densidad de energía de deformación S . La densidad de energía de deformación S puede ser escrita en función de los factores de intensidad de tensiones como sigue:

$$S(\theta) = a_{11}(\theta)K_I^2 + 2a_{12}(\theta)K_I K_{II} + a_{22}(\theta)K_{II}^2 \quad (1)$$

donde a_{11} , a_{12} , y a_{22} son funciones del ángulo de propagación θ , el que indica la dirección de la extensión Δa relativa a la orientación actual de la fisura. El ángulo θ es entonces determinado reemplazando los valores de K calculados en la expresión (1) y comparando los valores de $S(\theta)$ en los puntos para los que $d^2S(\theta)/d\theta^2 > 0$. Esto fue implementado utilizando un algoritmo de bisección.

Al tratarse de un criterio continuo, el mínimo S no considera el efecto de la discretización del análisis incremental. En otras palabras, la dirección de propagación será siempre definido en la misma dirección sin importar la magnitud de la extensión Δa . Consecuentemente la dirección de propagación debe ser corregida para dar la dirección correcta a la extensión. Con este propósito se utiliza un algoritmo predictor-corrector propuesto por Portela et al⁸.

La expresión de Klesnil y Lukas¹² fue adoptada en este trabajo para correlacionar la velocidad de propagación da/dN , con el rango del factor de intensidad de tensiones, ya que esta introduce el efecto del umbral de propagación:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (2)$$

donde $C=4.43 \cdot 10^{-10}$ y $m=2.85$ para el ADI y el término $\Delta K_{th}=5 \text{ MPa}\sqrt{m}$ corresponde al umbral del factor de intensidad de tensiones por debajo del cual no hay propagación. El efecto del cierre parcial de fisura¹³ ("crack closure") es considerado mediante la definición de un rango efectivo del factor de intensidad de tensiones

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (3)$$

donde K_{op} corresponde al valor de K para el cual la fisura se encuentra completamente abierta.

Finalmente las magnitudes de las extensiones son calculadas utilizando la expresión (2) en forma incremental:

$$\Delta a = C \cdot (\Delta K_{eff}^m - \Delta K_{th}^m) \cdot \Delta N. \quad (4)$$

4. RESULTADOS DEL MODELO DE BEM

La Figura 3 ilustra los resultados de un modelo de BEM donde una fisura principal propaga a través de un arreglo de nódulos que presentan microfisuras coincidentes con su “ecuador”. Estas se encuentran identificadas con las letras *A* a *H*. La Figura 4 muestra la evolución ΔK con los ciclos de carga *N*. Los factores de intensidad de tensiones ΔK se presentan normalizados con respecto a ΔK_{th} , de forma tal que los valores mayores a uno corresponde a fisuras propagantes, y los menores que uno a fisuras no propagantes. Los resultados demuestran como al aproximarse la fisura principal a una de las microfisuras, los efectos de la interacción causan un incremento sustancial en el valor del ΔK sobre la microfisura *A*, la que propaga en el sentido opuesto de la fisura principal hasta unirse a la misma. Tan pronto como que la fisura principal y la primera microfisura coalescen, la microfisura *B* del lado opuesto nódulo se torna en dominante, tomando el lugar de la fisura principal. El proceso se repite y las microfisuras *D*, *F* y *H* toman sucesivamente el lugar de la fisura principal. Al mismo tiempo las microfisuras *A*, *C*, *E* y *G* propagan hacia la fisura principal para finalmente arrestarse. Las microfisuras *I*, *J*, *K* y *L* no participan de la propagación de la fisura principal, sin embargo presentan el mismo comportamiento que las restantes microfisuras. En este caso más de una fisura propaga en forma simultánea hacia la fisura principal, lo que justifica la presencia de las bifurcaciones que se observan en los experimentos. Es importante mencionar que los resultados del modelo de BEM demostrando la tendencia de la fisura a interceptar los nódulos de grafito están en coincidencia también con resultados teóricos reportados por Petrova et al¹⁴.

