



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**

## **4. COMPORTAMIENTO ELASTOPLÁSTICO DE LOS COMPACTOS METÁLICOS**

## 4. COMPORTAMIENTO ELASTOPLÁSTICO DE LOS COMPACTOS METÁLICOS

El comportamiento mecánico de los materiales granulares está dominado por los cambios de volumen asociados a la aplicación de un esfuerzo. Así, toda ecuación constitutiva debe relacionar el estado de tensiones aplicado y la componente de la deformación volumétrica. Éste ha sido uno de los objetivos del análisis de los ensayos de compresión uniaxial, descritos en el capítulo 3. El otro, profundizar en el conocimiento de los mecanismos y fenómenos que rigen el comportamiento a deformación de los agregados metálicos.

Aunque se pretende deducir una ecuación que ligue tensión y deformación volumétrica, las componentes axial y radial aportan *per se* información de gran interés. Así, pues, se presentan los resultados completos, con el fin de analizar con detalle los datos experimentales.

### 4.1. EVOLUCIÓN DE LAS COMPONENTES DE LA DEFORMACIÓN

La evolución de la deformación axial con la tensión compresiva axial aplicada durante el proceso de carga se presenta, para los tres tipos de polvos, en las figuras 4.1 a 4.3. En todos los casos, la tensión compresiva se ha considerado positiva, con el fin de simplificar el tratamiento. Se han dibujado en un mismo gráfico los datos correspondientes a todas las probetas de un mismo polvo; de esta manera, puede estudiarse con mayor facilidad el efecto del nivel de densidad inicial del compacto.

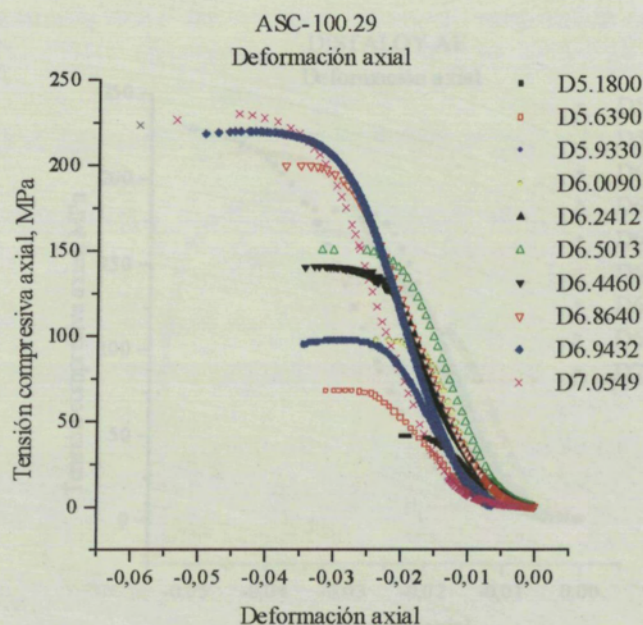


Fig. 4.1.- Deformación axial durante la compresión de compactos con diferente densidad inicial.  
*ASC100.29.*



DEFORMACIÓN RADIAL

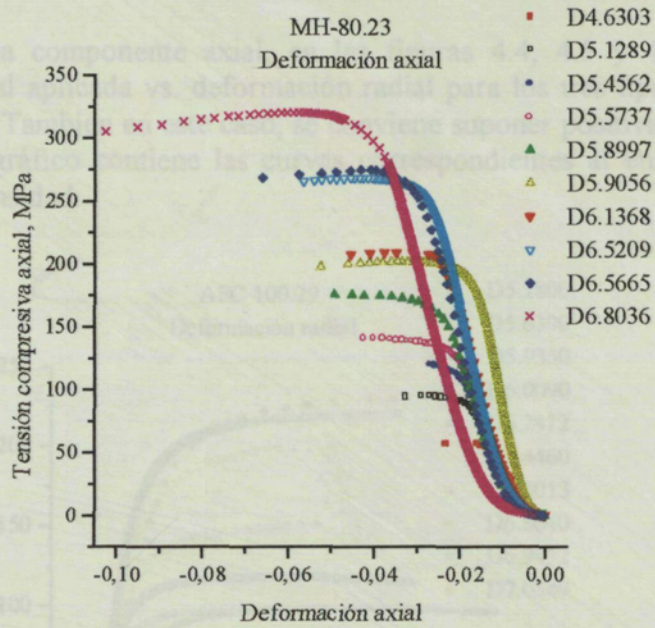


Fig. 4.2.- Evolución de la deformación axial para las distintas probetas..  
**MH80.23.**

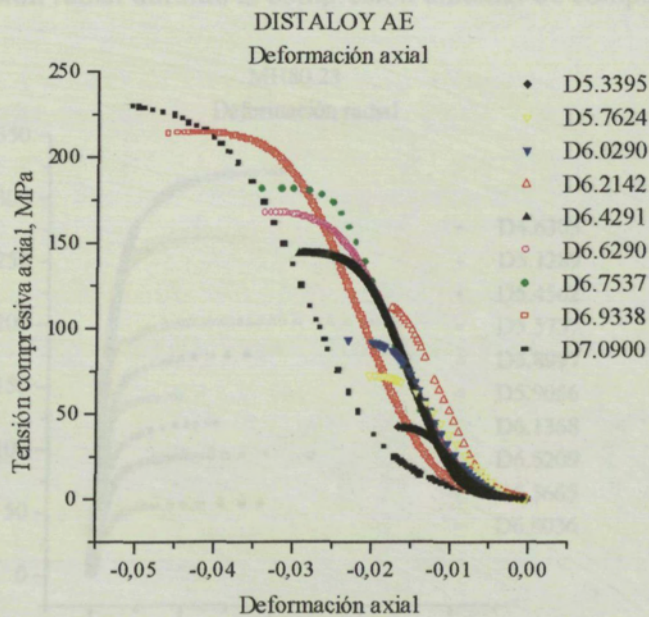


Fig. 4.3.- Deformación axial para las distintas probetas ensayadas del polvo **DISTALOY AE.**



## DEFORMACIÓN RADIAL

De forma similar a la componente axial, en las figuras 4.4, 4.5 y 4.6, se representan las relaciones tensión axial aplicada vs. deformación radial para los tres tipos de polvos metálicos objeto de este trabajo. También en este caso, se conviene suponer positiva la tensión compresiva axial. Además, cada gráfico contiene las curvas correspondientes al ensayo de compactos de diversos niveles de densidad.

