



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**

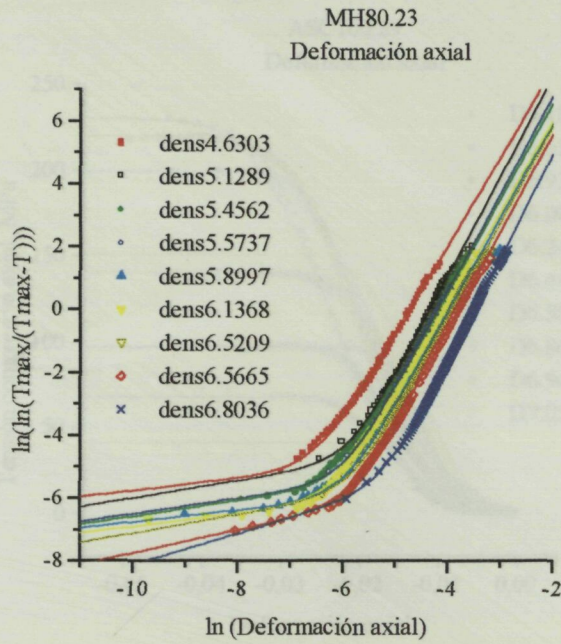


Fig. 4.27.- Ajuste de los parámetros  $\ln K_{1,2ax}$  y  $n_{1,2ax}$  para el *MH 80.23*.

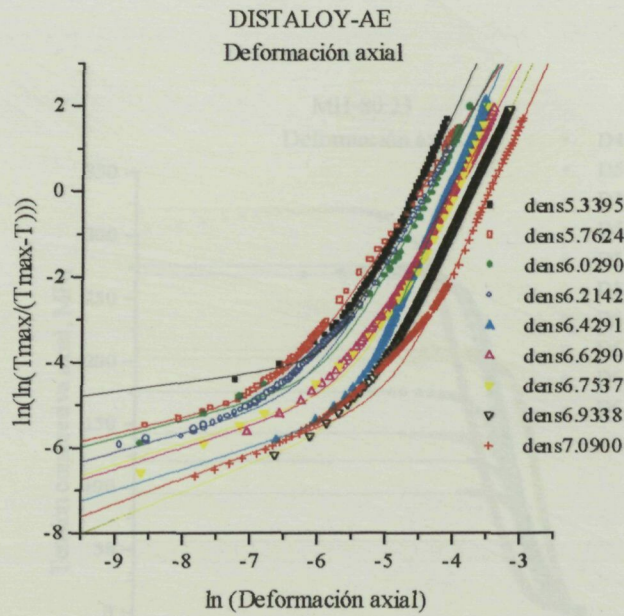


Fig. 4.28.- Ajuste de los parámetros  $\ln K_{1,2ax}$  y  $n_{1,2ax}$  para el *DISTALOY AE*.

En las figuras 4.29 a 4.31 se presentan estos mismos resultados, ahora en el plano “tensión-deformación axial”, mostrando, en todos los casos, el buen ajuste de los parámetros y el cumplimiento de la ley constitutiva representada por la ecuación (4.13).

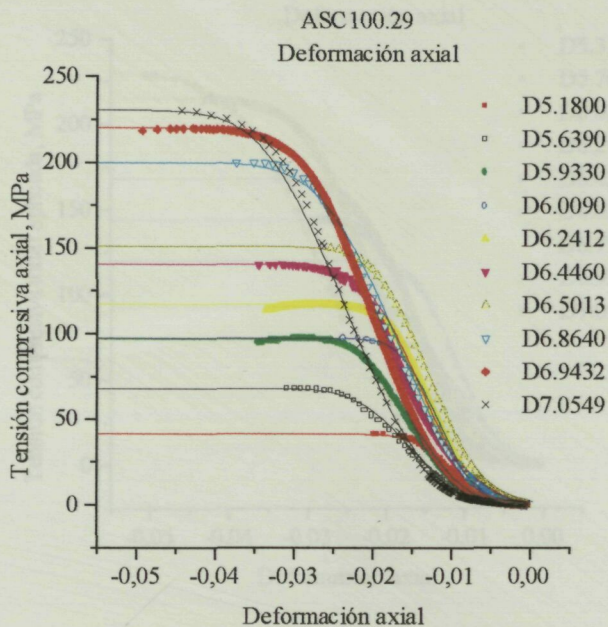


Fig. 4.29.- Deformación axial: datos experimentales y funciones con parámetros de ajuste  $\ln K_{1,2ax}$  y  $n_{1,2ax}$ . **ASC100.29**.

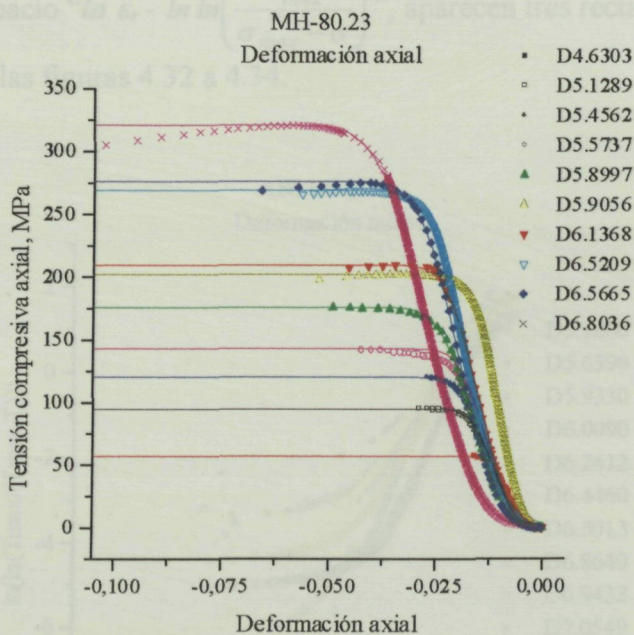


Fig. 4.30.- Deformación axial: datos experimentales y funciones con parámetros de ajuste  $\ln K_{1,2ax}$  y  $n_{1,2ax}$ . **MH80.23**.

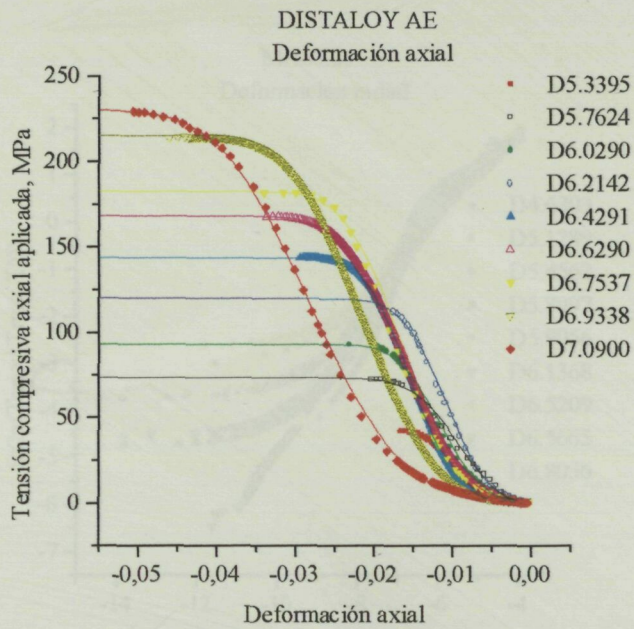


Fig. 4.31.- Deformación axial: datos experimentales y funciones con parámetros de ajuste  $\ln K_{1,2ax}$  y  $n_{1,2ax}$ . **DISTALOY AE**

La deformación en dirección radial cumple, también, una ecuación como la (4.13), expuesta para la componente axial; sin embargo, se muestra, en todos los casos, más compleja: en su representación en el espacio " $\ln \epsilon_r - \ln \ln \left( \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{max} - \sigma} \right)$ ", aparecen tres rectas, de pendiente distinta, tal como se observa en las figuras 4.32 a 4.34.

