



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA**

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
DEPARTAMENT DE CIÈNCIA DELS MATERIALS I ENGINYERIA METAL·LÚRGICA**

**COMPORTAMIENTO ELASTOPLÁSTICO DE COMPACTOS
PULVIMETALÚRGICOS**

MEMORIA

**que para optar al Grado de Doctor Ingeniero Industrial
presenta**

MARÍA DOLORES RIERA COLOM

Barcelona, 1999

Los datos representados en las figuras 5.49 a 5.51 se han obtenido aplicando (5.16) a los resultados experimentales y con los valores individuales de K_{ax} y n_{ax} ; el término $exp K_{ax}$ (y su homólogo volumétrico) es muy crítico: matemáticamente corresponde al valor de σ_{ax} para ε_{ax}^{el} (o ε_v^{el}) igual a la unidad; los niveles de deformación elástica medidos experimentalmente son dos órdenes de magnitud inferiores a 1, y pequeños cambios del parámetro K , dan lugar a grandes variaciones de su exponencial.

Siendo $n_{ax} = 1.5$ el valor teórico, para el que no hay efecto perturbador, n_{ax} superiores indican que la fricción interna favorece la deformación; en cambio, valores de este parámetro inferiores a 1.5, representan estados que endurecen el compacto.

El efecto de este fenómeno en la componente volumétrica de la deformación elástica, puede representarse mediante una expresión similar a la (5.16):

$$\sigma_{fi/volumétrica} = exp K_v (\varepsilon_v^{el})^{n_v} - exp K_{Hertz/volumétrica} (\varepsilon_v^{el})^{3/2} \quad (5.17)$$

en la que $\sigma_{fi/volumétrica}$ representa la contribución de la fricción interna en la deformación volumétrica del compacto; $K_{Hertz/volumétrica}$ es la constante del término de Hertz para la deformación volumétrica; su determinación se realiza a partir de la relación K_v-n_v , que se ha presentado, para los tres tipos de polvos metálicos, en la figura 5.43 (pg. 104); se incluye en ella el valor de la abcisa para $n = 1.5$, $K_{Hertz/volumétrica}$, que resulta igual a 11.88. Las figuras 5.52 a 5.54 corresponden a la aplicación de la ecuación (5.17) a una muestra de cada tipo de polvo metálico objeto de este trabajo.

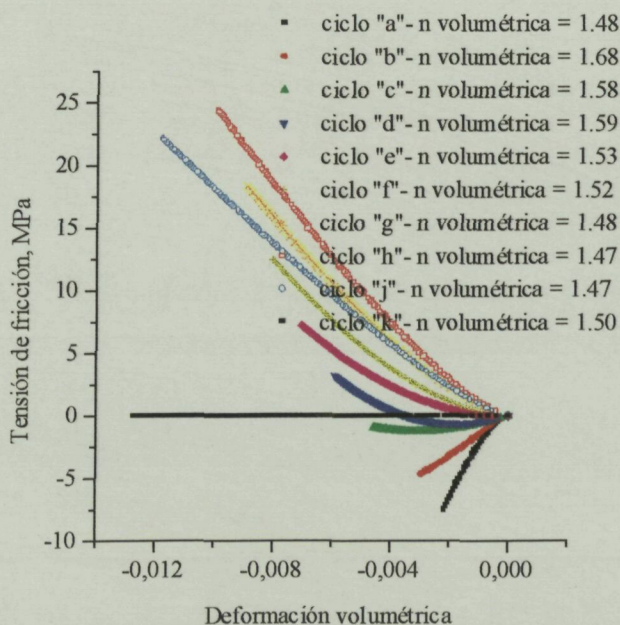


Fig. 5.52.- Componente de fricción de la tensión, durante la carga elástica, frente a la deformación volumétrica. (Segundas cargas).
ASC 100.29. D= 7.0549 Mg/m³.

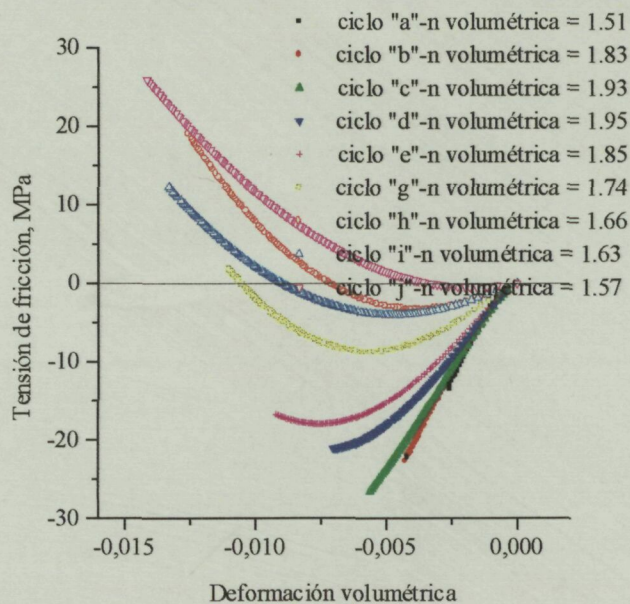


Fig. 5.53.- Componente de fricción de la tensión, durante la carga elástica, frente a la deformación volumétrica. (Segundas cargas).
MH 80.23. $D= 6.5665 \text{ Mg/m}^3$.

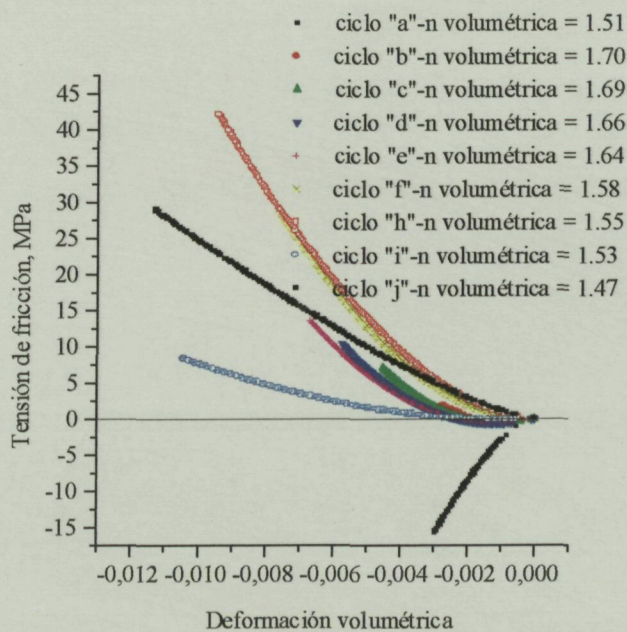


Fig. 5.54.- Componente de fricción de la tensión, durante la carga elástica, frente a la deformación volumétrica. (Segundas cargas).
DISTALLOY AE. $D= 7.0090 \text{ Mg/m}^3$.

5.4. RELACIÓN DE POISSON ELÁSTICA

Un parámetro clásico en la caracterización del comportamiento elástico de los materiales que, en los compactos metálicos se ha asimilado, frecuentemente, a la del material en estado totalmente denso.

En el presente trabajo, y ya que los compactos tienen una elasticidad no lineal, se analiza la *relación de Poisson tangencial*:

$$\nu = -\frac{d\varepsilon_r}{d\varepsilon_{ax}} \quad (5.18)$$

a partir de los resultados experimentales.

Para un compacto cilíndrico, la deformación volumétrica elástica es: $\varepsilon_v^{el} = \varepsilon_{ax}^{el} + 2\varepsilon_r^{el}$, en función de las componentes axial y radial. Igualando las ecuaciones (5.6) y (5.11) y sustituyendo el término volumétrico por las contribuciones de las deformaciones axial y radial, se obtiene:

$$\exp K_v (\varepsilon_v^{el})^{n_v} = \exp K_v (\varepsilon_{ax}^{el} + 2\varepsilon_r^{el})^{n_v} = \exp K_{ax} (\varepsilon_{ax}^{el})^{n_{ax}}$$

a partir de la cual se deduce la siguiente expresión para la deformación radial elástica:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2} \left(\frac{\exp K_{ax}}{\exp K_v} \right)^{1/n_v} (\varepsilon_{ax}^{el})^{n_{ax}/n_v} - \frac{1}{2} \varepsilon_{ax}^{el} \quad (5.19)$$

Derivando con respecto de la deformación axial,

$$\frac{d\varepsilon_r}{d\varepsilon_{ax}} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{\exp K_{ax}}{\exp K_v} \right)^{1/n_v} \left(\frac{n_{ax}}{n_v} \right) (\varepsilon_{ax}^{el})^{\frac{n_{ax}-n_v}{n_v}} \right] \quad (5.20)$$

y cambiando el signo, se encuentra una expresión que representa la *evolución de la relación de Poisson elástica a lo largo del proceso de carga* del compacto:

$$-\frac{d\varepsilon_r}{d\varepsilon_{ax}} = \nu = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{\exp K_{ax}}{\exp K_v} \right)^{1/n_v} \left(\frac{n_{ax}}{n_v} \right) (\varepsilon_{ax}^{el})^{\frac{n_{ax}-n_v}{n_v}} \right] \quad (5.21)$$

Aplicando (5.21) a cada compacto ensayado, se ha podido determinar la evolución de la relación de Poisson de los agregados de los tres tipos de polvos. Los valores de los parámetros K_{ax} , K_v , n_{ax} y n_v , son los indicados en las tablas 5.I a 5.XV, para cada compacto. Las figuras siguientes presentan los resultados.

(El ajuste de los datos que se presentan en las figuras 5.55, 5.56 y 5.57, sólo puede hacerse a través de la relación experimental $-(\varepsilon_r/\varepsilon_{ax})$, que se adjunta, para cada muestra ensayada, en el *Apéndice de Gráficos*).