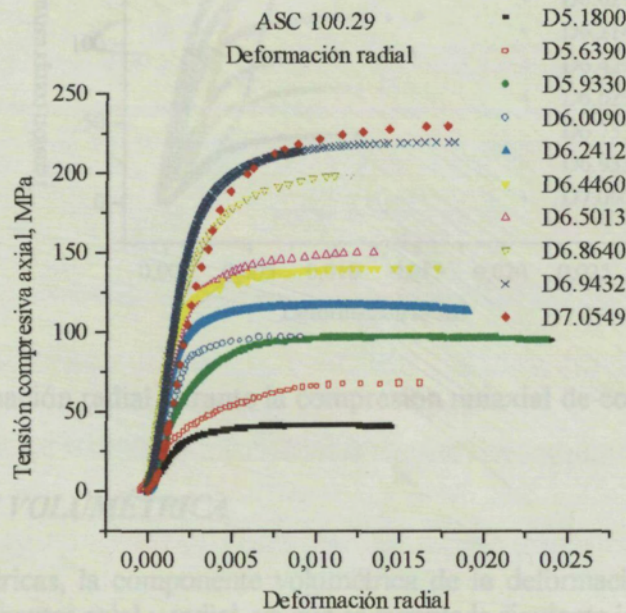


Fig. 4.4.- Deformación radial durante la compresión uniaxial de compactos de *ASC100.29*.

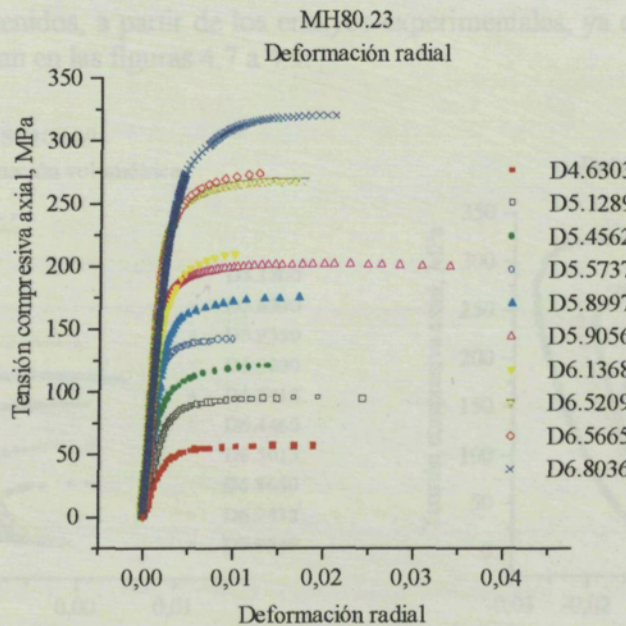


Fig. 4.5.- Evolución de la deformación radial para compactos de diferente densidad inicial. *MH80.23*.



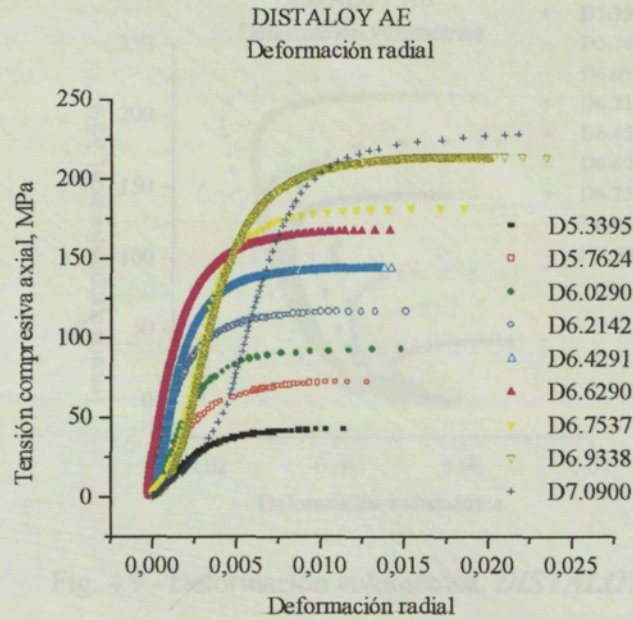


Fig. 4.6.- Deformación radial durante la compresión uniaxial de compactos de **DISTALOY AE**.

### DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA

En muestras cilíndricas, la componente volumétrica de la deformación, se determina fácilmente a partir de las componentes axial y radial, ya que se cumple la siguiente igualdad:

$$\varepsilon_v = 2\varepsilon_r + \varepsilon_{ax} \quad (4.1)$$

Los resultados obtenidos, a partir de los ensayos experimentales, ya descritos, para los tres tipos de polvos se representan en las figuras 4.7 a 4.9.