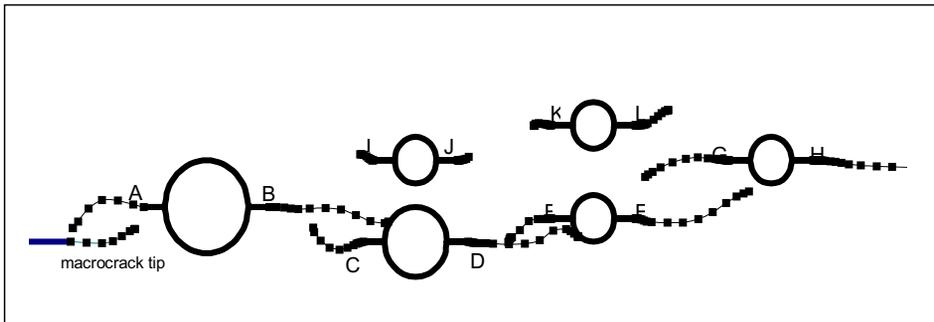


Figura 3: camino de propagación por fatiga de una fisura en ADI. Resultado del modelo de BEM.

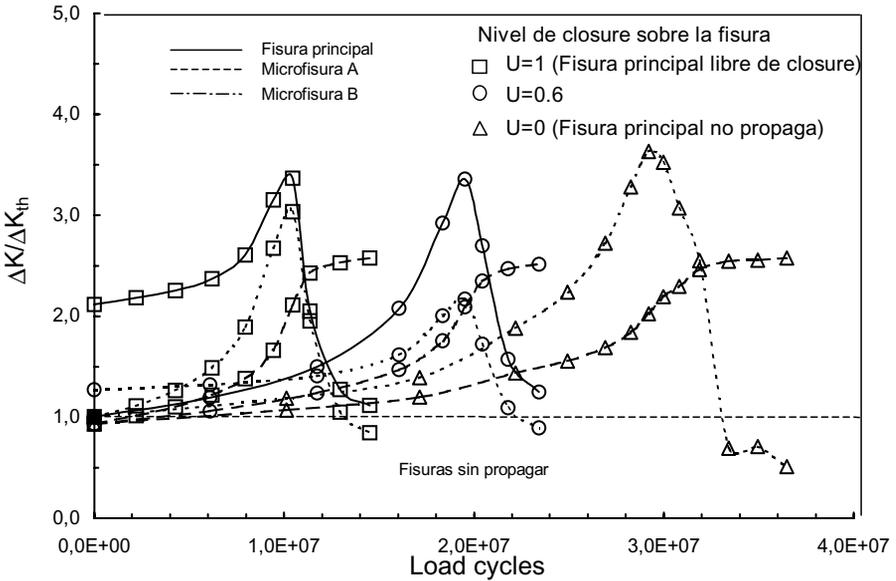


Figura 4: evolución ΔK con los ciclos de carga $s N$.

5. MODELO DE ELEMENTOS DISCRETOS

El DEM es una familia de métodos numéricos utilizada para resolver problemas de ingeniería y ciencias aplicadas que involucran un alto grado de discontinuidad en su comportamiento del material. Los problemas que involucran este tipo de comportamiento son difíciles de modelar utilizando metodologías numéricas convencionales basadas en la hipótesis del continuo como es el caso del FEM, BEM o diferencias finitas. En el DEM el continuo es discretizado mediante un arreglo de masas puntuales conectadas mediante barras (elementos). Con el DEM se modela en forma explícita el movimiento y las interacción mecánica de cada elemento, proveyendo una descripción detallada de sus posiciones, velocidades y fuerzas en el tiempo¹⁵. Las propiedades de las barras son equivalentes a la porción de continuo que estas representan. La falla del material (fractura o fragmentación) es introducida en el modelo mediante la desactivación de las barras. La relación constitutiva de cada una de ellas es de la forma:

Force=función(deformación de la barra)

Considerando los principios de la mecánica de fractura lineal elástica K_{IC} está dada por

$$K_{IC} = Y \cdot f \cdot \sqrt{a} \quad (5)$$

donde f es un nivel de tensión crítico e Y un parámetro geométrico. Considerando un comportamiento lineal de la barra hasta su rotura, es posible encontrar la siguiente expresión para la deformación crítica in ε_p :

$$\varepsilon_p = R_f \left[\frac{G_f}{E \cdot (1 - \nu^2)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

donde R_f es un “factor de falla” que se define como

$$R_f = \frac{1}{Y \cdot \sqrt{a}} \quad (3)$$

Sobre la base de estas definiciones, se adopta para las barras una relación constitutiva bilineal como se ilustra en la Figure 5.

