



**ESTRICCIÓN DE BARRAS METÁLICAS CILÍNDRICAS:
SENSIBILIDAD FRENTE AL TAMAÑO Y TIPO DE LAS IMPERFECCIONES**

Carlos García Garino,

Instituto Tecnológico Universitario, Facultad de Ingeniería, UNC,
Centro Universitario, Parque San Martín, 5500, Mendoza, Argentina.

Anibal Mirasso,

Industrias Metalúrgicas Pescarmona S.A., Carril Rodríguez Peña 2451,
5503 San Francisco del Monte, Godoy Cruz, Mendoza, Argentina.

Silvia Raichman,

Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional,
Rodríguez 273, 5500, Mendoza, Argentina.

José María Goicolea,

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Universidad Politécnica de Madrid,
Zona Universitaria, 28080, Madrid, España.

RESUMEN

El ensayo de tracción simple de un espécimen metálico axisimétrico se caracteriza, en presencia de grandes deformaciones, por una estricción localizada en la zona central. La respuesta medida en función de la carga versus el desplazamiento presenta un régimen precrítico con un estado homogéneo de deformaciones, seguido de la carga máxima y un punto de bifurcación que origina la trayectoria postcrítica. En la práctica, la solución del problema suele aproximarse resolviendo un espécimen imperfecto con una perturbación adecuada. En este trabajo se estudia la sensibilidad de la respuesta frente al tamaño de las imperfecciones iniciales y se presentan algunas sugerencias acerca del tipo de imperfección a emplear en el análisis numérico.

ABSTRACT

In the presence of large deformations, the tension test of an axisymmetric metal specimen is characterized by a localized necking in the central zone. The load-displacement response presents a precritical regime with an homogeneous state of deformations, followed by the maximum load and a bifurcation point that initiates the postcritical path. In practice, the problem is approached by the solution of an imperfect specimen with an appropriate imperfection. In the present paper, the sensitivity to the size of the initial imperfections is studied. Some suggestions about the type of the imperfections to use in the numerical analysis are presented.

INTRODUCCION.

Los procedimientos de ensayo normalizados para tracción en metales dúctiles no proporcionan la información necesaria para elaborar modelos constitutivos con grandes deformaciones. Los ensayos de tracción de barras cilíndricas en los que se llega a la localización geométrica de las deformaciones en un cuello delgado permiten obtener los datos requeridos para describir el comportamiento del material. Estos procedimientos conocidos desde hace tiempo [1,2], han sido empleados como ejemplos de aplicación y validación de formulaciones y métodos de cálculo para grandes deformaciones [3,4,5,6,7].

La estricción de la barra traccionada está asociada a una bifurcación en la respuesta de los puntos situados en la zona de localización de deformaciones [8]. La estructura teórica para el análisis clásico de bifurcación en elasto-plasticidad fue presentada por Hill [9] en su teoría general de unicidad y estabilidad en sólidos elasto-plásticos. Desviaciones a partir de las condiciones idealizadas de carga, geometría del espécimen y homogeneidad del material, resultan en una reducción de las cargas para las cuales ocurre la falla. Estas reducciones pueden ser fuertes o moderadas según el tipo de problema [10]. La investigación de la sensibilidad ante imperfecciones en las inestabilidades por estricción es importante, ya que en la realidad las imperfecciones no pueden ser evitadas y son mandatorias en lo que se refiere a los mecanismos de iniciación y concentración de deformaciones que conducen a la estricción.

Un estudio de inestabilidades por estricción requiere una teoría de deformaciones finita ya que justamente las deformaciones de interés son grandes y las reducciones del área de la sección transversal debido a la deformación son cruciales para este fenómeno. Un análisis detallado del comportamiento fuertemente no lineal en la estricción sólo se obtiene a partir del análisis de la respuesta postcrítica y de la sensibilidad a imperfecciones iniciales. Recientemente Goicolea *et.al.* [11] han tratado aspectos teóricos y numéricos correspondientes a la simulación computacional del problema y a la identificación de los parámetros del material. Una discusión de las formulaciones teóricas y de las soluciones numéricas puede encontrarse en el trabajo de García Garino *et.al.* [12].