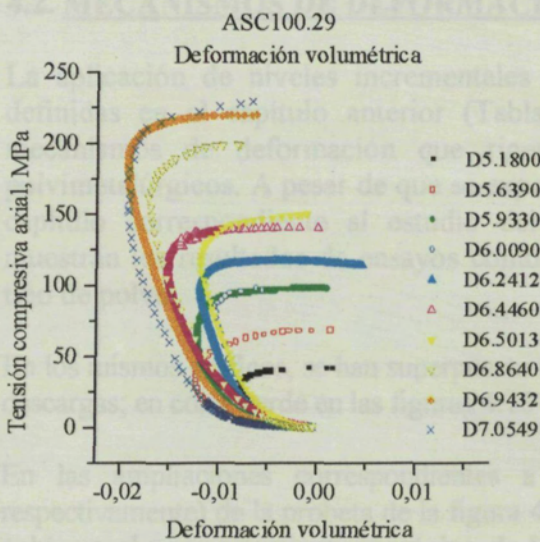


Fig. 4.7.- Deformación volumétrica.  
**ASC100.29.**

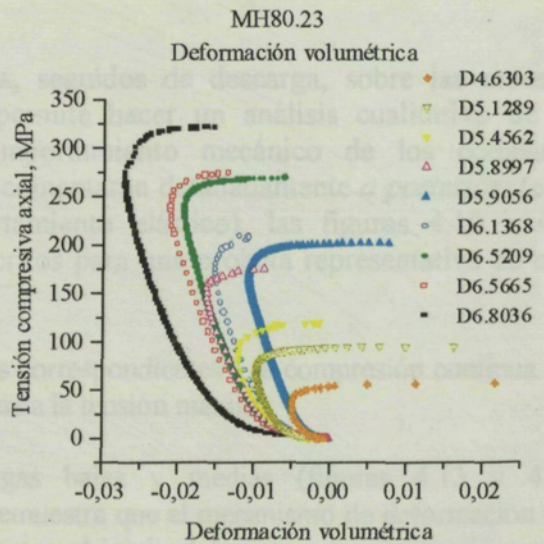


Fig. 4.8.- Deformación volumétrica.  
**MH80.23.**



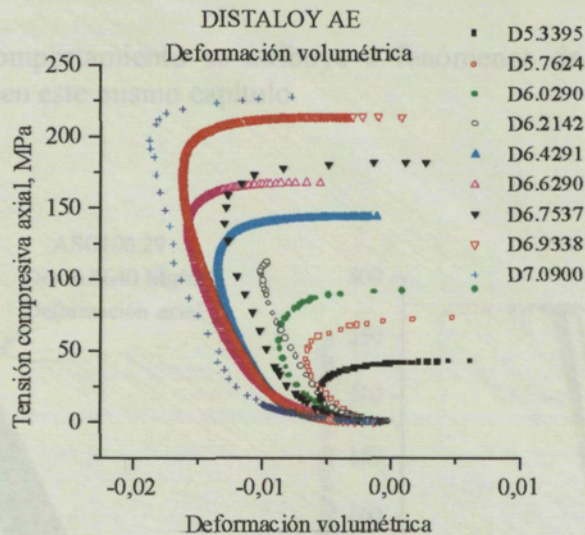


Fig. 4.9.- Deformación volumétrica. *DISTALOY AE*.

En la evolución, a lo largo del ensayo, de las tres componentes de la deformación, se aprecian claramente tres zonas: para muy bajas tensiones, aparece una especie de "pie" inicial, que corresponde a una importante disminución de volumen del compacto; a ello contribuye, básicamente, la componente axial; en dirección radial, este fenómeno es menos marcado; en las probetas de menor densidad se han medido, incluso, ligeras disminuciones del diámetro durante esta fase del ensayo. Puede observarse en las figuras expuestas que la intensidad de este fenómeno aumenta con la densidad inicial de los compactos.

Tras superar esta fase, la tensión crece rápida y casi linealmente con la deformación. El volumen de la probeta sigue disminuyendo, aunque más lentamente, hasta que, alcanzada una tensión de saturación, la deformación volumétrica cambia de sentido; el compacto comienza a aumentar su volumen (se inicia su *dilatación*) hasta el fallo total de la muestra.

#### 4.2. MECANISMOS DE DEFORMACIÓN

La aplicación de niveles incrementales de carga, seguidos de descarga, sobre las muestras definidas en el capítulo anterior (Tabla 3.II), permite hacer un análisis cualitativo de los mecanismos de deformación que rigen el comportamiento mecánico de los compactos pulvimetalúrgicos. A pesar de que se expondrán y comentarán detalladamente *a posteriori* (en el capítulo correspondiente al estudio del comportamiento elástico), las figuras 4.10 a 4.12 muestran los resultados de ensayos como los descritos para una probeta representativa de cada tipo de polvo.

En los mismos gráficos, se han superpuesto las curvas correspondientes a la compresión continua (sin descargas; en color verde en las figuras 4.10 a 4.12) hasta la tensión máxima.

En las ampliaciones correspondientes a las cargas bajas y medias (figuras 4.13 y 4.14, respectivamente) de la probeta de la figura 4.12, se demuestra que el mecanismo de deformación que gobierna el comportamiento mecánico de los compactos al inicio del ensayo de compresión, es la deformación plástica. En este tipo de materiales, granulares, el concepto *deformación plástica* alude, no sólo a la deformación de las partículas por movimiento de dislocaciones, sino, también, a la variación de la fracción de volumen de los poros, o sea, de la densidad.



En este trabajo, este comportamiento se atribuye a fenómenos de *fricción interna*, que se detallarán más adelante, en este mismo capítulo.

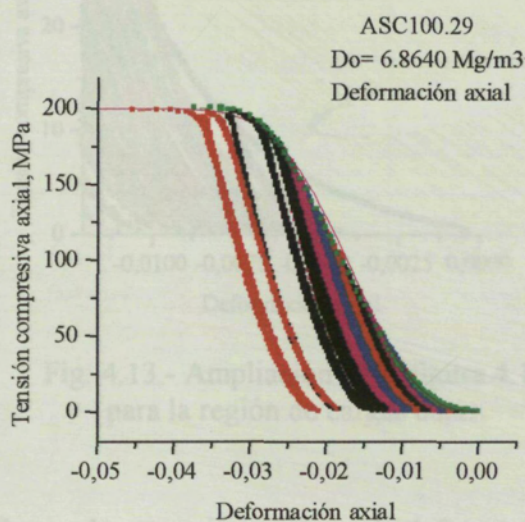


Fig. 4.10.- Ensayo de cargas y descargas para un compacto de **ASC100.29**.

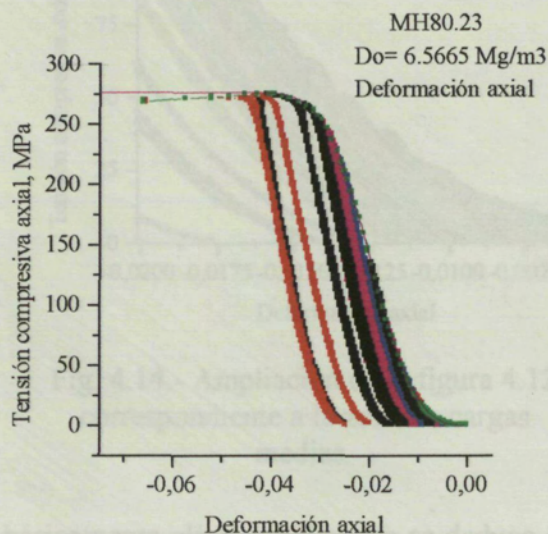


Fig. 4.11.- Ensayo de cargas y descargas para un compacto de **MH80.23**.

