Modelización del comportamiento elástico de los polvos metálicos

M.D. Riera(*) y J.M. Prado(*)

Resumen En este trabajo se estudia el comportamiento a deformación elástica de polvos metálicos compactados hasta distintas densidades, mediante ensayos de compresión uniaxial en carga y descarga aplicados sobre los compactos. Se aplica un modelo fenomenológico que relaciona exponencialmente la deformación volumétrica elástica y la componente hidrostática de la tensión. Aunque un análisis completo debería incluir la deformación elástica desviadora, aquí sólo se presenta la componente volumétrica.

Palabras clave: **Pulvimetalurgia. Polvos metálicos. Compactación. Elasticidad de porosos. Modelización.**

Modelling of the elastic behaviour of metallic powders

Abstract In this work the elastic behaviour of metal powders compacted to different densities is studied. The authors apply a model based on the experimental observation that the elastic volumetric strain and the hydrostatic component of the applied stress are exponentially related. While a complete analysis should include both the volumetric and deviatoric components of the elastic strain, we only present here the first one.

Keywords: **Powder metallurgy. Metallic powders. Compaction. Porous elasticity. Modelling.**

1. INTRODUCCIÓN

En el proceso pulvimetalúrgico industrial, una de las etapas más críticas es la de eyección de la preforma porosa tras la compactación. Al retirar los punzones de compresión, la recuperación elástica puede provocar el fallo, tanto de la preforma como de las herramientas. Por tanto, es imprescindible conocer el comportamiento elástico de las piezas compactadas para poder actuar sobre el diseño del proceso.

En la actualidad, se está trabajando intensamente (1) en el comportamiento elastoplástico de los polvos metálicos durante la compresión, sin que, por ahora, haya un modelo plenamente aceptado. No obstante, hay una tendencia general a utilizar modelos típicamente aplicados a materiales geológicos: modelos de plasticidad de estado crítico, CAM-clay y CAM-clay modificado (2-4), que parecen adaptarse bastante bien a los materiales pulverulentos (5).

En situación todavía más precaria se encuentra el conocimiento de su comportamiento elástico. En la mayor parte de los escasos trabajos publicados al respecto, se aplica una relación en la que la tensión y la deformación elástica están relacionadas a través de un módulo variable con la densidad (6). Pero, los resultados experimentales obtenidos ensayando compactos de diferentes densidades, y hasta de distintas morfología y composición química, muestran un comportamiento no lineal (7).

2. MODELO DE COMPORTAMIENTO

Los modelos de estado crítico (8), ya mencionados anteriormente con respecto al comportamiento plástico, toman como suposición fundamental que la variación de la energía interna recuperable al aplicar a la probeta un incremento de la presión hidrostática, dp, y de la componente desviadora, dq, de la tensión, sólo se debe a los cambios de la componente hidrostática. Estos modelos están basados

(*) Dpto. de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Univ. Politécnica de Cataluña. E.T.S.E.I.B. Avda. Diagonal, 647. 08028-Barcelona (España).

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://revistademetalurgia.revistas.csic.es

en la observación experimental de que, durante la deformación elástica, la variación de la proporción residual de poros elástica, e^{el}, y el incremento de la presión media, p, están relacionados de la forma siguiente:

$$de^{el} = -\,k\,d\,(\ln(p)) \qquad [1]$$

en la que k es un parámetro, constante, del material (Fig. 1).

No obstante, el comportamiento elástico observado por los autores difiere ligeramente del descrito mediante los modelos de estado crítico clásicos: tal como se muestra en la figura 2, la relación entre las variables de^{el} y dp no es lineal; además, k no es constante.

