

APLICACIONES DE LOS METODOS NUMERICOS A LA MECANICA DE LA FRACTURA.

M.A. Astiz

Departamento de Física de Materiales. E.T.S. de Ingenieros de Caminos. Madrid.

Se describen someramente en esta presentación los distintos aspectos de la Mecánica de la Fractura que han sido analizados por métodos numéricos en el Departamento de Física de Materiales de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos - de Madrid: Mecánica de Fractura elástica lineal y elasto-plástica y difusión de hidrógeno.

1.- INTRODUCCION

Como es bien sabido, la Mecánica de la Fractura plantea problemas de análisis de tensiones de muy difícil resolución. De hecho, son contados los casos de sólidos fisurados en régimen elástico lineal que han sido resueltos analíticamente. En cuanto al caso de sólidos fisurados en régimen elasto-plástico, sólo se conoce una solución asintótica /1-3/ cuya validez está limitada por el hecho de que en la zona que rodea el borde de una fisura, el material no se comporta como un medio continuo.

Estos hechos hacen que los métodos numéricos de análisis de tensiones hayan tenido una gran importancia en el desarrollo de la Mecánica de la Fractura. Nuestra experiencia se ciñe al uso del método de los elementos finitos por ser el más versátil, aunque no sea ésta, evidentemente, la única posibilidad existente.

Este método nos permite también analizar otros problemas de Mecánica de la Fractura distintos de los de análisis de tensiones como es el caso del estudio de la difusión de hidrógeno en materiales metálicos que veremos más adelante y que permite explicar algunos casos de corrosión bajo tensión.

2.- MECANICA DE LA FRACTURA LINEAL

El problema base a estudiar es el de los alambres de acero de pretensar con fisuras laterales y sometidos a un estado de tracción simple (Fig. 1). Por tratarse de un problema espacial es importante optimizar los métodos de cálculo utilizados en la determinación del factor de intensidad de tensiones a lo largo del borde de la fisura. Para conseguir esta optimización se ha usado el método de la rigidez diferencial /4,5/ combinado con el empleo de elementos finitos singulares alrededor del borde de la fisura llegándose de esta forma a re-

sultados satisfactorios con mallas de elementos relativamente poco densas. Nuestra contribución estriba por un lado en la definición de los límites de validez del método de la rigidez diferencial y por otro lado en proponer un nuevo elemento finito singular compatible con elementos lineales.

El método de la rigidez diferencial consiste en calcular la tasa de liberación de energía como:

$$G = - \frac{1}{2} \underline{u}^T \cdot \frac{\Delta K}{\Delta a} \cdot \underline{u} \quad (1)$$

siendo \underline{u} el vector de desplazamientos nodales, a la profundidad de la fisura, K la matriz de rigidez del modelo de elementos finitos y ΔK la variación de la matriz de rigidez correspondiente a una pequeña alteración Δa , en la profundidad de la fisura.

La elección adecuada de Δa en función de las dimensiones de los elementos, de la profundidad de la fisura y del número de dígitos con los que trabaje el ordenador es condición indispensable para la obtención de resultados precisos con este método /6/. Generalmente, valores de $\Delta a/a$ inferiores a 1/1000 suelen dar buenos resultados (Fig. 2).

En cuanto a los elementos finitos singulares existen varios elementos sencillos y eficientes para mallas de elementos cuadráticos /7,8/. Sin embargo, los elementos existentes para mallas de elementos lineales /9/ son singulares pero distorsionan de forma apreciable el campo de tensiones alrededor del borde de la fisura debido a su escaso número de grados de libertad.

El elemento propuesto consiste en añadir modos de deformación no compatibles al elemento de Tracey y combinar este nuevo elemento con elementos cuadrangulares o prismáticos (según que se trate de problemas planos o espaciales) que incorporen el mismo tipo de funciones de desplazamiento no compatibles de tal forma que el conjunto así obtenido pase la prueba de la parcela y dé lugar por lo tanto a modelos convergentes /11/.

