

Análisis de Propagación Subcrítica de Fisuras por Fatiga en un Acero Estructural astm a-36 usando el método de elementos de contorno

Analysis of propagation subcriticalizes of fissures by fatigue in a astm a-36 structural steel using the boundary elements method

Figueroa Cruz, Myriam S¹., Valdivia Rojas, Wilfredo J¹, Camacho Mamani, Wilson E¹, Reyes Cano, Victoria¹

RESUMEN

En presencia de cargas fluctuantes en el vértice de discontinuidades geométricas más o menos agudas se presenta un fenómeno de deformación elasto-plástica cíclica a partir del cual se produce la iniciación de la fisura por fatiga. La condición superficial y la naturaleza del medio cumplen un rol importante en la resistencia a la fatiga, esto es sobre el número de ciclos necesarios para que aparezca la fisura. Desde un punto de vista ingenieril, cuando la fisura adquiere una longitud de aproximadamente 0.25 mm, se acepta habitualmente que se ha completado la etapa de iniciación. A partir de ahí se considera que se está en la etapa de extensión o de crecimiento estable que eventualmente culmina en la rotura monótona de la sección remanente. La proporción de vida total que corresponde a la etapa de iniciación aumenta hacia la región de alto ciclo, entendiéndose habitualmente por tal a aquella en la cual se produce en no menos de aproximadamente 10^7 ciclos.

El Método de Elementos de Contorno (BEM), es una técnica de discretización empleada para solucionar ecuaciones diferenciales parciales, que ofrece, para ciertos problemas, importantes ventajas con respecto a aquellas técnicas de dominio. A pesar de la alta reducción de tiempo, que las computadoras pueden alcanzar en resolver sistemas de ecuaciones, algunos problemas en 3-D hoy en día siguen siendo intratables por su número extremadamente grande de grados de libertad, que en el caso del BEM sucede lo contrario.

Palabras clave: fatiga, discretización, elemento, contorno

ABSTRACT

In presence of fluctuating charges, in the vertex of geometric more or less sharp discontinuities there takes is produced a phenomenon of plastic elasto-cyclical deformation from which the initiation of the fissure takes place is produced for fatigue. The superficial condition and the nature of the way fulfil an important role on the resistance to the fatigue: this is on the number of necessary cycles in order that the fissure appears. From a point of view ingenieril, when the fissure acquires a length of approximately 0.25 mm it is accepted habitually that the stage of initiation has been completed. From there it thinks that one is in the stage of extension or of stable growth that eventually culminates in the monotonous break of the remaining section. The proportion of the total life that corresponds to the stage of initiation increases towards the region of high cycle, understanding itself habitually for such to that one in which the initiation takes place in not less than approximately 10^7 cycles.

The Method of Contours elements (BEM), it is a technology of discretización employee to solve differential partial equations, which it (he, she) offers, for certain problems. important advantages that those technologies (skills) of authority. In spite of the high reduction of time, which the computers can reach in to solve systems of equations, some problems in 3-D today in day continue being unamenable for its extremely big number of degrees offreedom, which in case of the BEM happens the opposite thing.

Key Words: fatigue, discretización, elements, Boundary

INTRODUCCIÓN

La fatiga es un fenómeno que produce el debilitamiento gradual de un material sometido a carga cíclica, y que conduce generalmente a la falla después de un cierto número de ciclos. A este tipo de fallas se conoce como, *fallas de fatiga*, porque ocurren en condiciones de carga dinámica [1]. Cuando existen cargas y descargas alternadas aparece el endurecimiento, aumentando la fragilidad del metal; agotada la capacidad del metal debido al aumento del endurecimiento, aparecen grietas microscópicas las cuales forman grandes concentradores de tensión que debilitan la sección y producen la rotura [2,3,4].

El Método de Elementos de Contorno (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 la propagación de la fisura [6, 7,8].

En el presente trabajo de Investigación, se determina la propagación subcrítica de fisura en un acero estructural ASTM A-36 sometido a fatiga. Se presenta el modelado numérico del fenómeno de la iniciación, interacción y propagación de la fisura. Para alcanzar lo mencionado anteriormente se partió de la siguiente interrogante:

¿Es posible analizar la propagación subcrítica de fisuras en un acero estructural ASTM A-36 sometido a fatiga, usando métodos numéricos?

El método de elementos de contorno, por requerir solo la discretización del contorno del problema, posibilita analizar la propagación automática de fisuras.

