

TAMAÑO CRITICO INICIAL DE GRIETA EN COMPONENTES NUCLEARES

JUAN BROS, FERNANDO MILLAN Y JOSE CARRERO

TECNATOM, S.A.

KM 19, C.N. I MADRID-IRUN. SAN SEBASTIAN DE LOS REYES (MADRID)

Para obviar los retrasos que se producirían en la puesta en marcha de una planta nuclear al realizarse la evaluación por mecánica de fractura de una posible indicación de defecto detectada en la inspección en servicio, Tecnatom ha desarrollado una metodología de cálculo encaminada a reducir al mínimo el tiempo de respuesta entre la detección de la indicación de defecto y la decisión sobre la aceptabilidad o no del mismo. Esta metodología se desarrolla alrededor del definido por Tecnatom como "tamaño crítico inicial de grieta".

In order to reduce the time involved in the fracture mechanic analysis of detected flaws during in service inspection, it is necessary to perform the analytical evaluation before the flaw detection. How? Determining for each critical location and all areas subjected to inspection the "Initial Critical Crack Size" defined as the flaw size, that after the evaluation time period will be equal to the fracture mechanic critical crack size.

1.- INTRODUCCION

La vigilancia periódica de la integridad estructural de los componentes y/o tuberías de una planta de producción eléctrica con combustible nuclear, se encuentra regulada en nuestro país, al carecer de normativa propia, por la del país suministrador de la ingeniería y diseño de la misma. En la actualidad, casi todas las plantas en operación en España son de origen Estadounidense.

La normativa actualmente en vigor es la establece el Código ASME y en concreto la Sección XI del mismo en lo referente a inspección en servicio.

Dentro de esta Sección, se establecen, en una serie de artículos, los requisitos de inspección de los distintos componentes, tuberías y accesorios sometidos a examen y seguimiento periódico. Asimismo se establecen unos estándares de aceptación para indicaciones de defecto en lo que al tamaño de los máximos defectos que pueden admitirse sin violar la integridad estructural de dichos componentes hace referencia. En concreto y en el caso de componentes de clase nuclear I, los estándares de aceptación los determina el artículo IWB-3500 de ASME XI.

Si estos estándares son excedidos, es obligada en principio, la reparación por eliminación del defecto o la sustitución de la parte afectada del componente previamente a la puesta de nuevo en funcionamiento de la planta, con el consiguiente perjuicio económico que esto conlleva al dilatarse en el tiempo los trabajos programados para la parada para recarga.

No obstante el Código ASME permite la reanudación de la puesta en servicio de la planta sin la reparación del defecto siempre y cuando, de acuerdo con el artículo IWB-3600, un estudio analítico, basado en conceptos de mecánicas de fractura, demuestre que las dimensiones del defecto en un período de tiempo dado no van a experimentar un crecimiento tal que las haga superar las de la grieta definida como crítica, dependiendo, dicho valor crítico de la grieta, de las propiedades mecánicas del material y del estado tensional presente en la estructura.

Son por tanto obvias las ventajas de la aplicación de esta metodología, ya que permite una ampliación de los estándares de aceptación que nos pueden llevar a obviar la reparación del componente o posponer ésta al momento más idóneo, siempre dentro del período de evaluación que haya sido fijado.

Todo lo anterior se presenta muy esquematizado en la figura 1.

Sin embargo, el análisis de mecánica de fractura, es un análisis relativamente complejo, debido fundamentalmente al elevado número de transitorios a analizar, con la consiguiente generación de gran cantidad de datos que hay que manejar y procesar. Todo esto puede suponer, para un área de geometría algo compleja, la inviabilidad del estudio analítico en un corto período de tiempo, que es el requerido para dar una respuesta eficaz al problema que se plantea.

Para evitar estos retrasos y los consiguientes perjuicios económicos es preciso, de alguna forma, adelantarse a la propia aparición de la grieta.

Para ello y conociendo cuales son las zonas críticas en el componente en cuestión, se ha llevado a cabo un estudio paramétrico consistente, a grandes rasgos, en determinar los distintos tamaños críticos de grieta para las secciones más representativas de esas zonas críticas y determinar, a partir de los mismos,

las dimensiones de las grietas que evolucionarían hasta los distintos tamaños críticos de grieta en determinados períodos de tiempo. El tamaño de esas grietas que concluirían en el tamaño crítico de grieta es el definido por Tecnatom como tamaño crítico inicial de grieta.

Determinados estos tamaños críticos iniciales de grieta se puede decidir, con un pequeño grado de incertidumbre, a cerca de la aceptabilidad o no de un defecto por comparación de las dimensiones reales del mismo con las del defecto crítico inicial de referencia.

El objetivo de esta ponencia es el de ofrecer la metodología desarrollada por Tecnatom para la determinación del tamaño crítico inicial de grieta.

2.- PLANTEAMIENTO DE LAS BASES DE PARTIDA DEL PROBLEMA

De acuerdo con lo indicado en el punto anterior se han fijado las zonas críticas del componente nuclear, que a partir de ahora centraremos en una vasija de reactor de agua a presión típica de tres lazos tipo Westinghouse.

Estas zonas críticas son básicamente aquellas en las que se presentan discontinuidades estructurales por cambio de espesor, etc, a parte de la zona de la vasija que rodea al núcleo, cuya criticidad obedece al efecto degradante que tiene el bombardeo neutrónico sobre las propiedades mecánicas del material.

De estas zonas y para ilustrar esta presentación se han seleccionado las dos zonas para las que Tecnatom ha desarrollado recientemente este estudio paramétrico. Las zonas, sombreadas en la figura 2 son la unión virola superior de vasija-bridada de cierre y tobera de salida o de rama caliente.

De estas dos zonas se han escogido a su vez, aquellas secciones tipo o críticas de cada una de ellas. Así en la unión vasija-bridada se ha escogido la sección mas tensionada, que se corresponde con el cambio de espesor, y en la tobera de salida se han elegido las secciones representativas de la unión tobera a vasija, corner y unión tobera anillo de transición.

Finalmente y en cada una de estas secciones se han supuesto defectos superficiales y subsuperficiales así como, para cada tipo, defectos de orientación circunferencial y longitudinal.