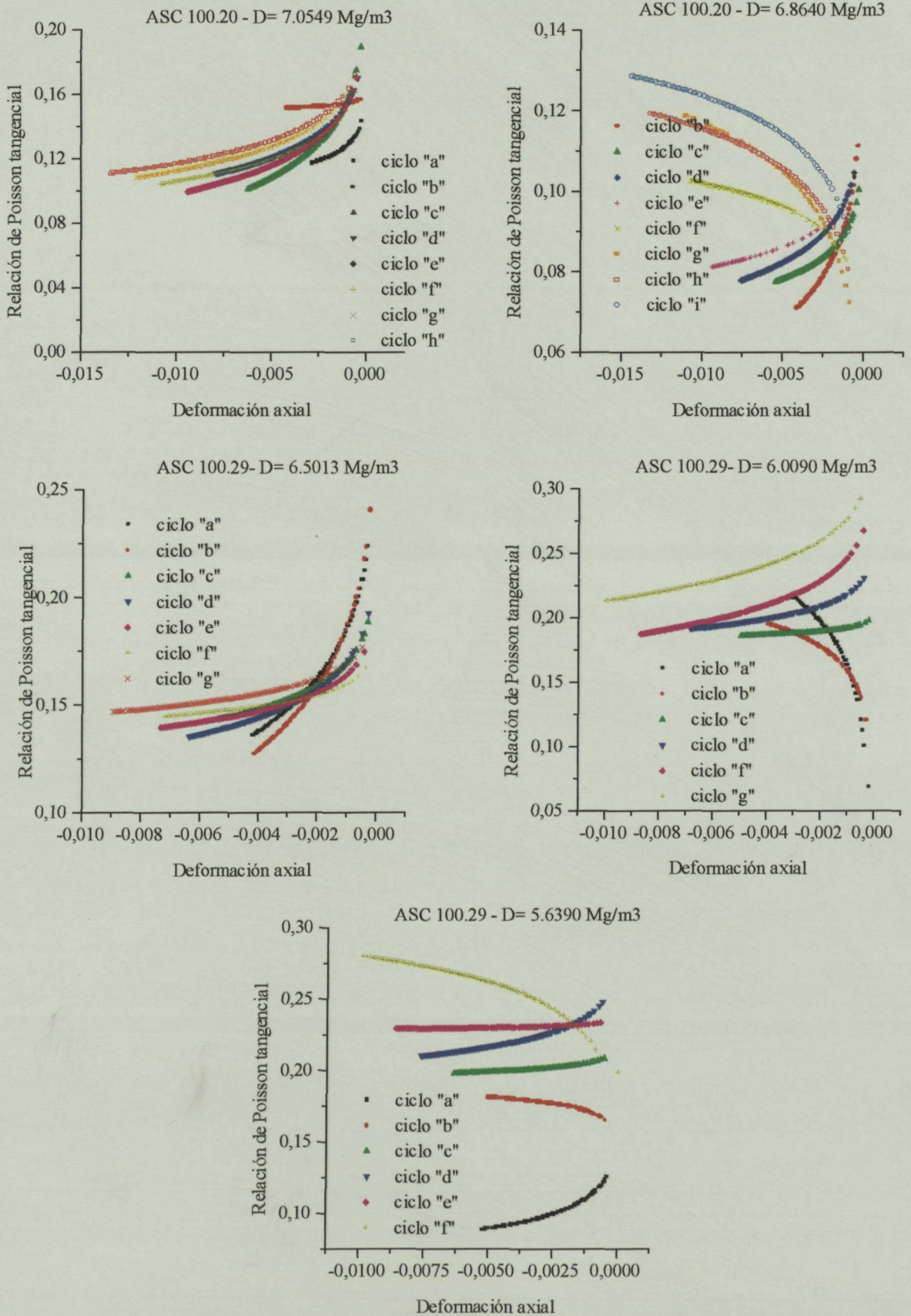


Fig. 5.55.- Evolución de la relación de Poisson tangencial durante las cargas elásticas de compactos de distintas densidades. *ASC 100.29*.

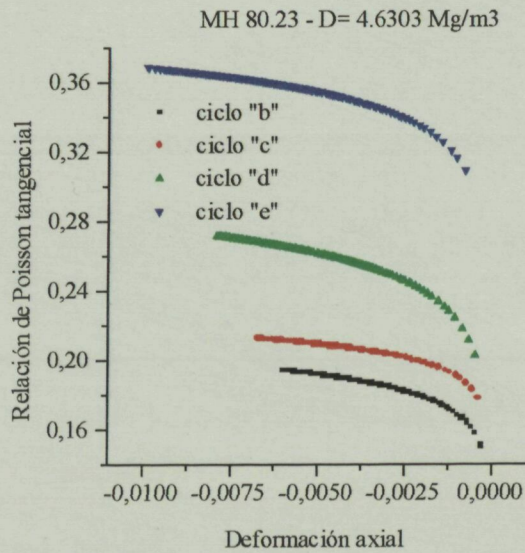
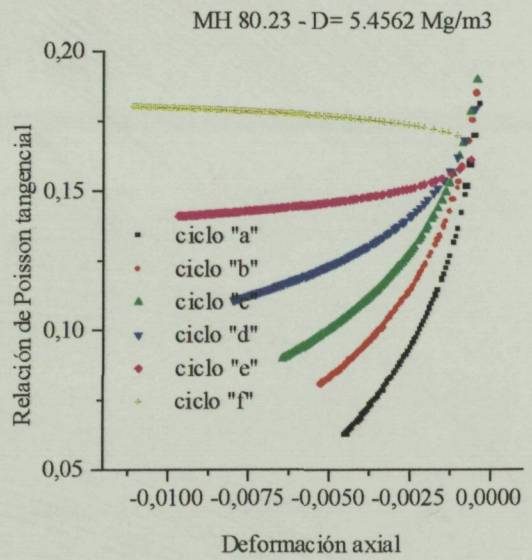
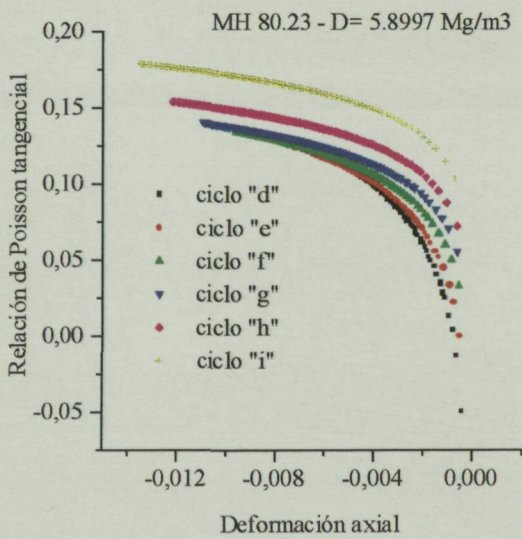
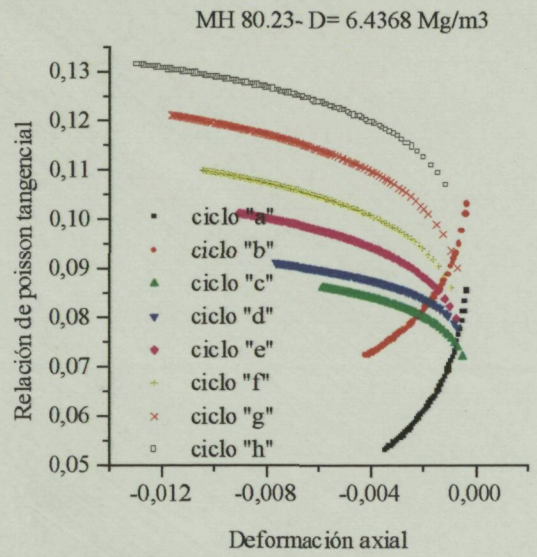
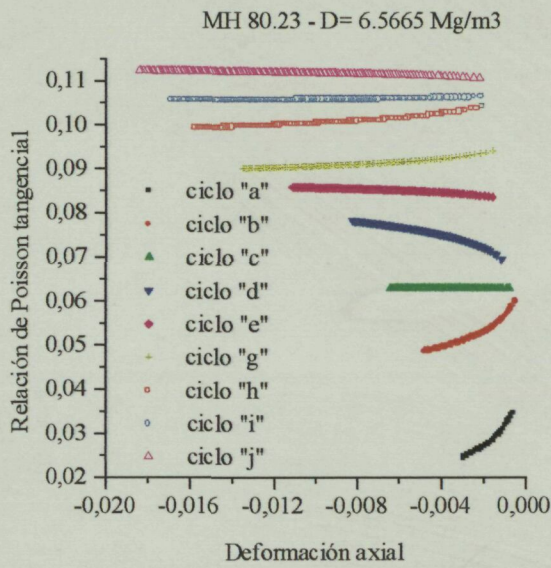


Fig. 5.56.- Relación de Poisson tangencial para compactos de distintas densidades. *MH 80.23*.

