

COMPARACION DE LOS ANALISIS CUASIESTATICO Y DINAMICO  
EN UN ACCIDENTE TIPO LOCA

J.M. Martínez-Esnaola  
Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa  
(CEIT), Apartado 1555, 20080 San Sebastián  
(España)

J.M. Bastero de Eleizalde  
Escuela Superior de Ingenieros Industriales,  
Universidad de Navarra, Urdaneta, 7, 20006 San Sebastián  
(España)

RESUMEN

*En esta comunicación se estudia el proceso de propagación de grietas durante un accidente LOCA en una vasija nuclear. La evolución de la grieta durante el transitorio térmico se determina a través de un análisis cuasiestático basado en los parámetros  $K_{Ic}$  y  $K_{Ia}$ . Debido a la ausencia de valores fiables para la tenacidad dinámica,  $K_{ID}$ , el análisis dinámico se efectúa simulando numéricamente cada uno de los procesos de propagación para diferentes velocidades de crecimiento. La comparación de los resultados obtenidos justifica la utilización del análisis cuasiestático por su notable sencillez.*

SUMMARY

*In this paper, the crack propagation process during a LOCA accident in a nuclear vessel is studied. Crack length evolution during the thermal transient is calculated using a quasistatic analysis based on the toughnesses  $K_{Ic}$  and  $K_{Ia}$ . Due to a lack of precise data on the  $K_{ID}$  property, the dynamic analysis is carried out by simulating numerically each propagation event for different crack velocities. Comparison of the results obtained shows that the quasistatic analysis can be suitable for this problem.*

## 1. INTRODUCCION

La vasija de un reactor nuclear de agua a presión puede quedar sometida, en determinadas circunstancias, a condiciones extremas de funcionamiento. Tal es el caso de los accidentes tipo LOCA (Loss of Coolant Accident), cuya evaluación constituye un problema de gran interés en la ingeniería nuclear.

Se postula un accidente en la conducción principal del refrigerante de la vasija y la consiguiente puesta en marcha del sistema de refrigeración de emergencia mediante la inyección de agua fría sobre la superficie interior de la pared. Este choque térmico genera un gradiente térmico positivo y variable con el tiempo. El nuevo campo de temperaturas induce tensiones térmicas de tracción en la zona interior de la pared y simultáneamente una reducción en la tenacidad del material. Este conjunto de factores puede dar lugar al crecimiento inestable de grietas preexistentes en la cara interna de la vasija. Además, esta posibilidad de propagación se acentúa para tiempos de operación elevados del reactor debido a la fragilización del material originada por la irradiación neutrónica.

El fenómeno del choque térmico en vasijas nucleares se analiza usualmente desde el punto de vista cuasiestático [1,2]. Los efectos dinámicos inherentes al crecimiento inestable de grietas (energía cinética y ondas de tensiones con origen en la punta de la grieta) pueden ser de gran importancia en muchos casos. En particular, cuando la grieta se propaga paralelamente a una superficie libre próxima, tienden a aumentar el valor del factor de intensidad de tensión [3]. Sin embargo, estos efectos son de menor relevancia en un problema con condiciones de contorno de desplazamientos fijados, al que puede asimilarse el choque térmico.

Por otra parte, la existencia de un gradiente térmico positivo y un nivel de irradiación decreciente a través de la pared provocan un aumento de la tenacidad del material a medida que la grieta se propaga. Estas características proporcionan un mecanismo que facilita la detención de la grieta, de manera que el crecimiento tiende a producirse con saltos de pequeña longitud. Estas consideraciones han llevado a suponer que los efectos dinámicos pueden ser despreciados en el análisis de un accidente LOCA [1,2].

En esta comunicación, se presenta una metodología para el tratamiento dinámico del LOCA mediante la utilización de técnicas numéricas desarrolladas por los autores: un elemento finito singular y dos integrales invariantes A y B. El problema fundamental para la realización de un análisis dinámico completo radica en la determinación de valores fiables de la tenacidad a fractura dinámica del material,  $K_{ID}$ , como función de la velocidad de propagación, de la temperatura y del nivel de irradiación. No obstante, como ejemplo orientativo, se presentan los resultados obtenidos al simular numéricamente diferentes propagaciones durante el transitorio térmico.

## 2. MÉTODOS NUMÉRICOS EN FRACTURA DINÁMICA.

Las técnicas de elementos finitos basadas en la Mecánica de la Fractura Dinámica pueden seguir dos líneas bien diferentes. La primera de ellas consiste en modelizar con precisión los campos singulares en las proximidades de la punta de la grieta mediante el empleo de elementos finitos especiales. La segunda se basa en la formulación de integrales independientes del contorno que evalúan la intensidad de los campos característicos en las proximidades de una grieta que se propaga.

En las referencias [4,5] los autores han presentado un elemento especial en el que el primer término de la solución teórica de un problema de fractura dinámica se incorpora al análisis mediante una formulación global-local. El campo de desplazamientos se interpola de la forma siguiente:

$$u_i = N_j d_i^j + K_I (F_{Ii} - N_j F_{Ii}^j) \quad (1)$$

donde  $d_i^j$  son los desplazamientos nodales,  $F_{Ii}$  son las funciones teóricas de fractura dinámica y  $F_{Ii}^j$  es el valor de  $F_{Ii}$  evaluada en el nudo  $j$ .