Así, y tal como se ha propuesto para sólidos celulares (9), la ecuación [1] podría modificarse añadiendo un nuevo parámetro, p_t^{el}, de manera que, ahora, las dos variables básicas cumplirían una expresión del tipo siguiente:

$$de^{el} = -k\,d(\ln(p+p_t^{el})) \qquad [2]$$

De su integración, la relación para la elasticidad volumétrica es, ahora:

$$\frac{k}{1+e_o}\ln\left(\frac{p_o+p_t^{el}}{p+p_t^{el}}\right)=\exp\left(\varepsilon_{vol}^{el}\right)-1 \qquad [3]$$

en que e_o y p_o son, respectivamente, la proporción residual de poros y la presión hidrostática en el estado inicial del análisis, y ε_{vol}^{el}, la componente elástica de la deformación volumétrica. Así, la proporción residual de poros,

$$e = e_o + k\ln\left(\frac{p_o+p_t^{el}}{p+p_t^{el}}\right)$$

se representa mediante una recta de pendiente k en el espacio $\ln\left(\frac{p_o+p_t^{el}}{p+p_t^{el}}\right)$ proporción residual de poros, y la deformación volumétrica elástica evoluciona, con la presión hidrostática, tal como se muestra en la figura 3.

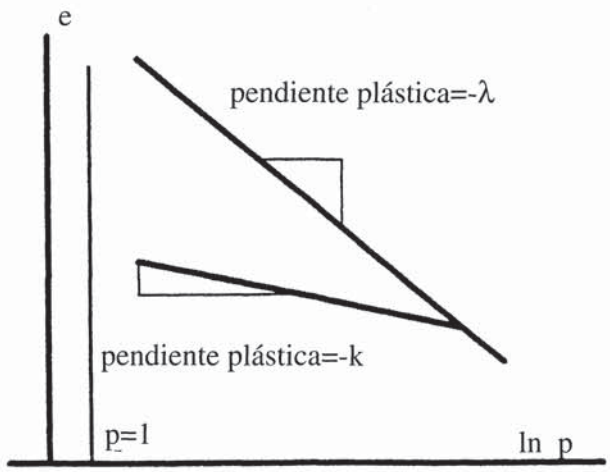

FIG. 1.— Cambio elástico.

FIG. 1.— Elastic change.

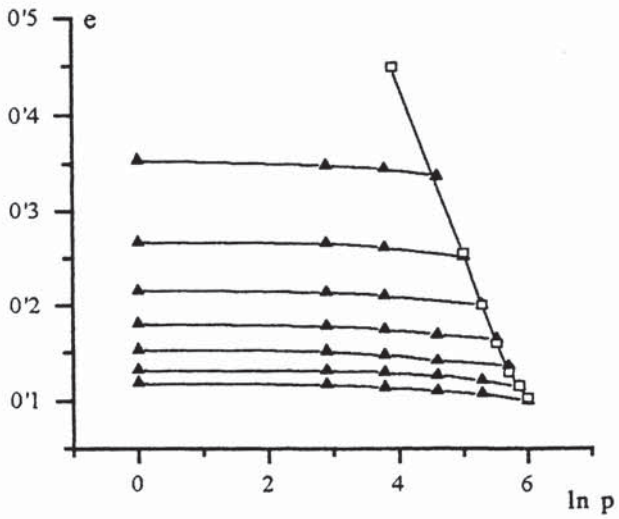

FIG. 2.— Descargas elásticas.

FIG. 2.— Elastic unloading.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han compactado, hasta diferentes densidades, probetas cilíndricas de polvo prealeado, atomizado, Distalloy-AE, de Höganäs. Se han sometido a cargas y descargas, en compresión uniaxial, hasta su desconsolidación, en una máquina universal de ensayos con extensómetros axial y radial. Las