Los resultados obtenidos combinando los dos métodos propuestos son excelentes como se puede observar en la Fig. 3 correspondiente al problema de la placa rectangular con una fisura lateral y sometido a tracción.

3.- MECANICA DE LA FRACTURA ELASTO-PLASTICA

Este campo es aún más extenso que el de la Mecánica de la Fractura elástica lineal. Nuestro tema de investigación inicial consistió en analizar la propagación de fisuras en régimen elastoplástico reproduciendo numéricamente el proceso de crecimiento lento de la fisura y analizando la evolución del campo de tensiones en este proceso (todo ello en el supuesto de que el material sigue comportándose como un medio continuo) /12/. Este tipo de análisis permite calcular la integral J no como tal integral sino directamente a través del balance energético establecido en el proceso de propagación de la fisura. Este tipo de cálculo tiene mayor sentido físico que el de la integral y se comprueba que los resultados experimentales se explican mejor que a través de la integral J. En la Fig. 4 se ha representado la zona de descarga elástica que se produce por detrás del borde de la fisura.

Simultáneamente nuestro departamento está participando en el "Elastic Plastic Fracture Mechanics Round Robin" organizado por la Comisión de las Comunida

des Europeas y el Grupo Europeo de Fractura /13,14/. Se trata de un cálculo por elementos finitos en régimen elasto-plástico realizado por más de veinte grupos de investigación europeos en el que se comparan los distintos resultados entre sí y con resultados experimentales. Este tipo de investigación permite determinar la influencia de la malla de elementos finitos, de las ecuaciones constitutivas, del tipo de iteración de equilibrio.

El objetivo que persigue es la uniformización de los resultados para conseguir que este tipo de cálculos sean más fiables de lo que son en la actualidad. Para comprobar la necesidad de este esfuerzo basta observar los resultados obtenidos en la primera fase (Fig. 5) en que la dispersión fué muy elevada. La primera fase consistió en el análisis de la probeta de flexión en tres puntos (1980); en la segunda fase (1983) se analizó la probeta CTS; la tercera fase (1985) supondrá la repetición de la segunda fase con una malla de elementos dada y está prevista una cuarta fase en la que se estudiará el crecimiento lento de la fisura.

4.- DIFUSION DE HIDROGENO

Es sabido que el fenómeno de la corrosión bajo tensión del acero viene producido por fragilización debida a la presencia de hidrógeno en el material. Por otro lado el transporte del hidrógeno a través del material obedece a las leyes de la difusión aunque bajo la influencia del campo tensional. Una de las ecuaciones propuestas para explicar este fenómeno es :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla \cdot (\nabla c - \frac{V^*}{RT} c \nabla s) \quad (2)$$

donde c es la concentración de hidrógeno, D la difusividad, V* el volumen parcial molar de hidrógeno, R la constante de los gases, T la temperatura y s la tensión hidrostática. Como vemos, se trata de un problema acoplado difusión-tensión y esto hace que el método de los elementos finitos esté especialmente indicado. El método propuesto permite analizar la evolución de la concentración de hidrógeno en cualquier punto del material incluso en el caso de un estado de tensiones variable /15/. El objetivo último de esta investigación consiste en determinar las condiciones de tensión y concentración que producen la rotura.