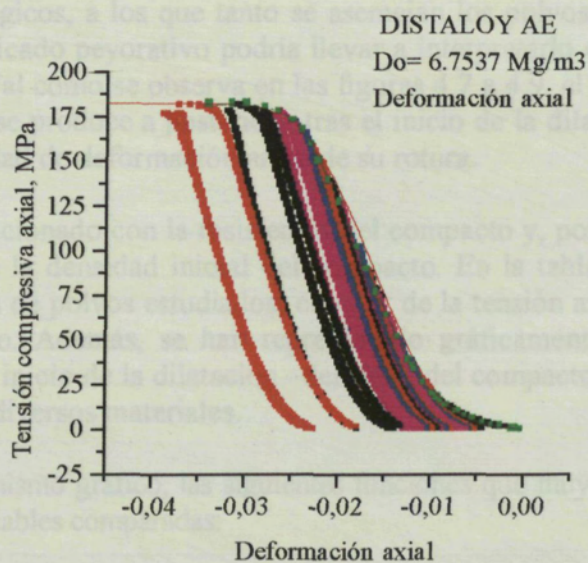


Fig. 4.12.- Ensayo de cargas y descargas para un compacto de **DISTALOY AE**.



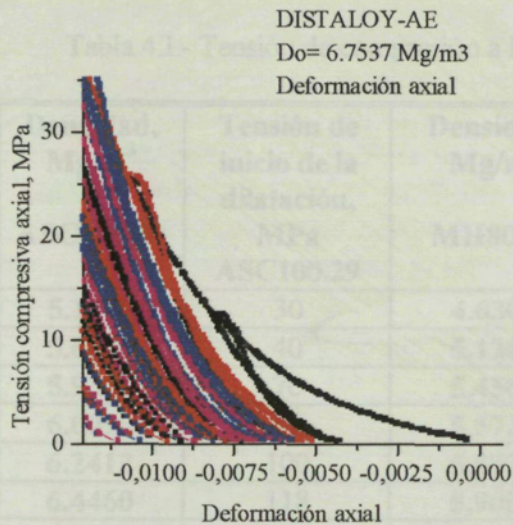


Fig. 4.13.- Ampliación de la figura 4.12 para la región de cargas bajas.

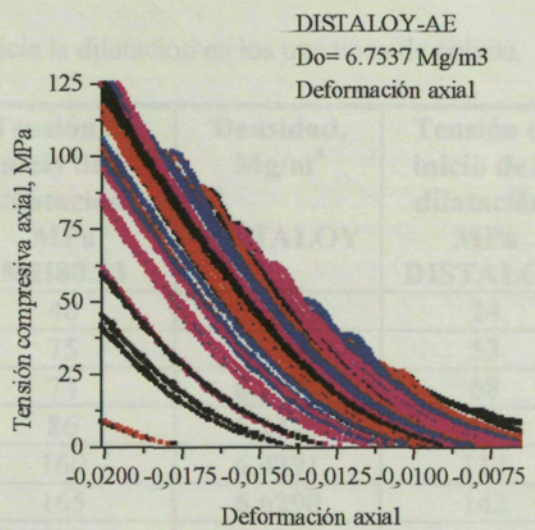


Fig. 4.14.- Ampliación de la figura 4.12 correspondiente a la zona de cargas medias.

Superada esta primera etapa, la deformación es básicamente elástica, tal como se deduce de las figuras 4.13 y 4.14.

Para tensiones próximas a la máxima, tal como se ha comentado anteriormente, se inicia la **desconsolidación** o **dilatación**; fenómeno característico de los materiales granulares que define el estado en el que el volumen del compacto aumenta.

El término **desconsolidación**, no obstante, se ha utilizado aquí por ser de uso clásico en el ámbito de los materiales geológicos, a los que tanto se asemejan los polvos metálicos no sinterizados. Sin embargo, su significado peyorativo podría llevar a interpretarlo como el estado de **fallo** del material. Y, no es así. Tal como se observa en las figuras 4.7 a 4.9, el fallo propiamente dicho, la fractura del compacto, se produce a posteriori; tras el inicio de la dilatación, la probeta absorbe, todavía, una gran cantidad de deformación antes de su rotura.

Este fenómeno está relacionado con la resistencia del compacto y, por lo tanto, depende del tipo de polvo metálico y de la densidad inicial del compacto. En la tabla 4-I se expone, para cada probeta de los tres tipos de polvos estudiados, el valor de la tensión axial para la que se inicia la dilatación del compacto. Además, se han representado gráficamente estos datos en el plano "tensión compresiva de inicio de la dilatación - densidad del compacto", resultando las curvas de la figura 4-15, para los diversos materiales.

Se han dibujado, en el mismo gráfico, las siguientes funciones que muy bien podrían representar la relación entre las dos variables comparadas:

$$ASC100.29: \sigma_{id} = 370 \left[ 1 - \exp \left( -0.00272 \{ D - 2.96 \}^4 \right) \right] \quad (4.2)$$

$$MH80.23: \sigma_{id} = 431 \left[ 1 - \exp \left( -0.00205 \{ D - 2.30 \}^{4.16} \right) \right] \quad (4.3)$$

$$DISTALOY AE: \sigma_{id} = 370 \left[ 1 - \exp \left( -0.00220 \{ D - 3.04 \}^{4.21} \right) \right] \quad (4.4)$$



Tabla 4.I.- Tensión de compresión a la que se inicia la dilatación en los tres tipos de polvos.