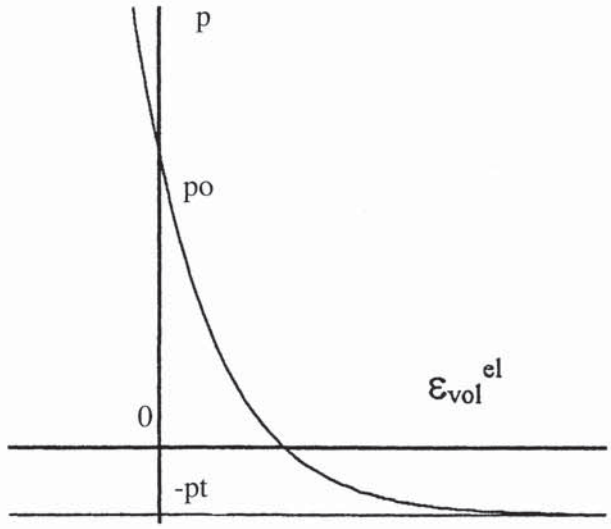

FIG. 3.— Comportamiento volumétrico elástico.

FIG. 3.— Volumetric elastic behaviour.

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://revistademetalurgia.revistas.csic.es

relaciones tensión-deformaciones axial, radial y volumétrica para un compacto de densidad 7,09 Mg/m^3, se muestran en las figuras 4, 5 y 6, con las envolventes correspondientes.

Se han aislado las descargas con el fin de analizar el comportamiento elástico. En la figura 7 se muestran las de la misma probeta de las figuras anteriores, en el espacio tensión compresiva axial aplicada-deformación volumétrica elástica.

Aplicando el modelo de elasticidad expuesto, se han obtenido los parámetros k y p_t^{el} mediante ajuste analítico y se incorporan a los resultados experimentales. En la figura 8 puede observarse que la inclusión de p_t^{el} en el modelo, permite valorar adecuadamente la variación de la proporción de poros instantánea, e, durante los procesos de deformación. La evolución de k y p_t^{el}, creciente con la densidad inicial de la pieza compactada, se representa en la figura 9. Los datos que se presentan en la figura corresponden a los que se cumplen en el estado crítico, justo antes de iniciarse la desconsolidación.

Los modelos de plasticidad de estado crítico, aplicados en la actualidad a los polvos metálicos, admiten cierta cohesión en el compacto, a partir de los primeros estadios de la compresión en frío, debido al endurecimiento (por deformación de partícula y geométrico) que se desarrolla durante el proceso de densificación. Así, el parámetro p_t^{el}, se supuso, en un principio, directamente relacionado con el grado de cohesión de la preforma. No obstante, el análisis detallado del comportamiento de probetas de muy diferente densidad inicial, muestra un crecimiento continuo del valor de dicho parámetro, incluso durante la etapa final de desconsolidación. No parece, pues, razonable mantener el significado físico asignado hasta ahora a p_t^{el}. Una valoración similar cabría hacer para k.

Con el fin de profundizar en el conocimiento de la elasticidad de los porosos, se están desarrollando otros modelos fenomenológicos de mayor simplicidad y, posiblemente, con mayor significado físico.

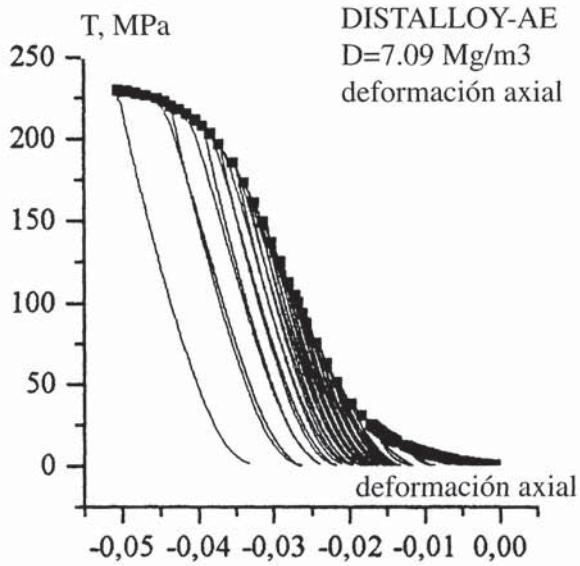

FIG. 4.— Ensayos de carga y descarga. Tensión compresiva-deformación axial.