Objetivo General

Predecir la magnitud y dirección de la propagación automática de la fisura en un acero estructural ASTM A-36 en fatiga.

Objetivos Específicos

- Modelar el fenómeno de propagación.
- Estimar cuantitativamente el fenómeno de propagación.

Modelado de Elementos de Contorno

La modelación numérica de la propagación de fisuras por fatiga requiere la capacidad de predecir la magnitud y la dirección de la extensión de fisura, al mismo tiempo, el modelo debe ser lo suficientemente robusto para actualizar su geometría. El BEM es reconocido por sus características especiales para resolver este tipo de problemas [6, 7,8]. El BEM no solo limita la discretización del modelo a su contorno, sino que permite además analizar los problemas usando una única zona, facilitando de esta forma el proceso de remallado del modelo luego de cada incremento de la longitud de la fisura [9,10].

La evaluación del factor de intensidad de tensiones K es de importancia en el análisis de propagación de fisuras, además es importante considerar los efectos de la iteración. Los factores de intensidad de tensiones son calculados 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 punto [11]. Esta técnica fue preferida sobre metodologías basadas en integrales de dominio, ya que para las características del problema resultó difícil 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 ello se incorpora al modelo elementos especiales de fractura que producen la variación \sqrt{r} en el campo de desplazamientos [12,13].

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.

Entre los criterios disponibles para determinar la dirección de propagación se adoptó para este trabajo el propuesto por Sih [14]. 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:

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

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 determinado reemplazando los valores de K calculados en la expresión (1) y comparando los valores de $S(\theta)$ en los puntos para los que $\frac{d^2 S(\theta)}{d\theta^2} > 0$, esto fue implementado usando un algoritmo de bisección.

Al tratarse de un criterio continuo, el mínimo de S no considera el efecto de la discretización del análisis incremental. La dirección de propagación siempre está definida 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 [10].

La expresión de Klesnil y Lucas [14] se usa para correlacionar la velocidad de propagación $\frac{da}{dN}$ con el rango del factor de intensidad de tensiones, ya que esta introduce el efecto del umbral de propagación:

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

Donde $C = (4.000 \pm 0.316) \times 10^{-6}$ y $m = 0.697 \pm 0.258$ y el término $\Delta K_{th} = 15 MPa\sqrt{m}$ corresponde al umbral del factor de intensidad de tensiones por debajo del cual no hay propagación. El efecto del cierre parcial de fisura (crack closure) es considerado mediante la definición de un rango efectivo del factor de intensidad de tensiones:

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

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:

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

MATERIALES Y MÉTODOS

El objeto de estudio estuvo constituido por materiales de acero estructural ASTM A-36.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero ASTM A-36.

Propiedades Mecánicas.		
Resistencia a la Tracción	Límite de Fluencia	Elongación
(Kg./cm ²).	(Kg./cm ²).	%
5600	2540	20

Tabla 2. Composición química del acero ASTM A-36.

Composición Química.				
C	Si	Mn	S	P
0.26%	0.40%	0.75%	0.05%	0.04%

Tabla 3. Características geométricas de la probeta de fatiga según la norma ASTM-399

Espesor.	Ancho.	Longitud.	Profundidad.	Longitud.
(e)	(a)	(L)	(p)	(l)
12.7 mm.	50.8 mm.	200mm	Máx. = 3 mm.	Máx. = 16 mm.

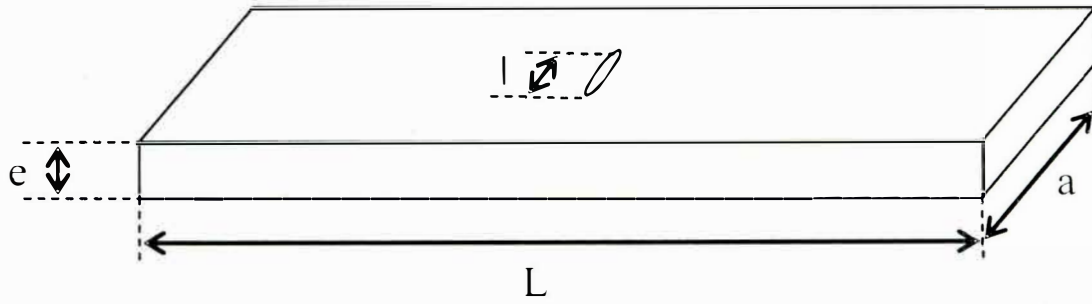


Fig. 1: Probeta para ensayo de fatiga.