En este trabajo se analiza el proceso de estricción de especímenes axisimétricos traccionados empleando el Método de Elementos Finitos, en base a un modelo hiperelástico implícito [6]. La información del comportamiento constitutivo del material se obtiene a partir de los resultados de un programa experimental de ensayos de estricción en aluminio HE-30 recocido [7]. Se modelan distintas probetas con imperfecciones geométricas. Los resultados obtenidos se analizan desde un punto de vista local y otro global. Se comparan los mismos y se estudia la sensibilidad ante imperfecciones.

ANALISIS DE LA ESTRICCIÓN.

En probetas metálicas cilíndricas sometidas a tracción, la uniformidad del campo de tensiones y deformaciones ocurre sólo durante una primera fase del ensayo en la que la carga es creciente. Luego de haber alcanzado la carga máxima, las deformaciones se localizan en un cuello de estricción en el centro del espécimen y la carga resistida disminuye. El material fuera de la zona del cuello descarga elásticamente, en tanto que en la zona de la estricción continúa la carga plástica hasta alcanzar la rotura. En esta segunda fase, las distribuciones de tensiones y deformaciones en el cuello del espécimen dejan de ser uniformes, verificándose un estado tensional triaxial. Existe evidencia experimental acerca de la uniformidad de las tensiones radiales y tangenciales [1,2,7]. A partir de este hecho, el análisis en la zona del cuello se simplifica considerablemente.

Teniendo en cuenta que durante la estricción las deformaciones elásticas son despreciables, la incompresibilidad del flujo plástico, y la constancia de las deformaciones radial y circunferencial en la sección del cuello, se obtiene que la deformación axial ϵ_z está dada por:

$$\varepsilon_z = -2 \ln \frac{D}{D_0}$$

siendo D y D_0 los diámetros actual e inicial respectivamente.

SIMULACION NUMERICA.

Para la solución numérica del problema se modelan las probetas considerando una geometría cónica en lugar de la cilíndrica, siendo la sección central la de menor ancho. Los resultados numéricos se obtienen con el código SOGDE de elementos finitos, basado en un modelo elastoplástico con grandes deformaciones [6].

En la *Figura 1* se indican los datos del espécimen analizado, así como también la malla de elementos finitos empleada. Se consideraron las siguientes propiedades del material: $E=67$ Gpa, $\nu=0.3$, $\sigma_y = 239$ - 270 Mpa.

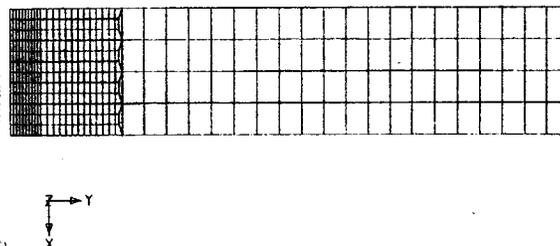


Figura 1. Datos del espécimen y malla de elementos finitos.

Los resultados de los ensayos de tracción indicados en [7] permitieron ajustar la ley constitutiva del material mediante un modelo elastoplástico isotrópico de tipo J_2 con endurecimiento exponencial. La superficie de fluencia queda definida por

$$Y(\varepsilon_p) = \sigma_{eq}$$

siendo ε_p la deformación plástica equivalente y $\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} s \cdot s}$ donde s es el tensor desviador de tensiones. La ley de endurecimiento está dada por:

$$Y(\varepsilon_p) = A \varepsilon_{eq}^n$$

donde ε_{eq} es la deformación uniaxial equivalente definida como

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\sigma_{eq}}{E} + \varepsilon_p$$

y las constantes A y n son parámetros determinados de los ensayos [7]:

$$A = 181.7 \text{ Mpa} ; n = 0.159$$

Por medio del análisis de la respuesta obtenida para los distintos especímenes, en los que se varía la geometría reduciendo el radio de la sección central, se efectúa el estudio de la sensibilidad frente a las imperfecciones.

La *Figura 2* muestra un gráfico de la carga total versus L/L_0 donde L es la longitud real y L_0 la longitud inicial. La carga total para la barra perfecta alcanza su valor máximo P_{max} un poco después del cual se inicia la descarga plástica en los extremos de la barra.