FIG. 4.— Loading and unloading tests. Compression stress-axial strain.

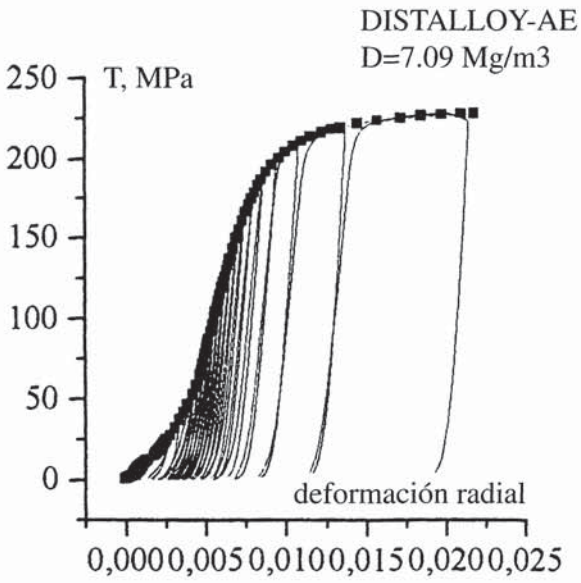

FIG. 5.— Ensayos de carga y descarga. Tensión compresiva. Deformación radial.

FIG. 5.— Loading and unloading tests. Compression stress-radial strain.

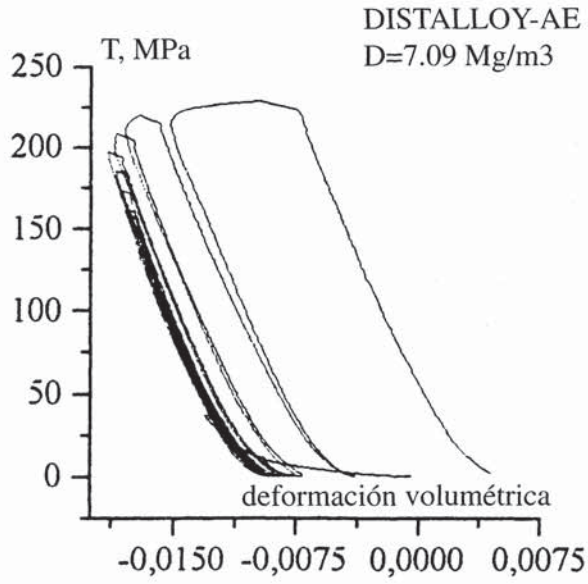

FIG. 6.— Ensayos de carga y descarga. Tensión compresiva-deformación volumétrica.

FIG. 6.— Loading and unloading tests. Compression stress-volumetric strain.

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://revistademetalurgia.revistas.csic.es

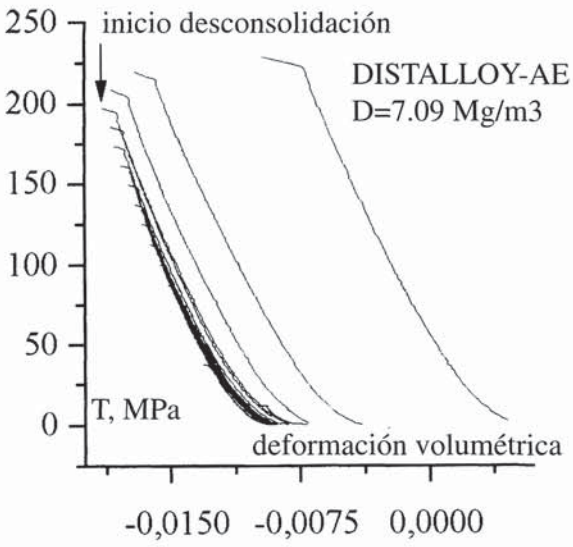

FIG. 7.— Tensión-deformación volumétrica en las descargas.

FIG. 7.— Stress-volumetric strain during unloading.