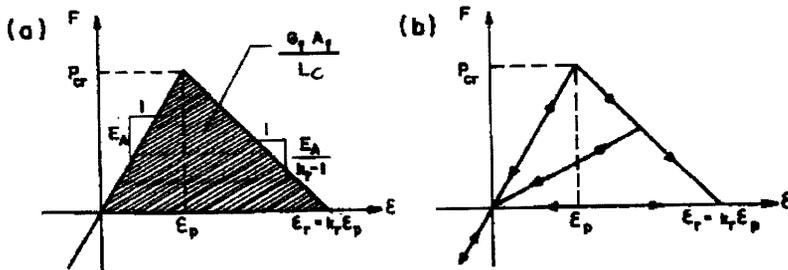


Figura 5: relación constitutiva de las barras: a) parámetros de control, b) esquema de carga

6. RESULTADOS DEL MODELO DE DEM

Las simulaciones con DEM se realizaron sobre modelos construidos a partir de distribuciones aleatorias de nódulos generadas con $r/d=0.25$, de acuerdo a los datos estadísticos reportados en la Tabla 1. Se adoptó un radio de nódulo $r=1 \cdot 10^{-4}$ mm correspondiente a un conteo nodular de 100 nódulos por mm^2 . Los modelos utilizados constaron de aproximadamente 175.000 nodos y 865.000 barras. Con el propósito de minimizar los efectos dinámicos se prescribió la velocidad de carga a 1 m/seg.

Se trabajó en primera instancia con modelos de calibración, reproduciendo un ensayo simple de tracción. A partir de estos se ajustaron las distintas constantes que gobiernan la ley constitutiva de las barras hasta reproducir la curva carga vs deformación experimental (ver Figura 6). La evolución del daño en la microestructura se ilustra en la Figura 7 para distintos

niveles de deformación.

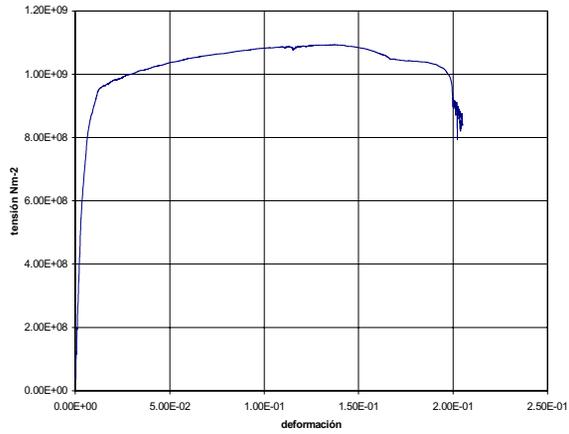


Figura 6: diagrama carga deformación obtenido del modelo de DEM

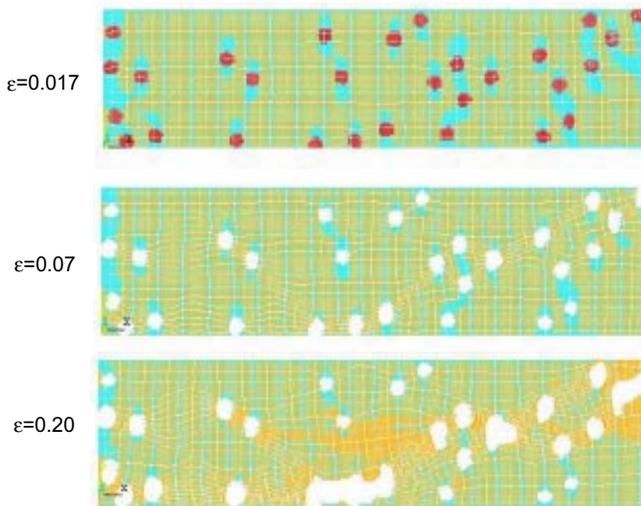


Figure 7: discretización de modelo de DEM mostrando la evolución del daño en la microestructura del ADI para distintos niveles de deformación.

La Figura 8 ilustra el modelo de una fisura en ADI. En concordancia con las observaciones experimentales el modelo predice la ocurrencia del proceso de microfisurado en la zona de alta concentración de tensiones en la zona vecina al vértice de la fisura.

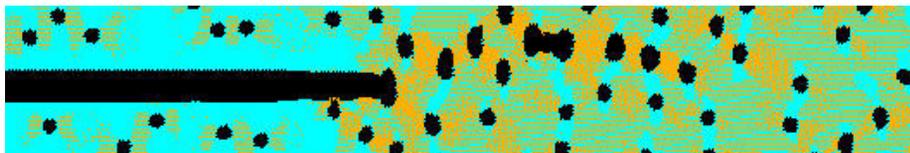


Figure 8: proceso de microfisurado en la región vecina al vértice de fisura.