Las funciones de interpolación locales,  $N_j$ , son del tipo blended, de manera que la condición de desplazamiento de apertura nulo en el frente de la grieta puede imponerse mediante restricciones nodales.

Aunque la técnica de desplazamiento del mallado para simular el crecimiento de la grieta hace laboriosa la aproximación de velocidades y aceleraciones [5], esta formulación permite la obtención directa del factor de intensidad de tensión dinámica durante la resolución del sistema de ecuaciones resultante de la aplicación del MEF.

Además, esta formulación permite la inclusión de cargas térmicas [4], que se aproximan mediante la interpolación local y no afectan al término singular de la interpolación global.

El empleo de integrales independientes del contorno constituye la segunda vía de análisis en fractura dinámica. En este ámbito, las integrales invariantes A y B [4] se han desarrollado teniendo en cuenta la existencia de efectos de inercia, cargas térmicas y propiedades variables con la temperatura. Ambos parámetros se relacionan con el factor de intensidad de tensión dinámica de la forma siguiente

$$A = C(\dot{a}, \theta) K_I = \int_{\Gamma} [(T_i \hat{u}_i - \hat{T}_i u_i) dl - \rho \dot{a}^2 (u_{i,1} \hat{u}_i - \hat{u}_{i,1} u_i) dx_2] + \quad (2)$$

$$+ \int_{\Sigma} [\rho(-\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + 2\dot{a} \frac{\partial u_{i,1}}{\partial t} + \ddot{a} u_{i,1}) \hat{u}_i + \gamma \theta \hat{u}_{r,r}] ds$$

donde  $\hat{u}_i$  y  $\hat{T}_i$  son campos auxiliares de desplazamientos y tracciones convenientemente seleccionados,  $\theta$  es el incremento de temperatura sobre el estado de referencia y  $\gamma = \alpha (3\lambda + 2\mu)$ .

Por otra parte, la integral B tiene la siguiente expresión

$$B = \frac{1}{2\mu} A_I(\dot{a}, \theta) K_I^2 = \int_{\Gamma} [(\frac{1}{2} \rho \dot{a}^2 u_{i,1} u_{i,1} + W) dx_2 - T_i u_{i,1} dl] +$$

$$+ \int_{\Sigma} (\rho(\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - 2\dot{a} \frac{\partial u_{i,1}}{\partial t} - \ddot{a} u_{i,1}) u_{i,1} - [\frac{1}{2} \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} u_{i,i} u_{j,j} +$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \mu}{\partial \theta} (u_{i,j} u_{i,j} + u_{i,j} u_{j,i}) - \gamma u_{i,i} - \frac{\partial \gamma}{\partial \theta} \theta u_{i,i}] \theta, 1) ds \quad (3)$$

donde W es la energía de deformación termoelástica y

$$A_I(\dot{a}, \theta) = \frac{\alpha_d(1-\alpha_s^2)}{4\alpha_d\alpha_s - (1+\alpha_s^2)^2} \quad (4)$$

La utilización de estas integrales invariantes basadas en los campos de tensiones y desplazamientos en la lejanía permite reducir las exigencias de precisión para la singularidad de la punta de la grieta. En consecuencia, la discretización de la estructura se efectúa con elementos isoparamétricos standard y el crecimiento de la grieta se simula de forma aproximada mediante la conocida técnica de la relajación nodal.

La resolución de un problema real de fractura en el que se pretende determinar la historia de la propagación de una grieta requiere técnicas adicionales. En la teoría lineal, se acepta la existencia de un parámetro característico del material, la tenacidad a fractura dinámica  $K_{ID}$ , que gobierna el crecimiento de la grieta. Este parámetro se considera función de la velocidad de propagación y de la temperatura, de manera que durante la extensión de la grieta se verifica

$$K_I(t) = K_{ID}(\dot{a}, \theta) \quad (5)$$

La nueva incógnita del problema es así la velocidad de crecimiento, cuya determinación requiere el empleo de técnicas de predic-

ción adecuadas. Estas técnicas se basan en conocer, en cada instante de tiempo, no sólo el factor de intensidad de tensión sino también su tasa de variación, esto es,  $\partial K_I/\partial t$ . Con este objeto, se han desarrollado dos nuevas integrales invariantes, denominadas A y B [6] que se relacionan con  $\partial K_I/\partial t$  de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \dot{A} = C(\dot{a}, \theta) \frac{\partial K_I}{\partial t} &= \int_{\Gamma} \left[ \left( \frac{\partial T_i}{\partial t} \hat{u}_i - T_i \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} \right) dl - \rho \dot{a}^2 \right. \\ &\left. \left( \frac{\partial u_{i,1}}{\partial t} \hat{u}_i - u_{i,1} \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} \right) dx_2 \right] - \int_{\Sigma} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\sigma_{ij,j} - \rho \dot{a}^2 u_{i,1}) \hat{u}_i - \right. \\ &\left. - \frac{\partial}{\partial t} (\gamma \theta) \hat{u}_{r,r} \right] ds \end{aligned} \quad (6)$$