Densidad, Mg/m <sup>3</sup> ASC100.29	Tensión de inicio de la dilatación, MPa ASC100.29	Densidad, Mg/m <sup>3</sup> MH80.23	Tensión de inicio de la dilatación, MPa MH80.23	Densidad, Mg/m <sup>3</sup> DISTALOY	Tensión de inicio de la dilatación, MPa DISTALOY
5.1800	30	4.6303	40	5.3395	24
5.6390	40	5.1289	75	5.7624	53
5.9330	70	5.4562	74	6.0290	68
6.0090	86	5.5737	86	6.2142	108
6.2412	100	5.8997	160	6.4291	114
6.4460	118	5.9056	165	6.6290	142
6.5013	126	6.1368	184	6.7537	160
6.8640	172	6.5209	240	6.9338	182
6.9432	189	6.5665	253	7.0900	210
7.0549	195	6.8036	280	-	-

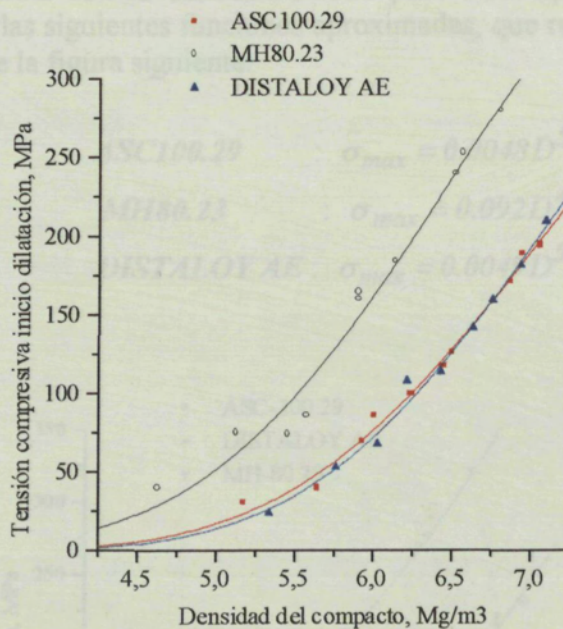


Fig. 4.15.- Variación de la tensión de inicio de la dilatación con la densidad del compacto.

En general, pues, y a pesar de que podrían aplicarse otros ajustes fenomenológicos, se ha optado por la siguiente expresión:

$$\sigma_{id} = \sigma_{me} \left[ 1 - \exp\left\{k \left\{D - D_{ap}\right\}^{n_d}\right\} \right] \quad (4.5)$$

En la que  $\sigma_{id}$ , es la tensión de inicio de la dilatación;  $\sigma_{me}$ , la tensión de máximo endurecimiento;  $D$ , la densidad inicial del compacto ensayado;  $D_{ap}$ , es la densidad aparente del polvo en estudio, y  $k$  y  $n_d$ , son dos parámetros del material, ajustados analíticamente.



De todas las funciones matemáticas analizadas, la de la ecuación (4.5) recoge mejor el significado físico de la situación: un compacto poroso que, a la densidad más baja, la aparente, inicia la desconsolidación a tensión compresiva igual a cero. Ésta es, por supuesto, una situación teórica; lo cierto es que, para el *MH80.23*, no nos ha sido posible obtener compactos de densidad inferior a 3.5 Mg/m<sup>3</sup>; los polvos *ASC100.29* y *DISTALOY AE* están todavía más limitados en este sentido, ya que es difícil elaborar compactos manejables de densidad inferior a 4 Mg/m<sup>3</sup>. Es claro, pues, que muy por encima de la densidad aparente, la tensión de inicio de desconsolidación es, todavía, cero o muy pequeña. Para la máxima densidad posible del compacto, la tensión de inicio de desconsolidación es, también, la más alta, como cabe esperar.

La tensión de máximo endurecimiento,  $\sigma_{me}$ , puede asimilarse al *límite elástico* del polvo. Pavier [6], a partir de valores de microdureza dados por el suministrador del material (Höganäs), deduce un límite elástico medio del *DISTALOY AE* igual a 370 MPa. Los valores de ajuste de las ecuaciones 4.2, 4.3 y 4.4, encajan bien con este dato y con los que pueden esperarse de los otros dos tipos de polvo. No obstante, hay que tener en cuenta que las expresiones anteriores pretenden, tan sólo, marcar una tendencia y valorar cualitativamente el inicio de un fenómeno.

Los resultados experimentales muestran que, una vez iniciada la dilatación, el compacto sigue deformándose, plásticamente ahora, a tensión constante. Esta tensión compresiva máxima,  $\sigma_{max}$ , depende del nivel de densidad inicial del compacto. En la figura 4.16, se compara la dependencia de la tensión máxima con la densidad inicial para cada tipo de material ensayado. Se han dibujado, además, las siguientes funciones aproximadas, que relacionan para cada tipo de polvo las dos variables de la figura siguiente:

$$ASC100.29 : \sigma_{max} = 0.0048D^{5.52} \tag{4.6}$$

$$MH80.23 : \sigma_{max} = 0.092D^{4.25} \tag{4.7}$$

$$DISTALOY AE : \sigma_{max} = 0.0049D^{5.51} \tag{4.8}$$

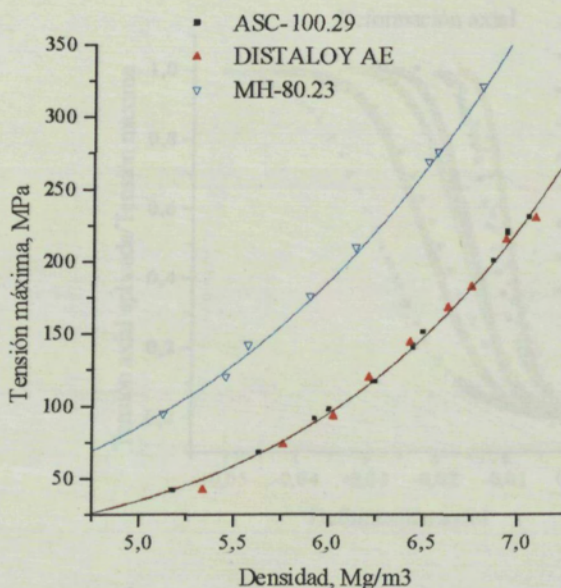


Fig. 4.16.- Evolución de la tensión máxima,  $\sigma_{max}$ , con la densidad inicial del compacto



En principio, sorprende que el polvo **MH80.23** muestre una resistencia a la compresión tan superior a la del **ASC100.29**, teniendo ambos la misma composición química. Pero, tal como se irá demostrando a lo largo de este trabajo, la morfología de las partículas es un factor determinante en el comportamiento mecánico de los compactos porosos.