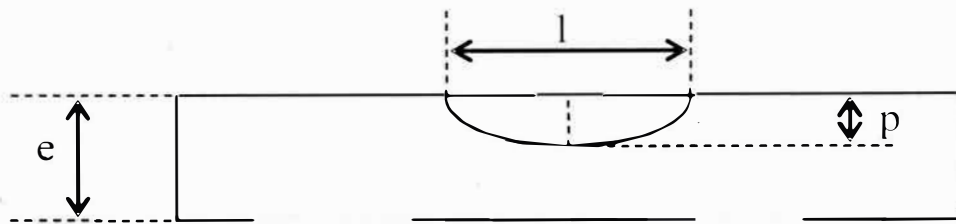


Fig. 2: Geometría del concentrador de tensiones para la probeta de fatiga.

Muestra de Estudio

Por las características de estudio que se realizaron, la investigación es de tipo Correlacional, y de acuerdo a la técnica de contrastación de hipótesis es de tipo Experimental.

Método

VARIABLES EN ESTUDIO

	VARIABLES
Variable independiente	X: ciclos
Variable dependiente	Y: Abertura de fisura

Procedimiento

Para marcar la evolución de fisuras se utilizó la información de las condiciones iniciales de la probeta, ingresando las cargas aplicadas y especificaciones del acero ASTM A-36, para verificar el avance de fisura en la probeta.

RESULTADOS

Tabla 4. Valores del número de ciclos (N), avance de la fisura (a y c), velocidad de propagación subcrítica (da/dN) y variación del factor de intensidad de tensiones (ΔK) para el acero estructural ASTM A36.

N (ciclos)	a (mm) ± 0.001	c (mm) ± 0.001	da/dN (mm/ciclo)	ΔK (MPa.$\text{mm}^{1/2}$)
125005	1.032	5.774	2.906E-05	12.184
137508	1.571	7.109	2.952E-05	14.949
150005	1.796	7.313	3.025E-05	15.880
167003	2.368	8.626	3.170E-05	18.344
187510	2.783	9.443	3.414E-05	20.016
200008	3.225	10.660	3.600E-05	21.989
206505	3.299	10.860	3.708E-05	22.324
227516	4.120	12.642	4.108E-05	25.934
235507	4.243	13.599	4.282E-05	27.046
250010	4.880	14.162	4.625E-05	29.508
267519	5.384	16.174	5.091E-05	33.295
275504	5.948	17.619	5.321E-05	37.268
290015	6.513	19.778	5.769E-05	43.364
297523	7.092	22.498	6.016E-05	53.293
301454	7.244	24.170	6.150E-05	60.226
309257	7.825	24.545	6.422E-05	67.710
314380	7.285	24.332	6.608E-05	61.259