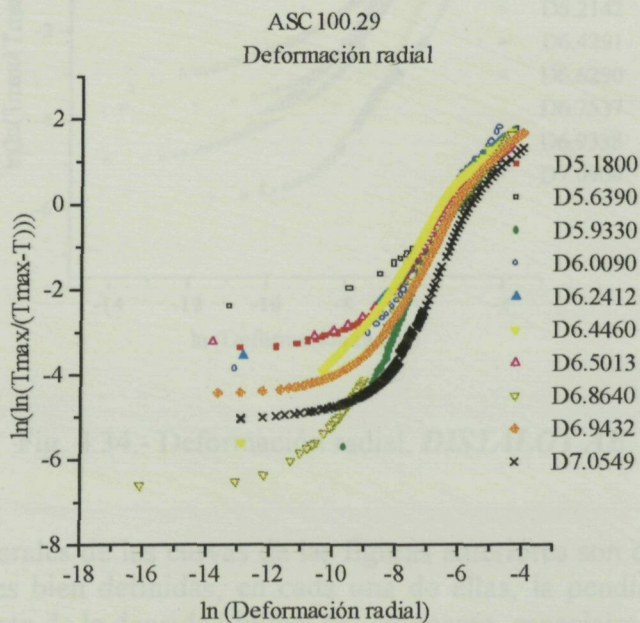


Fig. 4.32.- Deformación radial. **ASC100.29**.

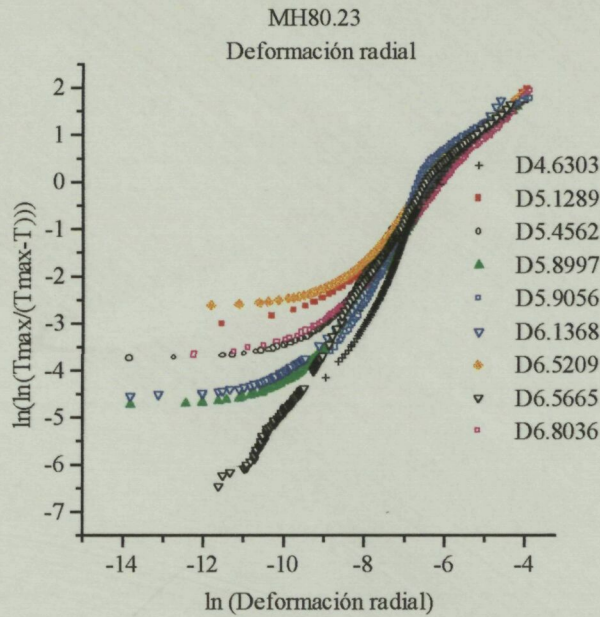


Fig. 4.33.- Deformación radial. *MH80.23*.

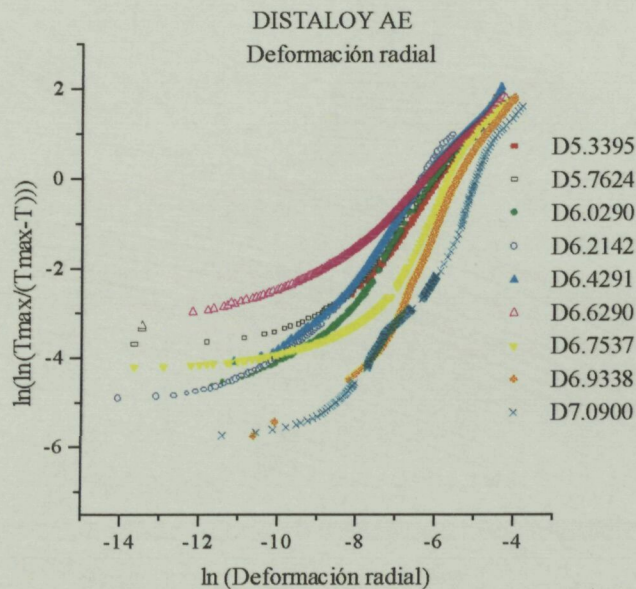


Fig. 4.34.- Deformación radial. *DISTALOY AE*.

Las características generales de las curvas de las figuras anteriores son comunes a los tres tipos de polvos: tres regiones bien definidas; en cada una de ellas, la pendiente parece mantenerse constante e independiente de la densidad inicial del compacto, especialmente en el *ASC100.29* y en el *MH80.23*, ambos de igual composición química. En el *DISTALOY AE*, en cambio, se observa cierta dependencia con la densidad inicial de la probeta. Los valores de los parámetros  $\ln K_{1,2,3r}$  y  $n_{1,2,3r}$  medidos para los tres tipos de materiales, se exponen en las tablas 4.V, 4.VI y 4.VII.

Tabla 4.V.- Valores de  $\ln K_{1,2,3r}$  y de  $n_{1,2,3r}$  para el *ASC100.29*.

Densidad, Mg/m <sup>3</sup>	$\ln K_{1r}$	$n_{1r}$	$\ln K_{2r}$	$n_{2r}$	$\ln K_{3r}$	$n_{3r}$
5.1800	-2.67	0.056	8.39	1.33	5.78	0.90
5.6390	-1.20	0.090	6.80	1.18	5.08	0.89
5.9330	-5.11	0.16	12.24	1.90	6.13	1.02
6.0090	-2.54	0.10	10.28	1.61	6.27	0.95
6.2412	-3.24	0.03	8.63	1.32	4.48	0.63
6.5013	-3.07	0.01	8.00	1.27	4.20	0.64
6.4460	-2.10	0.26	8.61	1.31	4.50	0.65
6.8640	-4.75	0.12	10.88	1.67	5.85	0.96
6.9432	-4.03	0.03	8.52	1.38	4.43	0.68
7.0549	-4.34	0.053	10.41	1.80	3.80	0.62

Tabla 4.VI.- Valores de  $\ln K_{1,2,3r}$  y  $n_{1,2,3r}$  para el *MH80.23*.

Densidad, Mg/m <sup>3</sup>	$\ln K_{1r}$	$n_{1r}$	$\ln K_{2r}$	$n_{2r}$	$\ln K_{3r}$	$n_{3r}$
4.6303	2.13	0.70	17.86	2.74	4.39	0.66
5.1289	-1.54	0.12	9.36	1.52	5.00	0.77
5.4562	-2.80	0.074	12.30	1.82	5.11	0.81
5.5737	8.38	0.84	6.64	0.98	4.70	0.66
5.8997	-4.43	0.021	8.71	1.39	4.23	0.62
5.9056	5.10	0.98	16.20	2.44	3.92	0.54
6.1368	-4.17	0.026	9.50	1.48	5.96	0.93
6.5209	-1.77	0.076	9.91	1.54	4.57	0.67
6.5665	-6.31	0.047	9.08	1.41	4.80	0.72
6.8036	-2.87	0.064	7.93	1.31	5.07	0.83

Tabla 4.VII.- Valores de  $\ln K_{1,2,3r}$  y  $n_{1,2,3r}$  para el *DISTALOY AE*.

Densidad, Mg/m <sup>3</sup>	$\ln K_{1r}$	$n_{1r}$	$\ln K_{2r}$	$n_{2r}$	$\ln K_{3r}$	$n_{3r}$
5.3395	-0.81	0.25	10.35	1.75	6.92	1.17
5.7624	-2.72	0.075	9.55	1.55	5.72	0.95
6.0290	-2.21	0.21	8.70	1.41	5.03	0.79
6.2142	-1.30	0.28	11.06	1.80	5.28	0.77
6.4291	-2.96	0.10	9.13	1.45	5.62	0.87
6.6290	-1.54	0.13	6.24	1.01	5.46	0.86
6.7537	-2.29	0.16	10.16	1.86	5.27	0.85
6.9338	-2.83	0.27	12.44	2.26	6.32	1.12
7.0900	-1.50	0.29	13.40	2.70	5.37	0.98

En las figuras siguientes, se representan los resultados para los tres polvos con los ajustes correspondientes.