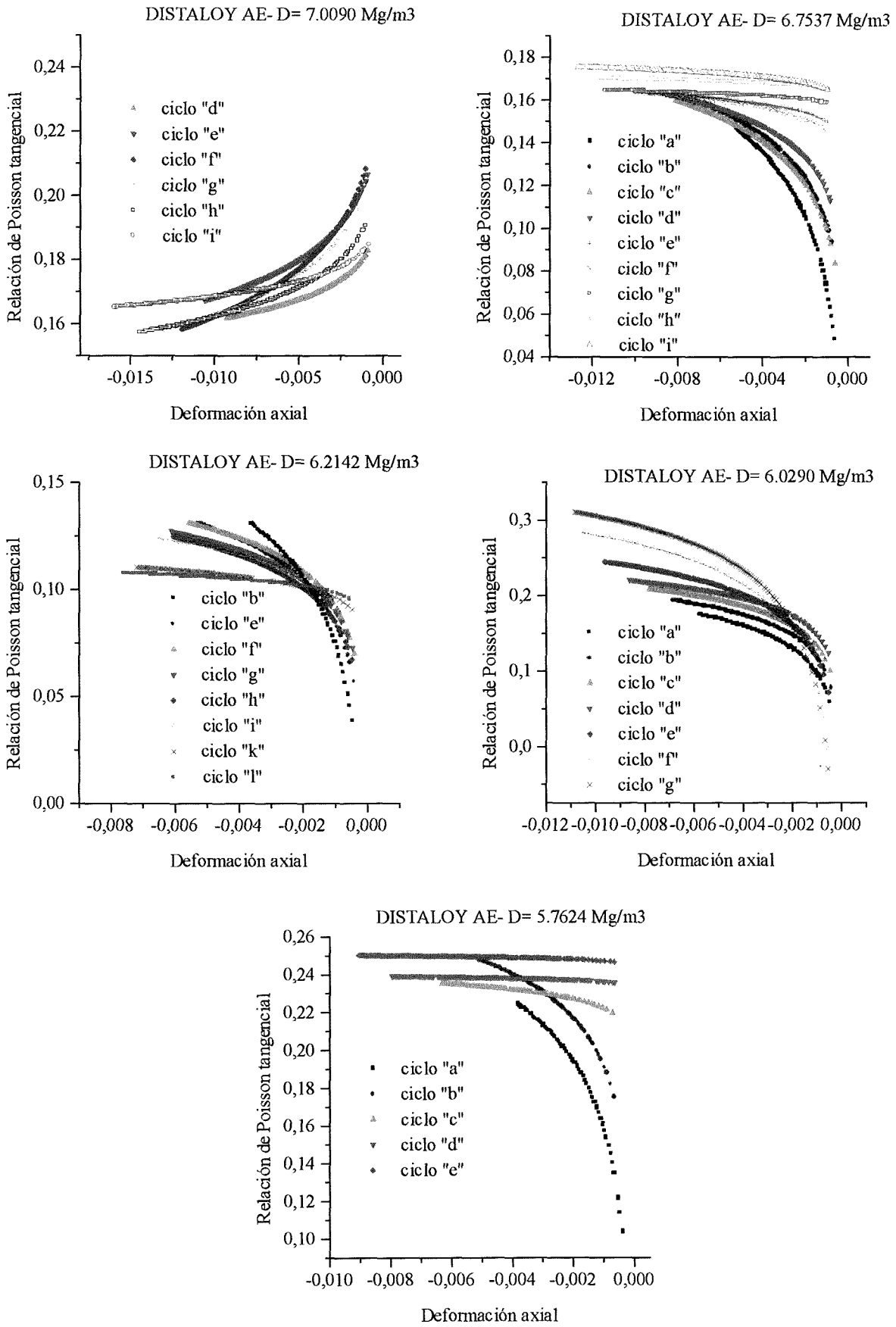


Fig. 5.57.- Relación de Poisson tangencial para compactos de distintas densidades. *DISTALOY AE*.

Desde los primeros estadios de la compresión elástica, ν *tangencial* varía con la deformación axial según el valor relativo de los parámetros n_{ax} y n_v ; en todos los casos, al iniciarse el ensayo el compacto se comporta con $n_{ax} \neq n_v$ y, por lo tanto, con una relación de Poisson tangencial variable. Esta fase podría suponerse como un transitorio inicial, tras el cual y para deformaciones todavía muy bajas, se llega a una ν tangencial más estable que tiende a un valor constante. En estas condiciones, los parámetros n_{ax} y n_v se igualan. La figura 5.58 representa la ecuación (5.21) en función de la deformación axial aplicada durante la compresión uniaxial.

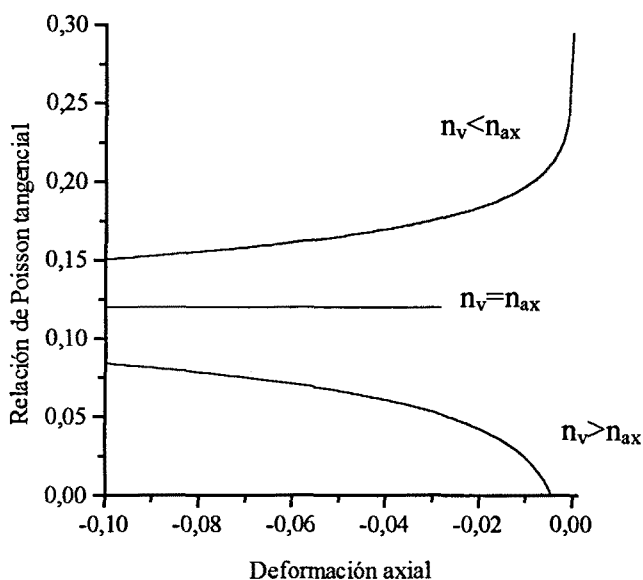


Fig. 5.58.- Representación de la ecuación (5.21) para las distintas posibilidades de valores relativos de los parámetros n_v y n_{ax} .

Como *valor estable de ν tangencial* se ha tomado, en este trabajo, el que corresponde al inicio de la dilatación y que se indica, para cada probeta, en la tabla 5.XVI.

Tabla 5.XVI.- Valores de la *relación de Poisson tangencial*.

Tipo de polvo	Densidad, Mg/m ³	Ciclo inicio dilatación	ν tangencial estable
<i>ASC 100.29</i>	7.0549	g	0.10
	6.8640	g	0.12
	6.5013	g	0.14
	6.0090	d	0.18
	5.6390	c	0.20
<i>MH 80.23</i>	6.5665	h	0.10
	6.4368	h	0.13
	5.8997	i	0.17
	5.4562	f	0.18
	4.6303	c	0.22

Tabla 5.XVI-bis.- Valores de la *relación de Poisson tangencial*.

<i>DISTALOY AE</i>	7.0090	g	0.15
	6.7537	f	0.16
	6.2142	e	0.16
	6.0290	d	0.22
	5.7624	c	0.25

En la figura 5.59, se presenta gráficamente la dependencia de ν tangencial con la densidad inicial del compacto.

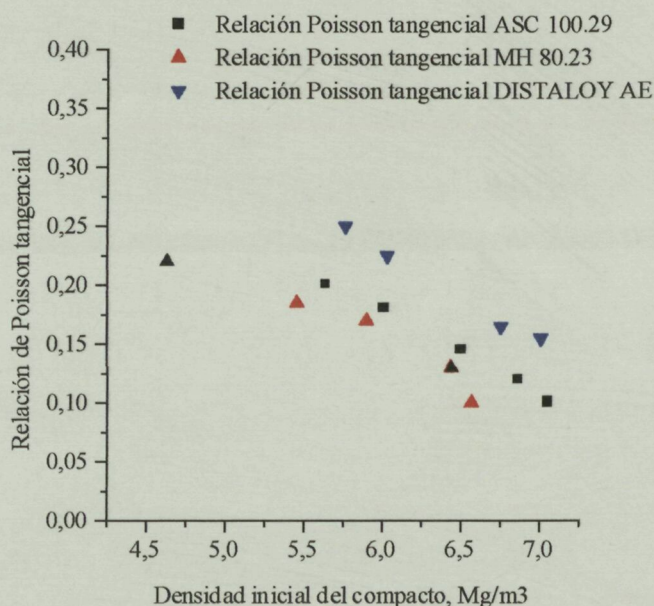


Fig. 5.59.- Relación de Poisson tangencial para los tres tipos de polvos metálicos.

Los valores de este parámetro son, pues, inferiores a los del material totalmente denso; además, disminuye al aumentar la densidad inicial del compacto.

Una vez más, se observa que el comportamiento mecánico de los agregados pulvimetalúrgicos no puede compararse con el de un material convencional, ni siquiera con el del mismo agregado en estado sinterizado.

No es un material poroso; es un material granular. Quizás, para densidades relativas muy cercanas a la total, puede razonarse en los términos característicos de un material totalmente denso; pero, hasta las densidades objeto de este trabajo (alrededor de $R= 0.95$) mantienen un carácter propio.

En las figuras 5.55 a 5.57, se observa otro aspecto destacable: a medida que avanza el ensayo (ciclos a, b, c, ...) y la tensión aplicada es mayor, la relación de Poisson tangencial aumenta. Parece contradictorio con lo anteriormente expuesto, ya que, antes de la dilatación, el compacto

presenta deformación volumétrica negativa durante la compresión uniaxial; no obstante, la pequeña consolidación de la probeta durante el ciclado es de naturaleza distinta a la del proceso de consolidación de las partículas en molde.

5.5. DESCARGAS ELÁSTICAS

En el presente trabajo, se han analizado las cargas elásticas de los ensayos de compresión aplicados, para caracterizar el comportamiento elástico de los compactos metálicos. Pero, debe destacarse la fuerte histéresis que muestran estos materiales, fruto del efecto de la fricción interna. Éste es un aspecto muy interesante que, no obstante, no se valora en esta memoria y se propone para un trabajo posterior.

6. CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

6.1. RELATIVAS AL COMPORTAMIENTO ELASTOPLÁSTICO DE LOS COMPACTOS METÁLICOS

1. Las características generales del comportamiento mecánico de los compactos pulvimetalúrgicos son comunes a los tres tipos de polvos metálicos estudiados e independientes de la morfología de las partículas y de la composición química. Cabe esperar que esto mismo se cumpla para todo compacto fabricado a partir de partículas dúctiles y con endurecimiento por deformación.
2. Durante la compresión uniaxial de un compacto metálico, se observan tres etapas en las que predominan mecanismos de deformación y densificación distintos. Al inicio del ensayo, para cargas bajas, hay una intensa deformación permanente que, en este trabajo, se atribuye a fenómenos de *fricción interna*. A este *pie* plástico inicial le sucede una fase dominada por la deformación elástica y que se extiende hasta un valor de la tensión para el que el compacto comienza a dilatarse; no obstante, el esfuerzo sigue incrementándose hasta un valor máximo, σ_{max} , para el que el agregado, y tras cierta deformación plástica adicional, falla.

La relación que se establece, durante este ensayo, entre la tensión aplicada y las componentes axial y radial de la deformación, puede representarse matemáticamente mediante la siguiente ley sigmoïdal:

$$\sigma = \sigma_{max} \left[1 - \exp(-K\varepsilon^n) \right]$$

en la que K y n son dos parámetros del material que se determinan experimentalmente.

Ésta es una ley general, ya que, en realidad, el comportamiento de los compactos es más complejo: se requieren dos pares de valores K - n para definir completamente la evolución de la deformación axial y tres pares para la componente radial. No obstante, se obtienen ajustes suficientemente buenos con un único valor de K_{ax} y n_{ax} y dos valores de K_r y n_r .

3. El comportamiento mecánico de estos materiales está muy influido por fenómenos de fricción interna. Sin embargo, en la deformación elastoplástica este efecto, de tipo local, es notable sólo en la etapa inicial de la compresión del compacto; la dilatación final corresponde a un mecanismo más generalizado.

Bajo la denominación genérica de fenómenos de fricción interna, se han agrupado una serie de mecanismos que, en este trabajo, se suponen ligados directamente a la deformación del agregado metálico: tensiones residuales, cambio de la estructura de contactos entre partículas y deslizamiento entre ellas.

