

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Dependiente de la Presidencia de la Nación
CENTRO ATOMICO BARILOCHE

ANALISIS TERMOELASTOPLASTICO POR ELEMENTOS FINITOS
DE LAS VAINAS DE LOS ELEMENTOS COMBUSTIBLES ATUCHA
EN LA ZONA DE LOS PATINES DESLIZANTES

G. Sanchez Sarmiento y F.G. Basombrío

BUENOS AIRES

1979

RESUMEN

Las vainas de los elementos combustibles de la Central Nuclear en Atucha llevan soldados, espaciadamente en toda la longitud de ellas, patines deslizantes que se apoyan sobre los separadores de dichos elementos de manera tal que permitan la libre dilatación diferencial entre las distintas barras según su dirección longitudinal. Esta zona de las vainas es la que más se aparta de las hipótesis de simetría cilíndrica e indefinida en que se basan los códigos unidimensionales para la simulación del comportamiento termomecánico de las barras combustibles. Es entonces de fundamental importancia conocer en qué medida la resistencia final de la vaina se modifica en dicha zona, con respecto a dicha geometría unidimensional.

Se describen en el presente trabajo un análisis termoelastoplástico bidimensional realizado en dicha zona, aplicando dos códigos en elementos finitos previamente desarrollados por los autores. Se consideraron dos casos límites: a) con juego inicial nulo entre los patines y los apoyos del separador al finalizar la fabricación del elemento combustible; y b) dicho juego inicial es lo suficientemente grande como para que no llegue a cerrarse en ninguna etapa del cálculo, es decir que se ignora la presencia del separador.

Con condiciones de presiones, gradientes de temperatura y tensiones longitudinales que se presentan durante el quemado del combustible dentro del reactor, se obtuvieron para ambas situaciones límites los valores de la presión interna (de gases y de contacto con la pastilla) que lleva a la vaina al colapso termoelastoplástico. Realizando idéntico análisis para la vaina indefinida sin los patines, el valor que se obtuvo de la presión interna de colapso resultó diferir con aquéllas en muy pequeña magnitud. Ello permite concluir que, en cuanto a colapso elastoplástico se refiere, los patines prácticamente no debilitan a la vaina, contrariamente a lo que se infiere de un cálculo puramente termoelástico.

FINITE ELEMENT THERMOELASTOPLASTIC ANALYSIS OF THE ATUCHA
FUEL ELEMENT CLADDINGS IN THE ZONE OF THE SLIDER RIBS

ABSTRACT

The clads of the fuel rods of the Atucha Nuclear Powerplant have welded onto them a set of slider ribs of the same material, uniformly spaced along them. These ribs can slide longitudinally on the corresponding fuel element separator's supports so as to permit the free differential expansion (in the longitudinal direction) of the different rods that constitute the element. This zone of the cladding is perhaps the one which differs most from the hypothesis of cylindrical infinite symmetry assumed for the one-dimensional computer codes generally used to simulate numerically the thermomechanical behaviour of fuel rods. It is therefore of fundamental importance to know the magnitude by which the final resistance of the cladding is modified by incorporating the cited ribs.

In the present report we describe a thermoelastoplastic bidimensional analysis corresponding to such a zone. Two codes previously developed by the authors were employed for the resolution of the following limiting cases: a) the initial gap between the ribs and the separator's supports vanishes, at the final stage of the fuel rod's manufacturing; and b) this initial gap is sufficiently large as to remain open at any stage of the calculations, i.e., the presence of the separator is ignored. In both limiting cases, for in-reactor conditions of temperature gradients and longitudinal stresses, the values of the internal thermoelastoplastic collapsing pressure of the clad were obtained (this internal pressure is due to the gases and to the contact with the pellet.)

A parallel analysis corresponding to the infinite clad without ribs was made, and the value obtained for the internal collapse pressure was almost identical to the previous ones. This allows us to conclude that, concerning the elastoplastic collapse, the ribs practically do not weaken the rod, contrary to what can be inferred from a purely thermoelastic calculation.

A. INTRODUCCION

Para el análisis termomecánico de las barras combustibles de reactores de potencia, en vistas a estudiar su comportamiento y performance en las severas condiciones de presiones y gradientes de temperatura a las que están sometidas durante su quemado dentro del reactor, suelen emplearse códigos de cálculo "unidimensionales" en la coordenada radial de la barra. Esto significa que el estado termomecánico de la barra depende espacialmente sólo de su coordenada radial, lo que lleva implícitas las suposiciones de simetría de revolución, de que la barra es indefinida según su dirección longitudinal, y de que es independiente de dicha coordenada. En la CNEA se emplea actualmente para estos propósitos el código BACO/1/, desarrollado en el Grupo de Teoría de la Gerencia de Desarrollo. Su utilización para los fines de diseño de elementos combustibles requiere un empleo intensivo de éste para una gran diversidad de situaciones. Además, deben sus predicciones ser lo más verídicas posibles. Ambas razones implican /1/ compatibilizar el uso de modelos físicos de comportamiento de materiales realistas y sofisticados, con la necesidad de contar con tiempos de ejecución económicamente razonables, y que sus requerimientos de memoria rápida sean factibles.

Esta limitación dimensional tiene su precio: en general, la validez de dichas hipótesis implica despreciar los efectos de los límites en la longitud de la barra, de las separaciones entre las pastillas, de las microheterogeneidades del combustible, y de ciertos elementos estructurales tales como las arandelas aplastables de dilatación y los patines de las vainas para su deslizamiento en los apoyos del separador de los elementos combustibles. Además, un tratamiento realista de las fisuras radiales y circunferenciales de la pastilla debe apelar a su complementariedad con análisis termomecánicos bi-dimensionales de dichas fisuras.

Para la determinación de la distribución de la temperatura y de las concentraciones de tensiones en zonas particulares como las citadas, en que es fundamental no restringirse a dichas hipótesis de simetría, el método de elementos finitos es de muy conveniente empleo, dada la irregularidad de las geometrías, y ha sido probada su eficiencia en la resolución de ese tipo de problemas /2-6/. En general, para estos análisis es suficiente la consideración de sólo dos dimensiones espaciales.

En el presente trabajo se describe la aplicación de un sistema de códigos en elementos finitos, desarrollados por los autores, para el análisis termoelastoplástico de la concentración de tensiones en una zona crítica de las vainas de los elementos combustibles de la Central Nuclear en Atucha (CNA), que puede tratarse en dos dimensiones: la de los patines deslizantes (figuras 1 y 2), ya sea en contacto mecánico o no con el separador del elemento combustible (suposición de simetría plana). Esta zona de la vaina es quizá la que más altera las hipótesis de simetría en que se basan los códigos unidimensionales mencionados. Es de fundamental importancia, por ello, conocer en qué medida la resistencia final de la vaina se modifica en esta zona, con respecto a la aproximación unidimensional.

En un trabajo previo /6/, con la base de otros trabajos anteriores /7-10/ y mediante un análisis termoelástico también por elementos finitos, los autores calcularon (para un nivel de potencia de 687 w /cm., temperatura del refrigerante de 324°C y presión de éste de 1.2 kg/mm²), la presión interna P_y sobre las vainas CNA para la cual el material alcanza el límite de fluencia, según el criterio de fluencia de von Mises. Se efectuó el análisis con la hipótesis de tensiones planas y en función del juego inicial entre los patines deslizantes y los apoyos del separador, obteniéndose para P_y los valores extremos de 2.69 y de 3.72 kg/mm², respectivamente para los casos de juego inicial nulo y juego inicial tal que al llegar al límite de fluencia éste no alcanza a cerrarse.

Cálculos unidimensionales con el código BACO /1/, y previamente con el código PIZZA /11/, demostraron que la presión de contacto entre las pastillas y la vaina puede superar ampliamente aquéllos valores de P_y en situaciones reales que se presentan durante su quemado dentro del reactor. Por esta razón, un cálculo termomecánico en el rango elástico no basta para analizar el debilitamiento o refuerzo en la resistencia mecánica de las vainas que los patines deslizantes producen. Se ha efectuado entonces en este trabajo el seguimiento de las tensiones y deformaciones termoelastoplásticas más allá del límite elástico en dicha zona. Ha sido obtenida de esta manera la presión interna P_c con la que, junto a las demás acciones termomecánicas que intervienen, se llega al colapso elastoplástico en dos situaciones límites más representativas, arribándose a conclusiones que se estiman relevantes.

