

# ANALISIS CUASI-ESTATICO DE LA PROPAGACION DE GRIETAS EN UNA VASIJA NUCLEAR

I. Miranda, J.M. Bastero, J. García de Jalón  
*Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa. San Sebastián*

*En el presente artículo se describe el análisis del proceso de propagación y detención de una grieta axial existente en el interior de una vasija nuclear. La propagación inestable de esta grieta es producida por un choque térmico.*

*El estudio del comportamiento estructural durante la propagación de la grieta se realiza con un análisis cuasi-estático. El borde de grieta es modelizado con elementos cuadriláteros isoparamétricos con un lado colapsado y 1/4 point. El crecimiento de grieta es simulado con un desplazamiento y regeneración de mallado. Como criterio de fractura se emplea el factor de intensidad de tensión  $K_I$ .*

## 1. INTRODUCCION

La propagación inestable de una grieta en una estructura produce unos efectos dinámicos como la energía cinética y las ondas de tensiones. Sin embargo, en algunos casos estos efectos tienen una influencia despreciable en el comportamiento de la estructura a fractura. En estos casos un análisis estático del proceso de fractura puede ser aplicado en el análisis del proceso de propagación de grieta /1/.

En este trabajo, se estudia el proceso de propagación y detención de una grieta axial, situada en el interior de una vasija nuclear. Esta estructura es sometida a un calentamiento motivado por un corte en el flujo de refrigerante. Este accidente se denomina LO CA - Loss of Coolant Accident. El mismo va seguido de la inyección de un refrigerante de baja temperatura en el interior de la vasija.

Este accidente induce unas tensiones térmicas que provocan el aumento de factor de intensidad de tensión  $K_I$  en la grieta. Si éste alcanza el valor crítico  $K_{IC}$ , resistencia crítica a fractura, la propagación inestable de la grieta se produce hasta la fractura total de la estructura o la detención del proceso cuando  $K_I$  se hace inferior a  $K_{IA}$  resistencia a detención en fractura.

## 2. ANALISIS ESTRUCTURAL EN EL CHOQUE TERMICO

El corte de refrigerante produce un calentamiento uniforme de las paredes de la vasija. Posteriormente, la inyección del refrigerante induce un rápido enfriamiento de la zona interna.

La distribución de temperatura en la pared de la vasija muestra un fuerte gradiente positivo, debido a la diferente velocidad de transmisión de calor, mayor por convección hacia el refrigerante en la zona interna, y menor por conducción hacia el interior en la zona media y externa.

Esta distribución de temperatura induce unas tracciones térmicas en la zona interna de la pared de la vasija, debido a la dilatación térmica diferencial existente en la zona de la misma. Estas tracciones térmicas son parcialmente relajadas por la apertura de los labios de la grieta existente.

El análisis termoelástico de la estructura ha sido realizado con el Método de los Elementos Finitos, considerándose las propiedades del material variables con la temperatura.

En la Figura 1 se muestra la discretización empleada en el análisis, para el tamaño de grieta inicial  $a/w = .2$ . En el borde de grieta se han utilizado cuatro elementos cuadriláteros isoparamétricos de 8 nudos, con un lado colapsado y  $1/4$  point /2,3/.

### 3. ANÁLISIS DE FRACTURA

Del análisis del comportamiento estructural por la acción del choque térmico, se obtiene el estado de tensiones y deformaciones en el borde de grieta. El criterio de fractura escogido es el factor de intensidad de tensión  $K_{IC}$  para la propagación inestable de la grieta y  $K_{Ia}$  para la parada del proceso.

Ambos parámetros han sido considerados dependientes de la temperatura y del radio para simular la fragilización del material por la irradiación que sufre la vasija nuclear /4/.

El Factor de Intensidad de Tensión  $K_I$ , ha sido calculado con dos técnicas diferentes habiéndose obtenido resultados muy similares. La primera consiste en realizar un ajuste entre la solución numérica del campo tensiones y desplazamientos en el borde de grieta, obtenida con el M.E.F., y la solución analítica /5/. La segunda consiste en calcular la velocidad de liberación de energía, G.