4. Aunque no es frecuente su utilización en régimen plástico, se ha analizado la relación de Poisson elastoplástica tangencial de los compactos. Durante la compresión uniaxial, este parámetro varía con la etapa de deformación: para cargas bajas, durante el *pie* plástico inicial, ν crece linealmente; ya en plena segunda región, regida por la deformación elástica, alcanza un valor de 0.25, a partir del cual ν aumenta rápidamente hasta que, al iniciarse la dilatación del compacto, llega a 0.5. En la fase final del ensayo, que conduce a la fractura

del compacto, la relación de Poisson continúa creciendo, ya que la dilatación es, básicamente, un fenómeno de expansión radial del agregado.

5. La dilatación no es un fenómeno de fallo; el agregado pulvimetalúrgico, tras iniciar su aumento de volumen durante la compresión, soporta tensiones todavía más altas y se deforma plásticamente con cierta intensidad antes de la fractura final.

6.2. RELATIVAS AL COMPORTAMIENTO ELÁSTICO DE LOS COMPACTOS METÁLICOS

1. Los compactos metálicos estudiados presentan un comportamiento elástico no lineal. Todas las componentes de la deformación se relacionan con la tensión aplicada a través de una ley potencial, tal como la siguiente:

$$\sigma_{ax} = \exp K(\varepsilon^{el})^n$$

en la que K y n son parámetros del material linealmente relacionados entre sí. Así, pues, el comportamiento elástico de los compactos está caracterizado por un único parámetro.

2. El valor teórico del exponente n , deducido a partir de un modelo de dos partículas (contacto de Hertz), es igual a 1.5. Los valores de n , superiores a 1.5, encontrados experimentalmente en este trabajo, están justificados por el efecto de la fricción interna.

No se observa un comportamiento elástico puro; siempre aparece, con mayor o menor intensidad, la influencia de la fricción interna, responsable de una fuerte histéresis, que no se ha estudiado en este trabajo.

La densidad no tiene un efecto directo sobre el comportamiento elástico en los compactos metálicos, sino que lo ejerce a través de la fricción interna asociada al nivel de densidad del compacto en cuestión.

3. La relación de Poisson tangencial elástica varía a lo largo del proceso de compresión: aumenta con la tensión aplicada y tiende a estabilizarse para un valor inferior al del material en estado totalmente denso. Este valor estable disminuye al aumentar la densidad inicial del compacto.

6.3. CONSIDERACIONES GENERALES

Los compactos pulvimetalúrgicos no pueden compararse con los materiales convencionales porosos, ni con los propios compactos en estado sinterizado; ni siquiera puede suponerse que un agregado metálico muy denso es un *material* que tiende al material totalmente denso. *Son materiales granulares, de partículas dúctiles, con un comportamiento mecánico propio que mantienen, sea cual sea su estado de densificación.*

En la definición de un modelo de comportamiento plástico para materiales granulares de partículas dúctiles, las superficies de cedencia deben reflejar dos fenómenos: a) la densidad del agregado, y b) el estado de endurecimiento de las partículas.

Los modelos de plasticidad aplicados hasta este momento a la compactación de polvos metálicos, definen superficies de cedencia de iso-densidad. Pero, un agregado de partículas metálicas puede llevarse a una misma densidad con distintos estados de endurecimiento. O sea, que el *yield locus*, la cedencia del compacto, depende de la trayectoria de carga.

7. ASPECTOS ABIERTOS A LA INVESTIGACIÓN

7. ASPECTOS ABIERTOS A LA INVESTIGACIÓN

Aunque todo trabajo de investigación tiene por objetivo dar respuesta a comportamientos previamente no conocidos ni comprendidos, no es sorprendente que cuando el campo de investigación es realmente novedoso, los primeros trabajos acaben generando más interrogantes que respuestas definitivas.

Éste ha sido el caso de esta Tesis; y ha debido darse por terminada en su estado actual, a pesar de que, constantemente, surgían nuevos comportamientos que requerían una explicación.

En este capítulo, se exponen algunos aspectos que deben ser estudiados con detenimiento, para completar la comprensión del comportamiento elastoplástico de los compactos metálicos, iniciada en este trabajo.

a) Naturaleza de la *fricción interna*

Parece recomendable llevar a cabo este estudio mediante el análisis de la histéresis en ciclos de carga y descarga en régimen completamente elástico.

Otra técnica experimental que puede aportar información de interés es la de los ensayos de relajación, a deformación constante.

La observación *in situ* de los desplazamientos entre partículas durante la sollicitación mecánica, no parece sencilla, pero podría realizarse mediante la utilización de un microscopio electrónico ambiental, provisto de un accesorio para el ciclado mecánico.

b) Mecanismos de fallo

El conocimiento de la inestabilidad plástica y de los mecanismos de fractura de los compactos, sería una gran ayuda para el diseño de matrices de compactación y de sistemas de eyección de piezas industriales.

c) *Locus* de cedencia

Es ésta una tarea difícil, ya que es necesario compactar y deformar las muestras en estudio bajo condiciones de carga muy diversas; así, pues, se requieren grandes y costosos equipos triaxiales o la colaboración con laboratorios especializados.

d) Comportamiento elastoplástico de compactos sinterizados

Los compactos sinterizados han sido estudiados mecánicamente mediante ensayos de tracción uniaxial y de flexión, pero no es bien conocido su comportamiento ante esfuerzos compresivos; en este caso, su comportamiento, sobre todo en régimen elástico, puede ser apreciablemente diferente: puede esperarse una respuesta intermedia entre el material granular, aquí estudiado, y el del material totalmente denso.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]: EVANS, P.E. y MILLMAN, R.S. The Vibratory Packing of Powders en *Perspectives in Powder Metallurgy*. Vol. 2. Hausner, H.H., Roll, K.H. y Johnson, P.K. Ed. Plenum Press. New York, 1967. Pg. 237-251.
- [2]: PLÉNEY, L. y MEYER, R. Diagramme de compression d'une poudre de fer. Anisotropie des agglomérés. 5th *European Symposium on Powder Metallurgy*. Pg. 219. Stockholm. 1978.
- [3]: RAJAB, M. *Tesis*. Loughborough University of Technology. 1982.
- [4]: MOSBAH, P.; BOUVARD, D.; LANIER, J.; OUEDRAOGO, E. y STUTZ, P. Rheological characterization of metal powder following various loading paths. *Powder Metallurgy World Congress. PM' 94*. Les Éditions de Physique. Pg. 677. París. 1994.
- [5]: ERNST, E. y BARNEKOW, D. Pressure, friction and density during axial powder compaction. *Powder Metallurgy World Congress. PM' 94*. Les Éditions de Physique. Pg. 673. París. 1994.
- [6]: PAVIER, E. *Tesis*. Institut Polytechnique de Grenoble. 1998.
- [7]: HÖGANÄS. *Polvos de hierro y acero Höganäs para componentes sinterizados*. Editado por Höganäs AB. Pg. 51. 1998.
- [8]: WALKER, E.E. *Trans. Faraday Soc.* Vol. 19. Pg. 73. 1923/24. Referencia extraída de [10]. Pg. 11.
- [9]: BALSHIN, M.Y. Theory of Compacting. *Vestnik Metalloprom*. Vol. 18. Pg. 137-147. 1938.
- [10]: GONZÁLEZ, J.M. y HERRERA, E.J.. *La relación densidad-presión en la compactación de polvos metálicos*. Comunicación privada.
- [11]: ATHY, L.F. Density, Porosity and Compaction of Sedimentary Rocks. *Bull. Am. Assoc. Petroleum Geologists*. Vol. 14. No. 1. Pg. 1. 1930.
- [12]: KONOPICKY, K. *Sintereissen und Sinterstahl*. Pg. 126. Ed. Springer. Viena. 1948.
- [13]: SHAPIRO, I. y KOLTHOFF, M. *J. Phys. Colloid Chem.* Vol. 51. Pg. 483. 1947. Referencia extraída de *Mechanical Fundamentals of Consolidation*, en *Metals Handbook*. 9th Edition. Vol. 7. Pg. 298.
- [14]: KAWAKITA, K. y LÜDDE, K.H. Some considerations of powder metals in compaction. *Powder Technology*. Vol. 4. Pg. 61-68. 1970.
- [15]: BRACKPOOL, J.L. *Tesis*. Loughborough University of Technology. 1970.
- [16]: ARZT, E. y FISCHMEISTER, H.F. Fundamental aspects of the compaction of metal powders. *Mémoires Scientifiques de la Revue de Métallurgie*. No. Octubre. Pg. 573. 1979.
- [17]: HERRERA, E.J. *Tesis*. Universidad de Sevilla. 1967.

- [18]: CYTERMANN, R. *Tesis*. University of Orsay. 1978.
- [19]: CYTERMANN, R. y GEVA, R. Development of new model for compaction of powders. *Powder Metallurgy*. Vol. 30. No. 4. Pg. 256. 1987.
- [20]: SEELING, P.R. y WULFF, J. The Pressing Operation in the Fabrication of Articles by Powder Metallurgy. *Trans AIME*. Vol. 166. Pg. 492-500. 1946.
- [21]: JAMES, P.E. Particle Deformation During Cold Isostatic Pressing of Metal Powders. *Powder Metallurgy*. Vol. 20. Pg. 199. 1977.
- [22]: KAKAR, A.K. y CHAKLADER, A.C.D. Deformation Theory of Hot-Pressing. *Journal of Applied Physics*. Vol. 38. Pg. 3223. 1967.
- [23]: HEWITT, R.L.; WALLACE, W. y de MALHERBE, M.C. The effects of strain hardening in Powder Compaction. *Powder Metallurgy*. Vol. 16. No. 31. Pg. 88-106. 1973.
- [24]: HELLIWELL, N. y JAMES, P.J. Isostatic compaction behaviour of copper powder. *Powder Metallurgy International*. No. 7. Pg. 25-29. 1975.
- [25]: SUNDSTRÖM, B. y FISCHMEISTER, H.F. *Modern Developments in Powder Metallurgy*. Editado por H.H. Hausner y W.E. Smith. Vol. 6. MPIF. Princeton, N.J. USA. Pg. 203. 1974.
- [26]: FISCHMEISTER, H.F.; ARZT, E. y OLSSON, L.R. Particle Deformation and Sliding During Compaction of Spherical Powders: A Study by Quantitative Metallography. *Powder Metallurgy*. Vol. 21. Pg. 178. 1978.
- [27]: TORRE, C. Theory and Behaviour of Pressed Powders. *Berg-und Hüttenmännische Montan*. Hochschule Leoben. Vol. 93. Pg. 62. 1948.
- [28]: HECKEL, R.W. An Analysis of Powder Compaction Phenomena. *Trans. AIME*. Vol. 221. Pg. 1001. 1961.
- [29]: BOCKSTIEGEL, G. y HEWING, J. Critical Review of the Literature on the Densification of Powders in Rigid Dies. *Archiv. Eisenhüttenwesen*. Vol. 36. Pg. 751. 1965.
- [30]: BOCKSTIEGEL, G. The Porosity-Pressure Curve and its Relation to the Pore Size Distribution in Iron Powder Compacts. *Modern Developments in Powder Metallurgy*. Pg. 155. Vol. 1. Hausner. H.H. Ed. Plenum Press. New York. 1966.
- [31]: GREEN, R.J. A Plasticity Theory for Porous Solids. *Int. J. of Mechanical Science*. Vol. 14. Pg. 215. 1972.
- [32]: GURSON, A.L. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I-Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. *Journal of Engineering Materials and Technology*. Paper No. 76-Mat-CC. 1976.
- [33]: MORRISON, H.L.; RICHMOND, O. y M.L. DEVENPECK. Sphere indentation with application to the Brinell hardness test. *Int. J. Mech Sci*. Vol. 16. Pg. 75-82. 1974.