En la siguiente sección B de este trabajo se resumen brevemente las características fundamentales de los códigos en elementos finitos empleados; en la sección C se detallan los cálculos realizados y las hipótesis empleadas; en la sección D se indican los datos de cálculo usados; en la sección E se describen los resultados; y finalmente, en la sección F se discuten dichos resultados y se enuncian las conclusiones finales.

B. CODIGOS EN ELEMENTOS FINITOS EMPLEADOS

Se supone en las situaciones analizadas que las ecuaciones de la distribución de la temperatura y de sus efectos elastoplásticos están desacopladas, es decir, primero se obtiene la distribución espacial de la temperatura para la geometría original, sin acciones externas, y luego con dicha distribución se efectúan los cálculos termoelastoplásticos.

B.1. Código NOLICUARM para el cálculo de la distribución de la temperatura

El Código NOLICUARM /12/ ha sido elaborado en el Centro de Cómputos del Centro Atómico Bariloche, y se ha aplicado a gran

diversidad de situaciones análogas. Resuelve por el método de elementos finitos la ecuación estacionaria de conducción de calor no lineal (con conductividades dependientes de la temperatura) en dos dimensiones espaciales. En sistemas de simetría plana ésta toma la forma

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + g(x, y) = 0 \quad (1)$$

$$(x, y) \in \Omega$$

donde:

- $\vec{r} = (x, y)$ son las coordenadas cartesianas de cada punto del recinto Ω ;
- $T(\vec{r})$ es la temperatura (incógnita del problema);
- $K(\vec{r}, T)$ es la conductividad térmica dependiente del material, de la posición dentro de éste y de la temperatura;
- $g(\vec{r})$ es la generación de calor en el punto r por unidad de volumen.

La solución $T(\vec{r})$, buscada en toda la región Ω , deberá tomar el valor prefijado de Dirichlet δ :

$$T|_{\Gamma^*} = \delta$$

en una parte Γ^* de la frontera Γ de Ω , y en el resto Γ' de dicha frontera la transferencia de calor $\vec{q}$ por unidad de área y por segundo deberá cumplir la condición de Neumann:

$$\vec{q} = -K(\vec{r}, T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma'} = \alpha T + \gamma$$

donde n es la normal interior, y tanto δ como α y γ pueden variar sobre los respectivos contornos.

El método de resolución numérica por elementos finitos de la ecuación (1) está detalladamente descrito en /12/, y un resumen de éste puede encontrarse en /15/. Se emplean elementos triangulares de espesor constante en el caso de simetría plana

(ecuación (1)) con polinomios de primer grado para la variación de la función incógnita dentro de cada uno de ellos. Los sistemas de ecuaciones lineales se resuelven por el algoritmo de eliminación de Gauss y la no linealidad de la ecuación se trata según un proceso iterativo simple.

B.2. Código PLASTE2 para la resolución de problemas bidimensionales de termoelastoplasticidad

El sistema de códigos PLASTE /13-14/ tiene por objeto simular el comportamiento termoelastoplástico de materiales, usando el método de elementos finitos. Para historias dadas de cargas y temperaturas, permiten resolver problemas tecnológicos de composición heterogénea y de variada geometría en tensión plana, deformación plana, deformaciones con simetría plana y tensión impuesta en la dirección perpendicular a ese plano y simetría de revolución. Admiten condiciones de contorno de muy variada naturaleza:

- a) fuerzas puntuales y/o cargas distribuidas;
- b) desplazamientos nulos o de un determinado valor prefijado con respecto a cualquier dirección dada;
- c) apoyos elásticos con coeficientes de rigidez dados según cualquier dirección prefijada;
- d) combinaciones de a), b) ó c) para dos direcciones perpendiculares entre sí.

Cada material puede responder a una ley cualquiera de endurecimiento por deformación, incluso dependiente de la temperatura. Descargas o recargas espontáneas son tenidas en cuenta automáticamente en todo punto del material.

Los programas se basan en el método incremental de las "tensiones iniciales", que para cada incremento de cargas evalúa dentro de un ciclo iterativo un problema elástico con tensiones iniciales ficticias, las que se van ajustando a los efectos de que las leyes de la plasticidad sean satisfechas dentro de un margen tolerable de error, para el cual se interrumpen las iteraciones. Se acumulan luego los resultados

que han sido obtenidos a partir de las leyes de equilibrio. Ha sido adoptado el criterio de plasticidad de Levy- Mises- Prandtl-Reuss.

Perteneciente al sistema PLASTEFL, el código PLASTEFL2 (que hemos utilizado) en este trabajo) resuelve problemas termo-elásticos de simetría plana, con elementos triangulares trinodales y polinomios de primer grado para la variación de ambas componentes de los desplazamientos de todo punto dentro de aquéllos. Cada elemento queda caracterizado por el valor del módulo de Young, del factor de Poisson de la temperatura, y de la tensión σ_z impuesta en la dirección perpendicular al plano de cálculo. En su versión actual no se contempla anisotropía en las propiedades del material, ni efecto Bauschinger.

C. SITUACIONES ANALIZADAS E HIPOTESIS

Se analizaron sólo dos casos límite que corresponden al comportamiento termoelastoplástico y excluyen fenómenos viscoelásticos.

- i) Juego inicial nulo entre los patines y los apoyos del separador al finalizar la fabricación del elemento combustible, es decir, con presión exterior de 1 Atm, presión interior de 17 Atm y a temperatura ambiente (20°C).
- ii) El juego inicial entre los patines y dichos apoyos es suficientemente grande como para que no llegue a cerrarse en ninguna etapa del cálculo, es decir que se ignora la presencia del separador.

Estas dos situaciones fueron comparadas con una porción cilíndrica asintótica de la vaina (hipótesis para los cálculos unidimensionales), cuando actúan simultáneamente las siguientes acciones (ver figura 6):

- a) un gradiente de temperatura que corresponde a la máxima potencia que puede disipar el combustible por unidad de longitud de barra;

- b) una presión P_{ext} sobre la superficie externa de la vaina igual a la del refrigerante (1.2 kg/mm^2);
- c) una presión P_{int} variable desde cero hasta aquélla en que se produce el colapso, que simula tanto la presión de gases de llenado y de productos de fisión, como la presión de contacto entre la pastilla y la vaina cuando el espacio entre ellos se anula por diferencia entre sus temperaturas medias, y por hinchado del combustible;
- d) una tensión longitudinal resultante de la acción simultánea de ambas presiones interior y exterior:

$$\sigma_z = \frac{R_{int}^2 \cdot P_{int} - R_{ext}^2 \cdot P_{ext}}{R_{ext}^2 - R_{int}^2 + 3A_p/\pi} \quad (3)$$

para la vaina en la zona de los patines (A_p = área de cada patín), y

$$\sigma_z = \frac{R_{int}^2 \cdot P_{int} - R_{ext}^2 \cdot P_{ext}}{R_{ext}^2 - R_{int}^2} \quad (4)$$

para la vaina sin ellos.

Tanto las conductividades térmicas como el módulo de Young y la tensión de fluencia $\bar{\sigma} = H(\bar{\epsilon}_p)$ se consideraron dependientes de la temperatura (ver sección D).

Dada su despreciable relevancia en los resultados, se supuso que el coeficiente de transferencia térmica del espacio gaseoso entre la pastilla y la vaina es constante, es decir, no depende de la temperatura ni del espesor de aquél.

La temperatura sobre la superficie exterior de la vaina es uniforme y exactamente igual a la del refrigerante.

La generación de calor por fisión del combustible nuclear se supone uniforme sobre todas las pastillas y no se tienen en cuenta las separaciones entre ellas.

Se consideró que en el caso i) los apoyos del separador son infinitamente rígidos, es decir que no ceden en absoluto ante la dilatación de las vainas. En rigor se debería haber

considerado una reacción al menos elástica de dichos apoyos, con constantes de rigidez diferentes para cada uno de los tipos de celda para alojamiento de las barras dentro del separador. Estas constantes fueron calculadas en /6/ en base a resultados de /19/, realizándose con ellas el análisis termo-elástico en la zona de los patines bajo las acciones a) a c) y se concluyó que para todos los tipos de celdas del separador la presión interna que hace llegar al material al límite de fluencia difieren como máximo en un 0.7% de la correspondiente a considerar apoyo absolutamente rígido. De ahí que, para los fines del presente trabajo, se adoptó esta última hipótesis.