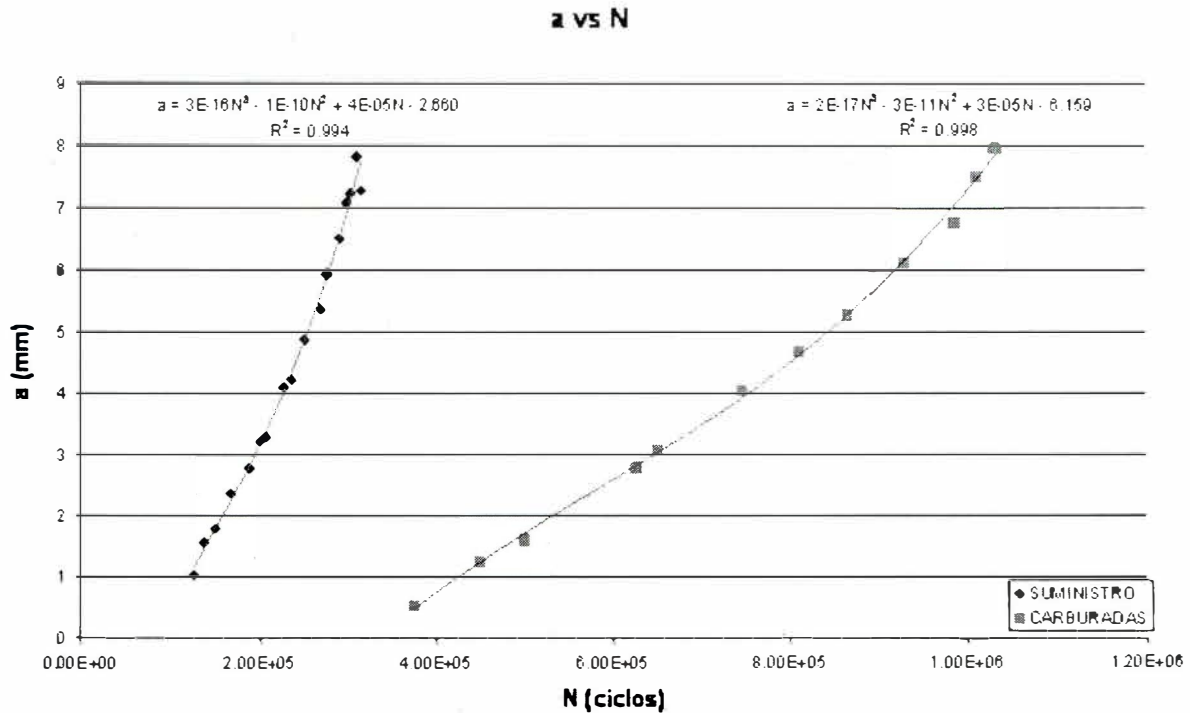


Fig. 3: Propagación de la fisura en función del número de ciclos para el acero ASTM A36 en suministro y carburado.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mediante la simulación con los elementos de contorno se acercan considerablemente a los obtenidos de manera experimental.

Según la figura N° 3, se observa que las probetas fallan a bajo número de ciclos, debido a defectos en la superficie que actúan como concentradores de tensiones, es decir, se introduce esfuerzos residuales en la capa superficial.

La diferencia de tiempo de duración a la fractura del acero ASTM A36, se observa en forma gráfica en la figura N° 3, en la que verificamos que para un determinado valor de avance de la fisura, el material requiere menor número de ciclos.

De la tabla N° 4, podemos ver que el material alcanza mayores velocidades de propagación; es decir, a medida que la fisura se propaga podemos ver que para determinado valor de avance de la fisura

los valores de la velocidad de propagación son mayores. Asimismo, el intervalo de velocidades que se crea entre el menor y mayor valor de la fisura, es mayor para el material de estudio.

CONCLUSIONES

1. La propagación de fisura es muy similar a la obtenida en forma experimental.
2. La curva de avance de fisura se puede ajustar al introducir elementos cuadráticos al modelo.
3. El método de elementos de contorno es adecuado a problemas de fisuras, donde haya una fuerte singularidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ipiña, J. 1995. *Elementos de mecánica de fractura*. Argentina: Universidad del Comahue.
- Faires, V. 1996. *Diseños de elementos de Máquina*. Barcelona: Editorial Montaner y Simón.

Jones, D. 1996. *Principles and prevention of corrosion*. N. Y. USA: Prentice Hall, Inc.

Galvele, J. y Duffo G. 2003. *Degradación de Materiales-I*, Instituto Sabate: Buenos Aires: UNSAM-CNEA

Yu. M. 1998. *Metalografía y tratamiento térmico de los aceros*. Moscú: Editorial Mir

Ortiz J., Cisiliano A. y Otegui J. 2000. *Boundary Element Analysis of Fatigue Crack Propagation Micromechanisms in Ductile Iron. Engineering Analysis with Boundary Elements*, 25, 467-473.

Abd L. 2002. *Crack Growth in Concrete Using Boundary Elements*. Computational Southampton UK and Boston USA: Mechanics Publications.

Brebbia C. 1992. *The Boundary Element Method for Engineers*. Gran Bretaña: Pentech Press.

Alarcón E. y Reyero P. 1983. *Guía de Introducción al Método de los Elementos de Contorno*. Madrid: Servicio de Publicaciones ETS Ingenieros Industriales.

Jaswon M. 1963. *Integral equation methods in potential theory-I*. Proc. Roy. Soc., 273(A).

Domínguez J. 1978. *Cálculo de Tensiones en las Inmediaciones de Anclajes. Aplicación del Método de los Elementos de Contorno*. Tesis Doctoral. Sevilla: ETS Ingenieros Industriales.

Jaswon M. y Symm G. 1977. *Integral Equation Methods in Potential Theory and Electrostatics*. Academic Press.

Paris F. Cañas J. 1997. *Boundary Elements Method*. New York: Oxford University Press.

Brebbia C. Domínguez J. 1989. *Boundary elements: an introductory course*. Southampton/New York: CMP/McGraw-Hill.