REFERENCIAS

- /1/ Hutchinson J.W., J. Mech. Phys. Solids, 16, pp. 13-31 (1968)
- /2/ Rice J.R. & Rosengren G.F., J. Mech. Phys. Solids, pp. 1-12 (1968)
- /3/ Astiz, M.A., Elices, M. y Sánchez Gálvez V., Int. J. Fracture, pp.191-193 (1980)
- /4/ Parks D.M, Int. J. Fracture, 10,pp. 487-502 (1974)
- /5/ Hellen T.K., Int. J. Num. Meth. Eng., 9,pp.187-207 (1975)
- /6/ Astiz M.A. y Elices M., 2nd.Int.Conf. Numerical Meth. in Fracture Mechanics (1980)
- /7/ Henshell R.D. y Shaw K.G. Int. J. Num. Meth.Eng., 9,pp.495-507 (1975)
- /8/ Blackburn W.S. y Hellen T.K., Int.J. Num. Meth. Eng., 11,pp.211-229 (1977)
- /9/ Tracey D.M., J. Nuc.Eng. Des., 3, pp.282-290 (1974)
- /10/ Astiz, M.A. en vías de publicación
- /11/ Zienkiewicz, O.C. The Finite Element Method, Mc.Graw-Hill (1977)
- /12/ Astiz M.A. Tesis Doctoral (1976)

- /13/ Astiz, M.A. y Elices M. An. Ing. Mecánica, 1, pp.35-42 (1982)
- /14/ Larsson L.H. 3rd. Int. Conf. Numerical Meth. in Fracture Mechanics (1984)
- /15/ Astiz, M.A. 2nd. Int. Conf. Numerical Meth. Non Linear Problems (1984).