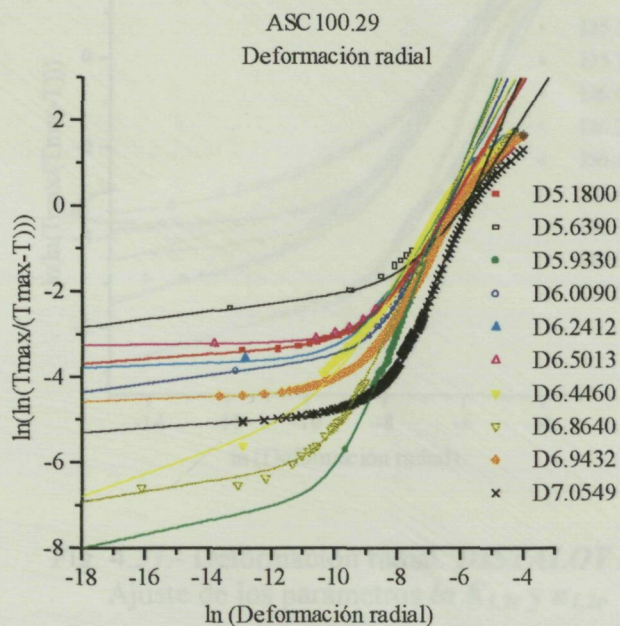


Fig. 4.35.- Deformación radial. *ASC100.29*.  
Ajustes de los parámetros  $\ln K_{1,2r}$  y  $n_{1,2r}$ .

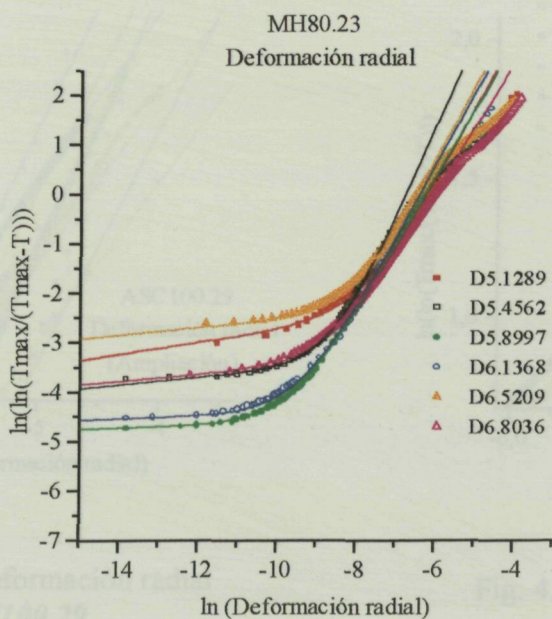


Fig. 4.36.- Deformación radial *MH80.23*.  
Ajuste de los parámetros  $\ln K_{1,2r}$  y  $n_{1,2r}$ .

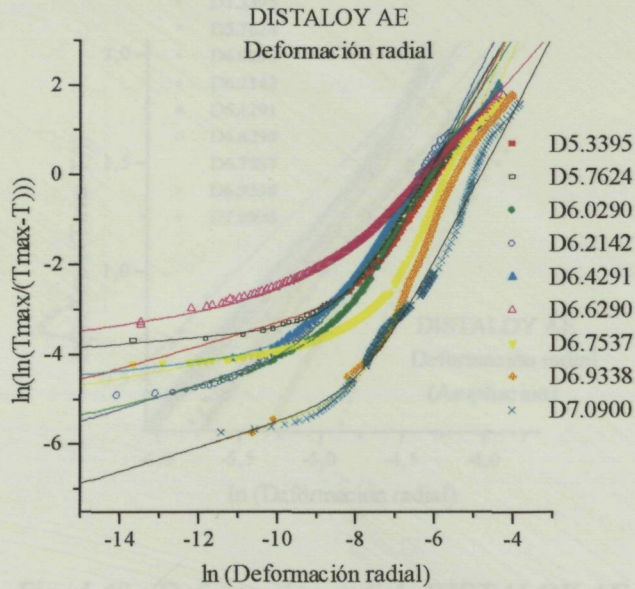


Fig. 4.37.- Deformación radial. **DISTALOY AE**.  
Ajuste de los parámetros  $\ln K_{1,2r}$  y  $n_{1,2r}$

Los ajustes para los parámetros  $\ln K_{3r}$  y  $n_{3r}$  se grafican en las figuras 4.38 a 4.40, ampliaciones de las 4.35 a 4.37, en beneficio de la claridad.

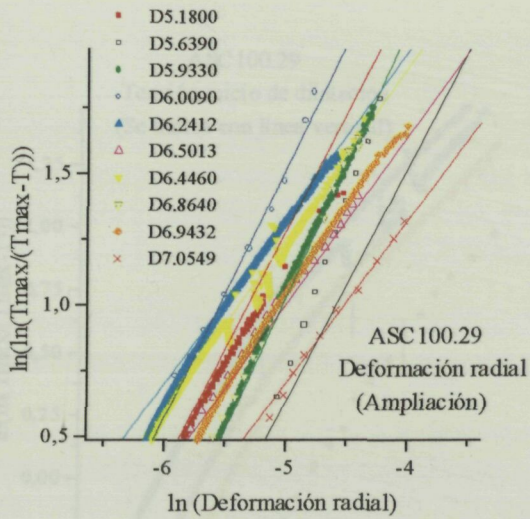


Fig. 4.38.- Deformación radial  
**ASC100.29**.  
Zona de altas tensiones.  
Ajustes para  $\ln K_{3r}$  y  $n_{3r}$

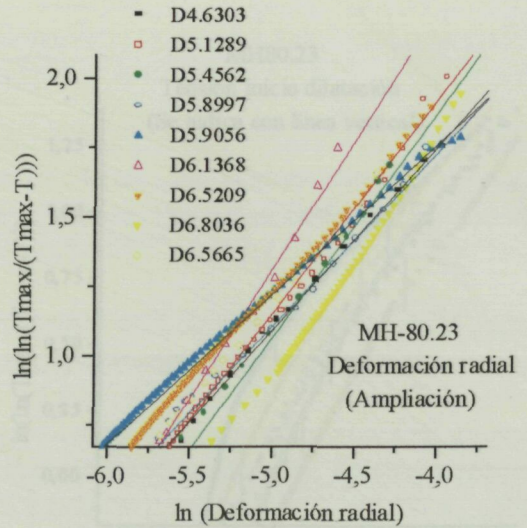


Fig. 4.39.- Deformación radial  
**MH80.23**.  
Zona de altas tensiones.  
Ajustes para  $\ln K_{3r}$  y  $n_{3r}$ .



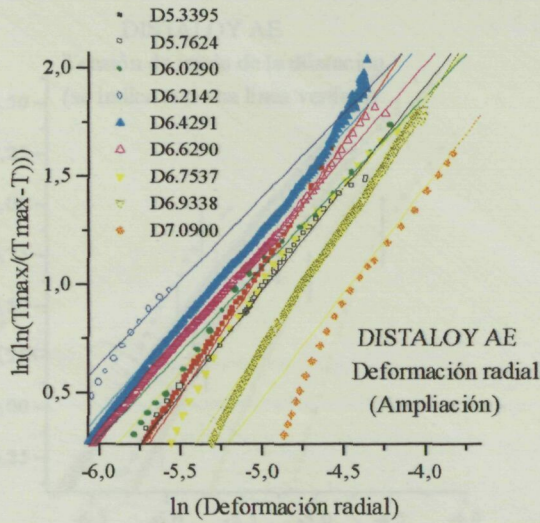


Fig. 4.40.- Deformación radial. *DISTALOY AE*.  
Zona de altas tensiones.  
Ajuste de  $\ln K_{3r}$  y  $n_{3r}$ .