y

$$\begin{aligned} \dot{B} = \frac{1}{\mu} A_I(\dot{a}, \theta) K_I \frac{\partial K_I}{\partial t} &= \int_{\Gamma} \left[ (\rho \dot{a}^2 u_{i,1} \frac{\partial u_{i,1}}{\partial t} + \frac{\partial W}{\partial t}) dx_2 - \right. \\ &\left. - \frac{\partial}{\partial t} (T_i u_{i,1}) dl \right] + \int_{\Sigma} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ (\sigma_{ij,j} - \rho \dot{a}^2 u_{i,1}) u_{i,1} - \right. \\ &\left. - \left[ \frac{1}{2} \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} u_{i,i} u_{j,j} + \frac{1}{2} \frac{\partial \mu}{\partial \theta} (u_{i,j} u_{i,j} + u_{i,j} u_{j,i}) - \right. \right. \\ &\left. \left. - \gamma u_{i,i} - \frac{\partial \gamma}{\partial \theta} \theta u_{i,i} \right] \theta_{,1} \right\} ds \end{aligned} \quad (7)$$

Utilizando los parámetros  $K_I$  y  $\partial K_I/\partial t$  en el instante  $t_1$  puede estimarse el valor del factor de intensidad de tensión en el intervalo  $(t_1, t_2 = t_1 + \Delta t)$  a través de un desarrollo en serie de Taylor [6] y predecir la velocidad de propagación en ese intervalo mediante la ecuación (5).

Cuando el análisis de fractura se realiza utilizando el elemento singular, puede seguirse un procedimiento análogo en el estudio de predicción, con la particularidad de que, en este caso, la obtención de  $K_I$ ,  $\partial K_I/\partial t$  y  $\partial^2 K_I/\partial t^2$  es directa.

### 3. METODOLOGIA PARA EL ANALISIS DINAMICO DEL LOCA

El punto de partida para el análisis de fractura dinámica de un accidente LOCA es la resolución del problema de transmisión de calor y del transitorio térmico que sigue a la inyección brusca de refrigerante sobre la pared interior de la vasija. El problema térmico presenta simetría de revolución, por lo que, prescindiendo de efectos axiales, se transforma en un problema unidimensional.

Se postula la existencia de una grieta de longitud  $a_0$ . El análisis se inicia estudiando el problema de una grieta estacionaria sometida a cargas dinámicas, variables con el tiempo (originadas por el transitorio térmico), bien con el elemento especial o con las integrales A o B.

En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo que representa, de forma esquemática, el proceso de cálculo para el análisis dinámico del LOCA.

Cuando  $K_I$  se hace mayor que el mínimo de la curva  $K_{ID}(a, \theta)$  para la temperatura correspondiente a la punta de la grieta,  $K_{ID}(0, \theta_{CT})$ , la grieta comienza a propagarse. Se aplica entonces el estudio de predicción expuesto en el apartado anterior en base a  $K_I$ ,  $\partial K_I / \partial t$  (y  $\partial^2 K_I / \partial t^2$ ), obtenidos a partir de las integrales A o B, o bien directamente en caso de utilizar el elemento singular. El proceso de propagación continúa hasta la detención de la grieta cuando  $K_I < K_{ID}(0, \theta_{CT})$ .

Durante el proceso de propagación, se ha considerado que el campo de temperaturas es estacionario. Esta hipótesis es muy aproximada puesto que la extensión de la grieta acontece con una gran velocidad de propagación (del orden de 1000 m/s), por lo que puede considerarse prácticamente instantánea con relación al resto de los efectos sobre la estructura.

Para la nueva profundidad de la grieta, vuelve a considerarse el problema de grieta estacionaria sometida a las cargas variables con el tiempo originadas por el régimen transitorio de temperaturas, hasta que tiene lugar una nueva propagación, repitiéndose el proceso de cálculo descrito anteriormente.

### 4. COMPARACION DE LOS ANALISIS CUASISTATICO Y DINAMICO

Se considera una vasija con radio interior 120 mm y radio exterior 265 mm, similar a la analizada por Cheverton et al [1] en un modelo a escala de un accidente LOCA.

En primer lugar se ha efectuado el análisis del transitorio térmico, utilizando un modelo axisimétrico unidimensional de elementos finitos, y suponiendo condiciones de contorno de convección forzada con el

refrigerante interior ( $0.126 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $-20^\circ\text{C}$ ) y convección natural con aire a  $20^\circ\text{C}$  en la superficie exterior. La Figura 2 muestra la evolución del campo de temperaturas cada 15 s durante los primeros 150 s a partir del régimen permanente inicial. Puede observarse el rápido enfriamiento de la pared interna y la transmisión de calor por conducción a través del espesor hacia dicha pared.