Por otra parte, un análisis riguroso de la vaina en la zona de los patines debería ser tridimensional, pero como la longitud de los patines es aproximadamente el triple del diámetro de la vaina, la hipótesis de simetría plana en esta zona resulta ser una buena aproximación.

D. DATOS DE CALCULO

D.1. Constantes térmicas del combustible (UO₂ natural) y de la vaina (Zircaloy-4)

D.1.1. Conductividad del UO₂ /1, 16, 17/:

$$K = K_0 \frac{(1 - p)^{3/2}}{0.95^{3/2}} \quad p: \text{porosidad de UO}_2$$

$$K_0 = \frac{38.24}{T + 129.4} + 4.79 \times 10^{-13} \cdot T \quad (\text{w/cm}^\circ\text{K})$$

(T en °K)

D.1.2. Conductividad del Zry-4 /11/:

$$K = 0.1145 + 1.425 \times 10^{-4} T \quad (\text{w/cm}^\circ\text{K}) \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}.$$

D.2. Coeficiente de transferencia térmica del espacio pastilla- vaina

(Calculado por el código PIZZA /11/, se lo supone constante e independiente del espesor):

$$h = 1.375 \text{ w/cm}^2\text{°K}.$$

D.3. Generación de calor por unidad de volumen

Para la barra en la zona de los patines y en la zona asintótica (zona central del reactor):

$$g = 0764 \text{ w/mm}^2$$

(corresponde a una potencia disipada de 687 w/cm de barra).

D.4. Temperatura sobre la superficie exterior de la vaina

$$T_e = 324^\circ\text{C}.$$

D.5. Constantes termoelastoplásticas de la vaina

D.5.1. Módulo de Young dependiente de la temperatura:

$$E = 10500 - 10.T \quad (\text{kg/mm}^2) \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}.$$

D.5.2. Factor de Poisson:

$$\nu = 0.44 \text{ para } 300^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C}.$$

D.5.3. Curva tensión-deformación de ensayo uniaxial $\bar{\sigma} = H(\bar{\epsilon}_p, T)$:
Indicada en figura 3 /18/. Su dependencia con la temperatura está dada por:

$$H(\bar{\epsilon}_p, T) = H(\bar{\epsilon}_p, T_0) - 0.0635(T - T_0) \text{ kg/mm}^2 \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}.$$

D.5.4. Coeficiente de dilatación térmica lineal isotrópica /18/:

$$\alpha = 6.5 \times 10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1} \quad (20^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C})$$

D.6. Datos geométricos (a presión atmosférica y 20°C)

Radio interior de la vaina: $R_{\text{int}} = 5.40 \text{ mm}.$

Radio exterior de la vaina: $R_{ext} = 5.95 \text{ mm.}$
Radio de la pastilla: $R_p = 5.31 \text{ mm.}$
Radio de la sup. exterior del patín = 6.91 mm.
Ancho del patín = 2.0 mm.

D.7. Redes de elementos finitos

D.7.1. Para el cálculo de la distribución de la temperatura en la zona de los patines (incluida la pastilla):

Número de nodos: 437

Número de elementos(triángulares):776

D.7.2. Para los cálculos termoelastoplásticos de la vaina en la zona de los patines (sin la pastilla). Ver figura 4:

Número de nodos: 218

Número de elementos(triángulares):356

D.7.3. Para los cálculos de la distribución de la temperatura y termoelastoplásticos de la vaina en la zona asintótica (sin la pastilla):

Número de nodos: 126

Número de elementos(triángulares):200

E. DESCRIPCION DE LOS CALCULOS Y RESULTADOS

Con las hipótesis enunciadas en C y los datos detallados en D, se calculó primeramente la distribución espacial de la temperatura con el código NOLICUARM, en la zona analizada de la vaina. Por razones de simetría (ver figura 2), se consideró sólo el sector de 60° de la figura 5. También se tomó un sector del mismo ángulo para la vaina indefinida sin los patines. Para el primer caso se incluyó la presencia de las pastillas, fundamental para el cálculo de la distribución de la temperatura. En la figura 5 se muestran los correspondientes mapas de curvas isotermas sólo para la vaina.

Los cálculos termoelastoplásticos para las situaciones descritas en C se efectuaron con el código PLASTE2. Para los

tres casos se incorporaron en el primer ciclo de carga las acciones a), b) y d) descritas en la sección C y presión interna P_{int} nula, y en los ciclos posteriores de cargas incrementales se fue aumentando P_{int} según los valores de TABLA I, adecuadamente a los comportamientos esperados para cada caso. En la TABLA II se indican los resultados fundamentales:

- a) P_y : Presión interna para la que el primer punto del material alcanza el límite de fluencia.
- b) P_1 : Presión interna mínima para la cual toman contacto las zonas de plastificación iniciadas separadamente en las superficies interior y exterior de la vaina (ver figura 9).
- c) P_c : Presión interna "de colapso".

A los fines de comparación entre las distintas situaciones analizadas de la vaina, en este trabajo es necesario dar una definición convencional de la presión interna de colapso: es aquella presión interna, mayor que P_1 , para la cual las deformaciones radiales ϵ_r de "puntos característicos" de la vaina llegan al 2%. Para esta deformación, la vaina se encuentra enteramente tensionada en el rango plástico para las tres situaciones analizadas. En la TABLA II hemos indicado también los respectivos valores de lo que llamamos "coeficientes de debilitamiento elástico y plástico", esto es, los valores de P_y y P_c divididos por los correspondientes a la vaina cilíndrica indefinida.

En la figura 8 se muestran los "puntos característicos" elegidos para cada caso, y se han graficado sus desplazamientos en término de la presión interna P_{int} , indicándose los respectivos valores de P_y , P_1 y P_c . En pequeños rangos de P_{int} ya cerca del colapso se observaron ciertas dificultades en la convergencia del algoritmo para las tres situaciones. Estas dificultades, en general, suelen ser normales en las etapas de bruscos avances de la zona de plastificación o bien, cuando el estado plástico es avanzado, y se estima que no afectan prácticamente los resultados finales.

En la figura 7, por su parte, se ha representado para $P_{int} = 3.85 \text{ kg/mm}^2$ (cerca del colapso) la geometría original y deformada para cada caso de la vaina en la zona de los patines y en la zona indefinida. Se ha tomado para los corrimientos de los puntos una escala muy ampliada respecto de la empleada para la geometría original.

En la figura 9 se han representado para sucesivos valores de P_{int} los avances respectivos de la zona plástica, esto es, de la porción de la vaina en que todos sus puntos están tensionados en el rango plástico.

F. DISCUSION DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En primer lugar, obsérvese en la figura 8 lo poco relevante que resulta, sobre el valor de la presión de colapso P_c , el valor convencional adoptado en su definición dada la pequeña pendiente de las curvas en esa zona.

De dicha figura 8 y de los resultados de la TABLA II se observa que, pese a que la tensión de fluencia llega en algún punto crítico de la vaina en la zona de los patines para una presión interior P_{int} mucho menor que en la vaina cilíndrica indefinida (coeficientes de debilitamiento elástico de 0.892 y de 0.567 para cada caso límite), el colapso se alcanza en las tres situaciones prácticamente con los mismos valores de P_{int} (los coeficientes de debilitamiento plástico son de 0.98 y 0.97 respectivamente). Surge de ello una conclusión fundamental: los patines no debilitan apreciablemente la vaina en cuanto a colapso elastoplástico se refiere, a diferencia de lo que puede concluirse de un estudio puramente elástico /6/.

Si bien es cierto que hay otros fenómenos importantes que influyen en la respuesta termomecánica de la vaina, tales como el creep, anisotropía mecánica y efectos de la radiación, es plausible que con la consideración de dichos fenómenos esta útil conclusión también se verifique. Ella es típica del comportamiento elastoplástico de materiales en general y la explicación

de este hecho es simple: el punto de la vaina más tensionado elásticamente llega primero al límite de fluencia y en sus vecindades el material permanece en estado puramente elástico. Estas zonas pueden seguir absorbiendo los incrementos de carga mientras que en aquel primer punto continúan produciéndose pequeñas deformaciones plásticas, quedando su estado de tensiones prácticamente sin modificación. Los puntos vecinos siguen absorbiendo la carga, y así van alcanzando paulatinamente el límite de elasticidad. En la continuación del proceso la zona de plastificación se propaga buscando puntos del material de mayor resistencia y uniformando su estado de tensiones en el rango plástico. La zona inicial que originó la concentración de tensiones queda por fin plastificada y la parte resistente de la vaina replegada prácticamente a su zona cilíndrica. Este análisis intuitivo explica cómo la resistencia última de la vaina es casi la de un cilindro indefinido.