Al igual que para la deformación axial, el valor de  $n_{1r}$ , asociado a una región de deformación plástica, es bajo; para la etapa intermedia, elástica,  $n_{2r}$  es, en cambio, mucho mayor. La tercera zona corresponde a la fase de dilatación. En las figuras siguientes puede verse cómo la transición entre la segunda y la tercera recta, en el espacio logarítmico, coincide, en todos los casos, con el inicio de la dilatación del compacto.

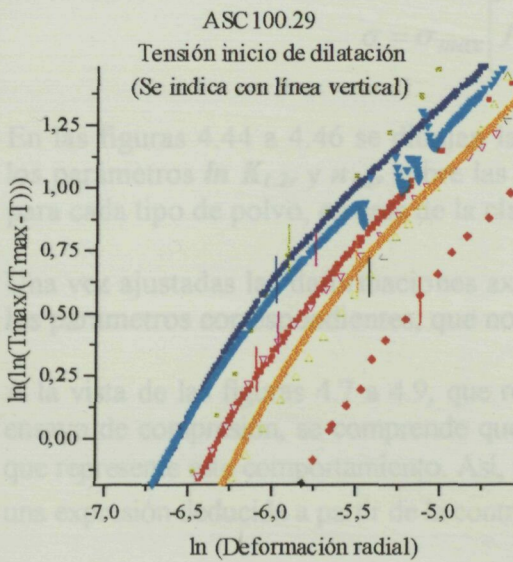


Fig. 4.41.- Tensión de inicio de la dilatación durante la compresión uniaxial. Coincide con el inicio de la tercera recta.  
*ASC100.29*.

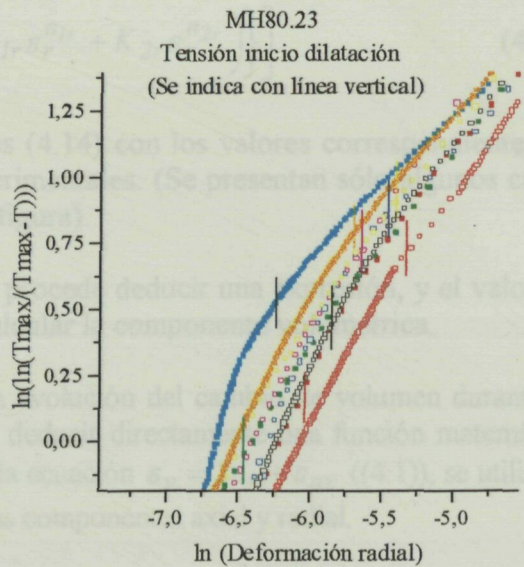


Fig. 4.42.- Tensión de inicio de la dilatación durante la compresión uniaxial. Coincide con el inicio de la tercera recta.  
*MH80.23*.

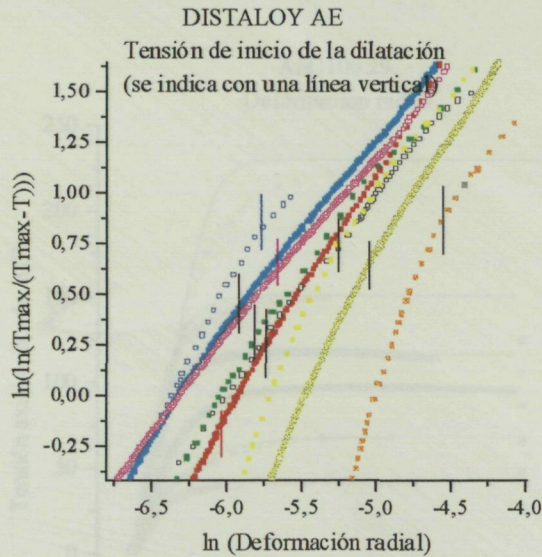


Fig. 4.43.- Tensión de inicio de la dilatación durante la compresión uniaxial. Coincide con el inicio de la tercera recta. **DISTALOY AE.**

El hecho de que sólo la componente radial muestre el fenómeno de dilatación, indica que este fenómeno consiste, básicamente, en un importante aumento del diámetro del compacto durante la compresión uniaxial. Entonces, y hasta el inicio de la dilatación, la deformación radial y la tensión aplicada se relacionan mediante una expresión tal como la siguiente:

$$\sigma = \sigma_{max} \left[ 1 - \exp \left\{ - \left( K_{1r} \varepsilon_r^{n_{1r}} + K_{2r} \varepsilon_r^{n_{2r}} \right) \right\} \right] \quad (4.14)$$

En las figuras 4.44 a 4.46 se dibujan las ecuaciones (4.14) con los valores correspondientes de los parámetros  $\ln K_{1,2r}$  y  $n_{1,2r}$  sobre las curvas experimentales. (Se presentan sólo algunos casos para cada tipo de polvo, en aras de la claridad de la figura).

Una vez ajustadas las deformaciones axial y radial, procede deducir una expresión, y el valor de los parámetros correspondientes, que nos permita calcular la componente volumétrica.

A la vista de las figuras 4.7 a 4.9, que representan la evolución del cambio de volumen durante el ensayo de compresión, se comprende que no es fácil deducir directamente una función matemática que represente este comportamiento. Así, y aplicando la ecuación  $\varepsilon_v = 2\varepsilon_r + \varepsilon_{ax}$  ((4.1)), se utilizará una expresión deducida a partir de la contribución de las componentes axial y radial.

Sin embargo, no es posible despejar  $\varepsilon_{ax}$  y  $\varepsilon_r$  de ecuaciones tales como las (4.13) y (4.14).

Para resolver esta situación, se trabajará con una simplificación de las componentes axial y radial de la deformación, tal como se ha avanzado anteriormente.

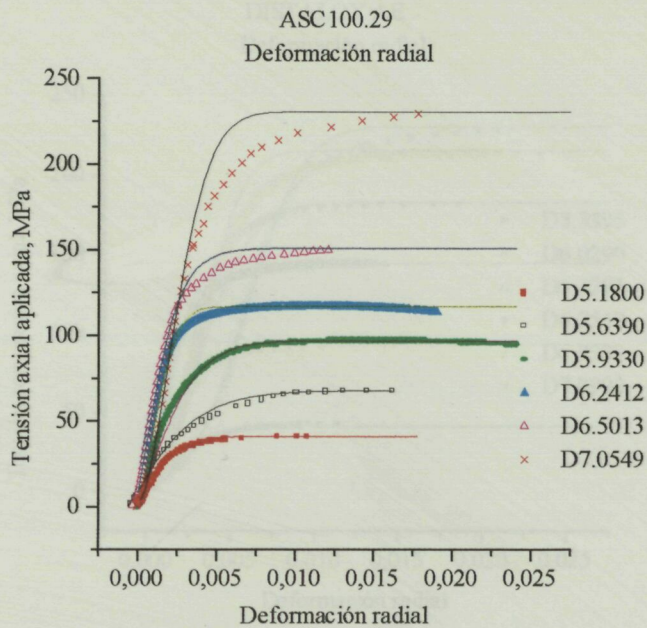


Fig. 4.44.- Ajustes de la ecuación (4.14) sobre la evolución de la deformación radial.  
**ASC 100.29.**