3.- DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA DE CALCULO

Para el estudio de mecánica de fractura a realizar, es necesario disponer del estado de sollicitaciones de la estructura. Para ello es necesario realizar un análisis térmico-tensional, análisis que ha sido el punto de partida del trabajo que ahora presentamos.

3.1 Análisis térmico-tensional

3.1.1. Análisis térmico

Para conocer la distribución de temperaturas en las secciones elegidas y en el tiempo, se hace necesario resolver el correspondiente problema de transmisión de calor analizando todo y cada uno de los transitorios de operación rela-

cionados en las especificaciones técnicas del circuito primario.

El análisis se ha realizado utilizándose la técnica de los elementos finitos mostrándose en las figuras 3 y 4 la modelización de las zonas seleccionadas. Puede observarse que se han utilizado elementos triangulares y cuadrangulares isoparamétricos con tres nodos por lado y que permiten interpolar, con buena precisión, grandes gradientes térmicos. Obviamente los elementos son mucho más estrechos en la parte de la zona más en contacto con el fluido teniendo en cuenta en una parte, la presencia del plaquedo de acero inoxidable existente y de diferente conductividad térmica a la del acero al carbono constitutivo de la vasija. Para la modelización de la tobera se ha considerado la zona de la vasija con radio de valor doble del valor real, para simular el efecto de la no aximetría de dicha zona. Esta consideración es práctica habitual en análisis similares para evitar el enorme costo y complejidad de un análisis tridimensional.

El mecanismo de transmisión de calor utilizado en el caso de la zona de brida-vasija ha sido el de convección natural mientras que en el caso de la tobera se han distinguido tres tipos: Convección forzada en la zona de contacto con el fluido de la rama caliente, convección natural en la zona de contacto con el fluido de la vasija y el mecanismo intermedio para la zona de contacto con el fluido existente a través de la holgura entre el barrilete y la tobera.

En la figura 5 se puede observar el gráfico de variación de temperatura obtenido para un determinado transitorio.

3.1.2.- Análisis tensional

Las tensiones a que se encuentra sometida la vasija del reactor son fundamentalmente de origen térmico y mecánico.

Las de origen térmico proceden de las dilataciones y contracciones que experimenta la vasija al variar las temperaturas a lo largo de los diferentes transitorios, variaciones consideradas en el punto anterior.

Las tensiones de origen mecánico proceden fundamentalmente de las variaciones de presión que experimenta la vasija desde la presión de operación normal a las derivadas por condiciones transitorias.

La combinación de estos dos tipos de tensiones corresponde al estado tensional presente en la estructura en condiciones de operación normal y en situaciones anómalas por efectos de los transitorios.

Para la obtención de estas tensiones se ha realizado una discretización semejante a la utilizada en el análisis térmico con el fin de evitar complejidades a la hora de utilizar los valores de temperaturas en los nodos determinados anteriormente como datos de entrada del cálculo de dichas tensiones.

Hay que hacer constar finalmente que el plaquedo de recubrimiento de la pared interna de la vasija no ha sido considerado como elemento resistente.

La figura 6 ofrece la distribución de tensión para un determinado transitorio y zona analizada.

3.2 Análisis de mecánica de fractura

Realizado el análisis térmico-tensional debe procederse al tratamiento de los resultados obtenidos para obtener el tamaño crítico de grieta y obtener a su vez, de él, el tamaño crítico inicial de grieta para un periodo de evaluación determinado.

Como en todo análisis de mecánica de fractura intervienen en el trabajo que nos ocupa los conceptos habituales como son: Factor de intensidad de tensiones, Factores críticos de tenacidad a la fractura de crecimiento y grietas incidiendo, en alguno de ellos, otros aspectos como el del efecto de la irradiación en la tenacidad del material.

3.2.1.- Determinación del factor de intensidad de tensiones

El factor de intensidad de tensiones, característica definitiva del estado tensional en la punta de una grieta, como es bien sabido depende de la geometría estructural, de las tensiones aplicadas y del tamaño del defecto.

Para su determinación se han tenido en cuenta las expresiones recogidas en los trabajos de Buchalet and Bamford que permiten el cálculo del factor de intensidad de tensiones, a partir de distribuciones de tensiones polinómicas de hasta tercer grado, para grietas superficiales continuas. Estas expresiones se han obtenido a partir de modelos de elementos finitos bidimensionales y permiten un enorme ahorro de tiempo al no ser necesario estar efectuando para cada incremento del tamaño de grieta un nuevo análisis por elementos finitos de la estructura. Los factores de intensidad de tensiones son corregidos de forma que sean así mismo válidos para grietas no continuas.

$$K_I = \sqrt{\pi} a \left(A_0 F_1 + \frac{2a}{\pi} A_1 F_2 + \frac{a^2}{2} A_2 F_3 + \frac{4a^3}{3\pi} A_3 F_4 \right) * R^{(00)}$$

donde a: Profundidad de la grieta

$A_0 A_1 A_2 A_3$: Coeficientes del ajuste polinómico de las tensiones

$F_1 F_2 F_3 F_4$: Factores de magnificación que dependen de la geometría considerada

$R^{(00)}$: Factor de corrección elíptico.

Para grietas superficiales, para las que las anteriores expresiones no son aplicables, se ha utilizado el procedimiento recomendado en el Apéndice A ASME XI, en el que se parte de un proceso de linealización conservativo de tensiones.

Las expresiones mencionadas nos permiten, pues, conocer el valor del factor de intensidad de tensiones en función de la profundidad de la grieta para cada uno de los estados tensionales a los que se someten el componente como resultado de la ocurrencia de los transitorios considerados.

3.2.2.- Determinación de los factores críticos de tenacidad

El factor de intensidad de tensiones K_I , debe ser comparado en todo momento con los valores de K_{IC} (factor de intensidad de tensiones crítico aso-

ciado al fenómeno de iniciación del crecimiento de grieta) y de K_{IA} (factor de intensidad de tensiones crítico asociado al fenómeno de detención del crecimiento de grieta).