La tensión máxima de cada compacto puede utilizarse como parámetro normalizador de la tensión axial aplicada; de esta manera, la evolución de la deformación axial de cada material puede compararse mejor, tal como se muestra en las figuras siguientes:

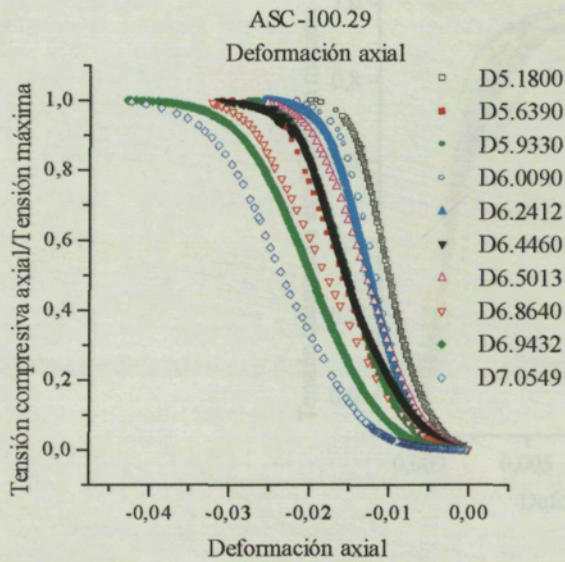


Fig. 4.17.- Variación de la deformación axial con la tensión normalizada.  
**ASC100.29**

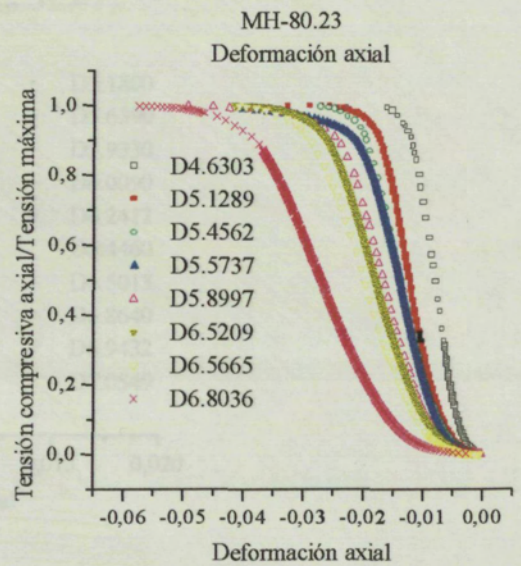


Fig. 4.18.- Variación de la deformación axial con la tensión normalizada.  
**MH 80.23**

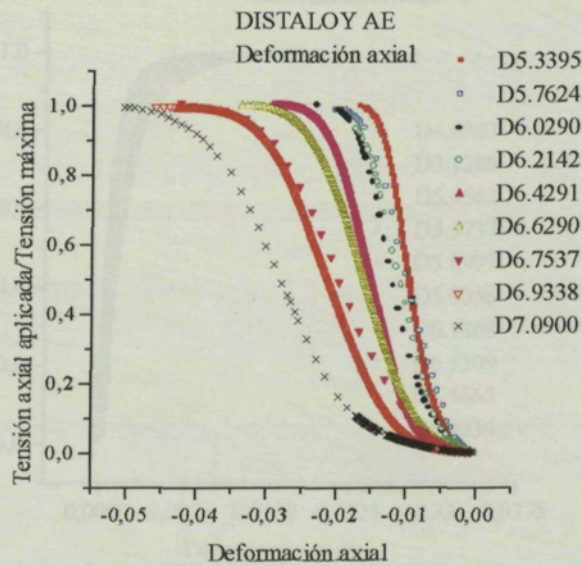


Fig. 4.19.- Deformación axial frente a la tensión normalizada.  
**DISTALOY AE**



Al igual que en las curvas correspondientes a la componente axial, la representación de la deformación radial frente a la tensión compresiva aplicada normalizada a través de la tensión máxima, permite comparar mejor el comportamiento de las diferentes muestras ensayadas. Las figuras 4.20 a 4.22 muestran estos resultados para el *ASC100.29*, *MH80.23* y *DISTALOY AE*, respectivamente.

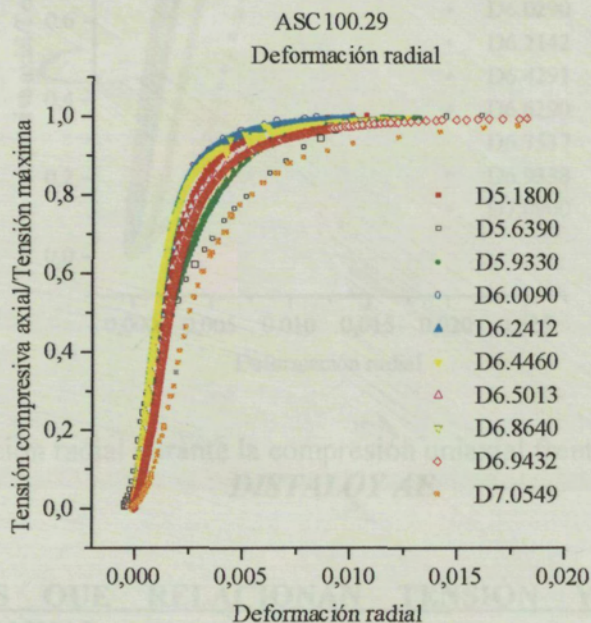


Fig. 4.20.- Evolución de la deformación radial frente a la tensión compresiva normalizada. *ASC100.29*.