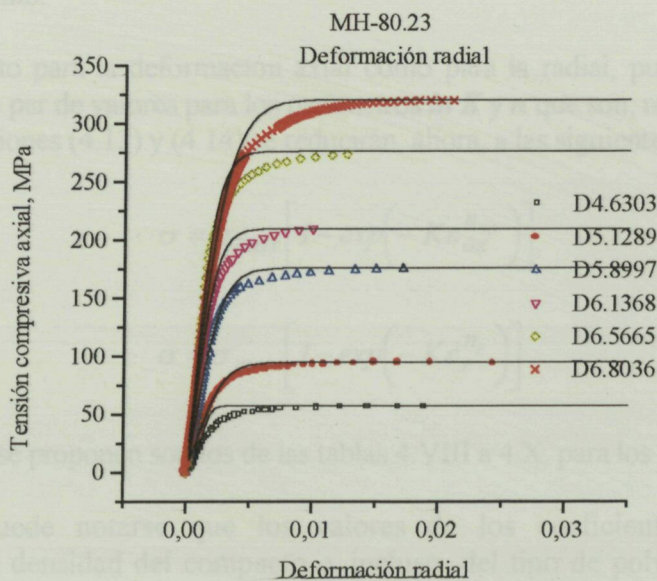


Fig. 4.45.- Ajustes de la ecuación (4.14) sobre la evolución de la deformación radial.  
**MH 80.23.**

DISTALOY AE  
Deformación radial

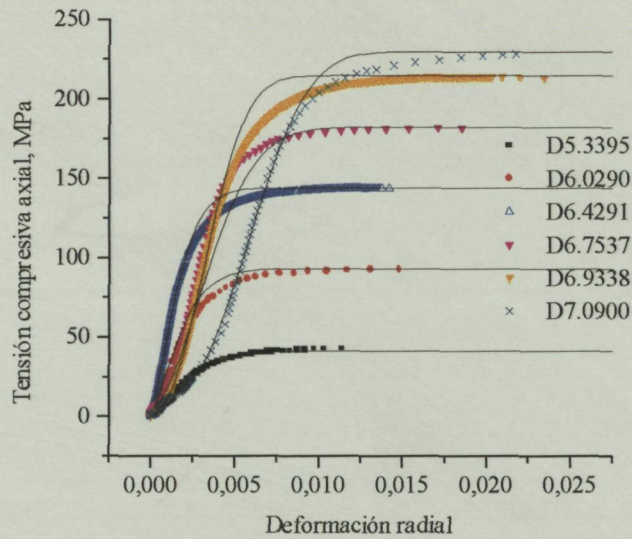


Fig. 4.46.- Ajustes de la ecuación (4.14) sobre la evolución de la deformación radial.  
**ASC 100.29.**

De los datos que figuran en las tablas 4.II a 4.VII, para los parámetros  $\ln K_{ax,r}$  y  $n_{ax,r}$  previos a la inestabilidad plástica, se han comentado ya ciertas tendencias que permitirán un tratamiento matemático más sencillo.

En primer lugar, tanto para la deformación axial como para la radial, puede encontrarse un ajuste aceptable con un solo par de valores para los parámetros  $\ln K$  y  $n$  que son, respectivamente,  $\ln K_{ax}$ ,  $n_{ax}$  y  $\ln K_r$ ,  $n_r$ . Las ecuaciones (4.13) y (4.14) se reducirán, ahora, a las siguientes:

$$\sigma = \sigma_{max} \left[ 1 - \exp\left(-K \varepsilon_{ax}^{n_{ax}}\right) \right] \quad (4.15)$$

$$\sigma = \sigma_{max} \left[ 1 - \exp\left(-K \varepsilon_r^{n_r}\right) \right] \quad (4.16)$$

y los parámetros que se proponen son los de las tablas 4.VIII a 4.X, para los tres tipos de polvos.

En estas tablas, puede notarse que los valores de los coeficientes  $n$  son, en general, independientes de la densidad del compacto  $e$ , incluso, del tipo de polvo en algunos casos. Es, por lo tanto, un parámetro ligado al mecanismo que rige el comportamiento del material. Así, se han ajustado a un único valor, 3, para la deformación axial y a 1.18 y 1.42, para la radial. Nuevamente, el **MH80.23** muestra ciertas diferencias con respecto a los otros dos materiales, sobre todo en lo que a la componente radial se refiere.

A pesar de que este tratamiento no incluye la zona de dilatación, en las tablas 4.VIII a 4.X se han incluido los parámetros  $\ln K_{3r}$  y  $n_{3r}$  que se acoplan más adecuadamente a los resultados experimentales, fijando el exponente  $n$ .

Tabla 4.VIII.- Valores de  $\ln K_{ax}$ ,  $n_{ax}$  y  $\ln K_r$ ,  $n_r$  para el *ASC100.29*.

Densidad, Mg/m <sup>3</sup>	$\ln K_{ax}$	$n_{ax}$	$\ln K_r$	$n_r$	$\ln K_{3r}$	$n_{3r}$
5.1800	13.50	3	4.99	1.42	5.25	0.80
5.6390	12.10	3	8.86	1.42	4.58	0.80
5.9330	12.24	3	8.83	1.42	5.10	0.80
6.0090	12.98	3	9.00	1.42	5.37	0.80
6.2412	12.83	3	9.40	1.42	5.42	0.80
6.5013	12.73	3	8.70	1.42	5.10	0.80
6.4460	12.20	3	9.36	1.42	5.35	0.80
6.8640	11.74	3	8.80	1.42	5.00	0.80
6.9432	11.40	3	8.70	1.42	5.05	0.80
7.0549	11.00	3	8.00	1.42	4.72	0.80

Tabla 4.IX.- Valores de  $\ln K_{ax}$ ,  $n_{ax}$  y  $\ln K_r$ ,  $n_r$  para el *MH80.23*.

Densidad, Mg/m <sup>3</sup>	$\ln K_{ax}$	$n_{ax}$	$\ln K_r$	$n_r$	$\ln K_{3r}$	$n_{3r}$
4.6303	14.15	3	7.35	1.18	4.44	0.67
5.1289	12.90	3	7.30	1.18	4.50	0.67
5.4562	12.60	3	7.37	1.18	4.37	0.67
5.5737	12.40	3	8.20	1.18	4.76	0.67
5.8997	11.95	3	7.07	1.18	4.45	0.67
5.9056	13.24	3	7.80	1.18	4.63	0.67
6.1368	12.20	3	7.48	1.18	4.57	0.67
6.5209	11.69	3	7.45	1.18	4.57	0.67
6.5665	11.40	3	7.55	1.18	4.50	0.67
6.8036	10.50	3	7.16	1.18	4.32	0.67

Tabla 4.X.- Valores de  $\ln K_{ax}$ ,  $n_{ax}$  y  $\ln K_r$ ,  $n_r$  para el *DISTALLOY AE*.

Densidad, Mg/m <sup>3</sup>	$\ln K_{ax}$	$n_{ax}$	$\ln K_r$	$n_r$	$\ln K_{3r}$	$n_{3r}$
5.3395	13.64	3	8.38	1.42	5.80	0.95
5.7624	13.50	3	8.58	1.42	5.72	0.95
6.0290	13.05	3	8.57	1.42	5.80	0.95
6.2142	13.18	3	8.85	1.42	6.02	0.95
6.4291	12.27	3	8.95	1.42	6.01	0.95
6.6290	12.04	3	6.13	0.97	6.00	0.95
6.7537	11.90	3	10.67	1.88	5.73	0.95
6.9338	11.20	3	11.69	2.13	5.54	0.95
7.0900	10.44	3	13.50	2.70	5.22	0.95

En estas condiciones, puede ya definirse una ecuación aproximada para la deformación volumétrica tal como la siguiente:

$$\varepsilon_v = 2 \left[ \ln \left( \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{max} - \sigma} \right)^{1/K_r} \right]^{1/n_r} + \left[ \ln \left( \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{max} - \sigma} \right)^{1/K_{ax}} \right]^{1/n_{ax}} \quad (4.17)$$

En las figuras 4.47 a 4.49, se superponen, a las experimentales, las curvas de relación entre la tensión compresiva axial y la deformación volumétrica obtenidas mediante la ecuación (4.17).

