

SIMULACION POR ELEMENTOS FINITOS DE LOS PRIMEROS INSTANTES DE LA EXTRUSION DE VAINAS DE COMBUSTIBLE PARA CENTRALES NUCLEARES

SANTIAGO URQUIZA
y
FERNANDO BASOMBRIO

*División Mecánica Computacional-DIA,
Centro Atómico Bariloche,
Comisión Nacional de Energía Atómica,
8400 Bariloche,
Río Negro, Argentina*

RESUMEN

Se simularon los primeros instantes del proceso de extrusión de vainas de ZRY-4, utilizando el código de Elementos Finitos VELPEF, y un modelo para el material de tipo viscoelástico pseudoplástico.

Se estudiaron los campos de tensiones, presiones y velocidades, presiones en la matriz, el mandril, el contenedor y el pistón, la influencia en las anteriores de la fricción, la geometría y la temperatura.

SUMMARY

ZRY-4 cladding extrusion first moments were simulated, by VELPEF finite elements code, and a viscoelastic pseudoplastic model for the material.

Stress, strain, pressure and velocity fields, pressure on the die, mandrel, container and piston were studied, as well as the influence of friction, geometry and temperature on the former.

INTRODUCCION

El trabajo que hemos encarado¹ está destinado a obtener información cualitativa y cuantitativa acerca de algunas de las principales variables del proceso de extrusión de vainas de Zircaloy-4 (Zry-4), desarrollo que es llevado a cabo en la Comisión de Energía Atómica y que tiene como objetivo reemplazar los tubos de Zry-4 importados, por otros de fabricación nacional.

El modelado del proceso de extrusión es un problema complejo, dado que involucra, entre otros, acoplamientos termomecánicos fuertes, grandes deformaciones y contactos con fricción.

Recibido: Marzo 1989

Para el cálculo que se describen, se utilizó el código VELPEF². Este código fue formulado bajo la hipótesis de pequeñas y moderadas deformaciones, desacoplamiento termomecánico y vínculos bilaterales, situación que encuadra nuestro análisis en los primeros instantes del proceso, donde dichas hipótesis son válidas. Debemos remarcar que la idea de aplicar un programa de deformaciones moderadas al estudio de la extrusión está fundamentada en lo siguiente: este problema es de tipo elasto-viscoplástico pero dado que el módulo de elasticidad es elevado los efectos elásticos se desarrollan casi completamente en pequeñas deformaciones. Entonces habiendo así obtenido casi toda la información posible sobre el comportamiento elástico en pequeñas deformaciones, podremos pasar a la simulación de la parte estacionaria del proceso con una formulación de fluido viscoplástico, sin tener que considerar elasticidad en grandes deformaciones.

Por último, haremos una breve descripción del proceso (por mayores detalles, ver referencia [1]). En la Figura 1, observamos un esquema de la extrusión directa de tubos, que es objeto de este trabajo. Un tocho de Zry-4 a la temperatura requerida (aprox. 750°C) es presionado a través de un contenedor contra una matriz, ubicándose el mandril en el agujero central del tubo. El anillo de grafito permite que el lingote complete su pasada. Se realizará un análisis de los campos de tensiones, velocidades, de presión sobre los distintos componentes de la extrusora, y de la influencia en lo anterior de la geometría, la temperatura y la fricción.

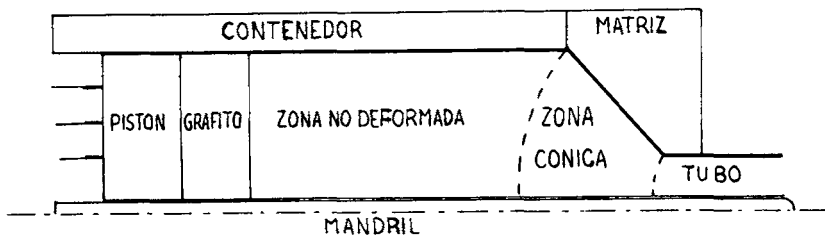


Figura 1.

ECUACION CONSTITUTIVA PROPUESTA PARA EL ZRY-4 A ALTAS TEMPERATURAS Y ALTAS VELOCIDADES DE DEFORMACION

El Zry-4 a altas temperaturas presenta un comportamiento a la deformación, fuertemente sensible a la temperatura y a la velocidad con que dicha deformación es aplicada. Para la tensión de fluencia se observa una dependencia con la temperatura y la velocidad de deformación del tipo³:

$$\dot{E} = Ae^{-B/R \cdot TE} T^n \quad (1)$$

donde:

$$\dot{E} = \text{Velocidad deformación uniaxial.}$$

$T =$ Tensión Uniaxial.
 $A, B, R, n,$ = Constantes.
 $TE =$ Temperatura.