7. CONCLUSIONES

Se presentaron en este trabajos modelos de Elementos de Contorno (BEM) y Elementos Discretos (DEM) al modelado de la propagación e fisuras en fundiciones esferoidales austemperizadas (ADI). Este proceso involucra el proceso de microfisurado en la zona de alta concentración de tensiones en la zona vecina al vértice de fisura a partir de los nódulos de grafito.

El BEM resultó eficaz y eficiente para modelar la para modelar el proceso de interacción y coalescencia de entre la fisura principal y las microfisuras. El modelo de BEM permitió corroborar el comportamiento evidenciado en los experimentos, en los que se observa que el camino de propagación la fisura preferentemente intercepta los nódulos de grafito.

La principal limitación de los modelos de BEM es que las microfisuras deben introducirse en forma artificial en los modelos. Con el objeto de estudiar la ocurrencia del microfisurado se utilizaron modelos de DEM, para los que la falla de una determinada región del modelo se traduce en la desactivación de elementos que agotan su resistencia. Los modelos de DEM reprodujeron el fenómeno de microfisurado a partir de los nódulos en la zona de alta concentración de tensiones vecina al vértice de la fisura.

Los modelos implementados aportaron información valiosa para validar hipótesis y modelos fractomecánicos propuestos para la propagación de fisuras en ADI. El modelo de DEM presenta un importante potencial para su desarrollo. Se propone en este sentido obtener del mismo resultados de carácter cuantitativo para medir el daño en la matriz y la forma de la zona dañada. Estos parámetros permitirán correlacionar los resultados numéricos con modelos teóricos disponibles en la bibliografía.

8. REFERENCIAS

- [1] G.L. Greno, J.L. Otegui and R.E. Boeri, (1999) "Mechanisms of fatigue crack growth in Austempered Ductile Iron", *Int. J. of Fatigue*, Vol. 21, pp. 35-43
- [2] Effect of Microcracking on the Micromechanics of Fatigue Crack Growth in Austempered Ductile Iron, J.Ortiz, A.P.Cislino y J.Otegui, (2001) *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 24/9, pp.591-606.
- [3] Faubert G.P., Moore D.J. and Rundman K.B. (1991) ADI Part I: microstructure and mechanical properties of high alloy heavy section castings. Proc. AFS (American Foundrymen's Society, Inc.) 1991 World Conference on Austempered Ductile Iron, 10-16
- [4] Image-Pro Plus, Media Cybernetics Inc. , USA
- [5] Greno G.L., Otegui J.L. and Boeri R.E., (1999) Mechanisms of fatigue crack growth in Austempered Ductile Iron, *Int. J. of Fracture*, 21, 35-43
- [6] Hutchinson J.W., Crack tip shielding by micro-cracking in brittle solids, *Acta Metallurgica*, 35(7), 1605-1619, (1987)
- [7] Aliabadi M.H. (1997) Boundary element formulations in fracture mechanics, *Appl. Mech. Review.*, 50/2, 83-96
- [8] Portela A., Aliabadi M.H. and Rooke D.P. (1993) Dual boundary element incremental analysis of crack propagation, *Computers & Structures*, 46/2, 237-247
- [9] Aliabadi M.H. and Rooke D.P. (1994) *Numerical Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publishers, London
- [10] Ortiz J., Cislino A.P. and Otegui J. (2001) Boundary Element Analysis of Fatigue Crack Propagation Micromechanisms in Ductile Iron, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 25 , 467-473.
- [11] Sih G.C. (1991) *Mechanics of Fracture Initiation and Propagation*, Kluwer Academic Publishers
- [12] Klesnil M, and Lukas P. (1972) Influence of strength and stress history on growth and stabilisation of fatigue cracks, *Engng. Fract. Mech.*, 4, 77-92
- [13] Elber W. (1971) The significance of fatigue crack closure, *Damage Tolerance in Aircraft Structures*, ASTM STP 486, 230-247
- [14] Petrova V., Tamuzs V. and Romalis N. (2000), A survey of macro-microcrack interaction problems, *Appl. Mech. Review*, 53(5), 117-146
- [15] Iturrioz, I. Aplicacao do método dos elementos discretos ao estudo de estruturas laminares de concreto armado. Porto Alegre, 176 p. Tese (Doutorado), Curso de Pós Graduacao em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.