Se observa que la carga total máxima de las barras imperfectas concuerdan con el valor correspondiente al de la barra perfecta. Luego de haber alcanzado el punto máximo, se inicia la discrepancia entre las curvas correspondientes a las barras imperfectas y la de la barra perfecta.

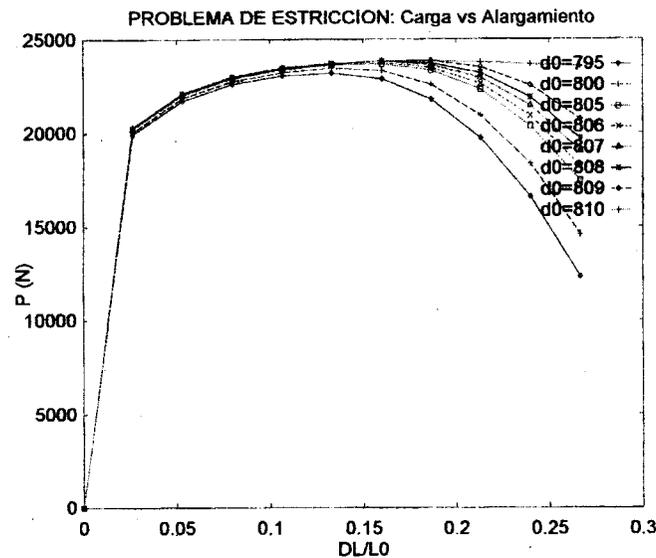


Figura 2. Evolución de la carga axial P frente al alargamiento nominal L/L_0 .

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD LOCAL.

La *Figura 3* muestra los resultados de la carga total axial P frente a la deformación logarítmica en la sección de estricción. Esta última se obtiene aplicando la ec.(1). En todos los casos se observa un aumento de la carga hasta un valor máximo, a partir del cual la carga disminuye a la vez que se localizan las deformaciones. La sensibilidad a las imperfecciones se manifiesta porque los mismos sucesos ocurren a tiempos distintos para las distintas barras.

Por otra parte, es interesante destacar la uniformidad de la respuesta, hecho que se justifica por tratarse de la misma ecuación constitutiva (ec.(3)). Como además el área es función de la reducción del diámetro, la integración de las tensiones y la carga máxima dependen sólo de la relación D/D_0 entre el diámetro actual y el diámetro inicial en la sección central del cuello.

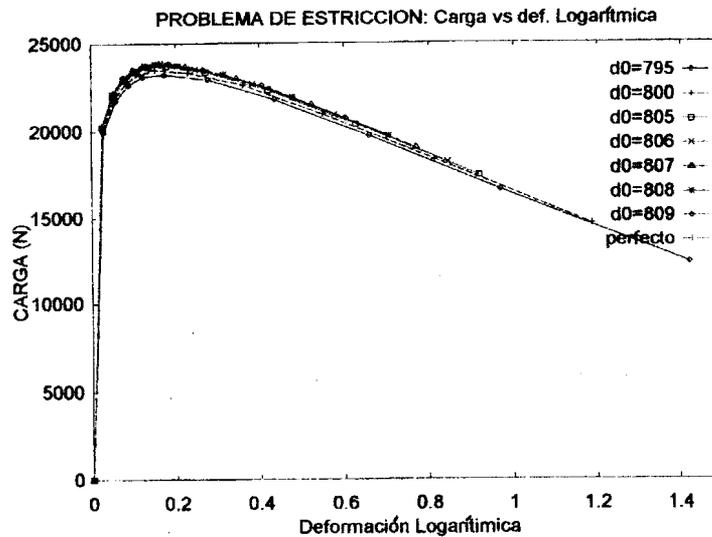


Figura 3. Carga axial P frente a la deformación logarftmica axial en la sección de estricción.

ANÁLISIS GLOBAL DE SENSIBILIDAD.

En este caso se presentan resultados que caracterizan la respuesta en función de un parámetro global dado por la relación L/L_0 .

La Figura 2 muestra que para los mismos alargamientos la carga es sensible a las imperfecciones en el régimen postcrítico, que es otra manera de indicar el resultado del punto anterior .