A los fines técnicos, la presión de colapso de la vaina con patines o sin ellos, con o sin apoyo rígido del separador, es entonces casi la misma. No obstante, observando con cuidado la figura 8 y los valores de la TABLA II se nota que el orden de debilitamiento plástico creciente es: 1º) vaina cilíndrica indefinida; 2º) con patines pero sin tomar contacto con el separador; 3º) con patines inicialmente en contacto rígido con el separador. Esto es justamente lo que corresponde esperar.

REFERENCIAS

- /1/ S. HARRIAGUE y E.J. SAVINO: BACO: Código de simulación termomecánica de una barra combustible en un reactor de potencia. CNEA-NT 9/78 (1978).
- /2/ G. SANCHEZ SARMIENTO y A. MARAJOFISKY: Finite element analysis of local overheating within plutonium enriched UO_2 fuel rods caused by PuO_2 islands. International Conference of Numerical Methods in Thermal Problems, Swansea, Gran Bretaña, Julio 2-6 de 1979.
- /3/ G. SANCHEZ SARMIENTO, E.J. SAVINO y S. HARRIAGUE: Distribución de la temperatura en la zona de las arandelas de dilatación de una barra combustible tipo CNA. CNEA-NT. En impresión (1979).
- /4/ S. HARRIAGUE, E.J. SAVINO, G. COROLI, F.G. BASOMBRIIO y G. SANCHEZ SARMIENTO: Theoretical fuel element modelling at CNEA. CNEA-NT 14/78. Enviado a publicación (1978).
- /5/ G. SANCHEZ SARMIENTO y F.G. BASOMBRIIO: Tensiones y deformaciones elásticas en la unión de la vaina combustible tipo CNA con el tapón inferior. Informe Interno N°22-7/76-CC (CAB) Dpto. Combustibles Nucleares, CNEA (1976).
- /6/ G. SANCHEZ SARMIENTO y F.G. BASOMBRIIO: Análisis termoelástico de las vainas para elementos combustibles CNA en la zona de los patines, en contacto con el separador. Informe CNEA. En impresión (1976).
- /7/ F.G. BASOMBRIIO: Estudio elástico de tensiones y deformaciones en la zona de los patines de la vaina Atucha a temperatura constante. Informe Interno, Centro de Cómputos, Centro Atómico Bariloche (1975).
- /8/ G. SANCHEZ SARMIENTO y F.G. BASOMBRIIO: Cálculos elásticos en vainas para elementos combustibles tipo CNA en la zona de los patines, a temperatura uniforme. Informe Interno N°21-6/76-CC(CAB). Departamento de Combustibles Nucleares, CNEA (1976).
- /9/ F.G. BASOMBRIIO y G. SANCHEZ SARMIENTO: Cálculos termoelásticos en vainas para elementos combustibles tipo CNA en la zona de los patines, para diferentes espesores. Informe Interno N°23-8/76-CC(CAB). Departamento de Combustibles Nucleares, CNEA (1976).
- /10/ F.G. BASOMBRIIO y G. SANCHEZ SARMIENTO: Análisis bidimensional de la distribución de temperatura en una barra combustible CNA en la zona de los patines. CAB/1976/1. Centro Atómico Bariloche, CNEA (1976).
- /11/ C. MONTENERO y U.V. ROCCA: PIZZA - Código para el análisis termomecánico de barras combustibles tipo CNA. CNEA-NT 18/76 (1976).

- /12/ F.G. BASOMBRIIO y B. CRUZ: Resolución por elementos finitos de la ecuación cuasiarmónica bidimensional (Programas CUARM, AXICUARM y NOLICUARM). CNEA-NT 31/78 (1978).
- /13/ F.G. BASOMBRIIO y G. SANCHEZ SARMIENTO: PLASTEFL: A code for the numerical simulation of thermoelastoplastic behaviour of materials using the finite element method. Nuclear Engineering and Design 49 (1978) 231-241.
- /14/ F.G. BASOMBRIIO y G. SANCHEZ SARMIENTO: Numerical experiments in the simulation of thermoelastoplastic behaviour of materials. Further development of the PLASTEFL Code. A ser publicado en RES MECHANICA (The Int. J. of Struct. Mech. and Mat. Sci.), Vol. 1 (1979).
- /15/ F.G. BASOMBRIIO, G. SANCHEZ SARMIENTO y S. PISSANETZKY. El método de elementos finitos en la Física del Continuo. Desarrollo adquirido y trabajos realizados en el Centro Atómico Bariloche (Informe N°2). CNEA-NT 28/78 (1978).
- /16/ M.F. LYONS. GEAP-5100-1 (1966).
- /17/ G. ONDRACEK y B. SCHULZ. J. Nucl. Mat. 46, 253 (1973).
- /18/ J.A. CASARIO y D. SANTINELLI. Modelos de comportamiento mecánico de las vainas para elementos combustibles de la CNA. Criterio de falla. Informe Interno N°13/75/D-CM. Departamento de Combustibles Nucleares. CNEA (1975).
- /19/ H.A. LOTANO y C.E. MARGUEIRAT. Análisis elástico de tensiones y deformaciones en un separador de un elemento combustible de la CNA. CNEA-NT 11/76 (1976).

Ciclo de carga	Vaina en la zona de los patines		Vaina cilíndrica indefinida
	Sin contacto con el separador	Inicialmente en contacto rígido con el separador	
1	0.00	0.00	0.00
2	3.20	2.10= P_y	3.20
3	3.30= P_y	2.20	3.30
4	3.40	2.30	3.40
5	3.50	2.40	3.50
6	3.60	2.50	3.60
7	3.70	2.60	3.70= P_y
8	3.75	2.70	3.75
9	3.80	2.80	3.80
10	3.82	2.90	3.82
11	3.84= P_1	3.00	3.84
12	3.86	3.10	3.86
13	3.88	3.20	3.88
14	3.90	3.25	3.90
15	3.92	3.30	3.92= P_1
16	3.94	3.35	3.94
17	3.96	3.40	3.96
18	3.98	3.45	3.98
19	4.00	3.50	4.00
20	4.02	3.55	4.02
21	4.04= P_c	3.60	4.04
22		3.65	4.06
23		3.70	4.08
24		3.75	4.10
25		3.80	4.12
26		3.85	4.13= P_c
27		3.90= P_1	
28		3.95	
29		4.00	
30		4.05= P_c	

TABLA I

Presiones internas (en kg/mm^2) en cada ciclo de carga para las tres situaciones analizadas

	Vaina en la zona de los patines		Vaina cilíndrica indefinida
	Sin contacto con el separador	Inicialmente en contacto rígido con el separador	
P_y (kg/mm ²)	3.30	2.10	3.70
P_l (kg/mm ²)	3.84	3.90	3.92
P_c (kg/mm ²)	4.04	4.00	4.13
Coeficiente de debilitamiento elástico: $P_y/P_y(\text{indef.})$	0.892	0.567	1.00
Coeficiente de debilitamiento plástico: $P_c/P_c(\text{indef.})$	0.98	0.97	1.00

TABLA II

Valores de P_y , P_l , P_c y de los coeficientes de debilitamiento elástico y plástico para las tres situaciones analizadas.