Cuando K_I supere, para unas condiciones dadas de profundidad de grieta, estado tensional, temperatura e irradiación, el valor de K_{IC} , el crecimiento de la grieta será inestable tendiendo a la rotura rápida del componente salvo el valor de K_I , en un instante superior a ese crecimiento se haga igual o menor que K_{IA} y entonces la grieta detenga su crecimiento.

Las expresiones de K_{IC} y K_{IA} dependen de la temperatura en el extremo de la grieta y de la temperatura de referencia de ductilidad nula (RT_{NDT}).

La RT_{NDT} es quien contempla la irradiación recibida por el material puesto que el bombardeo neutrónico del componente se refleja en un desplazamiento de dicha temperatura de referencia. Estos desplazamientos pueden ser cuantificados como resultado de los programas de vigilancia de materiales de vasija o por estimación de la Guía Reguladora 1.99.

3.2.3.- Determinación del tamaño crítico

Para cada transitorio el tamaño crítico para una localización y orientación de defecto dada se obtiene mediante la intersección de los perfiles de la tenacidad a la fractura en la detención o curva de K_{IA} y el perfil del factor de intensidad de tensiones aplicadas.

Este proceso debe ser repetido para todos los transitorios especificados. El más pequeño de los valores de tamaño crítico calculado, una vez que todos los transitorios han sido considerados nos da el tamaño crítico mínimo de defecto para operación normal o valor a_c .

La determinación de un tamaño crítico mínimo de defecto para la iniciación de una propagación sin detención de una grieta en condiciones de emergencia o accidente se obtiene mediante la intersección de la curva K_{IC} para las condiciones de accidente y de la variación del factor K_I a lo largo del espesor. Este proceso se repite para cada uno de los instantes t_i en que se ha subdividido el transitorio de emergencia o accidente postulado y se van obteniendo los distintos valores de a_i (profundidad en la iniciación del crecimiento inestable). A su vez el corte de la curva K_I con la curva de K_{IA} nos darán las profundidades críticas de grieta en el momento de la detención o la paralización de la propagación de grieta (a_a). Este procedimiento se ilustra en la figura 7.

El mas pequeño de los valores de a_i para el cual la profundidad en la detención a_a supera 75% del espesor despues que todos los accidentes postulados han sido considerados representan las dimensiones de defectos críticos mínimas para la iniciación en condiciones de accidente.

3.2.4.- Determinación del tamaño crítico inicial

Definimos como tamaño crítico inicial del defecto para un período determinado de tiempo las dimensiones iniciales de defecto que después del período de crecimiento fijado se convertirán en las dimensiones del defecto de tamaño crítico.

Para determinar estos tamaños críticos iniciales se parte del menor de los tamaños críticos obtenidos en el punto 3.2.3 afectados por el coeficiente de seguridad (0,1 para condiciones normales y 0,5 en condiciones de emergencia y/o accidente) de acuerdo con IWB-3600 de ASME XI siempre y cuando ese valor sea mayor que el tamaño de defecto correspondiente a la intersección de las curvas K_I y K_{IA} y K_{IC} , afectados estos dos últimos de los coeficientes de seguridad establecidos en IWB-3600. Si fuera menor, entonces se escogería como tamaño crítico el menor de los tamaños de defecto correspondiente a las intersecciones aquí señaladas.

A continuación se van considerando uno a uno todos los transitorios de operación normal especificados, obteniéndose en cada uno de ellos la mayor fluctuación del factor de intensidad de tensiones, ΔK_I , con la cual se entra en la curva de crecimiento en fatiga propuesta en el Ap. A de ASME XI y se obtiene la velocidad de crecimiento en profundidad en función del número de ciclos de ese transitorio, es decir, el valor de da/dN .

A partir de ese valor y teniendo en cuenta la frecuencia con que se postulan los distintos transitorios de diseño se obtiene el incremento de profundidad debido al transitorio analizado.

Sustrayendo del valor del tamaño crítico corregido, el valor de incremento de profundidad hallado, obtendremos las dimensiones del defecto actualizadas. Una vez que hayan sido considerados todos los transitorios, obtendremos el valor de tamaño crítico inicial antes definido.

Un esquema de este proceso se da en la figura 8

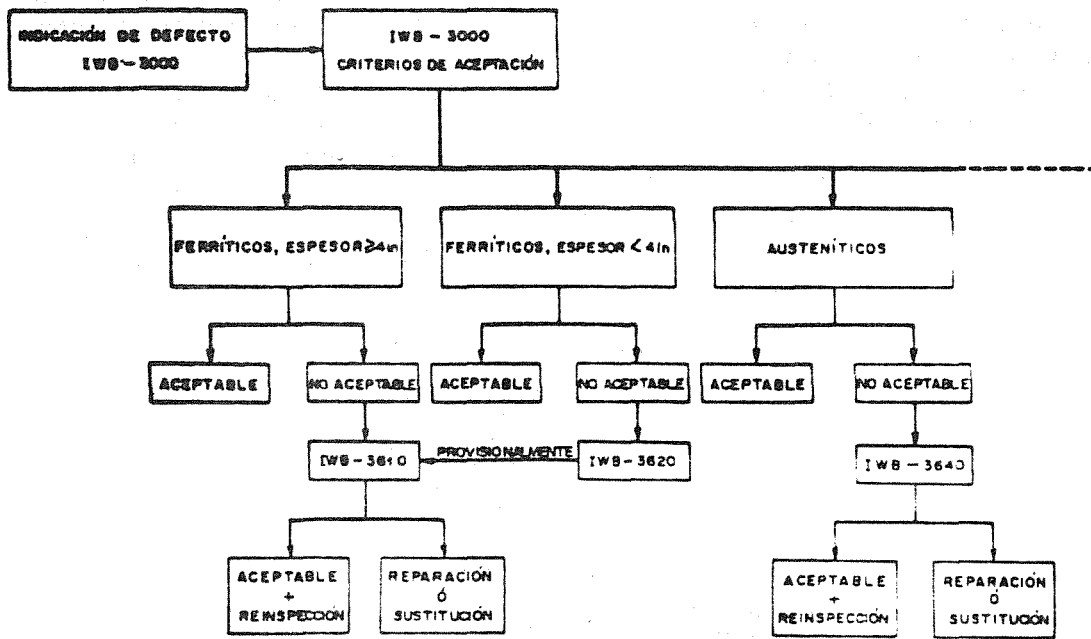
4.- RESULTADOS

Todo el proceso de cálculo ha sido automatizado mediante el programa de ordenador EVA, desarrollado por Tecnatom incorporando, este, al Ap. A de ASME XI los criterios posteriores de mecánica de fractura que se describen en el punto 3.2.