- [34]: ARZT, E. The influence of an increasing particle coordination on the densification of spherical powders. *Acta Metallurgica*. Vol. 30. Pg. 1883. 1982.
- [35]: SCOTT, G.D. Packing of Equal Spheres. *Nature*. Vol. 188. Pg. 908. 1960.
- [36]: SCOTT, G.D. Radial distribution of the random close packing of equal spheres. *Nature*. Vol. 194. Pg. 956. 1962.
- [37]: MASON, J. y BERNAL, J.D. Co-ordination of randomly packed spheres. *Nature*. Vol. 188. Pg. 910. 1960.
- [38]: FISCHMEISTER, H.F. y ARZT, E. Densification of powders by particle deformation. *Powder Metallurgy*. Vol. 26. No. 2. Pg. 82. 1983.
- [39]: HELLE, H.S.; EASTERLING, K.E. y ASHBY, M.F. Hot-isostatic pressing diagrams: new developments. *Acta Metallurgica*. Vol. 33. Pg. 2163. 1985.
- [40]: McMEEKING, R.M. The analysis of shape during isostatic pressing. *Int. J. Mech. Sci. Vol.* 34. No.1. Pg. 53-62. 1992.
- [41]: XU, J. y McMEEKING, R.M. An analysis of the can effect in an isostatic pressing of copper powder. *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 34. No.2. Pg. 167-174. 1992.
- [42]: FLECK, N.A.; KUHN, L.T. y McMEEKING, R.M. Yielding of metal powder bonded by isolated contacts. *J. Mech. Phys. Solids*. Vol. 40. No. 5. pG. 1139. 1992.
- [43]: OGBONNA, N. y FLECK, N.A. *Acta Metallurgica et Materialia*. Vol. 43. No. 2. Pg. 603. 1995.
- [44]: AKISANYA, A.R.; COCKS, A.C.F. y FLECK, N.A. The yield behaviour of metal powders. *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 39. No. 12. Pg. 1315-1324. 1997.
- [45]: MATTHEWS, J.R. Indentation Hardness and Hot Pressing. *Acta Metallurgica*. Vol. 28. Pg. 311-318. 1980.
- [46]: HILL, R. The Mathematical Theory of Plasticity. Clarendon Press. Oxford. 1950.
- [47]: LI, H.; SAIGAL, S. y WANG, P.T. A solution for the contact between two spherical particles undergoing large deformation. *Acta mater*. Vol. 44. No. 7. Pg. 2591-2598. 1996.
- [48]: LARSSON, P.-L.; BIWA, S. y STORAKERS, B. Analysis of cold and hot isostatic compaction of spherical particles. *Acta mater*. Vol. 44. No. 9. Pg. 3655-3666. 1996.
- [49]: LIU, J.X. y DAVIES, T.J. Coordination number-density relationships for random packing of spherical powders. *Powder Metallurgy*. Vol. 40. No. 1. Pg. 48. 1997.
- [50]: LIU, J.X. y DAVIES, T.J. Packing state and compaction equation of monosize spherical powders. *Powder Metallurgy*. Vol. 40. No. 1. Pg. 51. 1997.
- [51]: MOLERUS, O. Theory of Yield of Cohesive Powders. *Powder Technology*. No. 12. Pg. 259-275. 1975.

- [52]: LEE, D.N. y KIM, H.S. Plastic Yield Behaviour of Porous Metals. *Powder Metallurgy*. Vol. 35. No. 4. 1992.
- [53]: DORAIVELU, S.M.; GEGEL, H.L.; GUNASEKERA, J.S.; MALAS, J.C.; MORGAN, J.T. y THOMAS, J.F. Jr. A new yield function for compressible P/M materials. *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 26. No. 9/10. Pg. 527. 1984.
- [54]: KUHN, H.H. y DOWNEY, C.L.. Deformation Characteristics and Plasticity Theory of Sintered Powder Materials. *Int. J. Of Powder Metallurgy*. Vol. 7. Pg. 15. 1971.
- [55]: SHIMA, S. y OYANE, M. Plasticity Theory for Porous Metals. *Int. J. Mechanical Science*. Vol. 18. Pg. 285-291. 1976.
- [56]: OYANE, M.; SHIMA, S. y TABATA, T. Consideration of basic equations, and their application, in the forming of metal powders and porous metals. *Journal of Mechanical Working Technology*. No. 1. Pg. 325-341. 1978.
- [57]: ROSCOE, K.H.; SCHOFIELD, A.N. y WROTH, C.P. On the Yielding of Soils. *Géotechnique*. Vol. 8. Pg. 22-53. 1958.
- [58]: ROSCOE, K.H. y POOROSHASB, H.B. A theoretical and experimental Study of Stress-Strain in Triaxial Compression Tests on Normally Consolidated Clays. *Géotechnique*. Vol. 13. Pg. 12-28. 1963.
- [59]: ROSCOE, K.H.; SCHOFIELD, A. y THURAIRAJAH, A. Yielding of Clays in State Wetter than Critical. *Géotechnique*. Vol. 13. No. 3. Pg. 211-240. 1963.
- [60]: COULOMB, C.A. Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture. *Mémoires de Mathématique de l'Académie Royale des Sciences*. No. 7. Pg. 343-82. Paris. 1776. Referencia extraída de [61] pg. 235.
- [61]: SCHOFIELD, A. y WROTH, P. *Critical State Soil Mechanics*. Editado por McGraw-Hill. London. 1968.
- [62]: DESAI, C.S. y SIRIWARDANE, H.J. *Constitutive Laws for Engineering Materials with emphasis on Geologic Materials*. Editado por Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J. USA. 1984.
- [63]: DRUCKER, D.C. y PRAGER, W. Soil Mechanics and Plastic Analysis of Limit Design. *Quarterly of Applied Mathematics*. Vol. 10. Pg. 157-175. 1952.
- [64]: DRUCKER, D.C.; GIBSON, R.E. y HENKEL, D.J. Soil Mechanics and Work Hardening Theories of Plasticity. *Proc. ASCE*. Vol. 81. Paper 798. Set. 1955.
- [65]: HVORSLEV, M.J. On the Physical Properties of remoulded cohesive Soils. *Ingeniorvidenskabelige Skrifter*. A. No. 45. Pg. 159. 1937.
- [66]: ROSCOE, K.H. y BURLAND, J.B. On the generalized Stress-Strain Behaviour of "Wet" Clay. En *Engineering Plasticity*. Editado por J. Heyman y F.A. Leckie. Cambridge University Press. Cambridge. 1968.

- [67]: DiMAGGIO, F.L. y SANDLER, I. Material Model for Granular Soils. *Journal of the Engineering Mechanics Division. ASCE*. Vol. 97. No. EM3. Proc. Paper 8212. Pg. 935-950. Junio 1971.
- [68]: SANDLER, I.; DiMAGGIO, F.L. y BALADI, Y. Generalized Cap Model for Geological Materials. *Journal of Geotechnical Engineering Division*. Vol. 102. No. GT7. Pg. 683-699. 1976.
- [69]: DORÉMUS, P.; GEINDREAU, C.; MARTIN, A.; LÉCOT, R. y DAO, M. High Pressure triaxial apparatus for investigating the mechanical behaviour of metal powders. *Powder Metallurgy World Congress PM' 94*. Proceedings. Vol. I. Pg. 733. París. 1994.
- [70]: DORÉMUS, P y PAVIER, E. Comunicación privada.
- [71]: MOLERA, P. *Introducción a la Pulvimetalurgia*. Ediciones Bellaterra, S.A. Barcelona. 1977.
- [72]: HAUSNER, H.H. *Handbook of Powder Metallurgy*. Ed. Chemical Publishing Co. Inc. Pg. 86. New York. 1973.
- [73]: CUGAT, G.; MIRALLES, A. y RIERA, M.D. Modelización, por elementos finitos, del proceso de compactación en frío de polvos metálicos. *Proyecto Fin de Carrera. E.T.S.E.I.B.* 1992.
- [74]: RIERA, M.D.; MIRALLES, A.; CUGAT, G. y PRADO, J.M. Modelización del proceso de compactación en frío de polvos metálicos. *2º Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*. La Coruña. 1993.
- [75]: PRADO, J.M.; RIERA, M.D.; MIRALLES, A. y CUGAT, G. Application of a Finite-Element Formulation to the cold Compaction of Metal Powders. *ABAQUS Users' Conference Proceedings*. Pg. 523. Aachen. 1993.
- [76]: VALLS, I. Adecuación de una máquina de ensayos de tracción universal para la realización de ensayos de conformabilidad de materiales. *Proyecto Fin de Carrera. E.T.S.E.I.B.* 1997.
- [77]: KOTERA, H.; SHIMA, S.; KOJIMA, J. y MOSBAH, P. A Study of elastic Properties of compact and threedimensional elasto-plastic simulation. *International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes. Proceedings*. Pg. 33. Grenoble. 1997.
- [78]: KERGADALLAN, J.; PUENTE, G.; DORÉMUS, P. y PAVIER, E. Compression of an axisymmetric part with an instrumented press. *International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes. Proceedings*. Pg. 277. Grenoble. 1977.
- [79]: AL-HASSANI, S.T.S.; TENNANT, P.W. y SARUMI, M.A. Stress wave method for measuring elastic moduli of powder compacts in tension and compression. *Powder Metallurgy*. Vol. 32. No. 3. Pg. 204. 1989.
- [80]: GRIFFITHS, T.J. y GHANIZADEH, A. Determination of elastic constants for porous sintered iron powder compacts. *Powder Metallurgy*. Vol. 29. No. 2. Pg. 129. 1986.