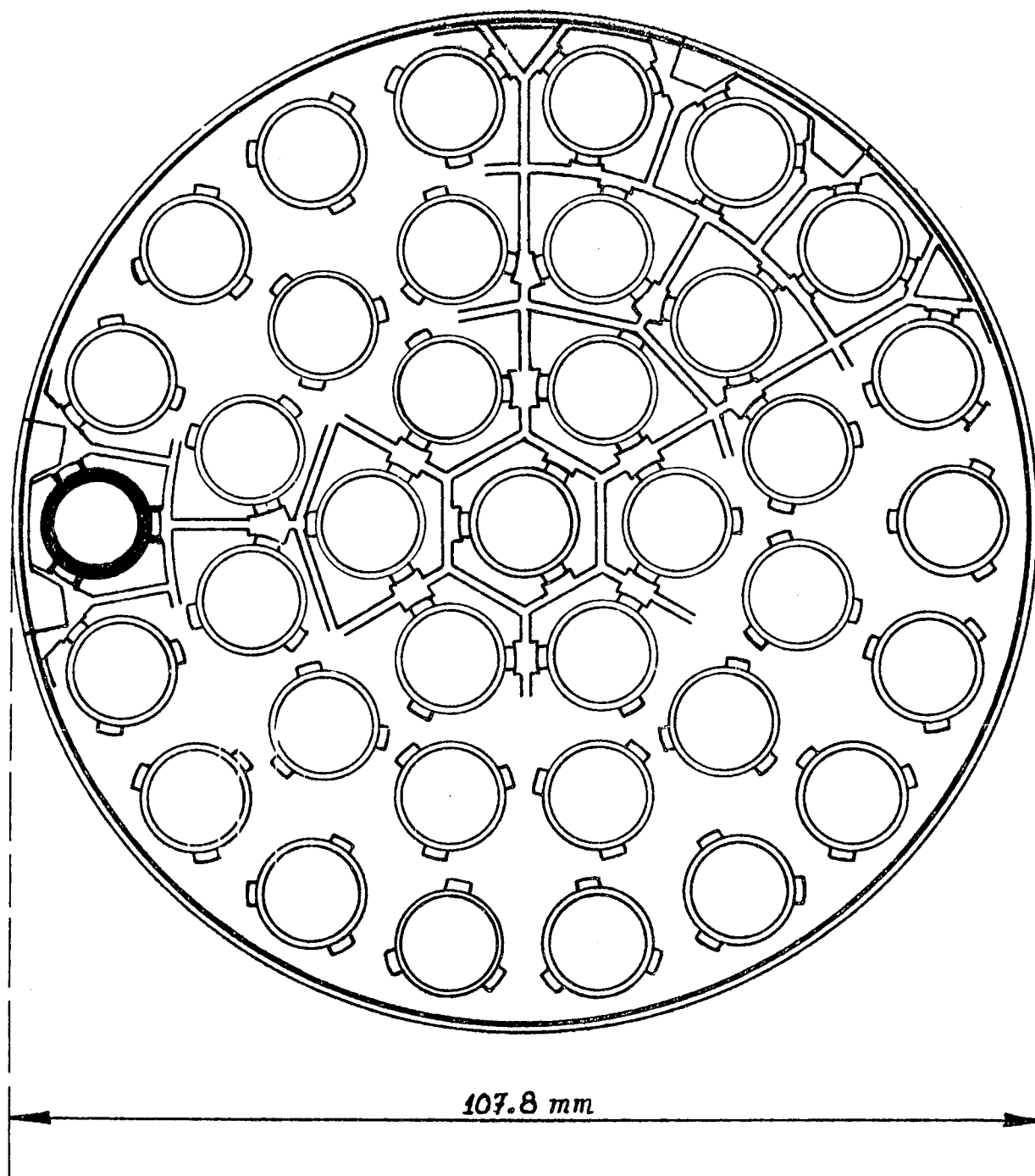


Figura 1.- Sección de un elemento combustible de la C.N.A.
a través de un separador.

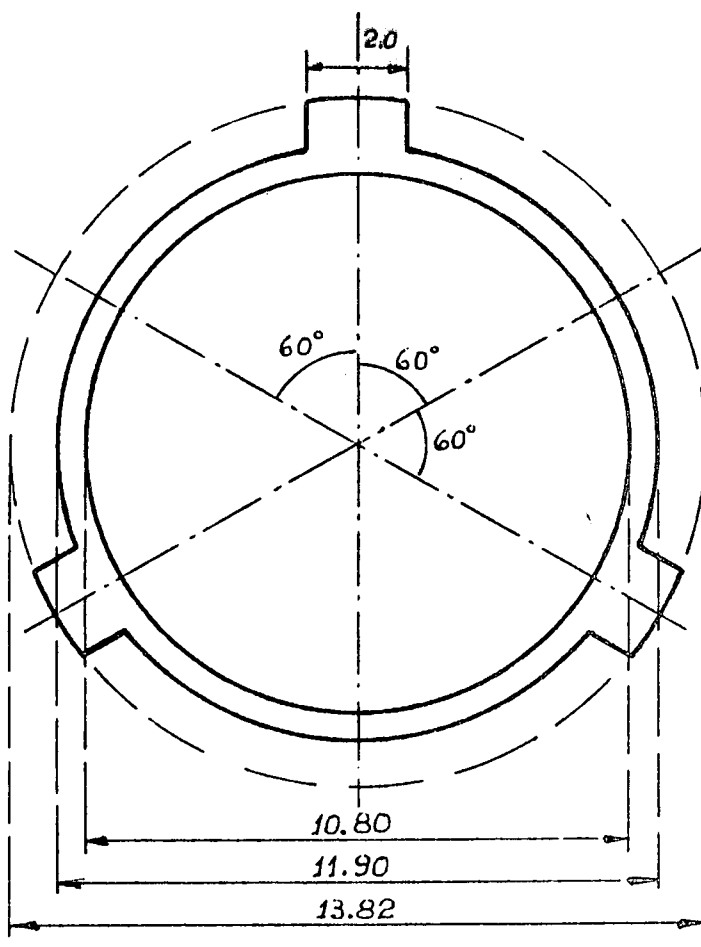


Figura 2.- Sección de una barra combustible de la C.N.A.
en la zona de los patines (Dimensiones en mm).