Los resultados obtenidos han sido condensados en una serie de mapas de decisión en las cuales se representa en abcisas el factor de forma o relación $a/1$, variando desde 0,0 a 0,5 y en ordenadas los valores máximos admisibles de la relación a/t (relación profundidad/espesor). En estos mapas de decisión quedan recogidos los valores máximos que se indican en IWB-3500 del código ASME (Sección XI) y los máximos admisibles (tamaños críticos iniciales) para un período de evaluación de 0,15 y 30 años, equivalente a plena potencia, obtenidos con este estudio analítico.

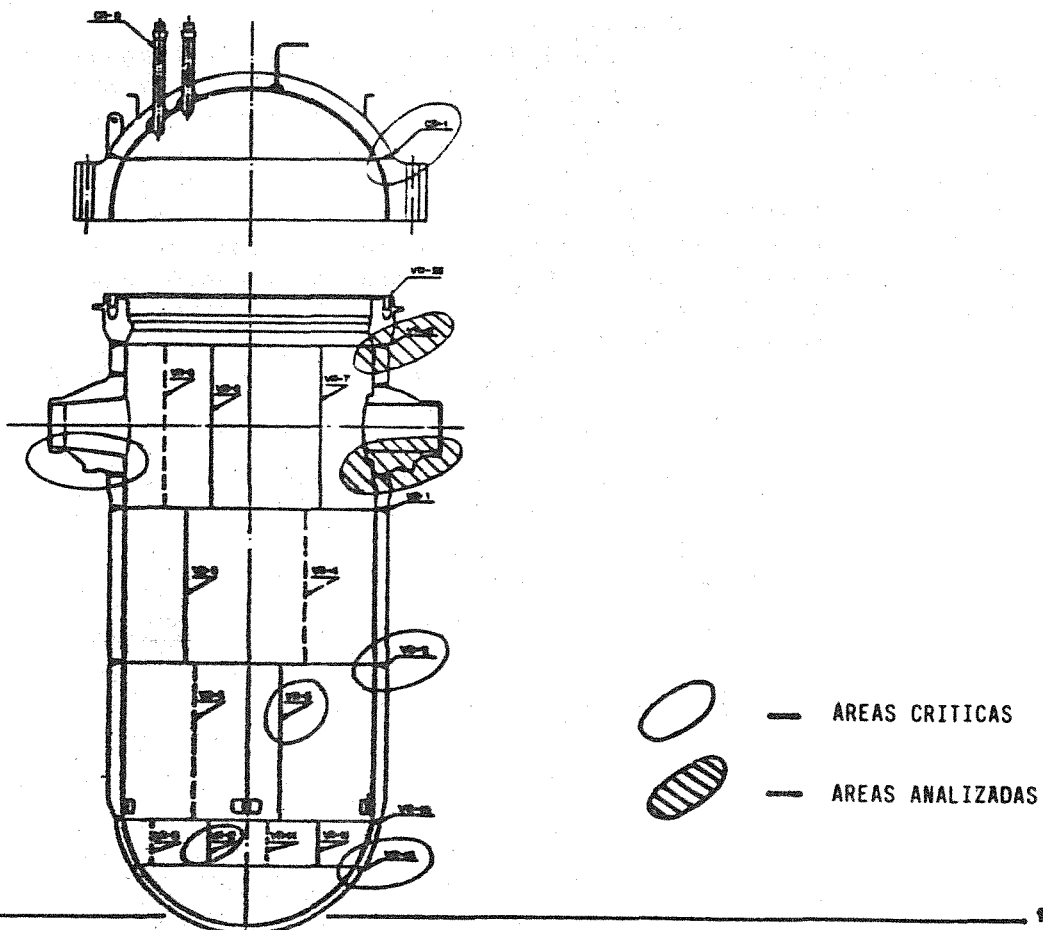
Una muestra de estos mapas de decisión se presenta en la figura 9.

EVALUACIÓN DE INDICACIONES (IWB-3000)



tecnaTom, s.a.

FIGURA 1



tecnaTom, s.a.