Supondremos además que:

- La tensión de fluencia dependerá de la temperatura y de la velocidad de deformación con la ley expresada por (1). En el rango de deformación considerado despreciaremos el endurecimiento por deformación.
- La temperatura del material no variará durante la simulación y será uniforme (proceso isotérmico).
- Los parámetros elásticos serán constantes.
- En metales las deformaciones viscoplásticas se realizan sensiblemente a volumen constante y no dependerán entonces de la presión hidrostática.

De esta forma el modelo propuesto es del tipo viscoelástico seudoplástico. Las ecuaciones resultantes para un estado de tensión-deformación triaxial son:

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}^e + \mathbf{D}^v \quad (2)$$

con:

$$\mathbf{D}^e = \mathbf{C}\mathbf{T}$$

$$\mathbf{D}^v = \mathcal{L}(\mathbf{S})\mathbf{S}$$

donde:

\mathbf{D} = Tensor velocidad de deformación, definido como $\mathbf{D} = 0.5(\nabla\mathbf{v} + \nabla\mathbf{v})$.
 \mathbf{v} = Vector de velocidad.
 \mathbf{T} = Tensor de tensiones.
 \mathbf{S} = Tensor desviador de tensiones.
 \mathbf{D}^e = Componente elástica del tensor \mathbf{D} .
 \mathbf{D}^v = Componente viscosa seudoplástica del tensor \mathbf{D} .
 \mathbf{C} = Tensor elástico isotrópico de cuarto orden.

Para $\mathcal{L}(\mathbf{S})$ utilizaremos la ley asociativa de Von Mises-Odqvist⁴:

$$\mathcal{L}(\mathbf{S}) = \left(\frac{T_e}{T_o}\right)^n$$

$$T_o = \left[\frac{2}{(3k)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

donde:

k = Constante de fluidez.
 n = Exponente de Norton.
 T_e = Tensión equivalente de Von Mises.

$$T_e = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}}$$

Con lo anterior reescribimos (2) como:

$$\mathbf{D} = \mathbf{C}^{-1} \dot{\mathbf{T}} + \frac{3}{2} k T_e^{n-1} \mathbf{S} \quad (3)$$

Tomando la operación de traza y desviador de (3), resulta:

$$\text{div } \mathbf{v} = \text{tr } \mathbf{D} = \frac{1}{3k} \text{tr } \dot{\mathbf{T}} \quad (4)$$

$$\mathbf{D} - \frac{1}{3} \text{tr } \mathbf{D} = \frac{\epsilon}{2(1+\nu)} \dot{\mathbf{S}} + \frac{3}{2} k T_e^{n-1} \mathbf{S} \quad (5)$$

con:

- k = Módulo de compresibilidad elástico.
- ϵ = Módulo de Young.
- ν = Módulo de Poisson.

Se observa entonces que:

- Puede cumplirse $\mathbf{S} = \text{cte}$ y $\text{tr } \mathbf{T} \neq 0$, i.e., la presión varía por efecto de compresión elástica.
- En el estacionario resultará un campo de velocidades isocórico, $\text{div } \mathbf{v} = 0$.
- En el caso particular de tensión uniaxial estacionario, (3) se reduce a la ley de Norton que es un caso particular de (1), cuando la temperatura de material es constante.

DESCRIPCION DE LOS CASOS ANALIZADOS

En el instante inicial el tocho sólo hace contacto con la matriz dada la presencia de luces entre tocho-contenedor y, tocho-mandril. Con el caso 1, que enseguida se describe comprobaremos que el tocho entra en contacto con el contenedor y el mandril, antes de empezar a fluir por la salida. Se desprecia la fricción, salvo en los casos 6, 7, 8 en los que se hace una estimación de la misma. En las superficies de contacto, se permite libre desplazamiento sólo en la dirección tangente a dicha superficie.

La discretización espacial por el método de elementos finitos la realizamos, suponiendo simetría de revolución, con una red plana de elementos triangulares isoparamétricos de tres nodos y tres puntos de integración, que nos permiten densificar selectivamente en los puntos de mayor concentración de tensiones (Figura 2).

A continuación se describen las distintas situaciones de interés práctico analizadas.