La mencionada sensibilidad se puede ilustrar además, comparando los perfiles de la geometría deformada para las diferentes imperfecciones, como se observa en la Figura 4. Este efecto también puede verse al comparar la evolución de la estricción (relación D/D_0) en función del cociente L/L_0 para los distintos modelos estudiados (Figura 5).

En la Figura 6 se muestran las curvas de sensibilidad ante imperfecciones de la relación de cada barra respecto a la barra original. Para el desplazamiento impuesto $u=5.0$ prácticamente no hay diferencia entre las barras perfecta e imperfectas. Cuando el desplazamiento impuesto se duplica, la curva de sensibilidad tiene una fuerte pendiente en el origen. Muy pequeñas deformaciones son suficientes para disparar el fenómeno estudiado. A medida que el tamaño de las imperfecciones aumenta, la influencia relativa de las mismas disminuye, efecto que también se puede observar en las Figuras 4 y 6.

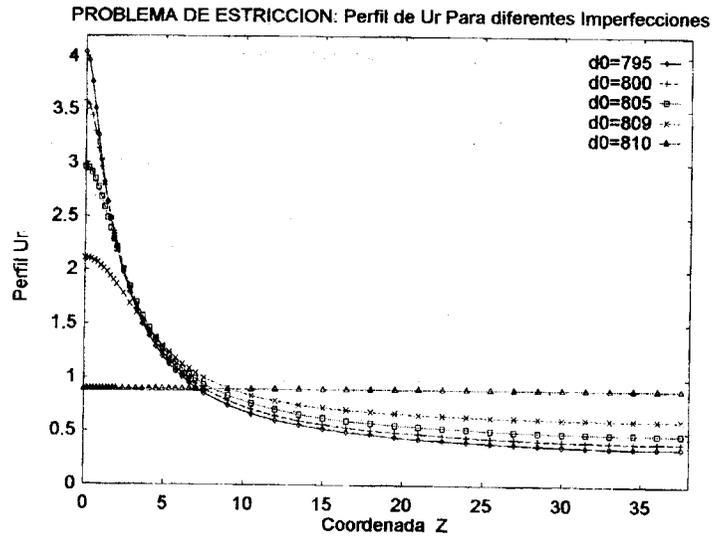
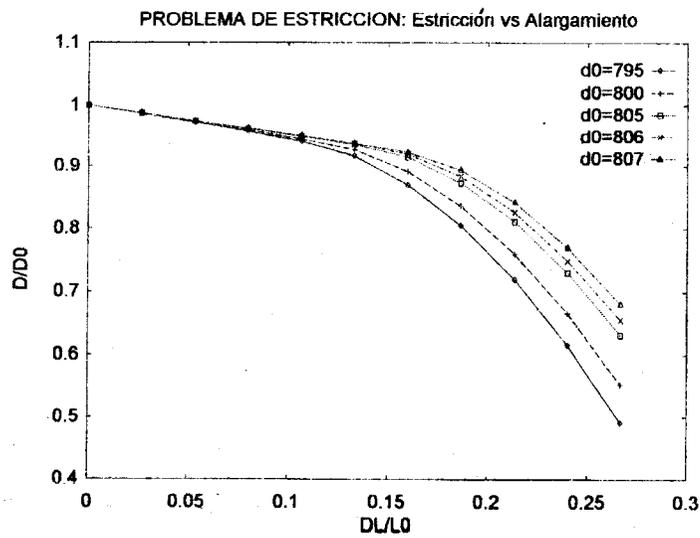


Figura 4. Perfiles.

Figura 5. Evolución de la estricción del cuello (D/D_0) frente al alargamiento nominal L/L_0 .