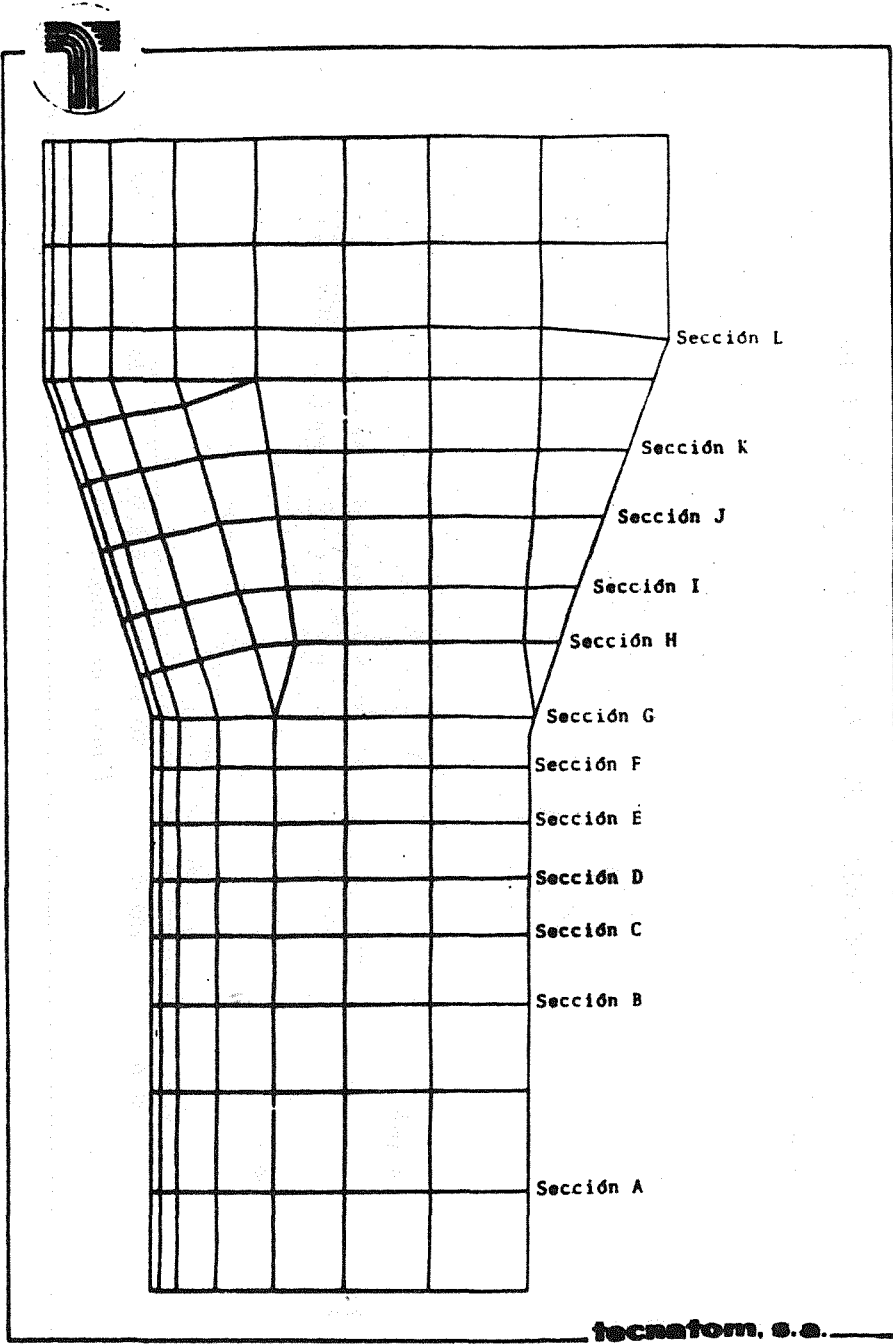


FIGURA 3

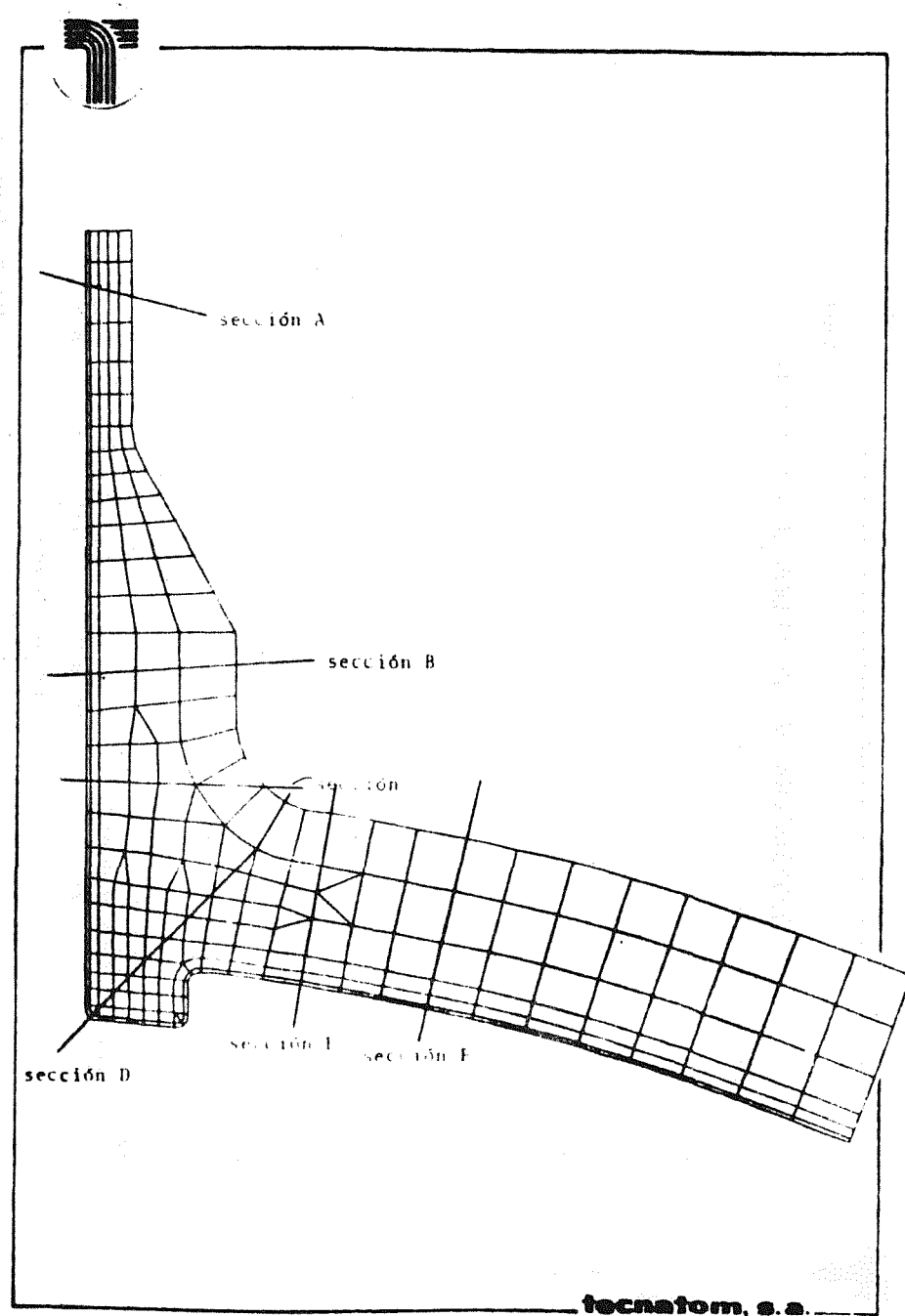


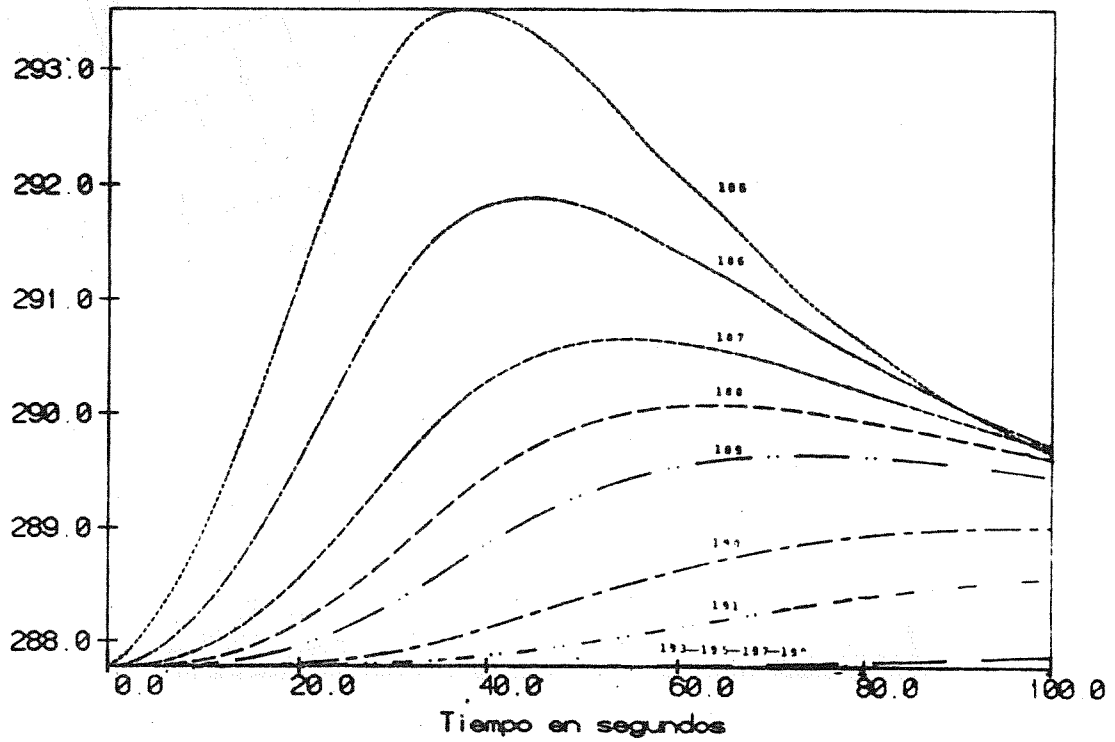
FIGURA 4



TRANSITORIO 9

TEMPERATURA DE LOS NUDOS DE LA SECCION G

Temperatura en grados centigrados



tecnatom, s.a.