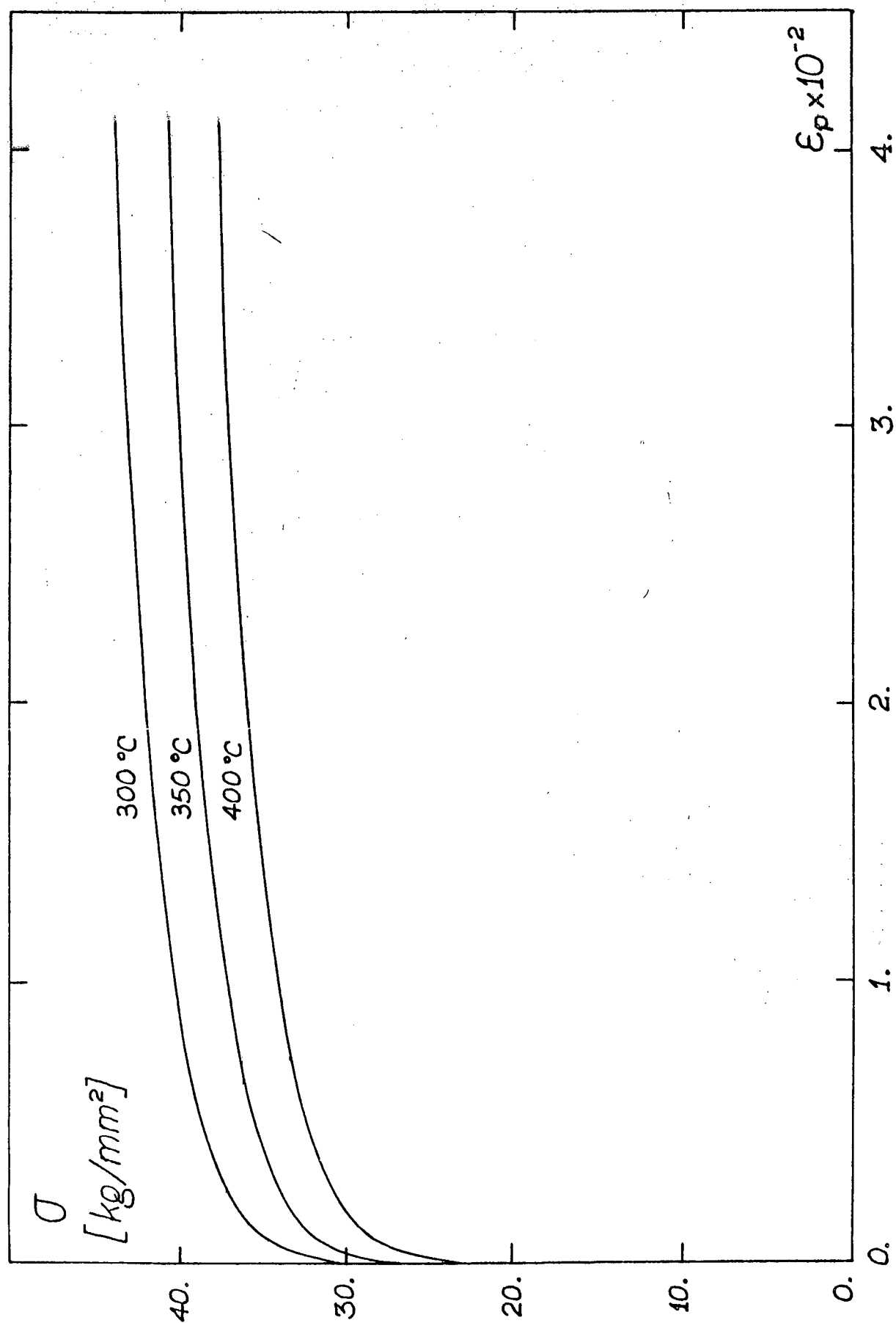


Figura 3:- Diagrama tensión-deformación plástica para el Zircolay-4 a distintas temperaturas.

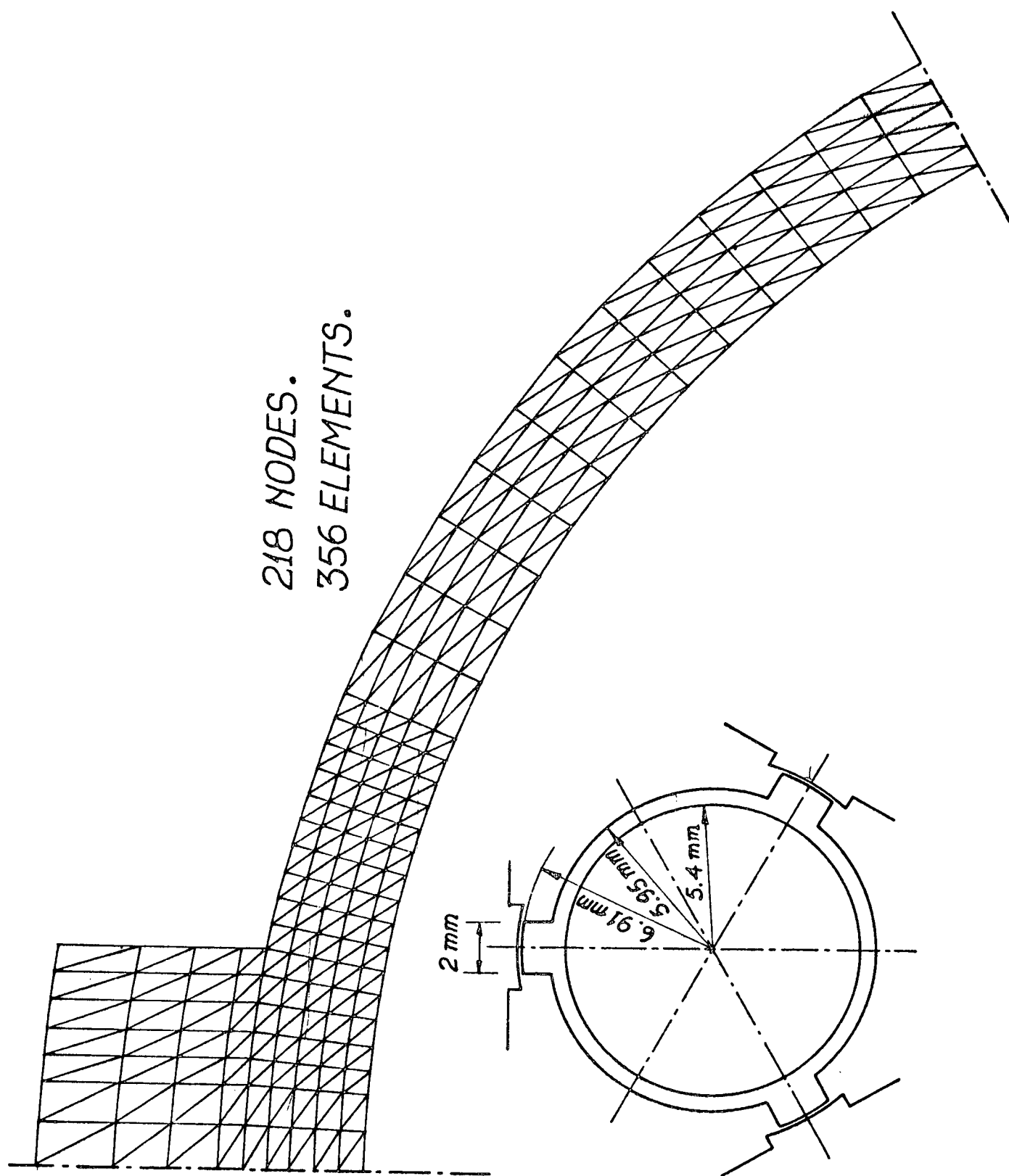


Figura 4.- Vista en corte de la vaina en la zona de los patines y red de elementos finitos.

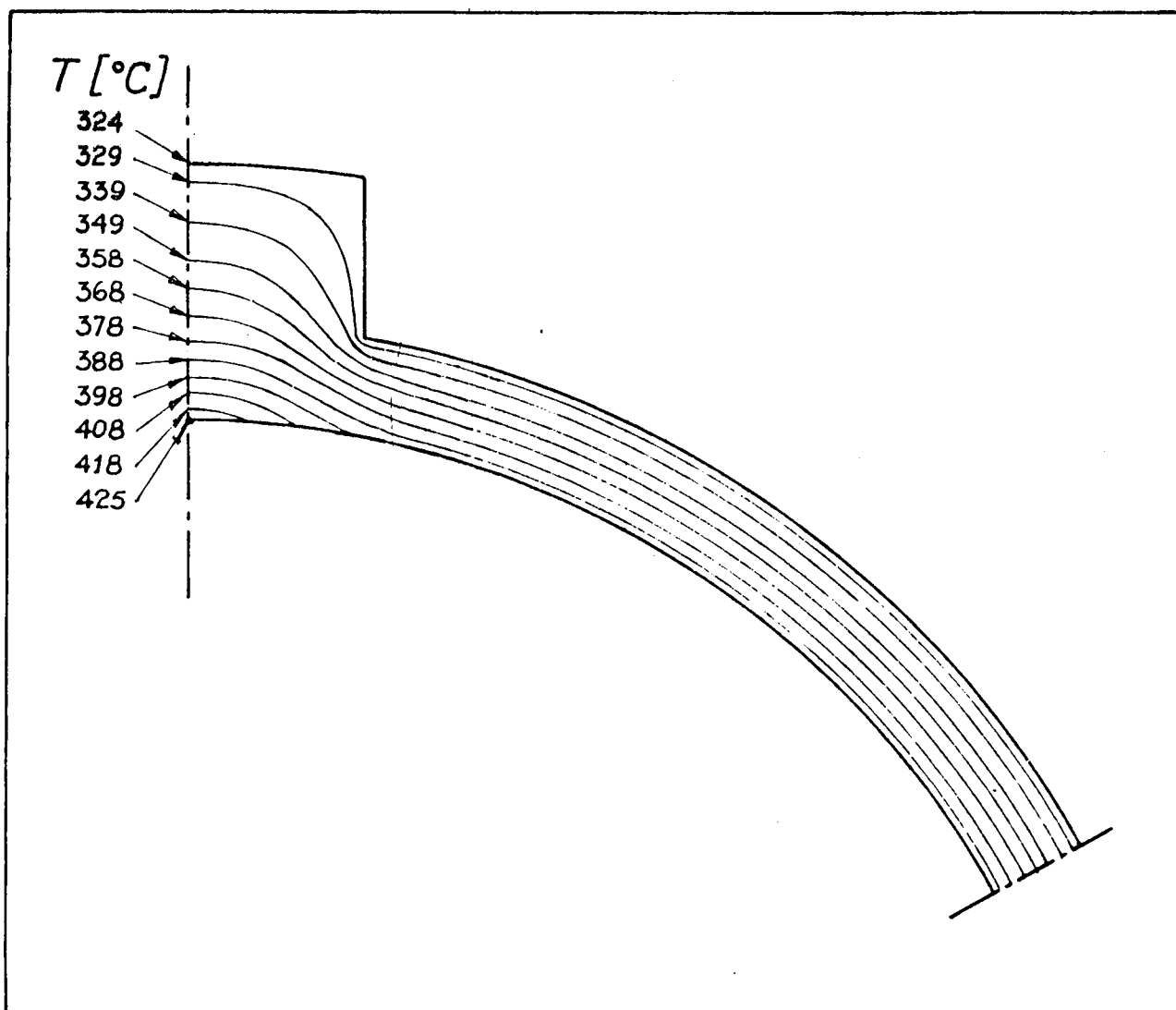


Figura 5.- Distribución de temperaturas (isotermas) en la zona de los patines.