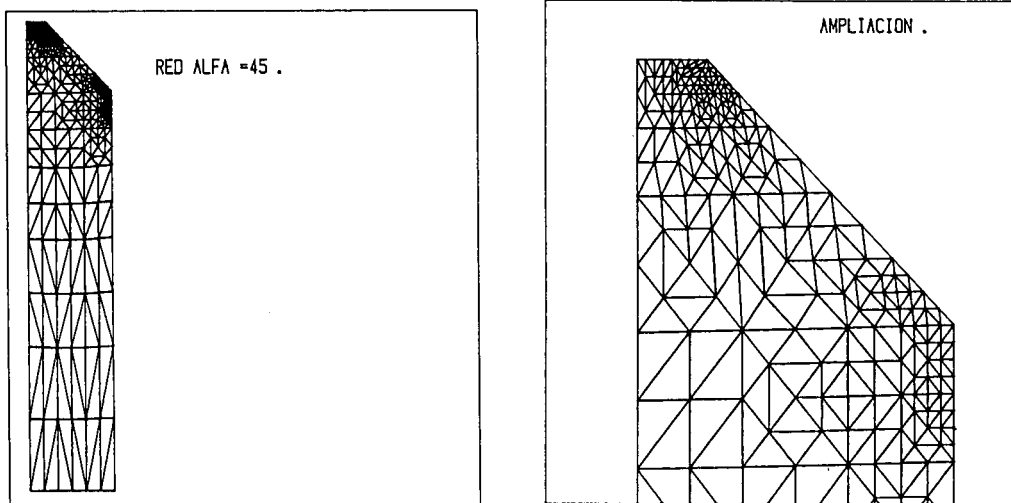


Figura 2.

Caso 1

El tocho está en contacto sólo con la matriz

$$. \alpha = 45[^\circ]$$

$$. VP = 40[\text{mm/seg}]$$

$$. TE = 750[^\circ C]$$

$$. DELTI = 1.25 \times 10^{-3}[\text{seg}]$$

$$. k = 9.1 \times 10^{-6}$$

$$. n = 4.6$$

$$. \epsilon = 4956.0[\text{Kg/mm}^2]$$

$$. \nu = 0.3$$

con:

α = Angulo de la matriz.

VP = Velocidad del pistón.

TE = Temperatura del tocho (constante y uniforme).

$DELTI$ = Paso de la discretización temporal.

ϵ y ν se obtienen de la referencia [5], K y n de la referencia [4].

Caso 2

El tocho está en contacto con la matriz, el contenedor y el mandril. Los parámetros son los mismos que en al Caso 1.

Caso 3

$$. TE = 725[{}^{\circ}C]$$

$$. k = 4.4 \times 10^{-6}$$

$$. \epsilon = 5160.0[\text{Kg}/\text{mm}^2]$$

$$. \nu = 0.3$$

En lo demás idem al Caso 2.

Caso 4

$$. \alpha = 30[{}^{\circ}]$$

En lo demás idem al Caso 2.

Caso 5

$$. \alpha = 30[{}^{\circ}]$$

En lo demás idem al Caso 3.

Caso 6

Se introduce fricción contra las paredes. Se toman los valores de tensión normal a las superficies de contacto obtenidos del Caso 2, en el tiempo 5.0×10^{-2} seg. (corresponde a 2 mm) de desplazamiento del pistón) se las multiplica por un coeficiente de fricción $\mathcal{L} = 0.01$ y se introducen como esfuerzos de corte en la superficie.

Caso 7

Idem Caso 6 tomando los valores del Caso 4.

Caso 8

Idem Caso 7 con $\mathcal{L} = 0.002$.

RESULTADOS

En los gráficos de esta sección se muestra una selección de los resultados más significativos para el análisis.

Todos los casos fueron corridos hasta un tiempo de 5.0×10^{-2} seg. que equivale a 2 mm de desplazamiento del pistón. A este tiempo alguna de las componentes del tensor de deformación superaron el 5 por ciento de deformación de 5 elementos localizados en la salida y en la zona de unión contenedor matriz.

La deformación total promedio de acuerdo a la norma:

$$EP = \sqrt{\sum_{e=1}^{NEL} E_{ij}^e E_{ij}^e \frac{A^e}{A}}$$

donde:

A = Area de la sección plana.

A^e = Area del elemento e .

NEL = Número total de elementos.