Este parámetro G se ha obtenido empleando, técnicas de expansión virtual de grieta /6,7/, según indica la ecuación 1.

$$G = - \frac{d\pi}{da} = \frac{1}{da} \left[ \{u\}^T \{dF\} - \frac{1}{2} \{u\}^T |dK| \{u\} \right] \quad (1)$$

donde

$\{u\}$  son los desplazamientos modales con un tamaño de grieta a

$\{dF\}$  son las variaciones entra las fuerzas modales con tamaño de grieta  $a+da$  y a

$|dK|$  son las variaciones entre matrices de rigidez con tamaño de grieta  $a+da$  y a

La propagación de grieta se produce con saltos intermitentes por dos motivos. Por una parte, el crecimiento de la grieta produce una relajación de las tensiones térmicas inducidas, y por otra, la progresión de la grieta se produce hacia zonas de material con mayor temperatura y menor nivel de irradiación.

Ambas características tienden a propiciar una pronta detención del proceso de propagación. En casos como éste, los efectos dinámicos del crecimiento de la grieta pueden ser despreciados, siendo posible emplear un análisis cuasi-estático del proceso de fractura /8,9/.

### 4. ANÁLISIS CUASI-ESTÁTICO

El análisis del comportamiento estructural por la acción del choque térmico permite estudiar el proceso de propagación de la grieta. Esta no se produce mien

tras el Factor de Intensidad de Tensión  $K_{Ic}$ , es menor que  $K_{Ia}$ .

Si la propagación ocurre, la velocidad de la misma es tan elevada que durante este proceso el tiempo puede ser "congelado". Se analizan diferentes tamaños de propagación de grieta hasta que la fractura total, o la detención del proceso ocurren. Esta parada se produce cuando el factor de intensidad de tensión se hace a  $K_{Ia}$ .

La simulación del proceso de propagación se realiza con un desplazamiento y regeneración del mallado de la zona de borde de grieta. El análisis numérico es optimizado empleando una técnica de subestructuras /10/. En la propagación de grieta, al no variar la distribución de temperatura los cambios de matriz de rigidez y vector de cargas térmico de la estructura se concentran en la zona del borde de grieta. Si esta zona se considera como un subestructura se concentran en la zona del borde de grieta añadida, la matriz de rigidez del resto de la vasija es constante durante el crecimiento de la grieta, pudiendo estar triangularizada /11/.

## 5. RESULTADOS

El modelo de vasija analizado tenía un tamaño inicial de grieta de  $a/w = .2$ . La temperatura inicial era de 290°C y la del refrigerante de -20°C.

Durante el choque térmico se han producido a los 41s, 69, 5s y 163, 4s, respectivamente. El Factor de Intensidad de Tensión alcanza un máximo local a los 212 s.

En la Figura 2 se indica la distribución de temperatura en la pared, las curvas de  $K_{Ic}$  y  $K_{Ia}$ , y el Factor de Intensidad de Tensión en la primera propagación y detención de grieta.

En la Figura 3 se muestra la evolución del Factor de Intensidad de Tensión con el tiempo. Los trazos verticales indican los procesos de propagación a tiempo parado.

En la Figura 4 se recoge la variación del Factor de Intensidad de Tensión con el tamaño de grieta. Con esta curva se puede observar que la propagación produce un efecto de relajación de tensiones, disminuyendo  $K_I$ .