El transitorio térmico suministra los datos de entrada para el análisis de fractura. En la Figura 3 se representa el mallado de elementos finitos utilizado en la discretización de la vasija con una grieta de longitud inicial  $a_0 = 20 \text{ mm}$ . Las propiedades del material se consideran dependientes de la temperatura a través del módulo de Young:

$$E = 2.14 \times 10^{11} (1 - 5.93 \times 10^{-4} \theta) \text{ N/m}^2$$

$$\rho = 7865 \text{ Kg/m}^3, \quad \nu = 0.3, \quad \alpha = 1.25 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

En primer lugar, se ha resuelto el problema cuasiestático basado en las tenacidades  $K_{Ic}$  de iniciación y  $K_{Ia}$  de detención, variables en la pared de la vasija como consecuencia de su dependencia respecto a la temperatura y la irradiación neutrónica. Cuando  $K_I$  alcanza el valor crítico  $K_{Ic}$  correspondiente a la temperatura y posición de la punta de la grieta, tiene lugar la propagación, que se considera instantánea como se ha señalado en el apartado anterior. La detención se produce cuando  $K_I \leq K_{Ia}$ .

La evolución de la profundidad de la grieta se muestra en la Figura 4. Pueden observarse cuatro situaciones de propagación-detención en los instantes de tiempo  $t = 24, 38, 69$  y  $150 \text{ s}$  respectivamente, con una longitud final  $a_f = 71 \text{ mm}$ . La Figura 5 representa la evolución del factor de intensidad de tensión durante el accidente. Se observa que la extensión de la grieta produce una relajación parcial de las tensiones térmicas, de manera que  $K_I$  disminuye durante cada propagación.

El análisis dinámico del problema requiere conocer la tenacidad a fractura dinámica,  $K_{ID}$ , como función de la velocidad de propagación y de la temperatura. La ausencia de datos fiables y precisos sobre este parámetro imposibilita un estudio completo. No obstante, con objeto de cuantificar la influencia de los efectos dinámicos durante un choque térmico, se ha analizado dinámicamente cada uno de los procesos de propagación-detención resultantes del estudio cuasiestático.

En cada uno de los casos, se supone que el crecimiento de la grieta se inicia bajo condiciones cuasiestáticas y se consideran distintas velocidades de crecimiento. La Figura 6 muestra la evolución del factor de intensidad de tensión durante la primera propagación en condiciones cuasiestáticas y para velocidades  $\dot{a}/C_s = 0.2, 0.3$  y  $0.4$ , donde  $C_s = 3248 \text{ m/s}$  es la velocidad de las ondas transversales a temperatura  $\theta = 0$ . Análogamente, en las Figuras 7 - 9 se representa la variación de  $K_I$  durante la 2ª, 3ª y 4ª propagación respectivamente.

A la vista de estas figuras, se observa que el análisis cuasiestático predice valores más elevados del factor de intensidad de tensión en todos los casos, para los intervalos de crecimiento considerados. Esta característica está asociada a los saltos de grieta de pequeña longitud, como consecuencia de que la distribución de temperaturas y el gradiente positivo en la tenacidad del material proporcionan un mecanismo que favorece la detención de las grietas.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología para el análisis de fractura dinámica de un accidente tipo LOCA, basado en técnicas numéricas originales desarrolladas por los autores. Ante la ausencia de datos fiables sobre la tenacidad a fractura dinámica,  $K_{ID}(\dot{a}, \theta)$ , se ha efectuado una comparación parcial entre los estudios cuasiestático y dinámico. Para ello, se han combinado ambos tipos de análisis a través de la simulación dinámica de los crecimientos de grieta calculados en el planteamiento cuasiestático.

Los resultados obtenidos indican que bajo las condiciones características de un LOCA, con condiciones de contorno de desplazamiento y saltos de grieta de pequeña longitud, el análisis cuasiestático puede considerarse conservativo, por lo que su utilización parece recomendable dada la notable simplificación en el cálculo respecto al análisis dinámico.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a IBERDUERO y OCIDE por la financiación del presente trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] R.D. Cheverton, P.C. Gehlen, G.T. Hahn, S.K. Iskander "Application of crack arrest theory to a thermal shock", Crack Arrest Methodology and Applications, Ed. G.T. Hahn, M.F. Kanninen, ASTM STP 711, 392-421, 1980.
- [2] R.D. Cheverton, D.A. Canonico, S.K. Iskander, S.E. Bolt, P.P. Holz, R.K. Nanstad, W.J. Stelzman, "Fracture data deduced from thermal shock and related experiments with LWR pressure vessel material", J. Press. Vess. Tech., 105, 102-110, 1983.
- [3] M.F. Kanninen, "Whiter dynamic fracture mechanics?", Numerical Methods in Fracture Mechanics, Ed. D.R.J. Owen, A.R. Luxmoore, 433-456, 1980.
- [4] J.M. Martínez-Esnaola, J.M. Bastero, "Elemento finito especial e in-



tegrales invariantes A y B para la fractura dinámica con cargas térmicas", Anales de Mecánica de la Fractura 3, 77-86, 1986.

- [5] J.M. Martínez-Esnaola, J.M. Bastero, I. Miranda, "On the use of global-local functions of blended type for computer simulation of dynamic crack propagation with thermal loading. Generation and prediction studies", a publicar en Engineering Fracture Mechanics, 1987.
- [6] J.M. Martínez-Esnaola, J.M. Bastero, "Aplicación de la integral invariante A al estudio de propagación dinámica de grietas", Anales de Mecánica de la Fractura 3, 87-94, 1986.