E_{ij} = Componente ij del tensor de deformación.

fue aproximadamente del 1 por ciento para todos los casos. Es decir que, en la mayoría de los elementos, la deformación moderada localizada en los elementos de la salida. Por esta razón no se siguió avanzando con las corridas más allá de los 2 mm de desplazamiento del pistón.

Caso 1

Se observa la estabilización de la presión en un valor relativamente bajo dado que el tocho no se encuentra confinado (Figura 3). Lo más relevante de este caso es el hecho que se deduce de la observación del campo de velocidades (Figura 4). Vemos que el tocho va a llenar las luces tocho-contenedor antes de empezar a salir por la punta.

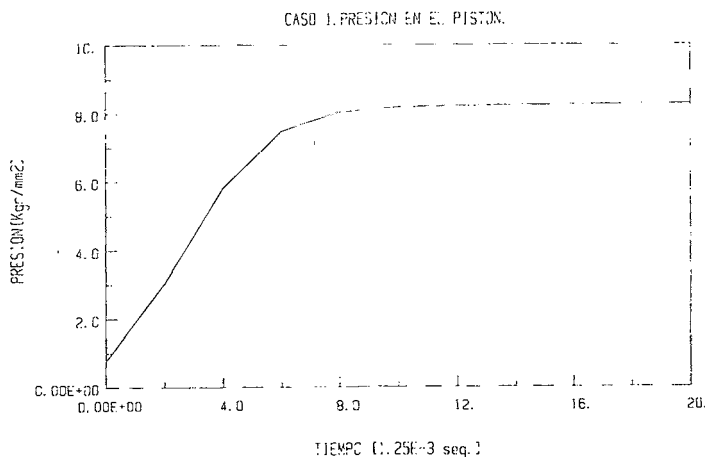


Figura 3.

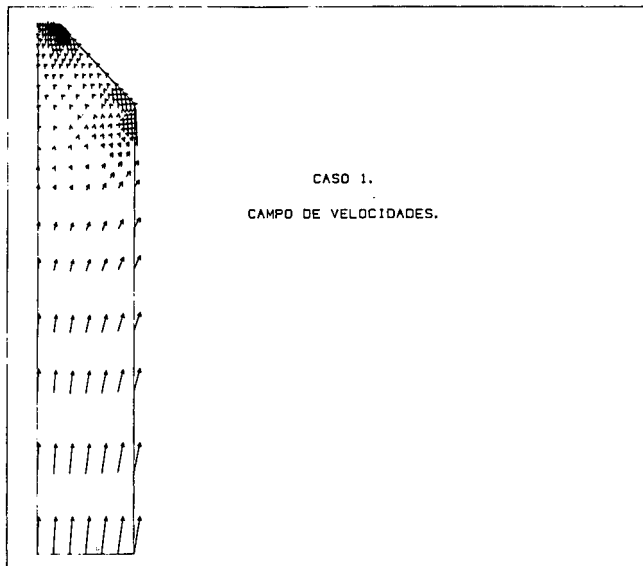


Figura 4. Caso 1, Campo de velocidades.

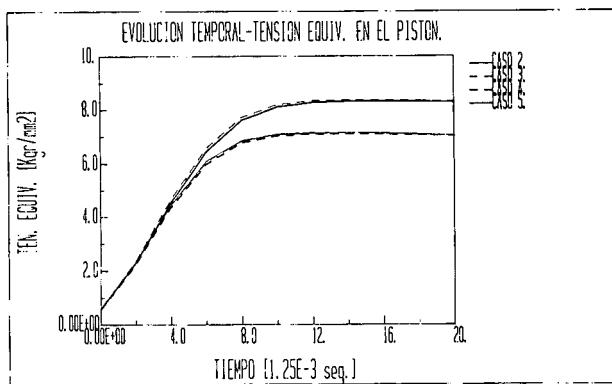
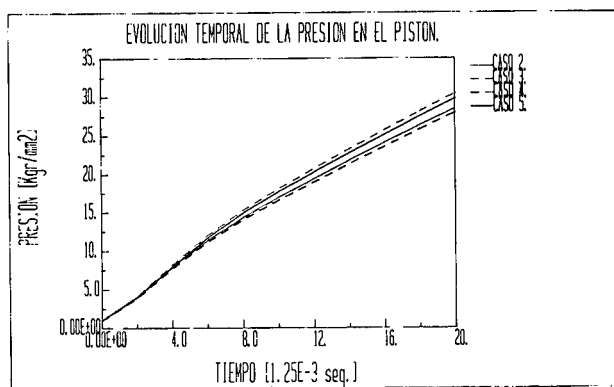


Figura 5.