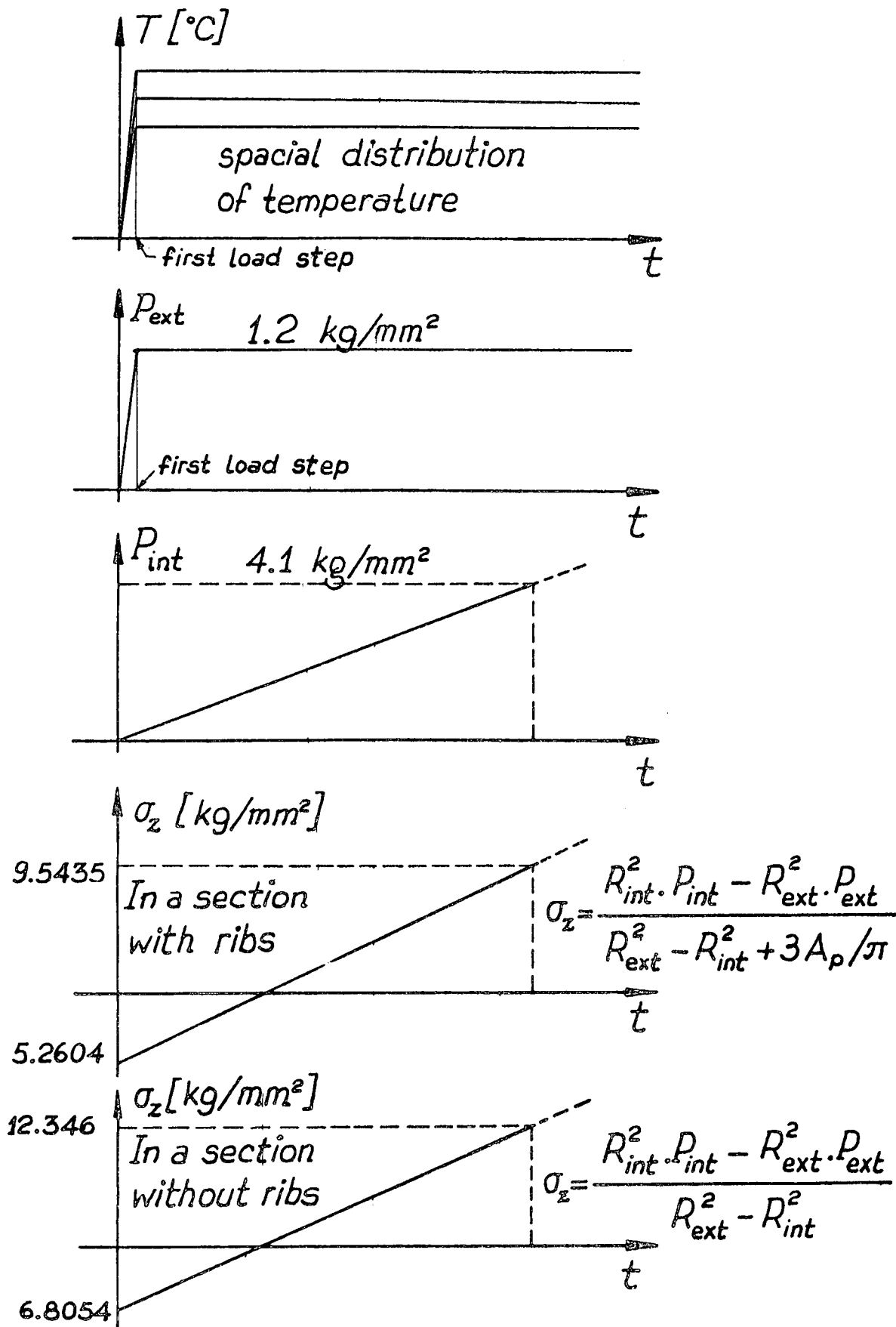


Figura 6:- Historias de cargas, temperaturas y tensi3n σ_z para la vaina, que simulan la puesta en funcionamiento del reactor.

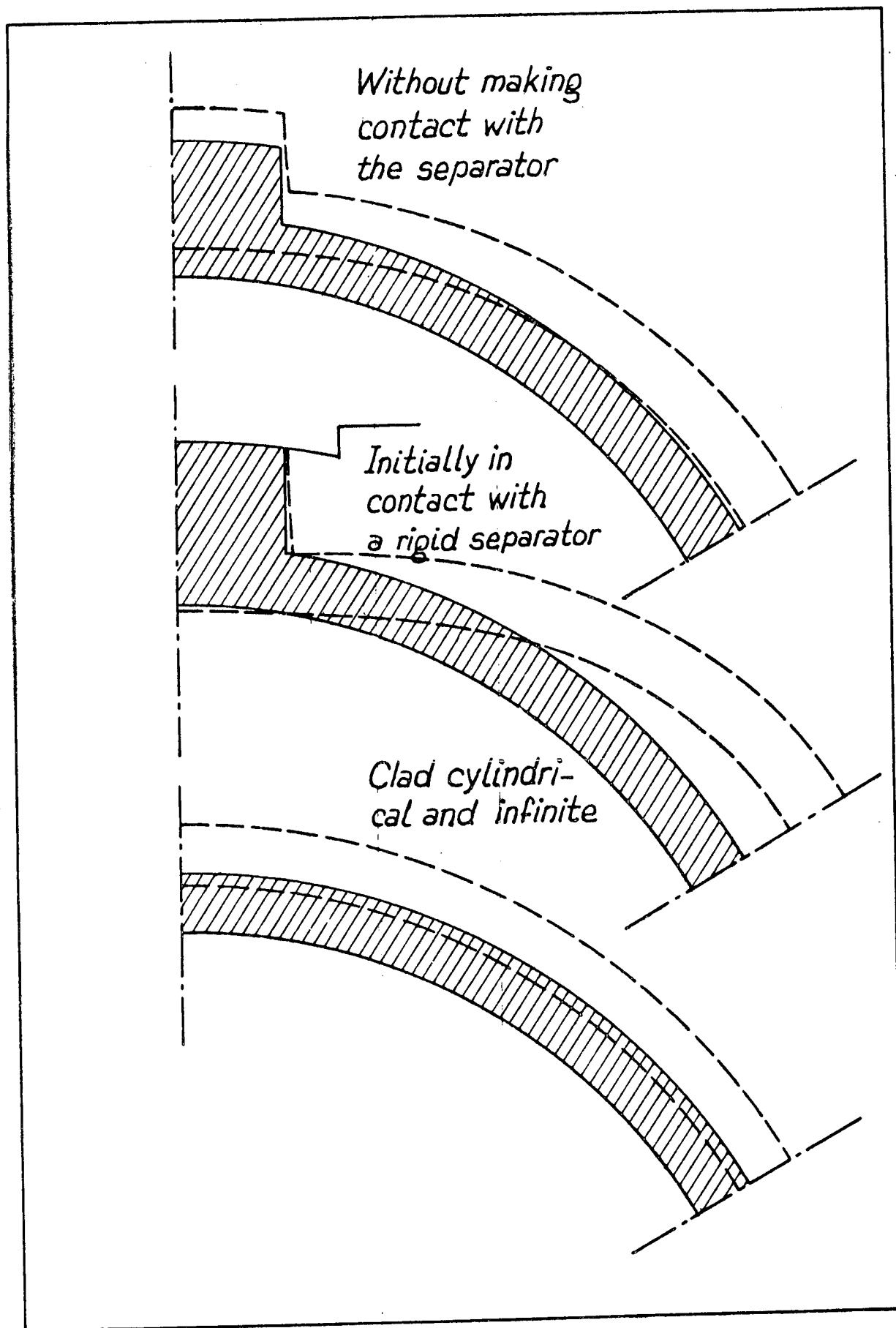


Figura 7.- Deformación de la vaina para los distintos casos estudiados.