## 6 REFERENCIAS

- /1/ Kanninen M.F., 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Numerical Methods in Fracture Mechanics, pp 433-456. 1980.
- /2/ Barsoums R.S., Int J. Num. Meth in Engin., 10, pp 25-37 (1976)
- /3/ Hensell R.D., Shaw K.G. Int. J. Nume. Meth. in Engin., 9 495-507, (1975)
- /4/ Ritchie R.O., Server W.L. Wullaert R.A., Metallurgical Transactions A, 10A, pp 1557-1569. (1979)
- /5/ Broek R.D., "Elementary Engineering Fracture Mechanics", Nordhoff The Hague, (1982)
- /6/ Parks D.H. Int J. Fracture Mech., 10, pp 487-502, (1974)
- /7/ Hellen T.K., Int. J. Num Meth. Engin., 9 pp 187-207, (1975)
- /8/ Cheverton R.D., et al Crack Arrest Methodology and Applications, ASTM, STP711, pp 392-421, (1980)
- /9/ Cheverton R.D. et al J. Pressure Vessel Tech. ASME, 105, pp 102-110 (1983)
- /10/ García de Jalón J. Viadeno F., Computers and Structure, a publicar
- /11/ Miranda I., García de Jalón J., Bastero J.M., 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Num. Meth for Non-Linear Problems, pp 1984.

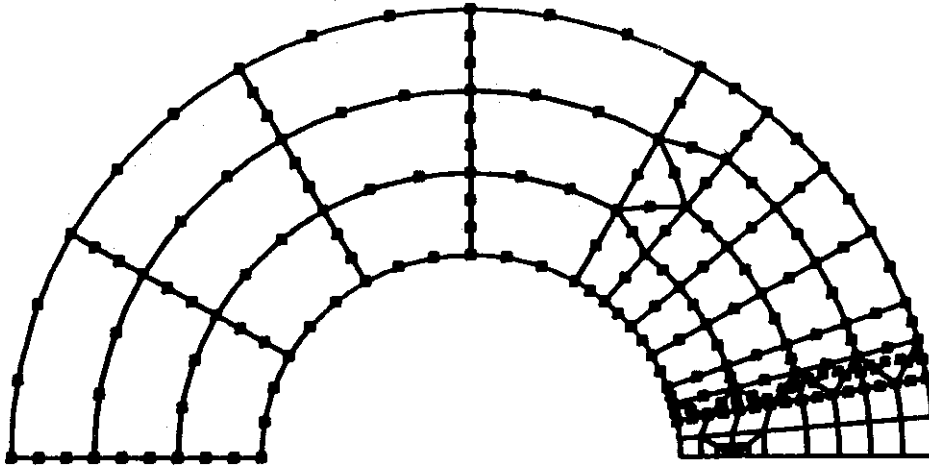


Fig. 1 - Discretización por elementos finitos de la vasija

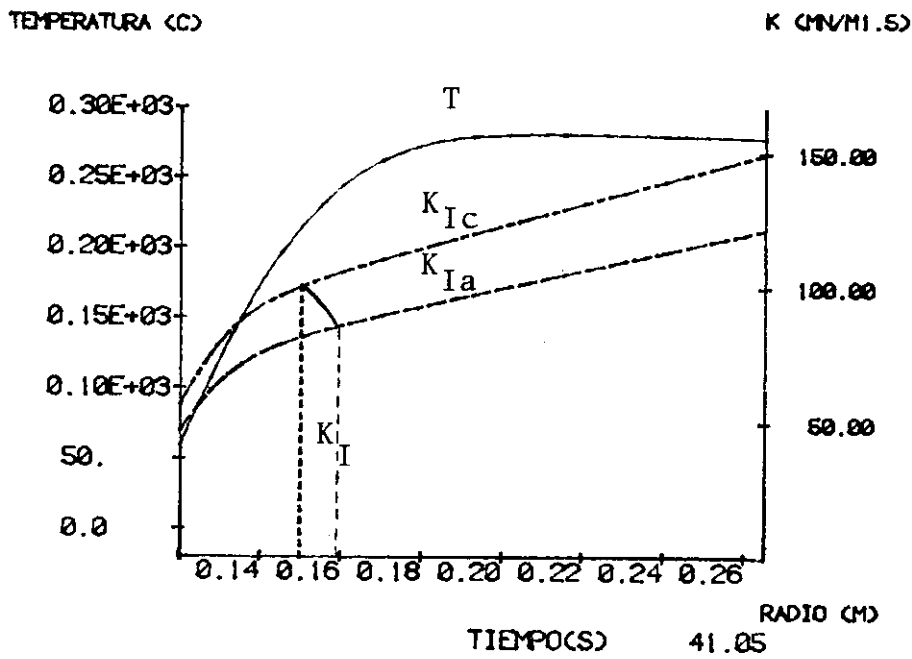


Fig. 2 - Distribución de temperatura, curva  $K_{Ic}$ ,  $K_{Ia}$ , y factor de intensidad de tensión  $K_I$ , en la primera propagación y parada