Casos 2, 3, 4, 5

En la Figura 5 observamos la evolución temporal de la tensión equivalente de Von Mises y de la presión en el pistón.

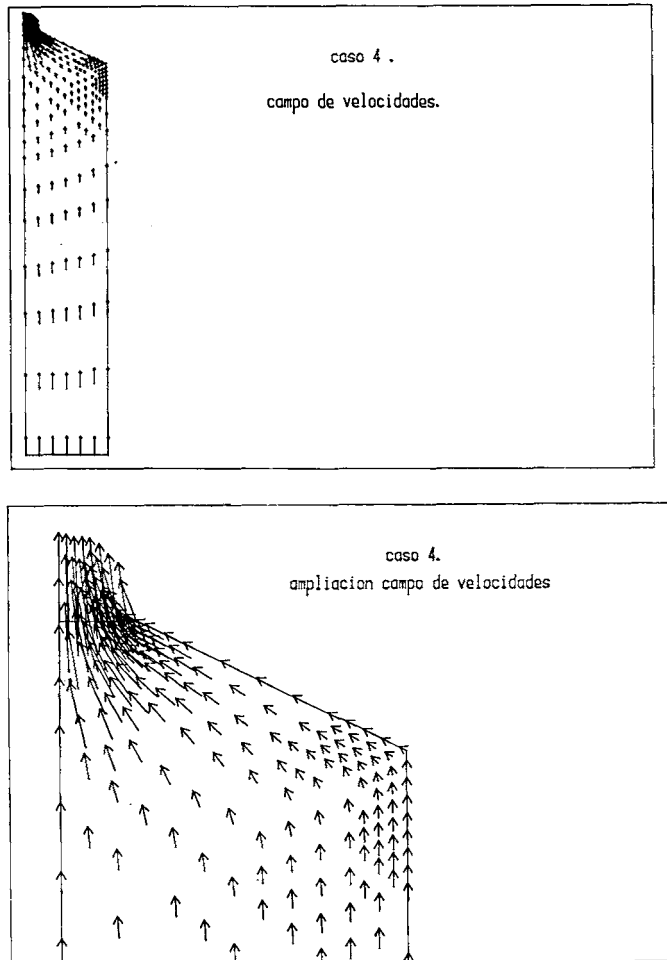


Figura 6.

Se observa que: en el instante de interrupción del cálculo la presión todavía no se ha estabilizado, está lejos de alcanzar un valor constante, esto es debido a que el tocho aún se sigue comprimiendo elásticamente dado que no se cumple

$$V_p \cdot A_p = V_s \cdot A_s$$

donde:

V_p = Velocidad del pistón.

A_p = Area del tocho en contacto con el pistón.

V_s = Velocidad de salida.
 A_s = Area de salida.

es decir $\text{div } v \neq 0$, esto puede interpretarse por medio de la ecuación (4).

No se observan diferencias importantes en la presión sobre el pistón debidas a los ángulos de las matrices. Inclusive la presión es levemente menor para el ángulo de 30° , dado que en ese caso el volumen del tocho es mayor. Se puede ver la diferencia en las presiones de 7 por ciento, debido a la temperatura, entre los casos del $750^\circ C$ y $725^\circ C$, siendo mayores, para la temperatura menor, como es esperable, dado que la fluidez del material disminuye al disminuir la temperatura. Esta diferencia va en aumento a medida que los efectos elásticos van perdiendo peso frente a los viscosos.

Para el caso 4 observaremos el campo de velocidades en la Figura 6.