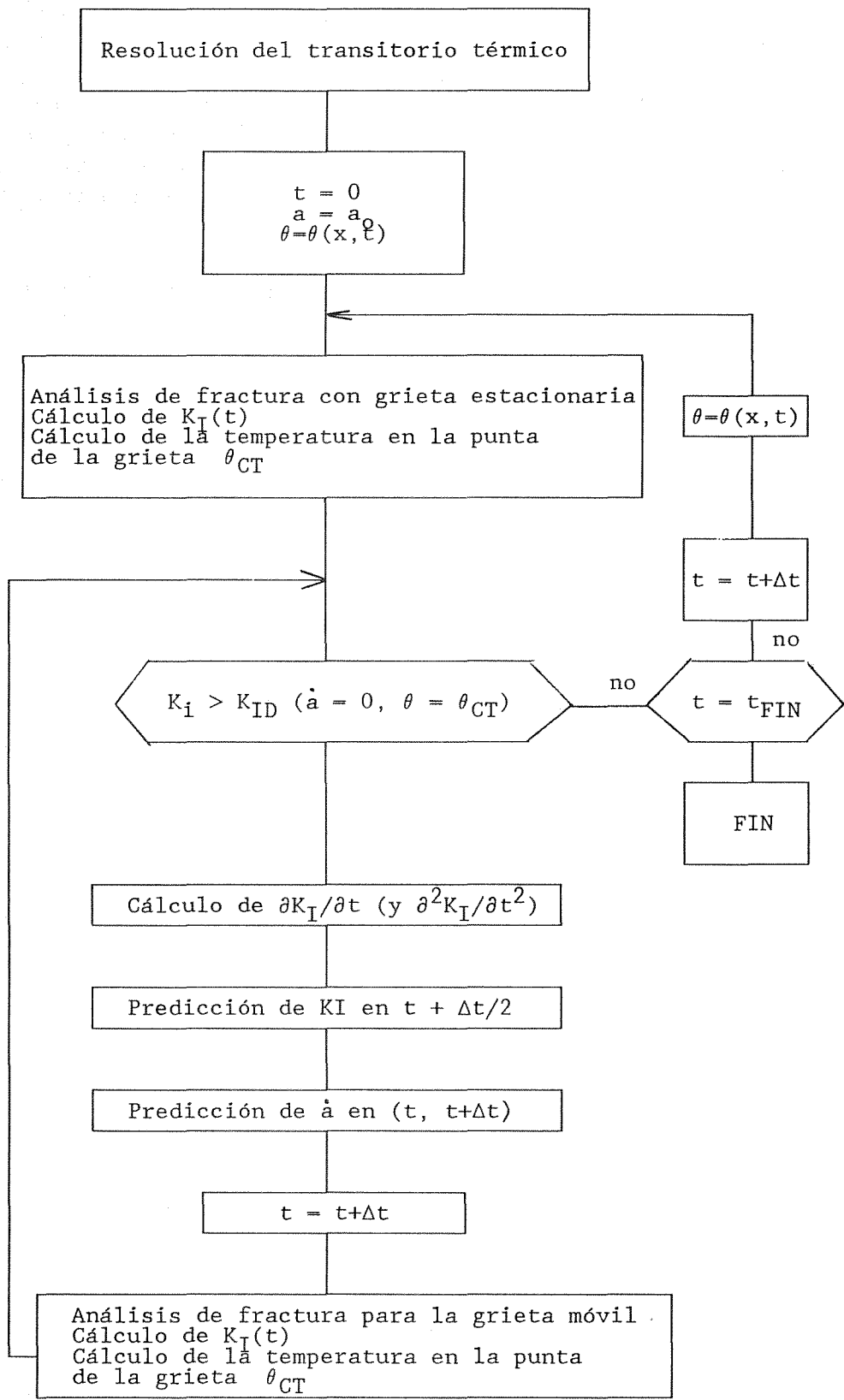


Figura 1. Diagrama de flujo para el análisis dinámico del LOCA.