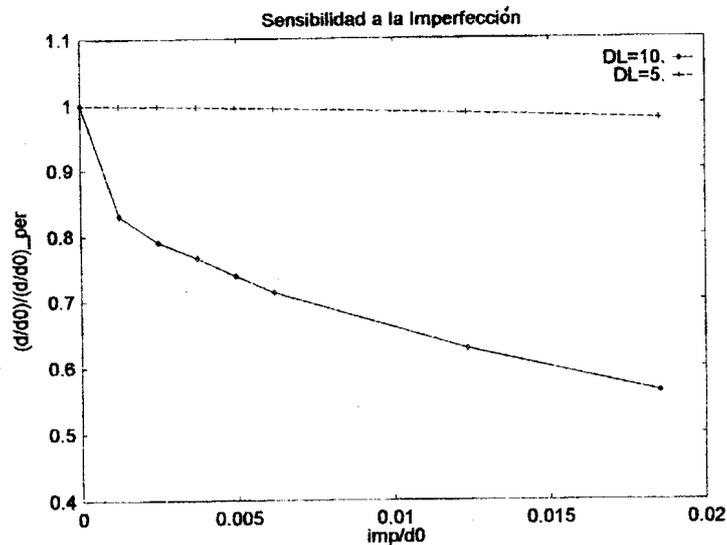


Figura 6. Curva de sensibilidad ante imperfecciones de la relación r/t_0 de cada barra respecto a la barra perfecta

CONCLUSIONES.

Una comprensión detallada del comportamiento fuertemente no lineal en los problemas de inestabilidad por estricción se puede obtener a partir del análisis de la respuesta postcrítica y del estudio de la sensibilidad ante imperfecciones iniciales.

Los resultados presentados indican que el problema de la barra cilíndrica traccionada es altamente sensible a imperfecciones iniciales. Su influencia relativa en la solución disminuye con el tamaño de las mismas. El análisis local de las imperfecciones permite confirmar que la respuesta en la zona de la estricción sólo depende de la relación entre el diámetro real en la sección central del cuello y el diámetro inicial.

REFERENCIAS.

- [1] BRIDGMAN, P.W.: "The stress distribution at the neck of a tensile specimen." *Trans. Amer. Soc. Metals*, 32, pp.553-574, (1944).
- [2] DAVIDENKOV, N.N., SPIRIDINOVA, N.I.: "Analysis of the state of stress in the neck of a tension test specimen", *Proc. Amer. Soc. Testing Mater*, 46, pp. 1147-1158. (1946).
- [3] WILKINS, M.L. "Third Progress report of light armor program". Lawrence Livermore Natl. Lab., Univ. of California, Rept UCRL-50460, (1968).

- [4] WILKINS, M.L.: "Mechanics of penetration and perforation", *Int. J. Eng. Sci.*, 16, pp. 793-807 (1978).
- [5] NORRIS, D.M. et al.: "A Computer simulation of the tensile test", *J. Mech. Phys. Solids*, 26, pp. 1-19 (1978).
- [6] GARCIA GARINO, C.: *Un Modelo Numérico para el Análisis de Sólidos Elastoplásticos Sometidos a Grandes Deformaciones*. Tesis Doctoral, Univ. Politécnica Cataluña (1993).
- [7] GOICOLEA, J.M.: *Numerical Modelling in Large Strain Plasticity with Application to Tube Collapse Analysis*, Ph.D. Tesis, Univ. of London, (1985).
- [8] NEEDLEMAN, A., TVERGAARD, V.: "Finite element analysis of localization in plasticity", en *FE Special Problems in Solid Mechanics*, 5, pp. 94-157, ed. Oden y Carey, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, (1984).
- [9] HILL, R.: "A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids", *J. Mech. Phys. Solids*, 6, pp.236-249, (1958).
- [10] TVERGAARD, V.: "Bifurcation and imperfection sensitivity at necking instabilities", *ZAMM*, 60, pp. 26-34, (1980).
- [11] GOICOLEA, J.M., GABALDON, F., GARCIA GARINO, C.: "Interpretación de la estricción en el ensayo de tracción empleando modelos hipoplásticos e hiperelásticos", *Métodos Numéricos en Ingeniería*, SEMNI, ed. Doblare M. et al., 1, pp.875-885, , Barcelona, (1996).
- [12] GARCIA GARINO, C., GOICOLEA, J.M., GABALDON, F.: "Simulación numérica del ensayo de tracción simple", V Congreso Argentino de Mecánica Computacional, *MECOM 96*, San Miguel de Tucumán, Argentina, (1996).