Los resultados de los ajustes concuerdan aceptablemente bien con los obtenidos experimentalmente.

En estas mismas figuras se ha incluido, además, el ajuste correspondiente a la tercera región. Se han representado sólo parte de las probetas ensayadas en beneficio de la claridad, pero, en todos los casos, el acuerdo es igualmente bueno.

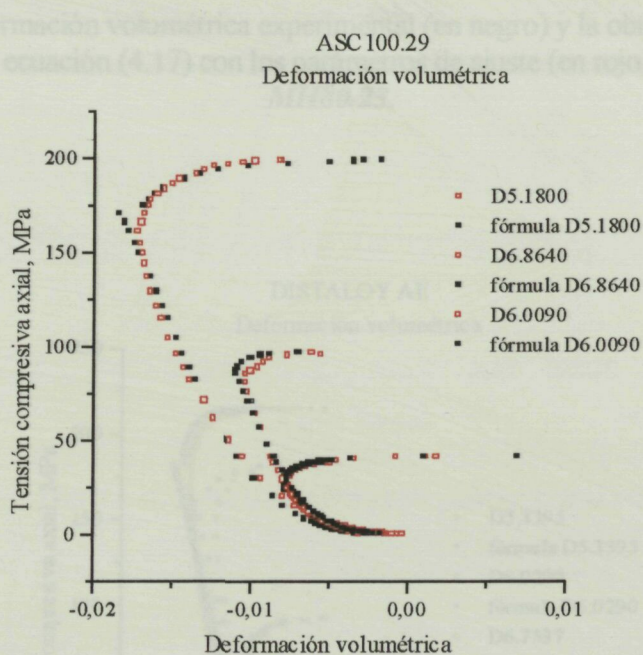


Fig. 4.47.- Deformación volumétrica experimental (en negro) y la obtenida mediante la ecuación (4.17) con los parámetros de ajuste (en rojo).  
*ASC100.29.*

Sin duda alguna, un aspecto importante del comportamiento de estos compactos convencionales. Además, en esta fase del ensayo, su comportamiento elástico es similar a los compactos convencionales (figura 4.50) y la eyección posterior del compacto en la dirección de compresión. Las microfisuras se cierran y la deformación plástica inicial

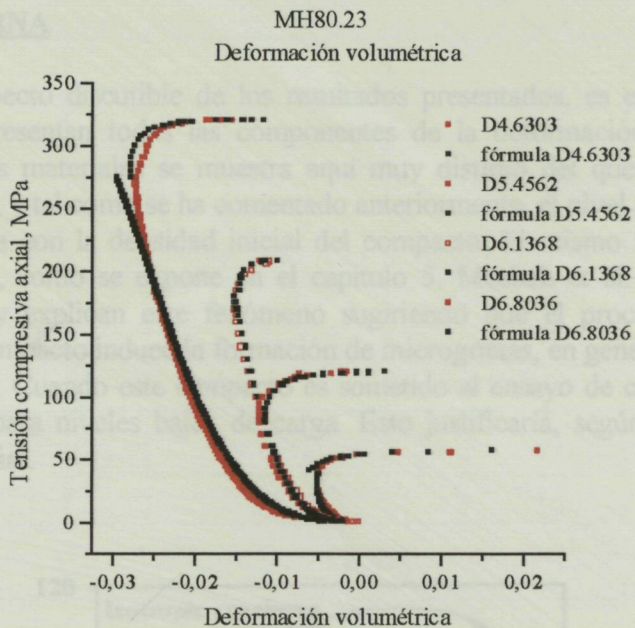


Fig. 4.48.- Deformación volumétrica experimental (en negro) y la obtenida mediante la ecuación (4.17) con los parámetros de ajuste (en rojo).  
**MH80.23.**

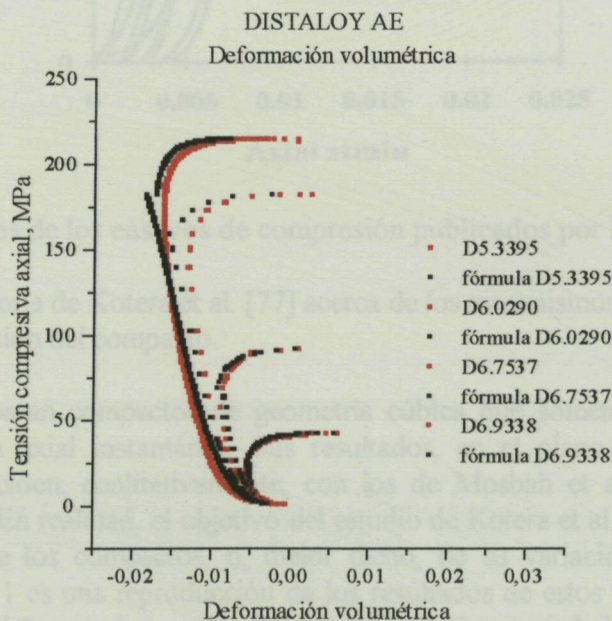


Fig. 4.49.- Deformación volumétrica experimental (en negro) y la obtenida mediante la ecuación (4.17) con los parámetros de ajuste (en rojo).  
**DISTALOY AE.**

#### 4.4. FRICCIÓN INTERNA

Sin duda alguna, un aspecto discutible de los resultados presentados, es el de la etapa inicial del ensayo, el “pie” que presentan todas las componentes de la deformación a bajas tensiones. El comportamiento de estos materiales se muestra aquí muy distinto del que es habitual en metales convencionales. Además, y tal como se ha comentado anteriormente, el nivel de plastificación, en esta fase del ensayo, aumenta con la densidad inicial del compacto. El mismo fenómeno aparece en el comportamiento elástico, como se expone en el capítulo 5. Mosbah et al. [4] obtienen resultados similares (figura 4.50) y explican este fenómeno sugiriendo que el proceso de compactación y eyección posterior del compacto induce la formación de microgrietas, en general, perpendiculares a la dirección de compresión. Cuando este compacto es sometido al ensayo de compresión simple, estas microgrietas se cierran para niveles bajos de carga. Esto justificaría, según los autores citados, la deformación plástica inicial.

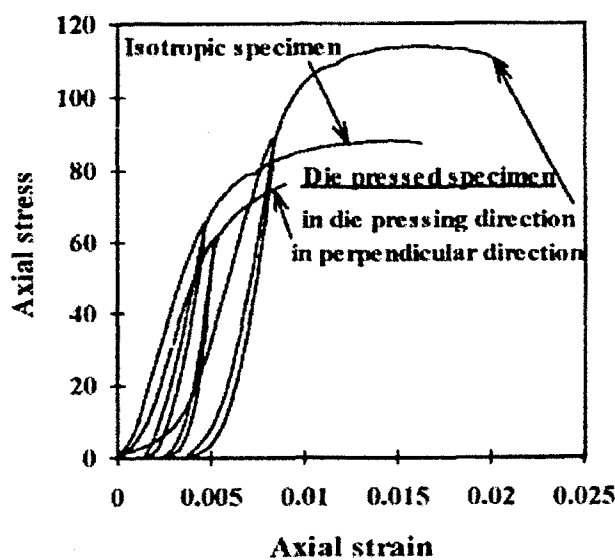


Fig. 4.50.- Resultados de los ensayos de compresión publicados por P. Mosbah et al. [4].