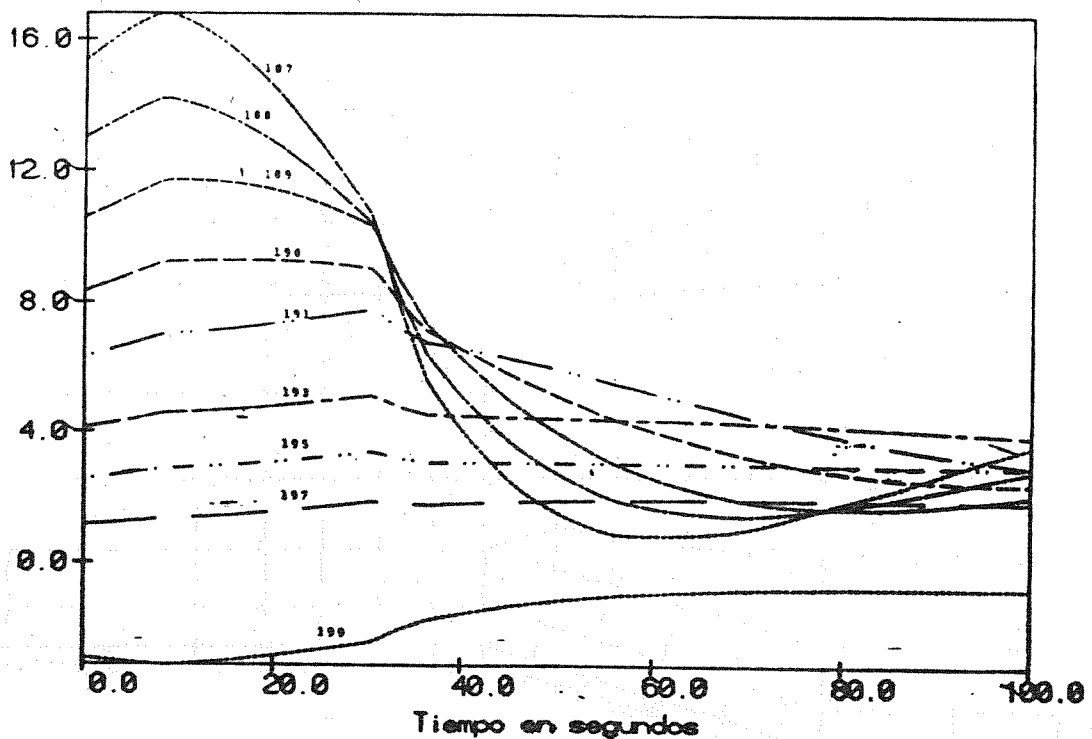
FIGURA 5



TRANSITORIO 9

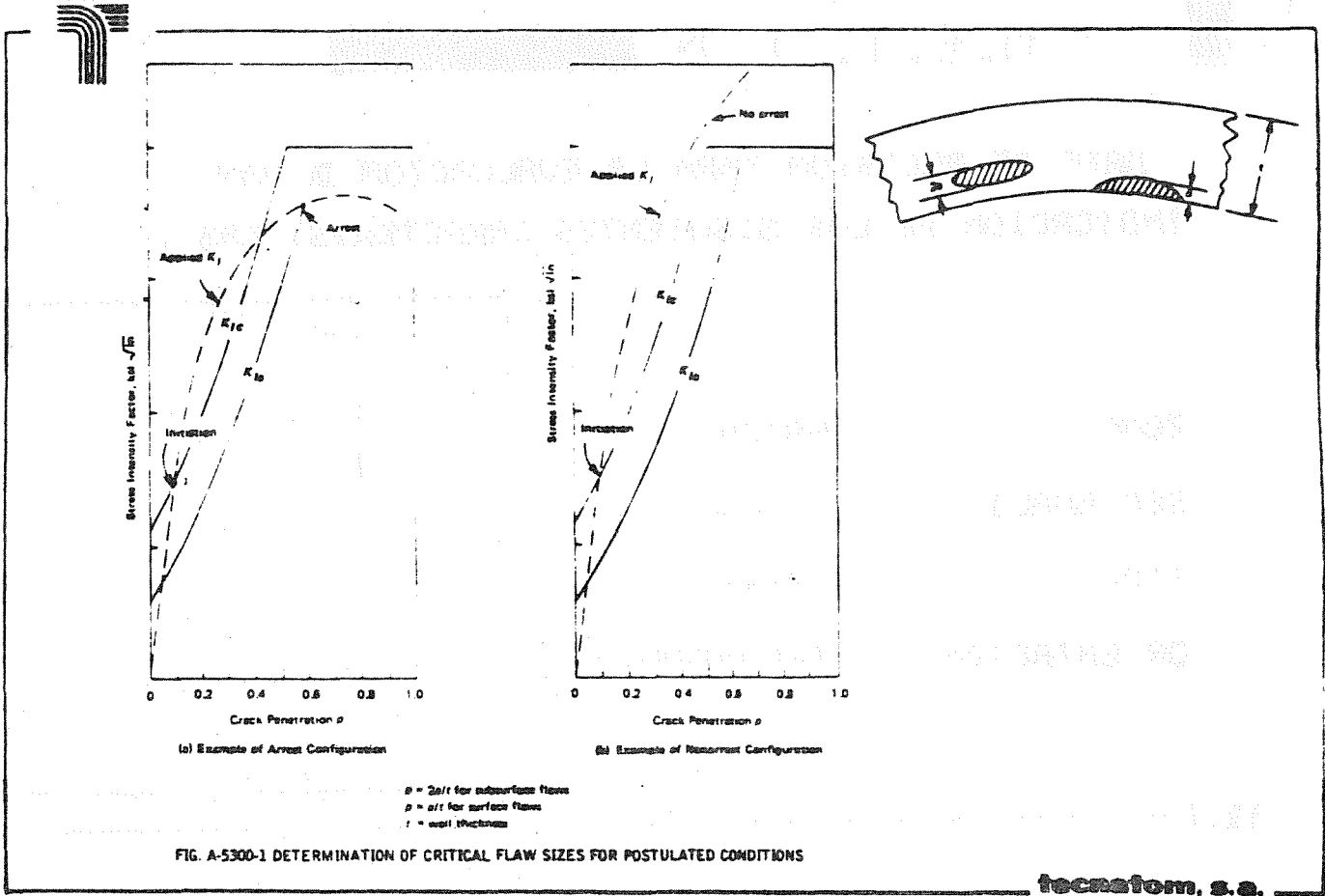
TENSIONES (ZZ) DE LOS NUDOS DE LA SECCION G

Tension en megapascuales



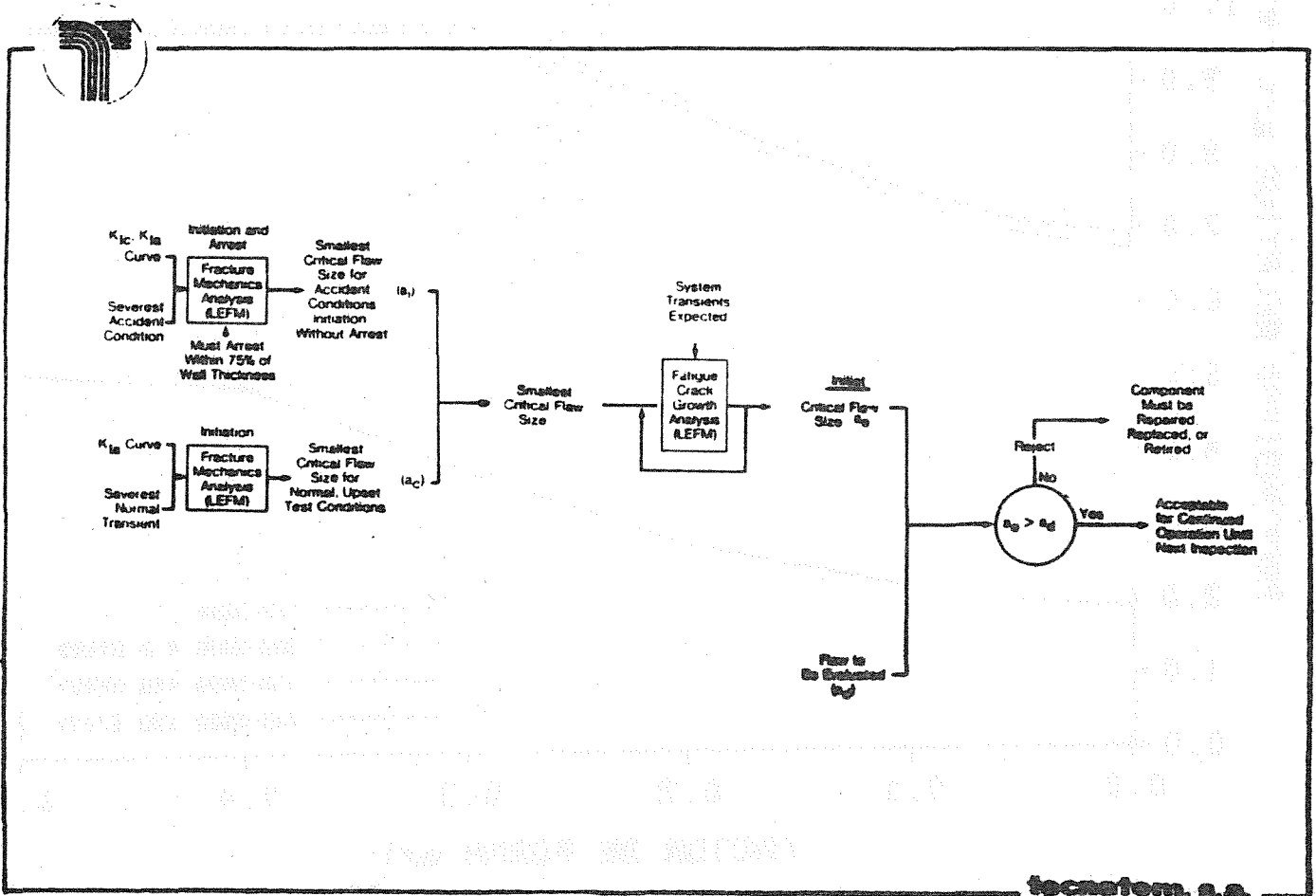
tecnatom, s.a.