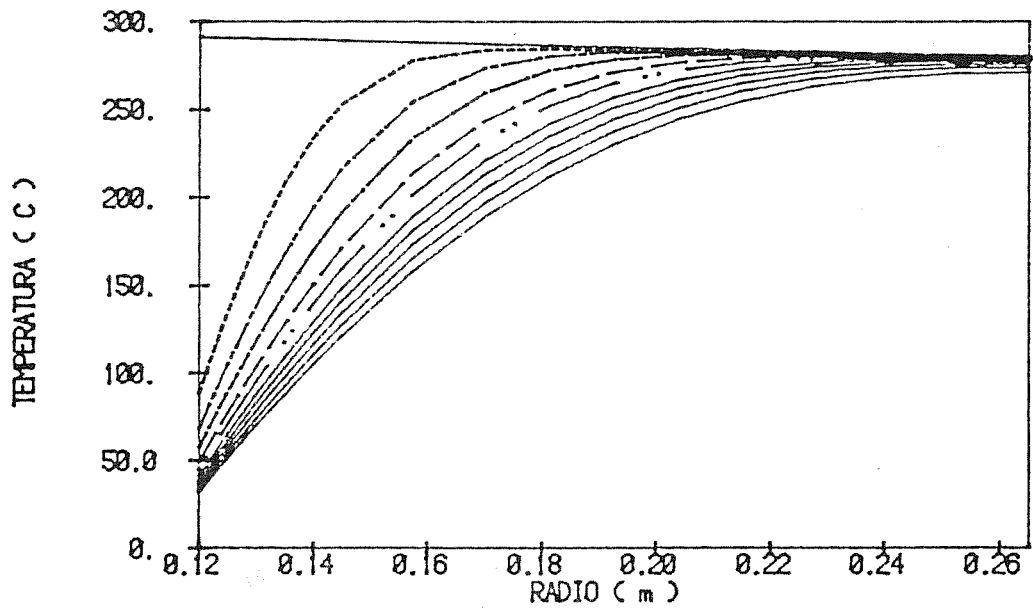


Fig. 2 Evolución de las temperaturas durante el transitorio.