[81]: MOON, J.R. Elastic Moduli of Powder Metallurgy Steels. *Powder Metallurgy*. Vol. 32. No. 2. Pg. 132. 1989.

[82]: RIERA, M.D. y PRADO, J.M. Elastic Behaviour of Metal Powders. *Int. Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes. Proceedings*. Pg. 29. Grenoble. 1997.

[83]: H.K.S., Inc. Porous Elasticity. En *ABAQUS Theory Manual*. Version 5.5. Pg. 4.4.1-1. 1995.

[84]: LARSSON, A.; RIERA, M.D. y PRADO, J.M. Aplicación del ensayo brasileño al estudio del comportamiento a fractura de los compactos pulvimetalúrgicos. *Anales de Mecánica de la Fractura*. No. 16. Pg 304. 1999.

[85]: ZIENKIEWICZ, O.C. y NAYLOR, D.J. The adaptation of critical state soil mechanics theory for use in finite elements. Referencia no identificada.

APÉNDICE DE GRÁFICOS

APÉNDICE DE GRÁFICOS

1. RELACIONES EXPERIMENTALES ENTRE LA TENSIÓN Y LAS COMPONENTES DE LA DEFORMACIÓN

Se incluyen, en este apartado, los resultados experimentales correspondientes a los ensayos de compresión uniaxial sobre todos los compactos estudiados. A partir de estos datos, se han valorado los comportamientos elastoplástico y elástico, expuestos en los capítulos 4 y 5 de este trabajo.

DEFORMACIÓN AXIAL

ASC 100.29

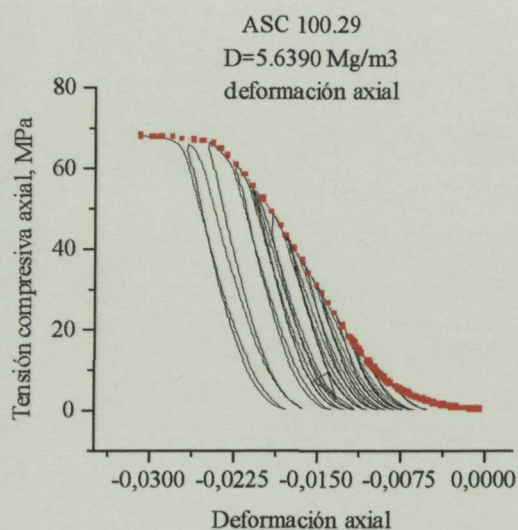


Fig. 1.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
ASC 100.29. $D= 5.6390 \text{ Mg/m}^3$.

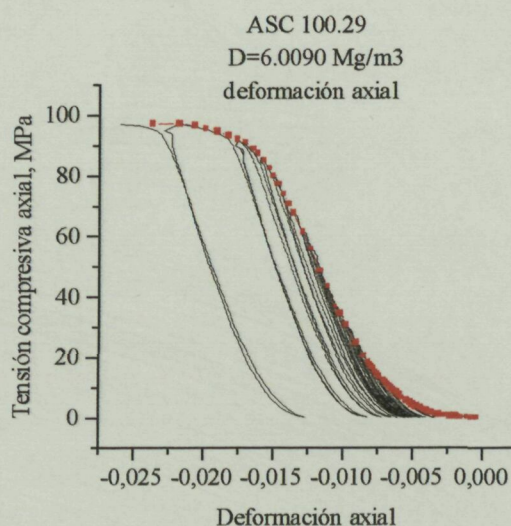


Fig. 2.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
ASC 100.29. $D= 6.0090 \text{ Mg/m}^3$.

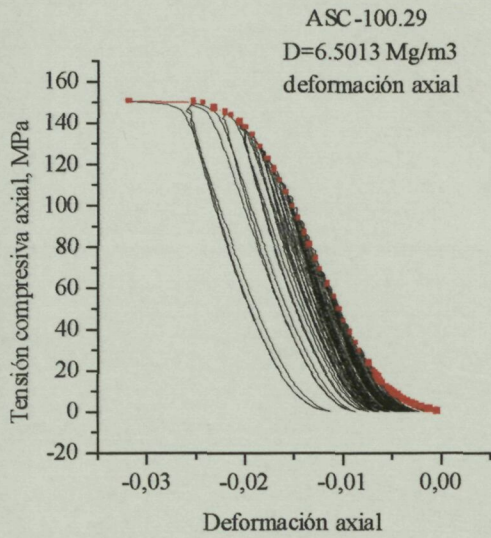


Fig. 3.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
ASC 100.29. D= 6.5013 Mg/m³.

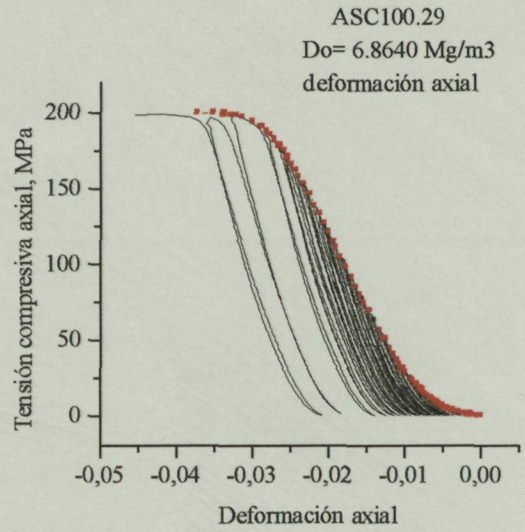


Fig. 4.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
ASC 100.29. D= 6.8640 Mg/m³.

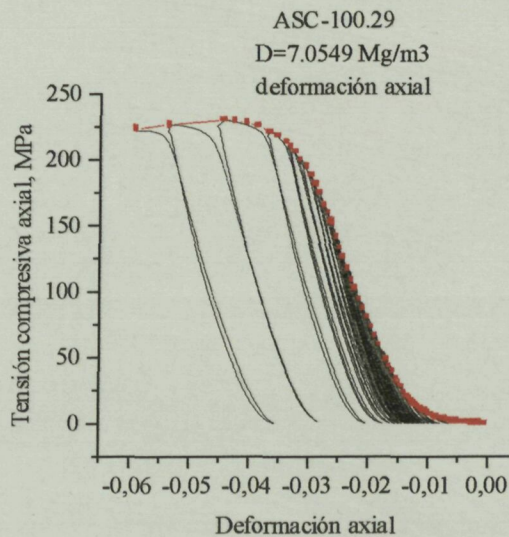


Fig. 5.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
ASC 100.29. D= 7.0549 Mg/m³.

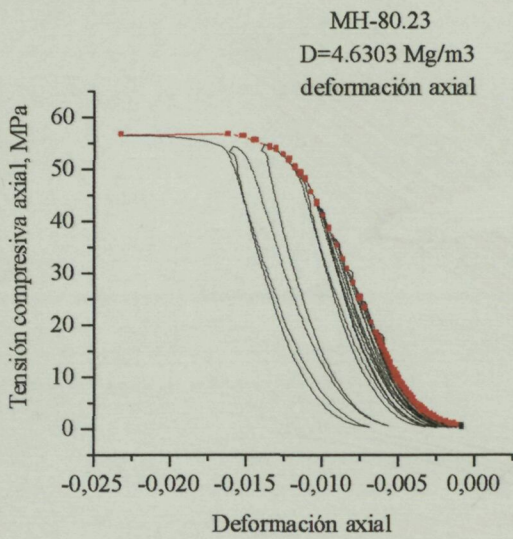


Fig. 6.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
MH 80.23. D= 4.6303 Mg/m³.

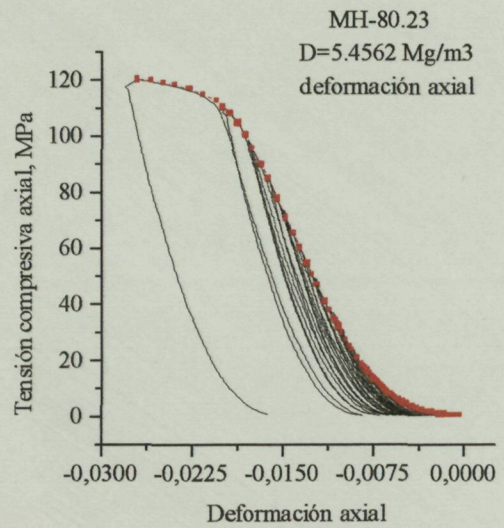


Fig. 7.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
MH 80.23. D= 5.4562 Mg/m³.

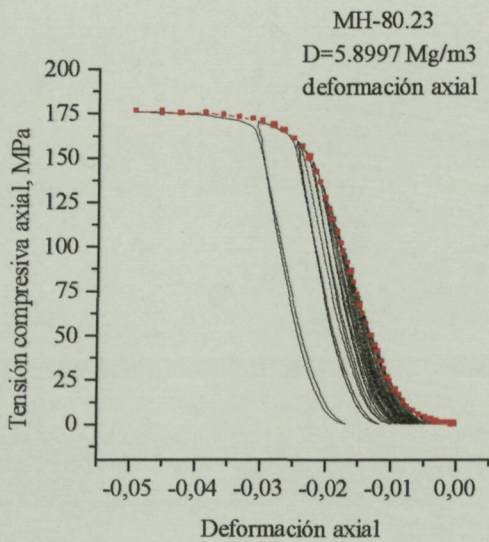


Fig. 8.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
MH 80.23. D= 5.8997 Mg/m³.

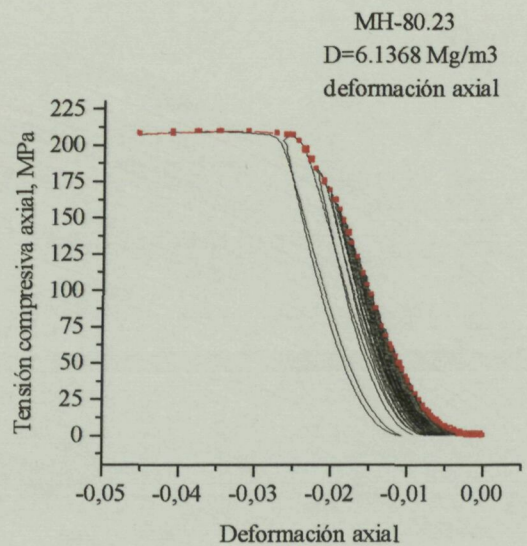


Fig. 9.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
MH 80.23. D= 6.1368 Mg/m³.