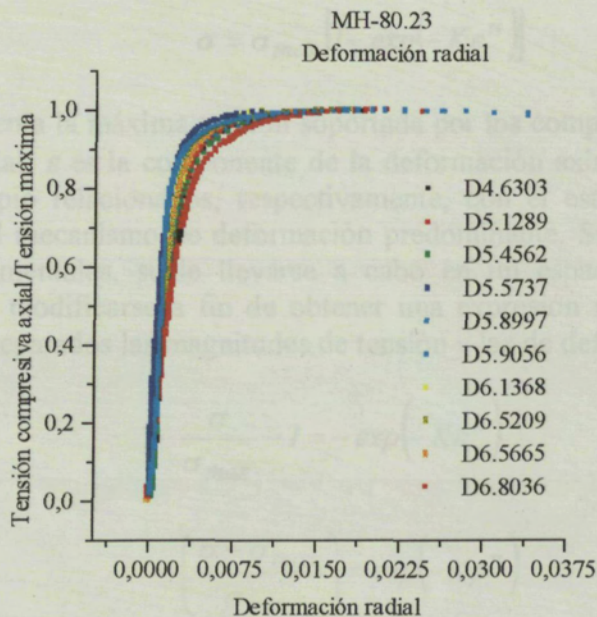


Fig. 4.21.- Deformación radial frente a tensión normalizada. *MH80.23*.



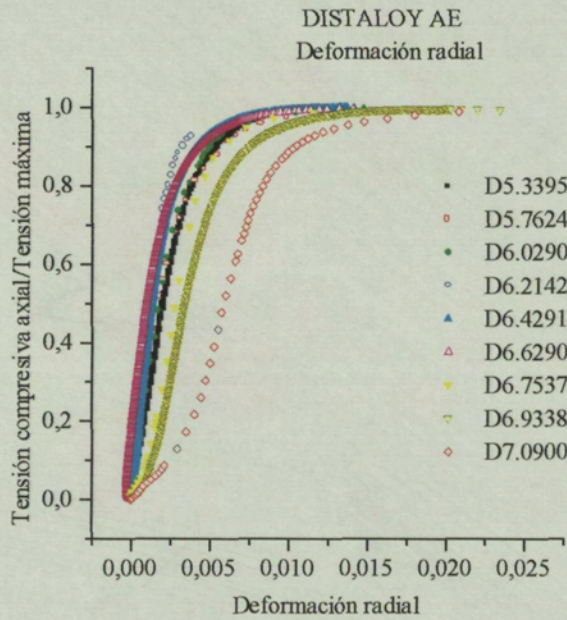


Fig. 4.22.- Deformación radial durante la compresión uniaxial frente a la tensión normalizada.  
**DISTALOY AE.**

### 4.3. ECUACIONES QUE RELACIONAN TENSIÓN Y DEFORMACIÓN EN COMPRESIÓN UNIAxIAL

La forma de las curvas que relacionan la tensión aplicada,  $\sigma$ , y las deformaciones axial y radial,  $\varepsilon_{ax}$  y  $\varepsilon_r$ , puede representarse matemáticamente mediante una ecuación de tipo sigmoideal, tal como la siguiente:

$$\sigma = \sigma_{max} \left[ 1 - \exp(-K\varepsilon^n) \right] \quad (4.9)$$

en la que  $\sigma_{max}$  representa la máxima tensión soportada por los compactos sometidos a un estado de compresión uniaxial;  $\varepsilon$  es la componente de la deformación axial o radial, y  $K$  y  $n$  son dos parámetros en principio relacionados, respectivamente, con el estado inicial de las probetas compactadas y con el mecanismo de deformación predominante. Su determinación, a partir de los resultados experimentales, suele llevarse a cabo en un espacio logarítmico, ya que, la ecuación (4.9) puede modificarse a fin de obtener una expresión más adecuada; para ello, se agrupan en términos separados las magnitudes de tensión y las de deformación:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{max}} - 1 = -\exp(-K\varepsilon^n)$$

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

Arreglando el término izquierdo de esta última ecuación:



$$\frac{\sigma_{max} - \sigma}{\sigma_{max}} = \exp(-K\varepsilon^n)$$

y, aplicando logaritmos a ambos lados y cambiando de signo, se obtiene:

$$-\ln\left(\frac{\sigma_{max} - \sigma}{\sigma_{max}}\right) = K\varepsilon^n$$

y, por lo tanto:

$$\ln\left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{max} - \sigma}\right) = K\varepsilon^n \quad (4.10)$$

De esta ecuación puede deducirse la siguiente expresión para la deformación:

$$\varepsilon = \left[ \ln\left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{max} - \sigma}\right)^{1/K} \right]^{1/n} \quad (4.11)$$

La representación que se ha utilizado para el análisis de la función sigmoïdal se deduce aplicando logaritmos a la ecuación (4.10):

$$\ln\left[ \ln\left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{max} - \sigma}\right) \right] = \ln K + n \ln \varepsilon \quad (4.12)$$

que es la ecuación de una recta, de pendiente  $n$ , en el espacio " $\ln \varepsilon - \ln\left[ \ln\left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{max} - \sigma}\right) \right]$ ". En este plano, los resultados para la componente axial de la deformación de los tres tipos de polvos metálicos ensayados, se muestran en las figuras 4.23 a 4.25.

Para los tres tipos de polvos metálicos aparecen claramente dos rectas con distinta pendiente; existen, pues, dos etapas en las que predominan mecanismos de deformación diferentes. Así, la expresión que relaciona la tensión y la deformación axial para estos materiales, necesita dos pares de valores  $K$ - $n$  y es del tipo siguiente:

$$\sigma = \sigma_{max} \left[ 1 - \exp\left\{ -\left( K_{1ax} \varepsilon_{ax}^{n_{1ax}} + K_{2ax} \varepsilon_{ax}^{n_{2ax}} \right) \right\} \right] \quad (4.13)$$

(Se utilizan los subíndices "ax" porque las magnitudes corresponden a la componente axial de la deformación).

Mediante un programa específico para análisis de datos gráficos, se han determinado los parámetros  $K_{1,2ax}$  y  $n_{1,2ax}$  que optimizan el ajuste. Los resultados, para cada nivel de densidad estudiado de los tres tipos de polvo, se exponen en las tablas 4.II a 4.IV.