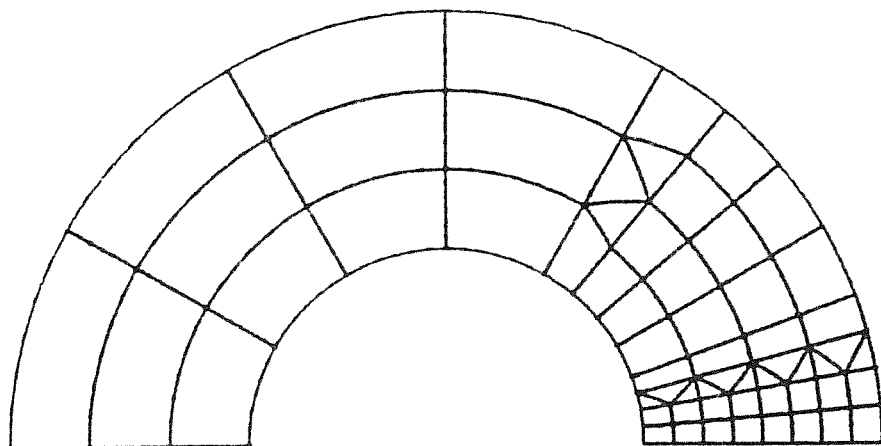


Fig. 3 Mallado de elementos finitos

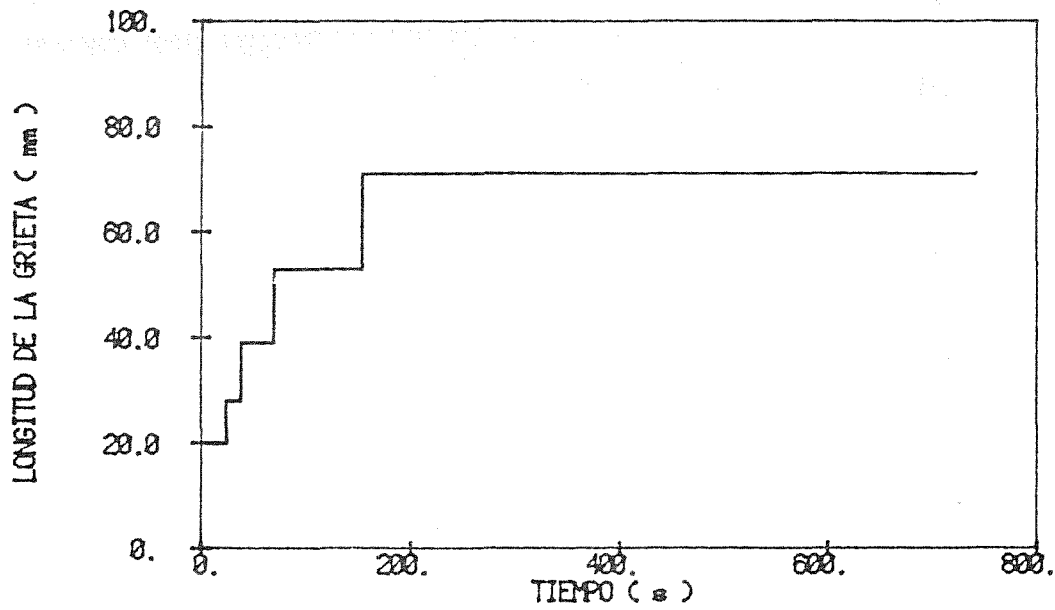


Fig. 4 Evolución de la longitud de la grieta

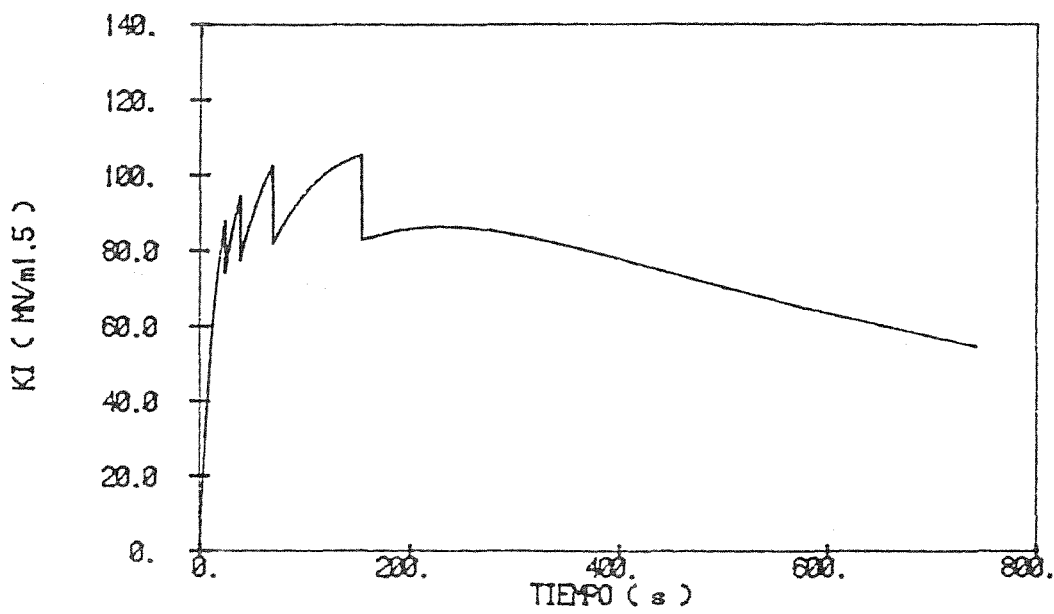


Fig. 5 Variación del factor de intensidad de tensión

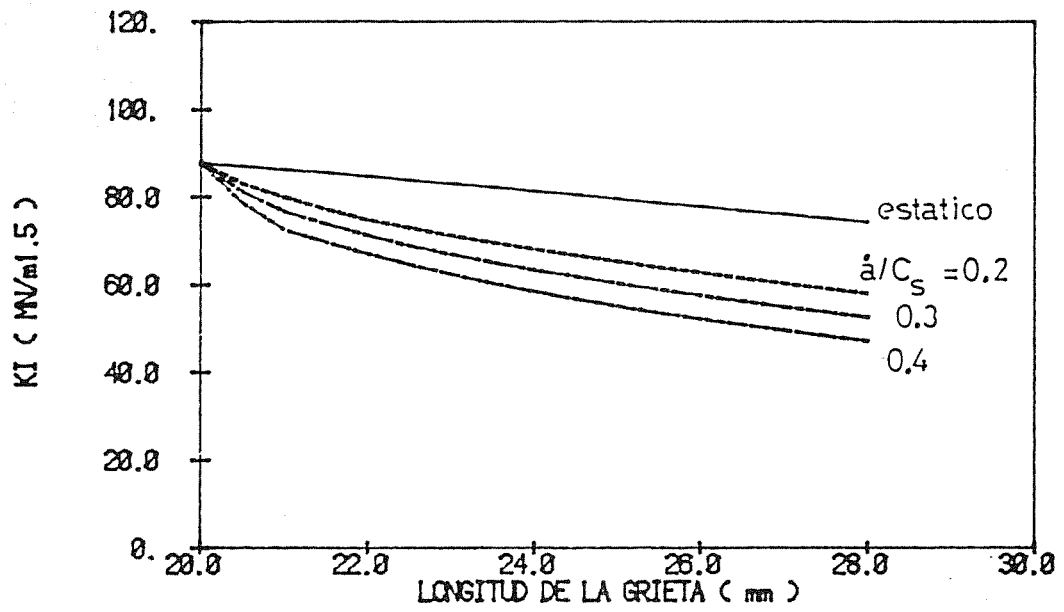


Fig. 6 Comparación cuasiestática-dinámica (1ª propagación)