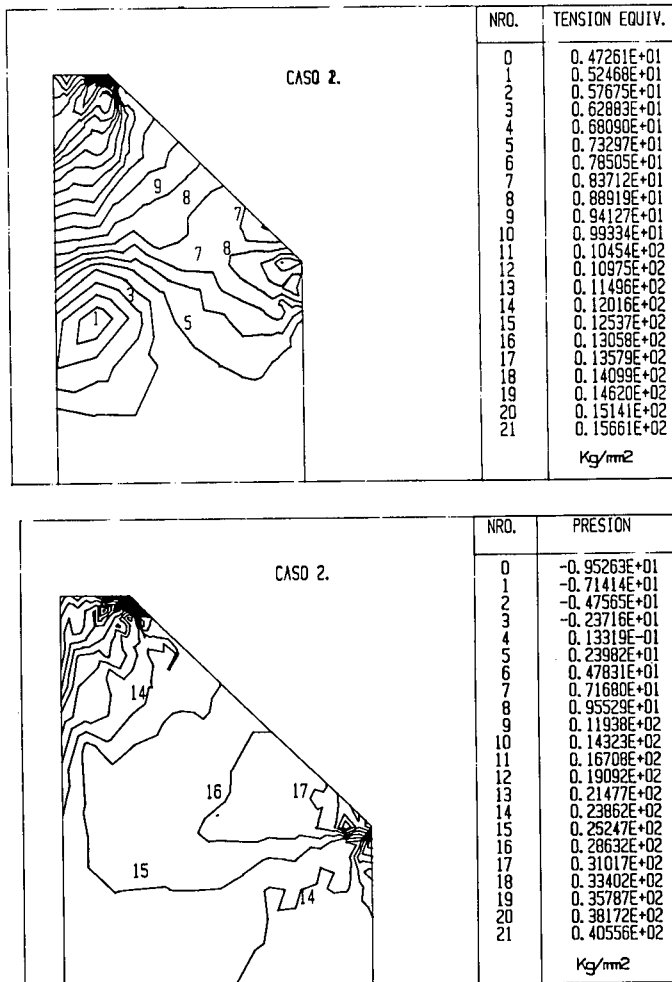


Figura 7.

En cuanto a los campos de tensiones tienen características similares en todos los

casos (Figura 7,8,9).

Los campos de presiones muestran un pico en el extremo superior de la matriz. Se observa también que el proceso es prácticamente hidrostático ya que la zona de mayor gradiente de presión está concentrada a la salida. En cuanto al campo de tensiones equivalentes se ve una zona de fuerte compresión sin deformación en la zona del mandril donde se observa un pico en la presión contra este dispositivo (Figuras 10 y 11).

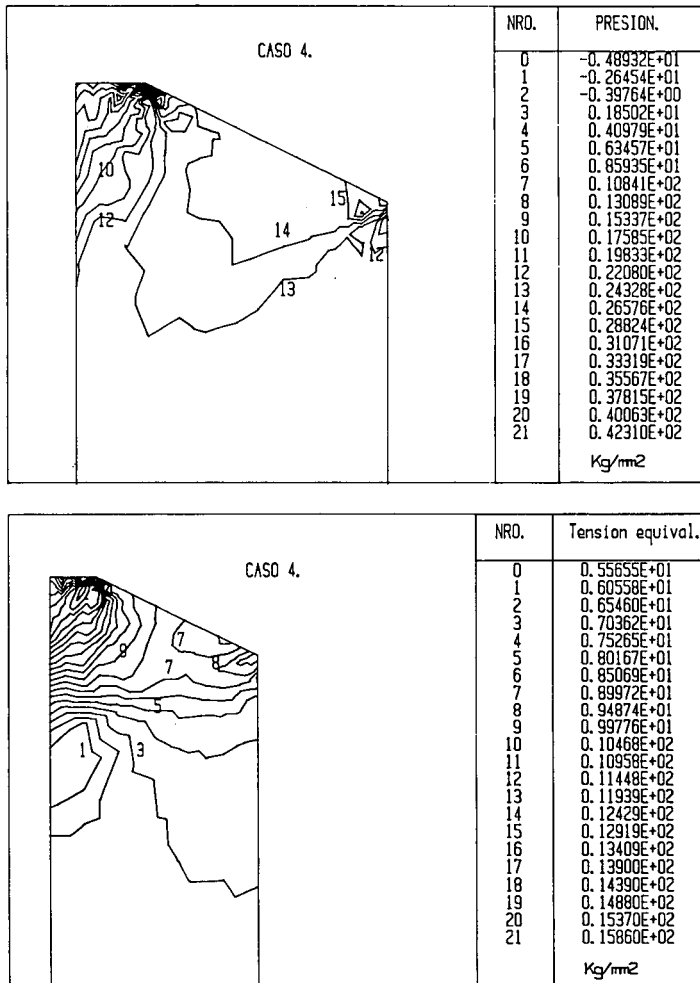


Figura 8.

Las presiones en el contenedor son casi uniformes, bajando lógicamente en el extremo en contacto con la matriz, dado que allí el material tiende a seguir la dirección de esta.

Las presiones en la matriz se muestran más uniformes para los casos $\alpha = 30^\circ$.