Fig. 1.- Alambre con una fisura superficial

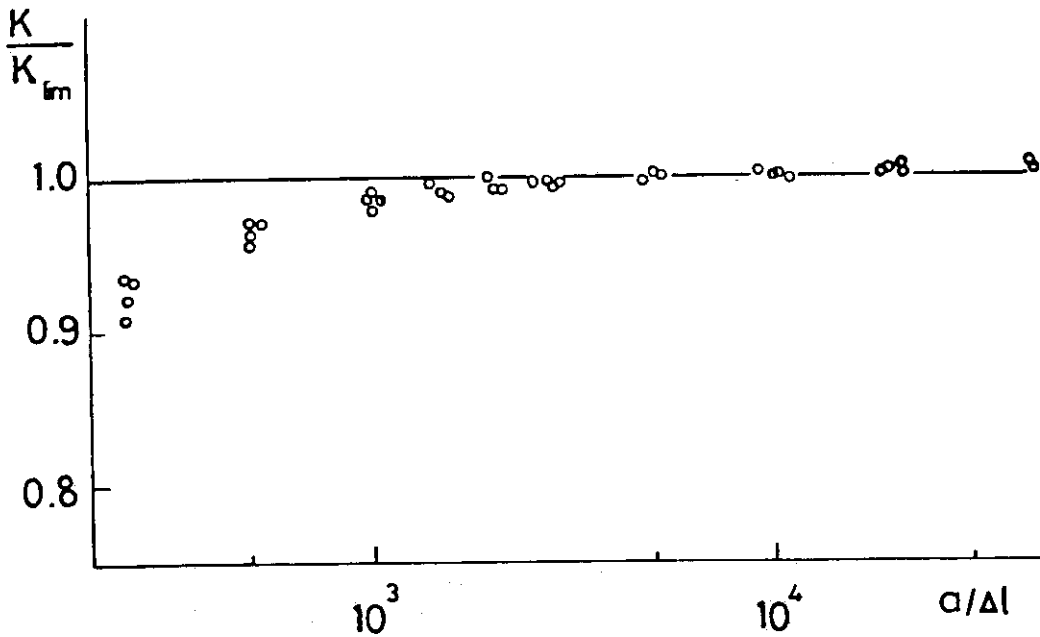


Fig. 2.- Influencia del incremento del tamaño de la fisura

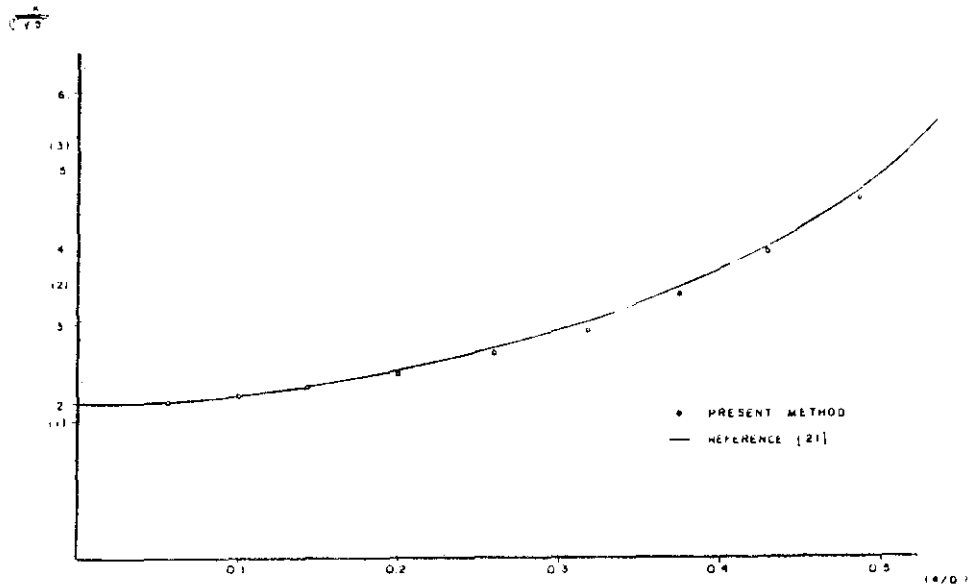


Fig. 3.- Factor de intensidad de tensiones para la probeta rectangular con una fisura lateral.