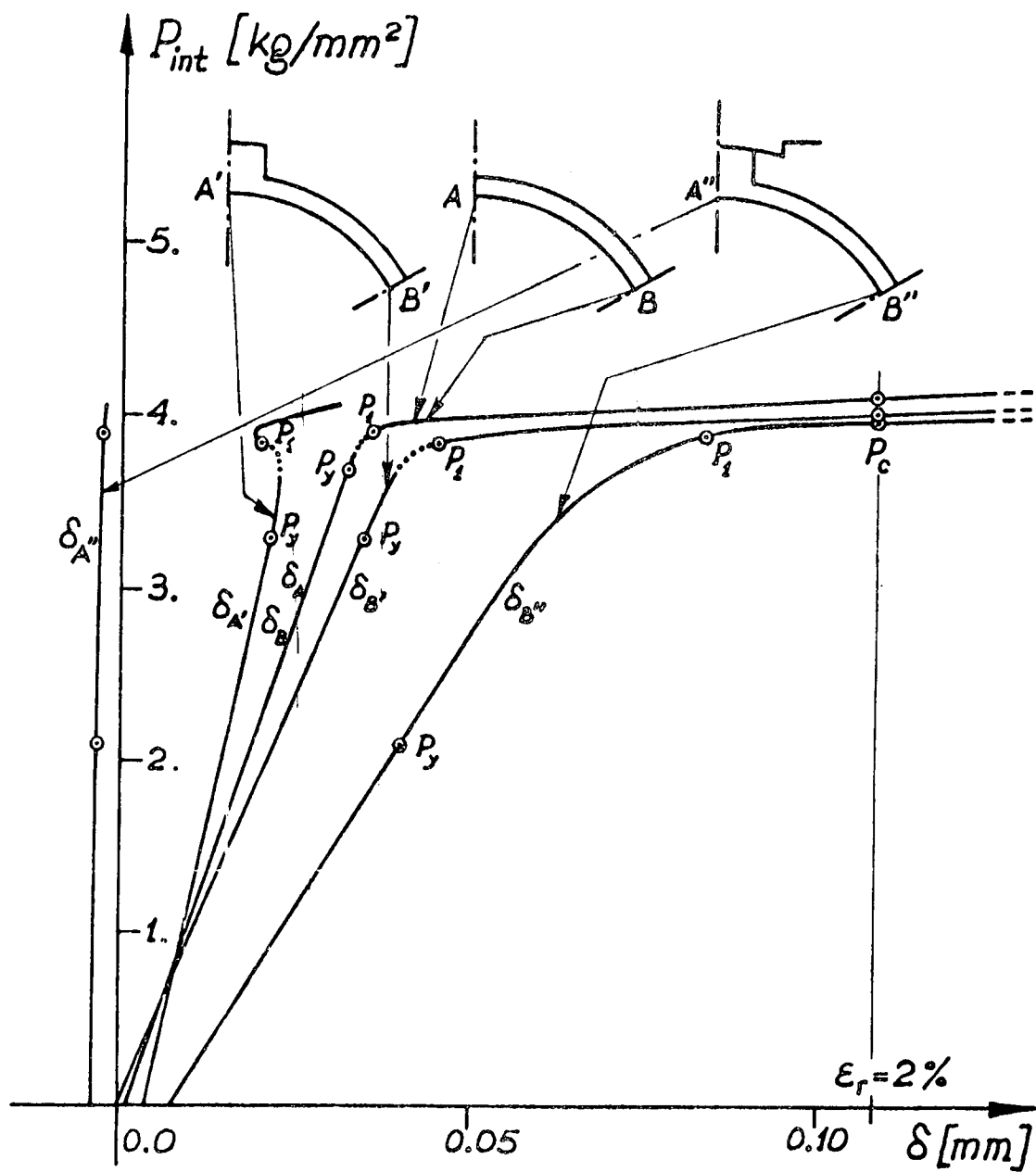


Figura 8.- Deformaciones en puntos seleccionados de la vaina, en función de la presión interna aplicada.

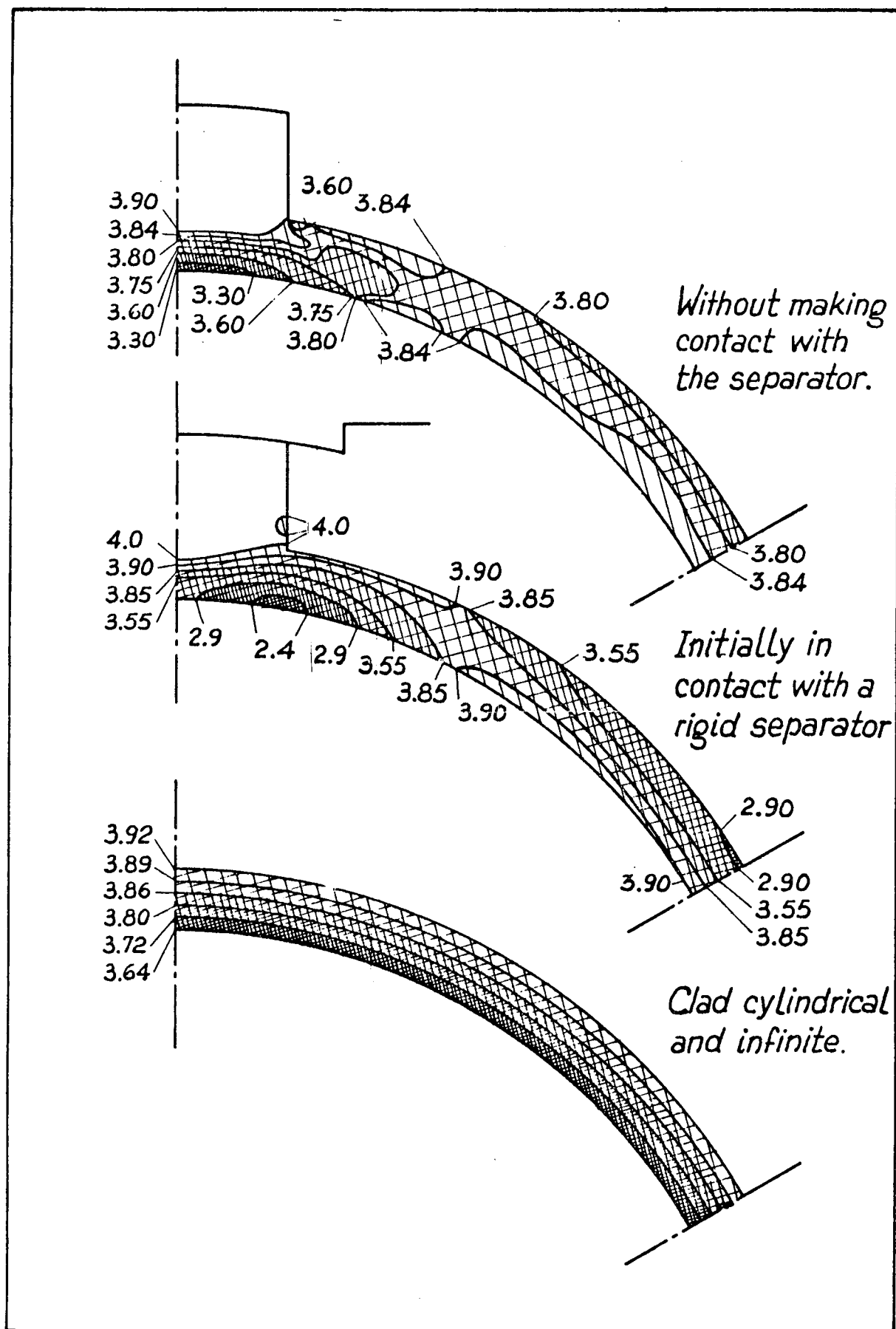


Figura 9.- Avances de la zona plástica para diferentes presiones, en los distintos casos estudiados.