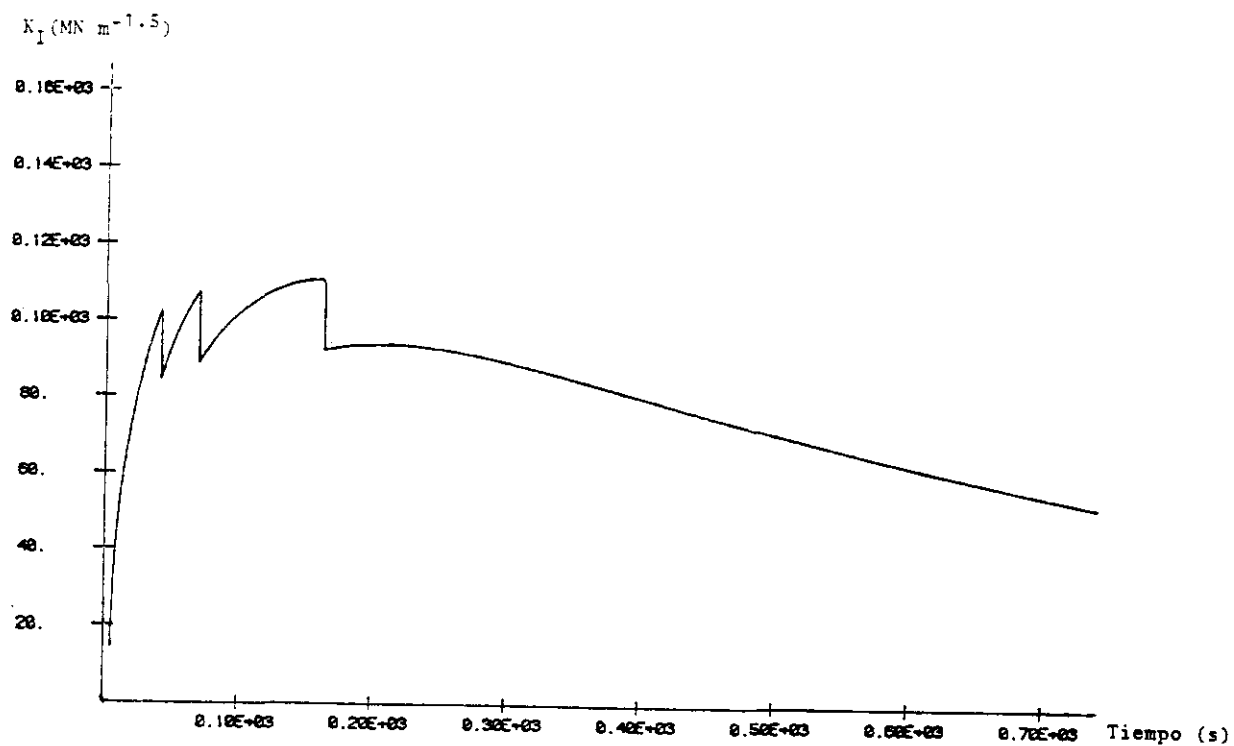


Fig. 3 - Curva  $K_I$  vs tiempo durante el choque térmico

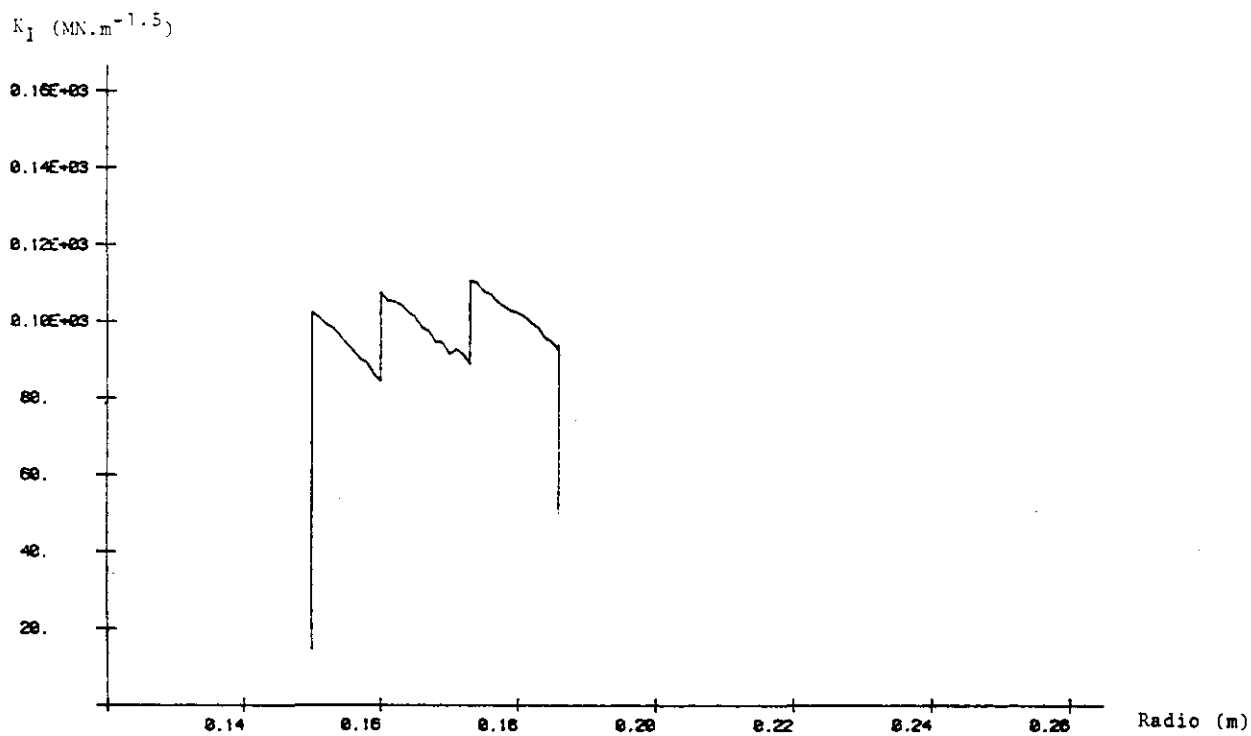


Fig 4 - Curva  $K_I$  vs posición del borde de grieta

## QUASI-STATIC ANALYSIS OF THE CRACK PROPAGATION PROCESS IN A NUCLEAR PRESSURE VESSEL

I. Miranda, J.M.Bastero, J.García de Jalón

Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa, San Sebastián.

*The structure of a nuclear vessel, damaged with an initial axial inner-surface crack, is analyzed under LOCA (Loss of Coolant Accident) conditions.*

*This accident, followed by an injection of a low temperature coolant, induces traction thermal stresses tending to open the crack. The structure behaviour and the fracture material properties tend to provide a mechanisms of crack arrest. In such conditions, a quasi-static analysis may be quite able to represent the structure behaviour.*

*This quasi-static analysis consists in the evaluation of the possibility that a critical state in the crack tip zone may occur during the thermal shock. If so, the crack extension is analyzed until the total fracture of the vessel or the crack arrest takes place.*

*The Finite Element Method is used in the analysis of the structure. Quadrilateral 8-nodes isoparametric element, with a collapsed side and 1/4-point are used at the crack tip. The crack extension is simulated with a refining of the crack tip mesh. A substructure technique is used in the numerical analysis.*

*The calculation of the stress intensity factor  $K_I$ , and the energy release rate,  $G$  is carried out. Material properties are considered temperature dependent. The fracture criteria is based on  $K_{IC}$ , fracture toughness for crack initial propagation, and  $K_{Ia}$  for crack arrest.*