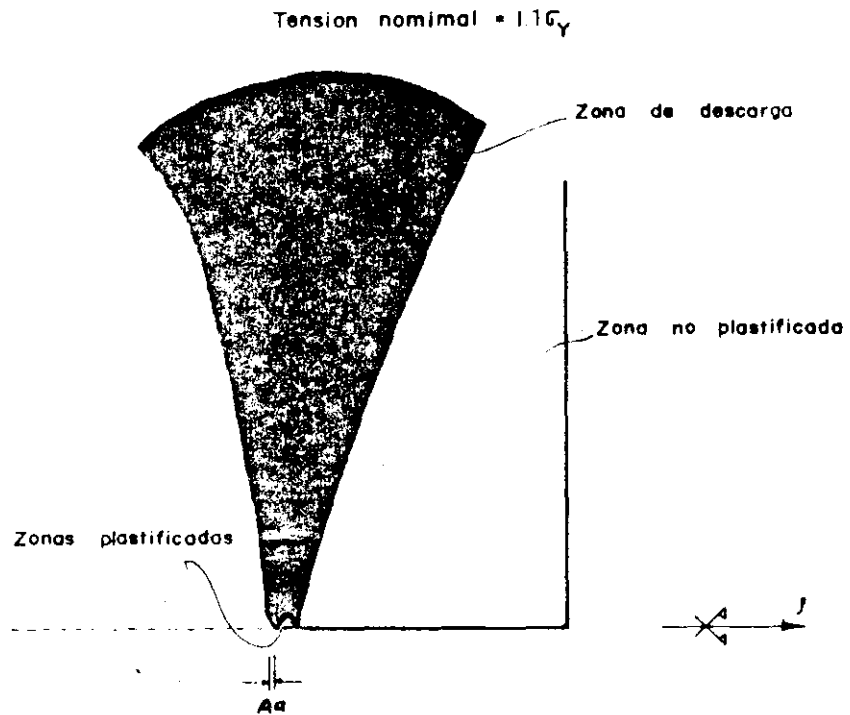


Fig. 4.- Zona de descarga elástica en la propagación de la fisura

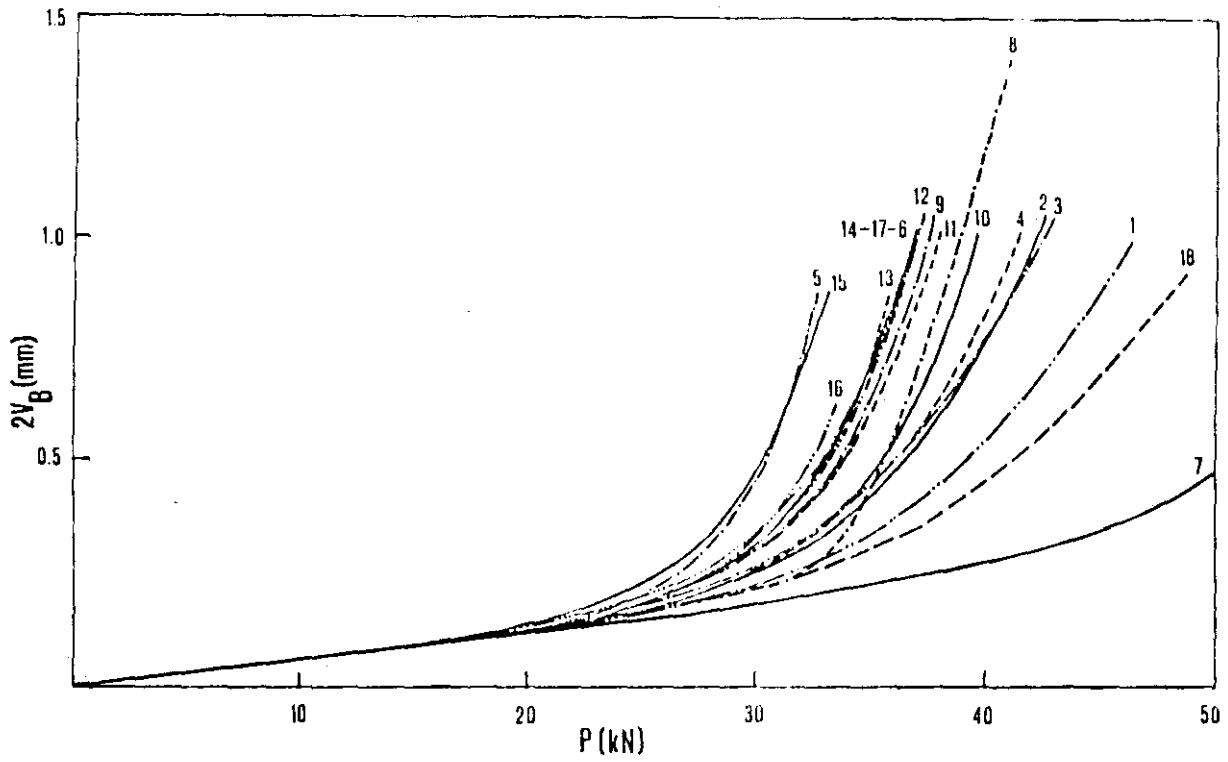


Fig. 5.- Curvas carga-desplazamiento para la probeta de flexión (EPFM Round Robin)

SOME APPLICATION OF NUMERICAL METHODS TO FRACTURE MECHANICS

M.A.Astiz

Departamento de Fisica de Materiales - E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Madrid.

The activities of the Physics of Materials Department of E.T.S.I. Caminos (Madrid) in the field of numerical methods applied to Fracture Mechanics are presently aimed at the development of the following areas.

In LEFM a new singular finite element has been presented. This element is a three node triangle in its planar version or a six node prismatic element in its three dimensional version and is to be used in conjunction with linear quadrilateral or hexahedral elements.

In EPFM there have been some developments in the modelling of slow crack growth processes. This department is also participating in the EPFM European Round Robin since the beginning.

In the stress-corrosion field, hydrogen diffusion has been studied by means of a finite element model which deals with the coupled problem (diffusion and solid mechanics) by applying the weighted residual method.