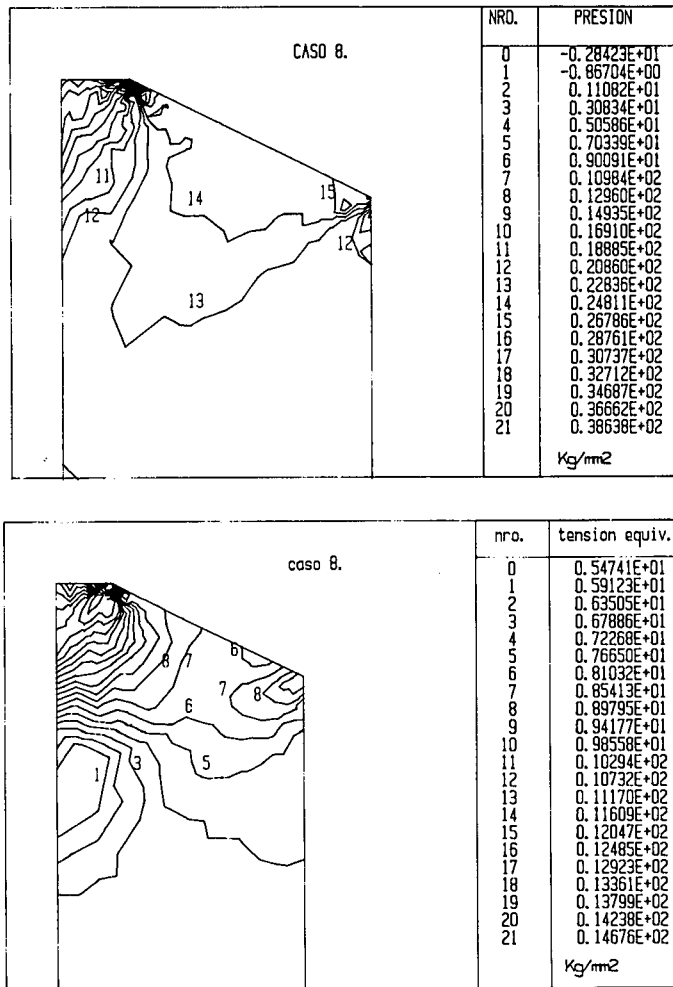


Figura 9.

Casos 6, 7, 8

La incorporación estimada de fricción en la superficie externa del tocho, no ha alterado significativamente ninguno de los campos. La presión en el pistón se ha visto incrementada en un valor igual a la diferencia necesaria para el equilibrio de las fuerzas de rozamiento.

CONCLUSIONES

Como era esperable salvo en el Caso 1 no se ha alcanzado el estado estacionario dado que la condición $div \mathbf{v} = 0$ no se logra dentro de las pequeñas deformaciones. Consecuentemente, la componente elástica será causa del crecimiento hidrostático de la presión debido a compresión del material, influyendo en menor grado sobre la componente desviadora de la tensión, íntimamente ligada a los efectos viscosos

(ecuaciones 4, 5). Los puntos a resaltar son:

- La temperatura tiene marcada influencia sobre la presión de extrusión. Esta dependencia explicaría parte del pico de presión que se observa en el proceso real, durante la primera etapa de la extrusión y antes de alcanzarse el estado estacionario, debido a que se han consignado inhomogeneidades en la temperatura del horno, que redundarían en el enfriamiento considerable de la punta del tocho.
- El proceso es prácticamente hidrostático, ya que se observa un fuerte gradiente de presiones a la salida que va disminuyendo, limitando su alcance a la zona cónica, quedando el resto del tocho a presión prácticamente constante.
- Se observa un mayor pico de presión sobre el mandril (Figuras 10 y 11) para la matriz de 45°, que redundaría en beneficio para el autocentrado del mismo.

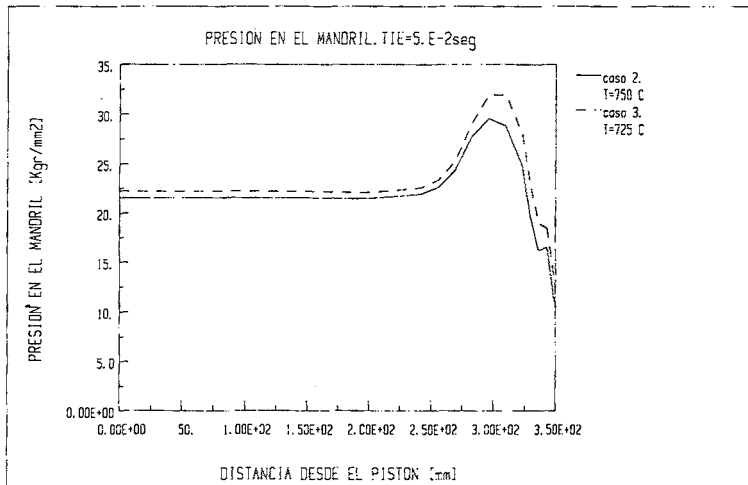


Figura 10.