Más probable parece la teoría de Kotera et al. [77] acerca de los mecanismos que, a nivel de partícula, operan durante la elaboración del compacto.

Estos investigadores preparan compactos de geometría cúbica que someten a compresión simple, midiendo la deformación axial instantánea. Sus resultados, en el plano “tensión axial aplicada-deformación axial”, coinciden, cualitativamente, con los de Mosbah et al. [4] y con los que se presentan en este trabajo. En realidad, el objetivo del estudio de Kotera et al. [77] es la determinación del módulo de Young de los compactos, o, mejor dicho, de su variación durante el ensayo de compresión. La figura 4.51 es una reproducción de los resultados de estos investigadores, en la que puede observarse el especialmente bajo valor del módulo elástico, para bajas deformaciones, de los compactos de mayor densidad. (En la figura citada, el símbolo  $\rho$  representa la densidad relativa inicial de la probeta ensayada, o sea, la relación entre la densidad del compacto y la del material en estado totalmente denso). Se comprende, así, la deformación plástica que sufren los compactos al inicio del ensayo de compresión, así como la mayor intensidad de este fenómeno al aumentar la densidad inicial de dichos compactos.



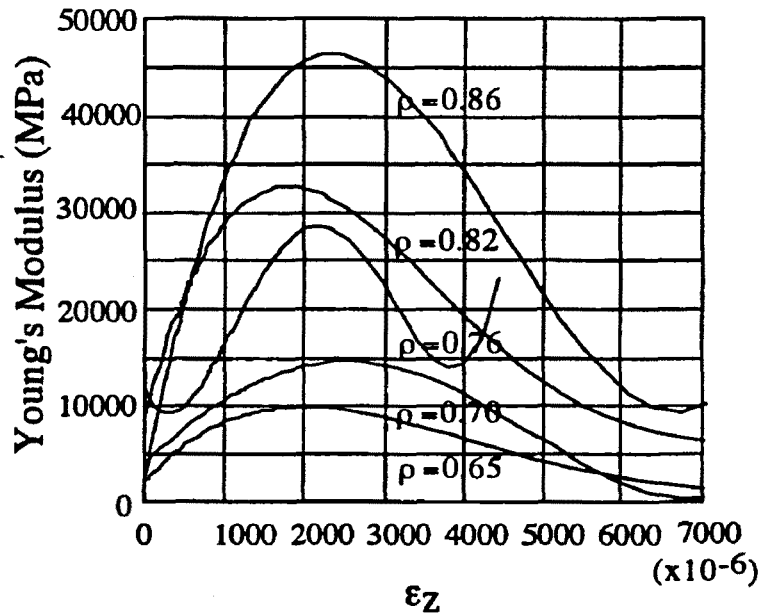


Fig. 4.51.- Resultados experimentales publicados por H. Kotera et al. [77].

Según estos autores, durante la compactación, se “construye” una estructura que depende de la presión aplicada y de la cantidad de deformación inducida. Esta estructura está constituida por partículas que se unen íntimamente y/o contactan entre sí elastoplásticamente. Durante la descarga, tras la compactación, los compactos sufren una recuperación elástica, tanto más intensa cuanto mayor ha sido la presión de compresión. Kotera et al. [77] sugieren que esta recuperación elástica provoca la separación parcial de las partículas a través de los contactos entre ellas y, en algunos casos, a través de las uniones íntimas. Así, la rigidez de los compactos tras descarga, es inferior a la que presentan antes de ella. Cuando dichos compactos se someten a compresión simple, los contactos entre las partículas, parcialmente separadas, se restablecen y, como consecuencia de ello, la rigidez se incrementa.

La misma figura 4.51 indica la existencia de un límite en este incremento, a partir del cual el módulo disminuye continuamente. Según los autores, esta disminución coincide con la rotura gradual de la estructura antes descrita del compacto y con el mecanismo de deformación plástica.

A pesar de compartir con estos autores su opinión acerca de los mecanismos involucrados en el proceso, Kotera et al. [77] no explican cuál puede ser la causa.

Durante la compactación del polvo en molde, el propio proceso de compresión simple (ver figura 3.12) y el efecto del rozamiento, generan un estado triaxial de tensiones heterogéneo. Al retirar el punzón, el compacto sufre una recuperación, en principio elástica, que incrementa su altura. No obstante, la experiencia demuestra que la pieza compactada queda sometida a tensiones residuales, básicamente de componente radial, ya que, en la eyección, es frecuente la aparición de grietas, sobre todo en geometrías complejas. Algunos investigadores sugieren que, en estas últimas etapas de la elaboración de la preforma porosa, retirada del punzón y eyección, las tensiones residuales superan el límite de cedencia del material y le causan deformación plástica. En este sentido, Pléney y Meyer [2] elaboran el *diagrama de compresión* (figura 4.52) de un polvo de hierro (NC100.24, de Höganäs), tipo esponja, de características morfológicas y composicionales parecidas a las del MH 80.23.

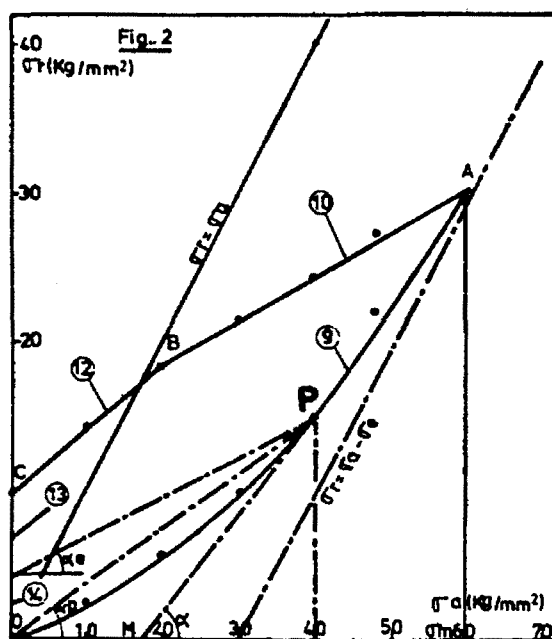


Fig. 4.52.- Diagrama de compresión de un polvo de hierro (NC100.24 + 1% Acrawax). [2].

En este diagrama, se representa la relación entre la tensión axial aplicada al polvo y la componente radial que se desarrolla durante el proceso de compactación simple en molde y retirada del punzón. Los autores sugieren para la primera etapa, representada en el diagrama por la curva  $OA$ , los mismos mecanismos de deformación y densificación tradicionalmente aceptados (re-arreglo de partículas y deformaciones elástica y plástica). Al retirar el punzón, Pléney y Meyer [2] encuentran una región de  $\sigma_r/\sigma_a$  constante (recta  $AB$ ) para la que la deformación del aglomerado es puramente elástica. La tensión radial que actúa todavía sobre el compacto provoca, a lo largo del segmento final  $BC$ , su deformación plástica. Además, tal como puede verse en la figura 4.52, las tensiones residuales pueden ser suficientemente altas para que, en la eyección del aglomerado, ocurra una deformación plástica adicional. Por supuesto, ello dependerá del tipo de polvo y de la densidad del aglomerado; pero, en todo caso, explica situaciones observadas experimentalmente y mediante simulación [78].

*A priori*, nos parece aventurado asignar el cambio de pendiente (de  $AB$  a  $BC$ ) durante la descarga a un cambio de mecanismo. En nuestra opinión, y ya que no parece fácil comprobarlo experimentalmente, los segmentos  $AB$  y  $BC$  son, en realidad, curvos y corresponden a una deformación básicamente elástica. Una forma de analizar la posibilidad de que el compacto se deforme plásticamente durante su elaboración, se basa en trasladar el estado tensional al espacio “presión hidrostática-tensión desviadora” y estudiar su posición con respecto a las superficies de cedencia del material.