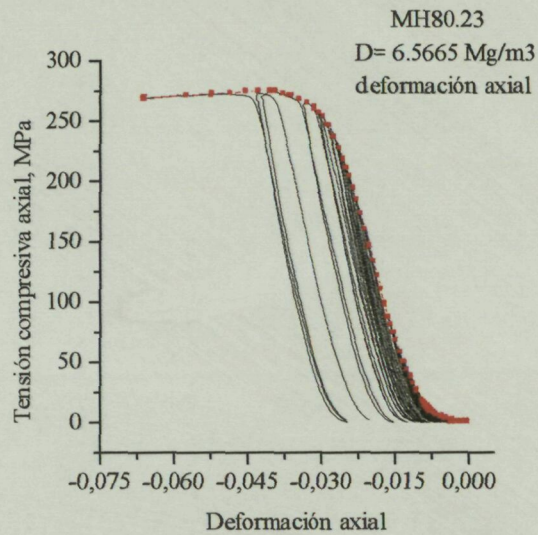


Fig. 10.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
MH 80.23. D= 6.5665 Mg/m³.

DISTALLOY AE

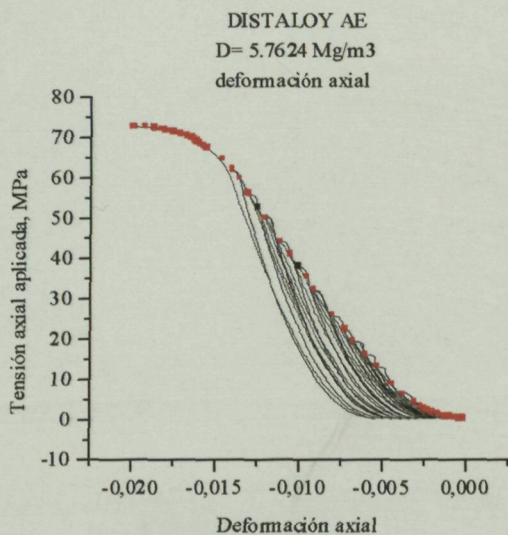


Fig. 11.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
DISTALLOY AE. D= 5.7624 Mg/m³.

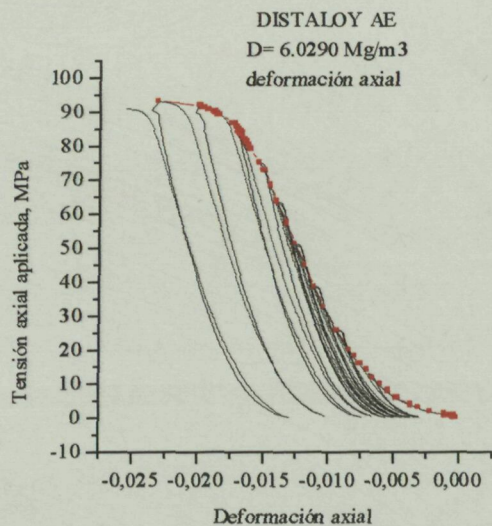


Fig. 12.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
DISTALLOY AE. D= 6.0290 Mg/m³.

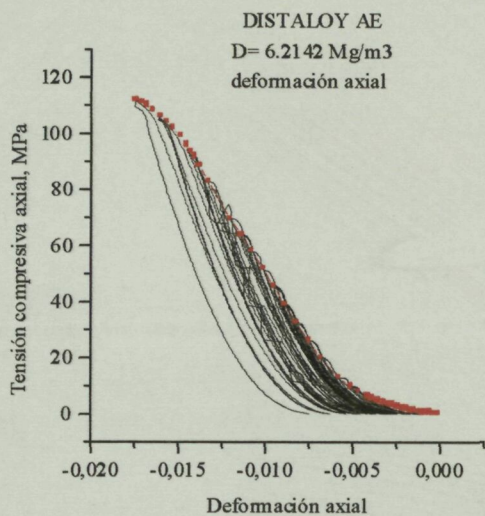


Fig. 13.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
DISTALOY AE. D= 6.2142 Mg/m³.

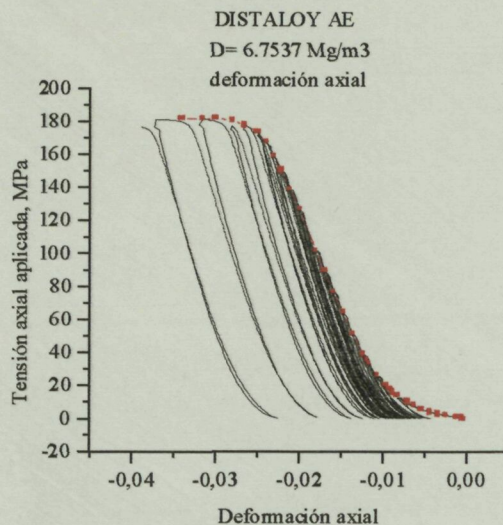


Fig. 14.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
DISTALOY AE. D= 6.7537 Mg/m³.

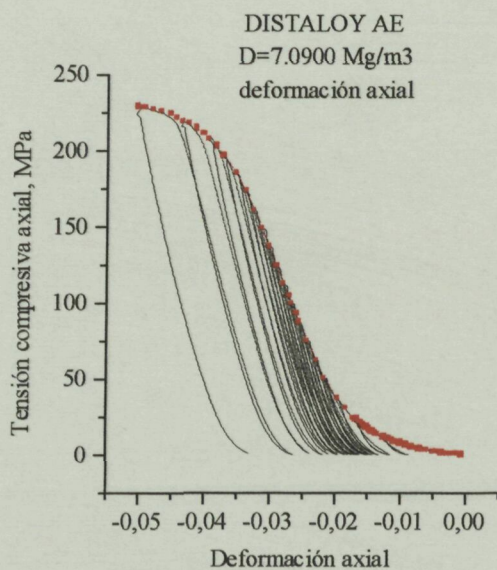


Fig. 15.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
DISTALOY AE. D= 7.0900 Mg/m³.

DEFORMACIÓN RADIAL

ASC 100.29

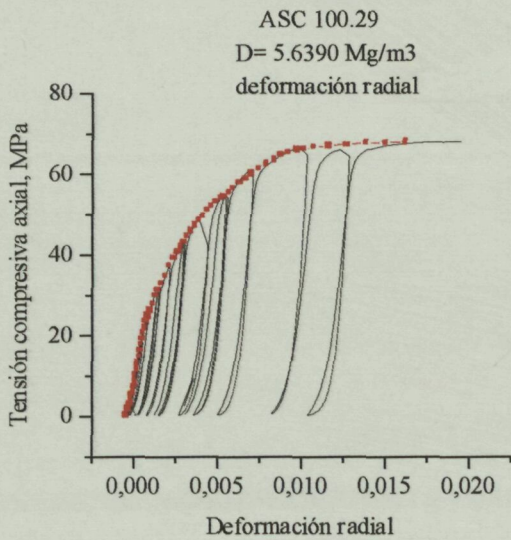


Fig. 16.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
ASC 100.29. D= 5.6390 Mg/m³.

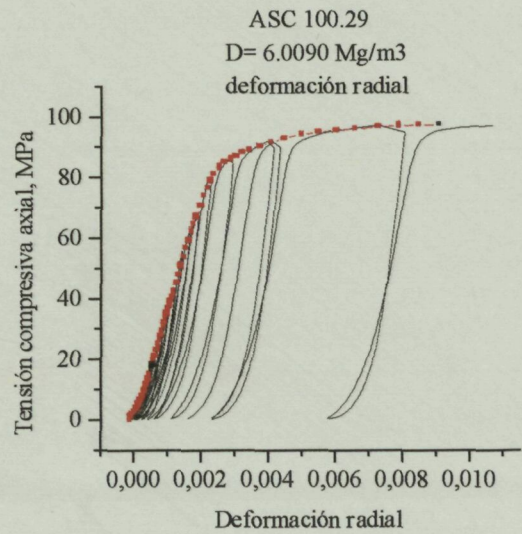


Fig. 17.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
ASC 100.29. D= 6.0090 Mg/m³.

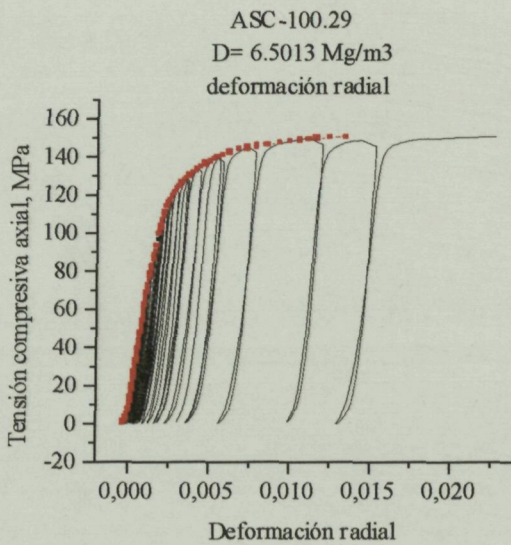


Fig. 18.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
ASC 100.29. D= 6.5013 Mg/m³.

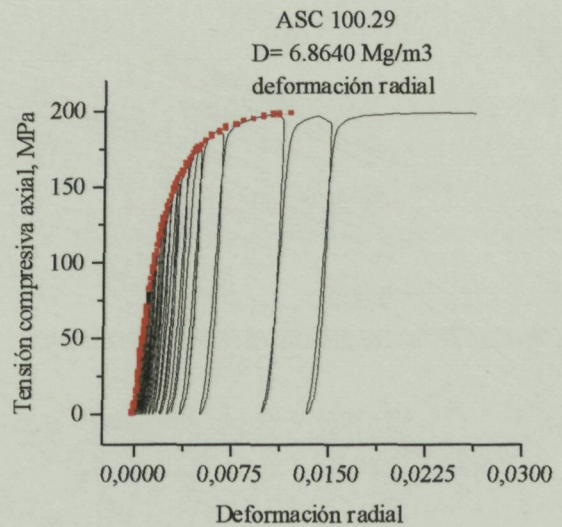


Fig. 19.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
ASC 100.29. D= 6.8640 Mg/m³.