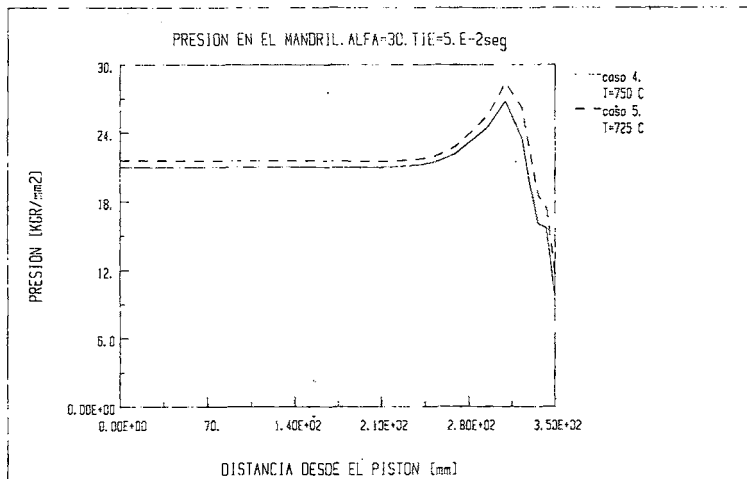


Figura 11.

- Los campos de velocidades resultan en todos los casos muy uniformes y además en todos los vínculos las tensiones son de compresión (no se observan tendencias de inclusiones de la capa exterior). Por lo tanto, no se pueden deducir de los cálculos realizados, causas de defectos en el producto terminado.
- El rozamiento no ha introducido alteraciones importantes en ninguno de los campos.
- Se ha estudiado los efectos elásticos del proceso de extrusión, observándose que tienen tiempos característicos muy cortos respecto al tiempo de extrusión esto se puede observar en la Figura 5, en la cual la tensión equivalente en el pistón se estabiliza rápidamente mientras el tocho acumula energía elástica comprimiéndose hidrostáticamente, esta estabilización se verá afectada a medida que el tocho escurra más por la salida, pero una vez que el flujo saliente iguale al entrante, rápidamente será alcanzado el estacionario. Lo anterior nos permite pasar a la simulación de la parte estacionaria del proceso con la formulación de fluidos viscoplásticos, objetivo presente de los autores de este trabajo. Cabe mencionar en este punto, que los primeros resultados obtenidos⁶ con la formulación de fluido muestran una buena concordancia con los presentes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. D. Banchik de PFFAE-CNEA por el estímulo recibido para resolver este problema, también al Dr. D. Banchik y al Dr. S. Rodriguez (CNEA) por la información suministrada.

REFERENCIAS

1. S. Urquiza, "Simulación por Elementos Finitos de los primeros instantes de la extrusión de vainas de elementos combustibles de centrales nucleares", Trabajo especial de la carrera de Ingeniería Nuclear, Instituto Balseiro, Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica, S.C. de Bariloche, (1988).
2. S. Felicelli, *VELPEF*, "Programa para la simulación numérica del comportamiento termo-elasto-viscoplástico de Materiales", Trabajo Especial de la Carrera de Ingeniería Nuclear, Instituto Balseiro, CAB, CNEA, Bariloche, (1985).
3. R. Feijoo y E. Taroco, "Viscoplasticidad y su formulación variacional", *II Escola de Matemática Aplicada*, Vol. 2, Laboratorio de Cálculo-CBPF, Rio de Janeiro, (1980).
4. J.J. Jonas, "Recuperación y recristalización durante deformación a altas temperaturas", Proyecto Multinacional de Tecnología de Materiales-OEA-CNEA, Buenos Aires, (1981).
5. H. Rosinger y D. Northwood, "The elastic properties of zirconium alloy fuel cladding and pressure tubing materials", *J. Nuc. Mat.*, Vol. 79, pp. 170-179, (1979).
5. G. Buscaglia, "Elementos finitos con énfasis en viscoplasticidad y acoplamiento termomecánico", Trabajo especial de la carrera de Ingeniería Nuclear, Instituto Balseiro, Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica, S.C. de Bariloche, (1989)