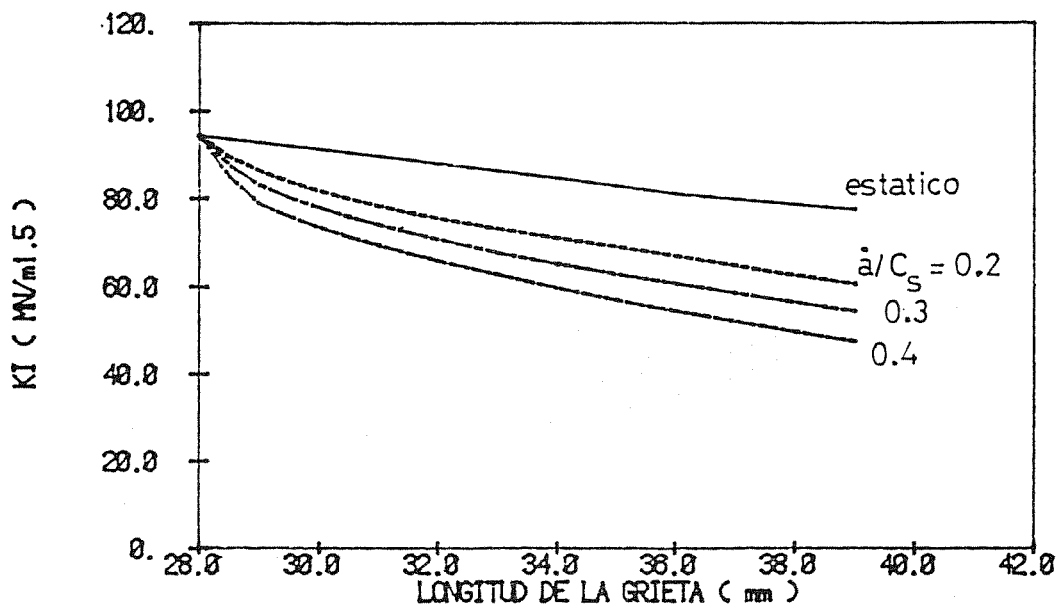


Fig. 7 Comparación cuasiestática-dinámica (2ª propagación)

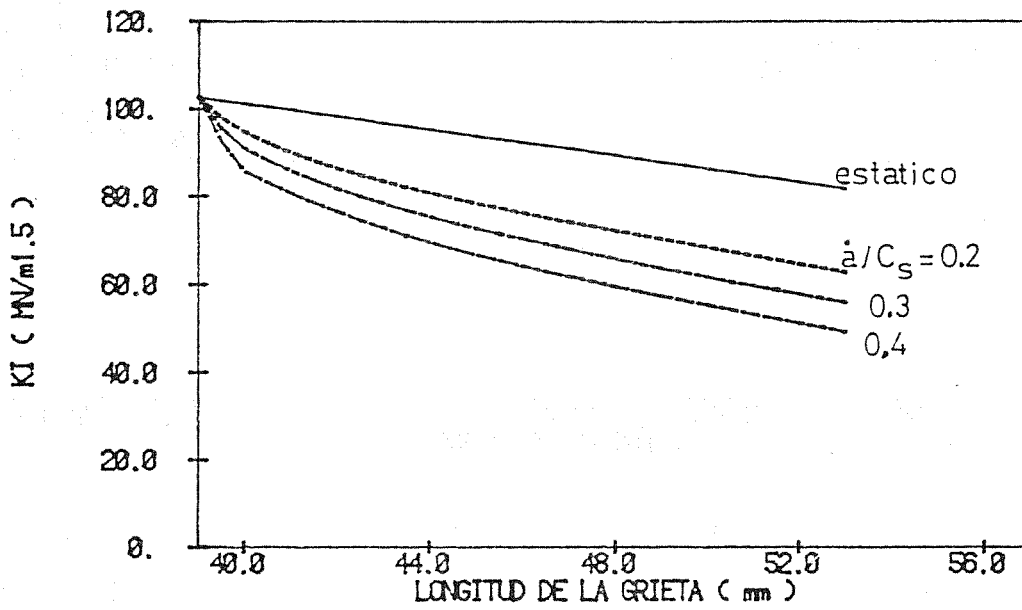


Fig. 8 Comparación cuasiestática-dinámica (3ª propagación)

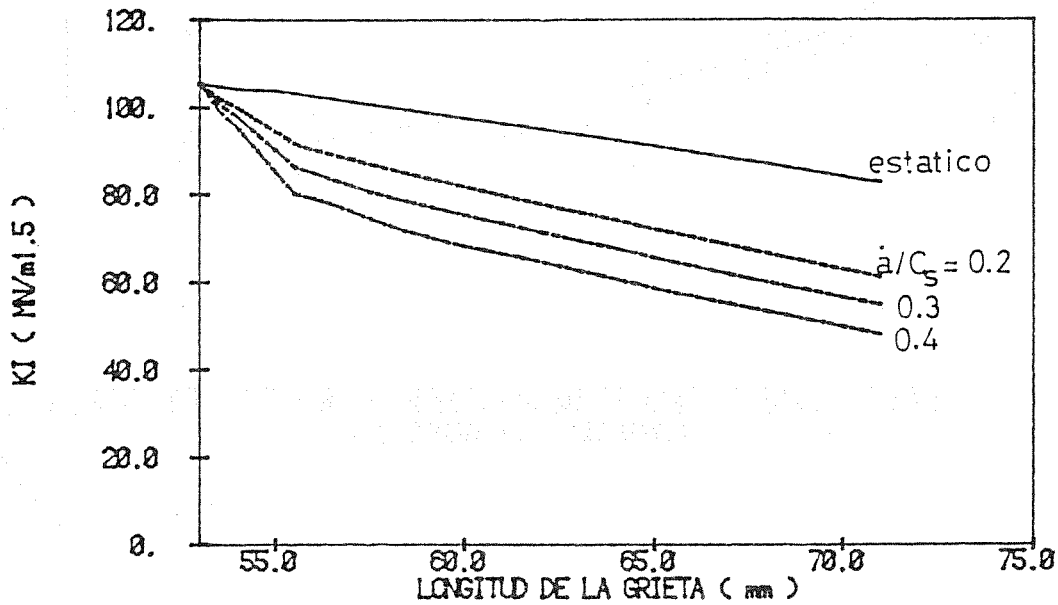


Fig. 9 Comparación cuasiestática-dinámica (4ª propagación)