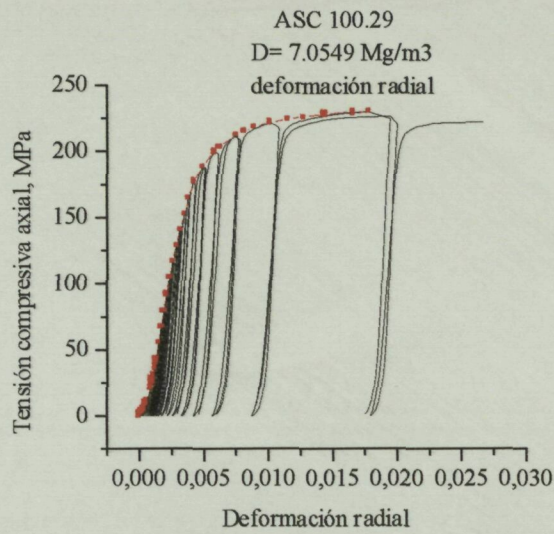


Fig. 20.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
ASC 100.29. D= 7.0549 Mg/m³.

MH 80.23

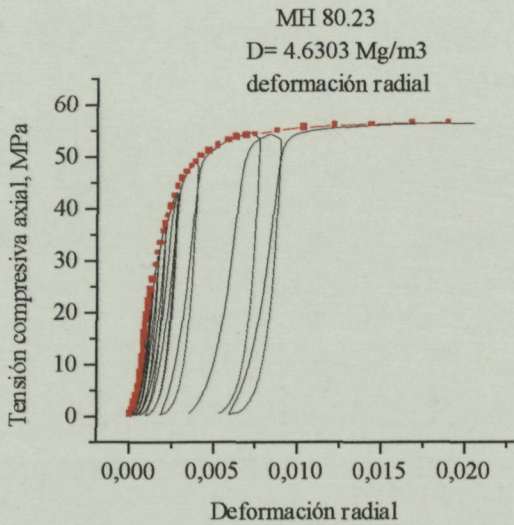


Fig. 21.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
MH 80.23. D= 4.6303 Mg/m³.

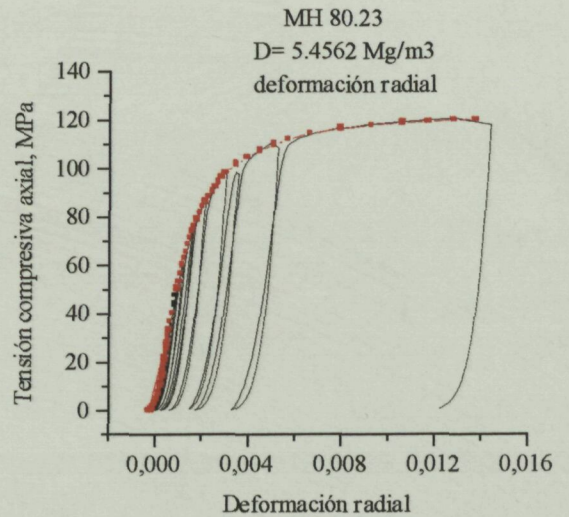


Fig. 22.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
MH 80.23. D= 5.4562 Mg/m³.

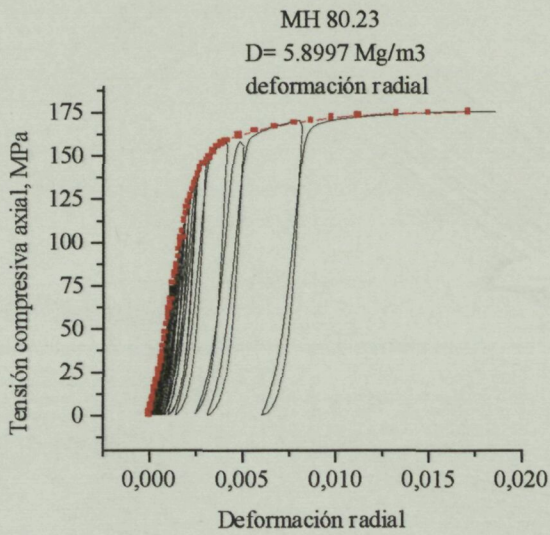


Fig. 23.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
MH 80.23. D= 5.8997 Mg/m³.

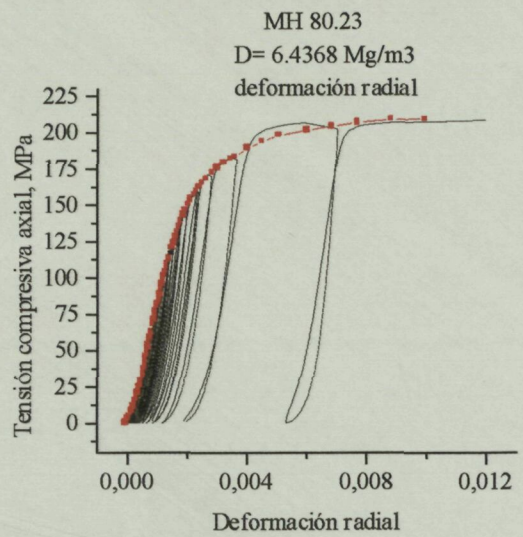


Fig. 24.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
MH 80.23. D= 6.4358 Mg/m³.

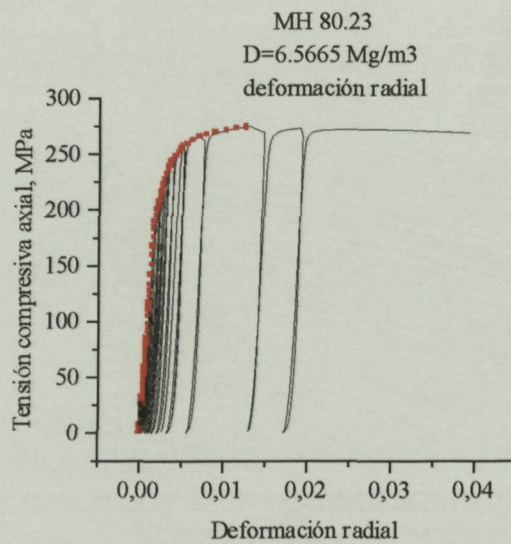


Fig. 25.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
MH 80.23. D= 6.5665 Mg/m³.

DISTALOY AE

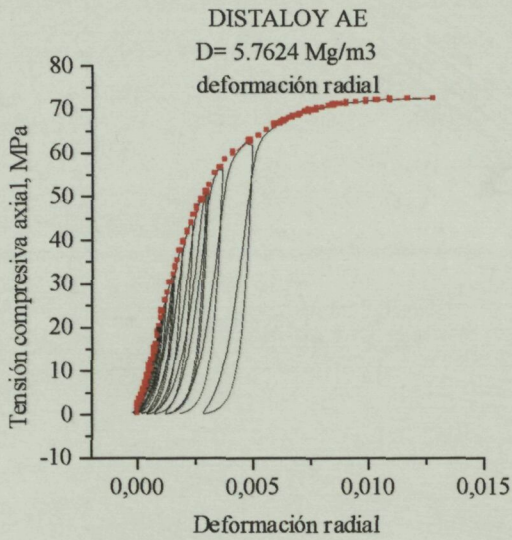


Fig. 26.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
DISTALOY AE. D= 5.7624 Mg/m³.

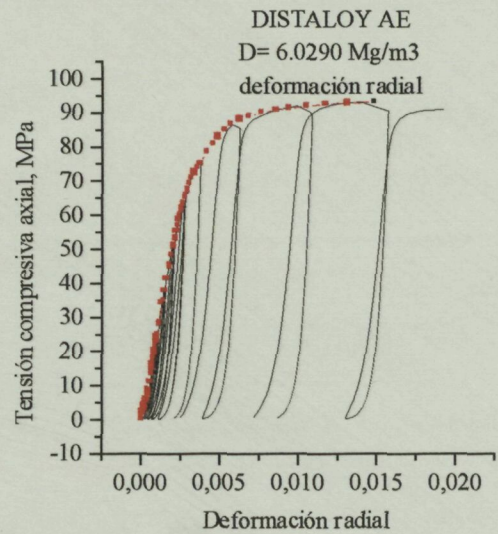


Fig. 27.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
DISTALOY AE. D= 6.0290 Mg/m³.

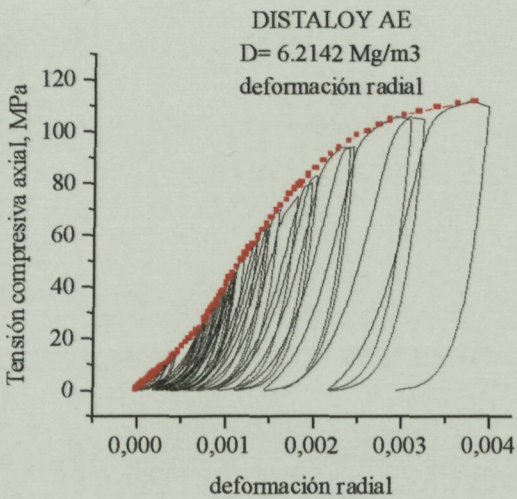


Fig. 28.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
DISTALOY AE. D= 6.2142 Mg/m³.

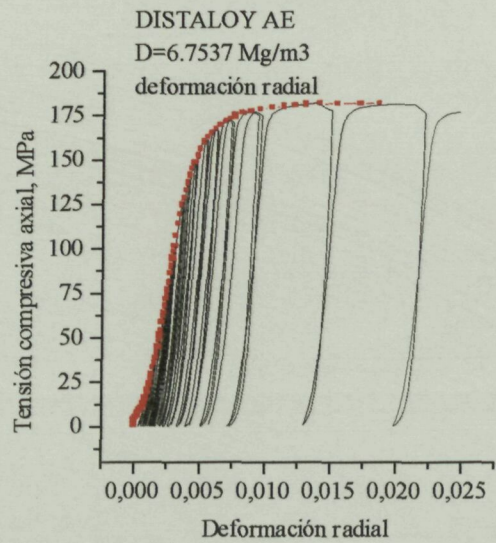


Fig. 29.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
DISTALOY AE. D= 6.7537 Mg/m³.