El primer problema es conocer la transmisión de la tensión axial aplicada a través de las partículas de polvo y la influencia del molde. A pesar de que, en la literatura, pueden encontrarse diversos estudios al respecto [2], [3], [4], [5] y [6] y todos ellos con resultados muy parecidos entre sí, no hay, hasta este momento, un modelo universalmente aceptado; quizás, ello sea debido a que, en cada caso, las expresiones propuestas por los diferentes autores son sólo válidas para un tipo concreto de polvo metálico.

Para este trabajo se utilizará el llevado a cabo por E. Pavier [6], para el *DISTALOY AE*, por ser el estudio más reciente e incluir datos suficientes para un correcto tratamiento.

Según Pavier [6], el diagrama de compresión del polvo tipo *DISTALLOY AE*, es el mostrado en la figura 4.53. Corresponde a la fabricación de un compacto de densidad, bajo carga, igual a  $7.2 \text{ Mg/m}^3$ . Su comparación con el de la figura 4.52, para el NC100.24, permite notar las diferencias entre los dos tipos de polvo.

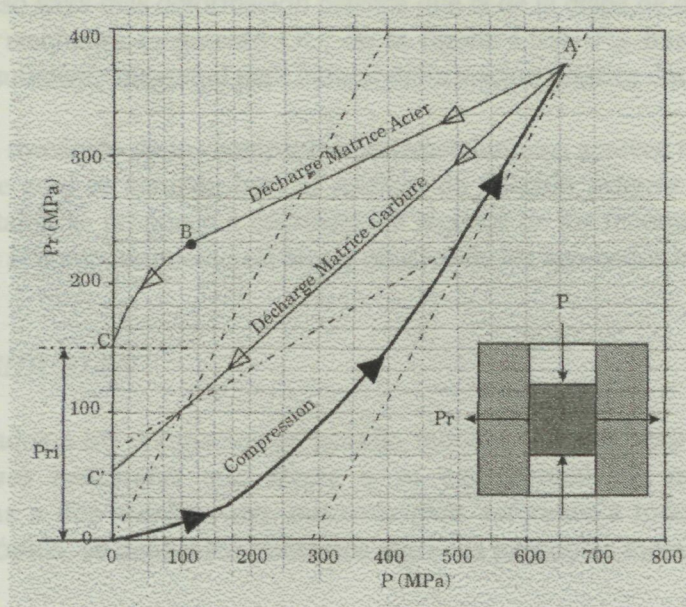


Fig. 4.53.- Diagrama de compresión del polvo *DISTALLOY AE* hasta  $D= 7.2 \text{ Mg/m}^3$ . [6].

Esta misma trayectoria de carga, en el espacio “p-q”, se muestra en la figura 4.54, junto con las superficies de cedencia, dadas por la misma autora, para el polvo descrito.

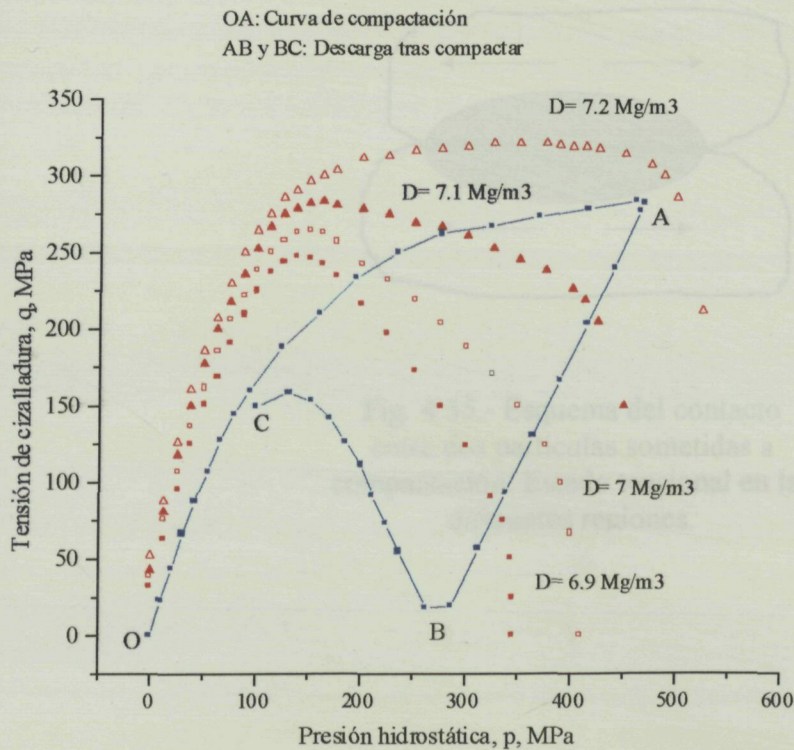


Fig. 4.54.- Trayectoria de compactación y descarga y superficies de cedencia para diversas densidades, en el espacio “tensión hidrostática-tensión de cizalladura”. *DISTALLOY AE*. [6].

Durante la compactación del polvo y partiendo del estado "suelto", la trayectoria de carga (curva OA) va definiendo, atravesando, superficies de cedencia sucesivas a medida que aumenta la densidad del compacto. Pero, tal como indica la evolución de los segmentos AB y BC, durante la retirada del punzón, el aglomerado se mantiene siempre, como cabía esperar, por debajo de la superficie de cedencia correspondiente al compacto elaborado. Por lo tanto, no parece posible que, en ningún momento del proceso haya más deformación plástica que la de la etapa de compactación. Tampoco el nivel de tensiones residuales (segmento OC, en la figura 4.53),  $P_{ri}$ , tras la retirada completa del punzón, parece de suficiente magnitud para inducir deformación plástica durante la eyección.

El comportamiento mecánico de los compactos pulvimetalúrgicos aparece muy influido por una serie de mecanismos que aquí se agrupan bajo el nombre de *fricción interna*. Aunque no se presentan pruebas experimentales, se proponen a continuación algunos de los fenómenos que la autora de este trabajo cree ligados al comportamiento elástico y plástico de los agregados metálicos.

### TENSIONES RESIDUALES

Los ensayos aplicados a los compactos en estudio indican que su elaboración induce en ellos un estado de *tensiones residuales* que afecta a su comportamiento mecánico posterior. Esta situación se origina a dos escalas; una, macroscópica, referente a todo el compacto; la otra, a nivel más microscópico, se debe a los contactos entre las partículas metálicas.

En la etapa de compactación, los contactos entre partículas crecen por deformación elástica y plástica de dichas partículas. Es muy probable que, especialmente para las densidades medias y bajas, sólo haya deformación plástica en la zona de contacto y en sus inmediaciones (ver figura 4.55); hay que esperar, pues, que la diferencia de estado con respecto del núcleo, dé lugar a tensiones residuales a nivel local. Incluso las partículas totalmente plastificadas, lo son de forma heterogénea, de manera que pueden representarse mediante el mismo esquema de la figura 4.55

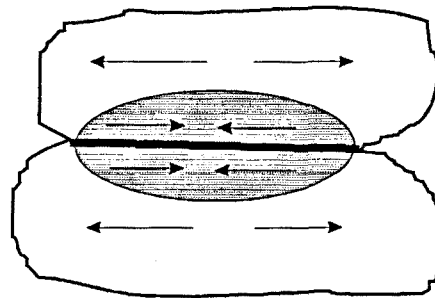


Fig. 4.55.- Esquema del contacto entre dos partículas sometidas a compactación. Estado tensional en las diferentes regiones.