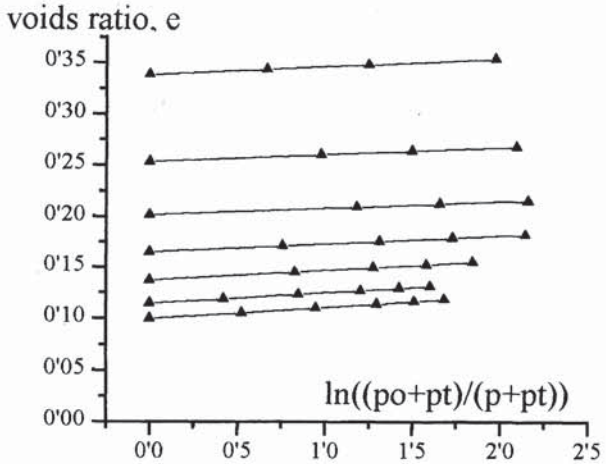

FIG. 8.— Efecto de p_t^{el} en las descargas elásticas.

FIG. 8.— Effect of p_t^{el} during elastic unloading.

4. CONCLUSIONES

El comportamiento elástico de los compactos porosos evoluciona, durante su deformación, en el sentido de aumentar la rigidez de la probeta, incluso en el inicio de la etapa de desconsolidación. La ley que define su elasticidad es no lineal. Una aproximación logarítmica, como la presentada en este trabajo, cumple bien con los resultados experimentales, aunque presente dificultades de interpretación física.

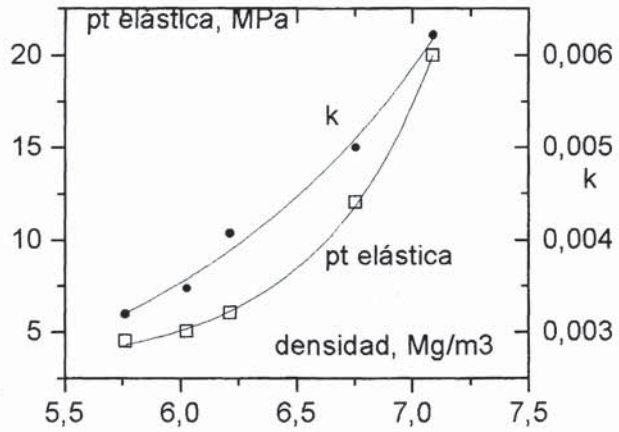

FIG. 9.— Evolución de los parámetros k y p_t^{el} con la densidad.

FIG. 9.— Evolution of k *and* p_t^{el} *with density.*

REFERENCIAS

(1) Proc. Intern. Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes. Grenoble (Francia). 1997.

(2) ROSCOE, K.H., SCHOFIELD, A. y WROTH, C.P. *Géotechnique*. 8, 1958 22.

(3) ROSCOE, K.H. y BURLAND, J.B. Engineering Plasticity. Eds. J. Heyman y F.A. Leckie. Cambridge University Press. Cambridge. 1968: 535.

(4) DIMAGGIO, F.L. y SANDLER, I.S. *J. Eng. Mech. Div*. ASCE. 97 (EM3), 1971: 935.

(5) RIERA, M.D. y PRADO, J.M. Powder Metallurgy World Cong. PM´94. Vol. I. Pg. 685.

(6) PLENEY Y MEYER. Proc. Powder Metallurgy Cong. P/M 78. Estocolmo (Suecia). 1978: 219.

(7) RIERA, M.D. y PRADO, J.M. Proc. Intern. Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes. Grenoble (Francia) 1997: 29.

(8) ROSCOE, K.H., SCHOFIELD, A. y THURAIRAJAH, A. *Géotechnique*. 13, 1963: 211.

(9) HKS, Inc. Abaqus Theory Manual. Version 5.4. 1994: 4.4.1-1.

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://revistademetalurgia.revistas.csic.es