FIGURA 6



tecnatom, s.a.

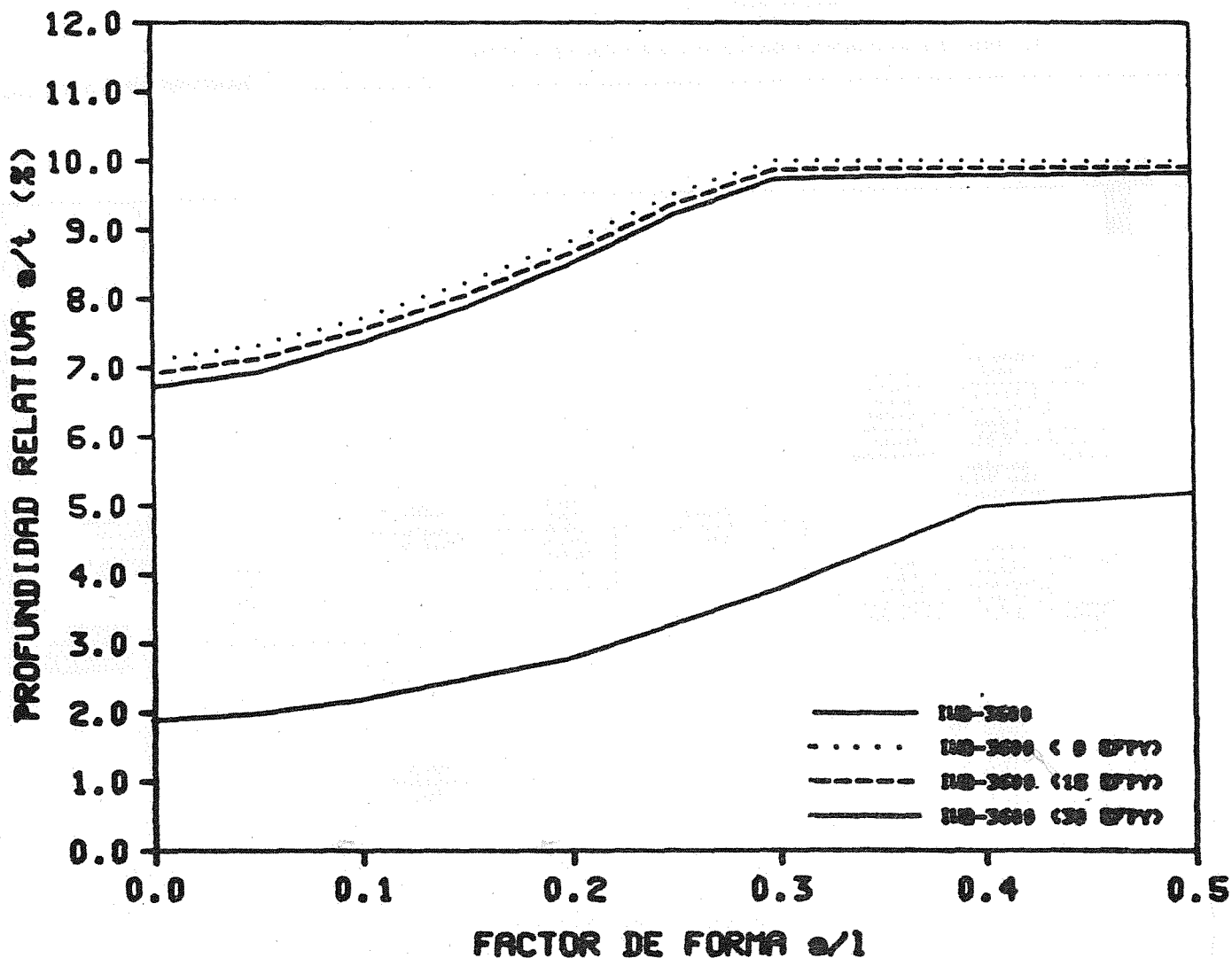
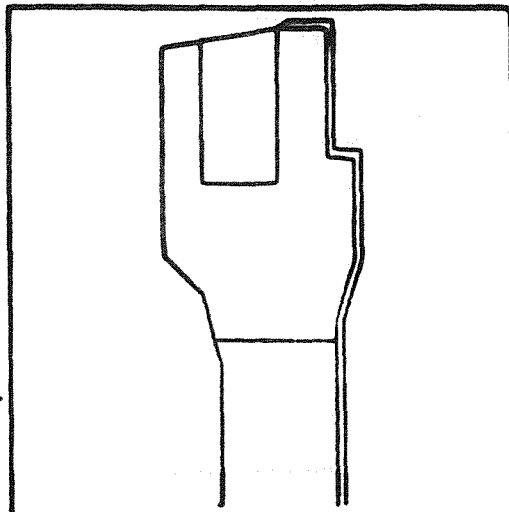
FIGURA 7



tecnatom, s.a.

MAPA DE DECISION PARA LA EVALUACION DE UNA INDICACION DE LAS SIGUIENTES CARACTERISTICAS :

ZONA : VASIJA-BRIDA
 SEC. ANALIZ. : _____
 TIPO : SUPERFICIAL
 ORIENTACION : CIRCUNFERENCIAL



tecna tom, s.a.