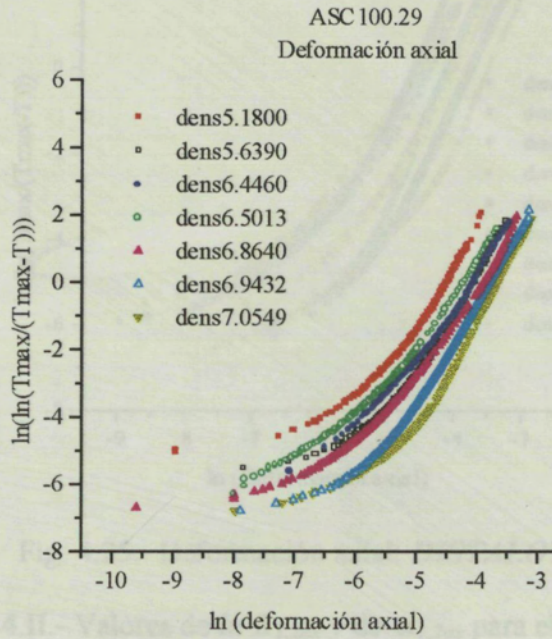


Fig. 4.23.- Deformación axial. *ASC100.29*.

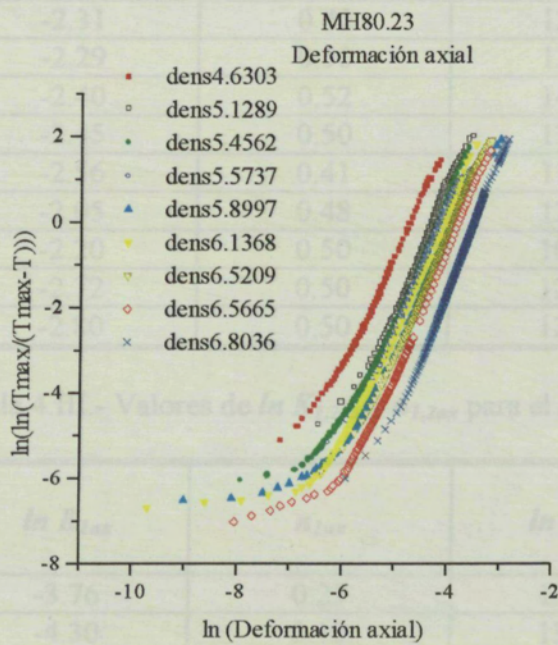


Fig. 4.24.- Deformación axial. *MH80.23*.



DISTALOY-AE

Deformación axial

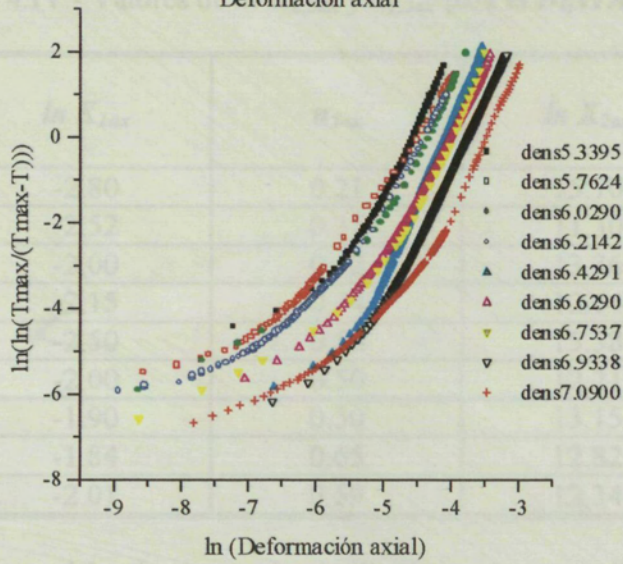


Fig. 4.25.- Deformación axial. *DISTALOY AE*.

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

Densidad, Mg/m <sup>3</sup>	$\ln K_{1ax}$	$n_{1ax}$	$\ln K_{2ax}$	$n_{2ax}$
5.1800	-1.91	0.34	13.27	2.95
5.6390	-2.31	0.40	13.05	3.21
5.9330	-2.29	0.50	13.06	3.20
6.0090	-2.40	0.52	14.80	3.40
6.2412	-2.45	0.50	13.50	3.16
6.5013	-2.56	0.41	11.80	2.70
6.4460	-2.05	0.48	12.50	3.02
6.8640	-2.20	0.50	10.70	2.73
6.9432	-2.72	0.50	12.27	3.22
7.0549	-2.80	0.50	12.00	3.30

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

Densidad, Mg/m <sup>3</sup>	$\ln K_{1ax}$	$n_{1ax}$	$\ln K_{2ax}$	$n_{2ax}$
4.6303	-3.76	0.23	13.34	2.83
5.1289	-4.30	0.10	13.79	3.20
5.4562	-4.02	0.25	12.62	3.02
5.5737	-4.93	0.08	12.86	3.10
5.8997	-4.86	0.19	11.95	3.00
5.9056	-4.30	0.50	11.30	2.56
6.1368	-4.00	0.30	12.10	2.98
6.5209	-4.12	0.30	11.95	3.06
6.5665	-4.05	0.37	11.81	3.11
6.8036	-3.12	0.50	11.55	3.30



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

Densidad, Mg/m <sup>3</sup>	$\ln K_{1ax}$	$n_{1ax}$	$\ln K_{2ax}$	$n_{2ax}$
5.3395	-2.80	0.21	15.70	3.45
5.7624	-2.52	0.35	11.30	2.51
6.0290	-2.00	0.42	13.36	3.08
6.2142	-2.15	0.44	12.64	2.88
6.4291	-2.50	0.50	15.58	3.82
6.6290	-2.00	0.50	12.21	3.05
6.7537	-1.90	0.50	13.15	3.29
6.9338	-1.84	0.65	12.82	3.44
7.0900	-2.01	0.59	12.34	3.56

A la vista de estos datos, debe destacarse la similitud de comportamiento entre los dos polvos atomizados, *ASC100.29* y *DISTALOY AE*: los parámetros  $\ln K_{1,2ax}$  y  $n_{1,2ax}$  son, aproximadamente, de la misma magnitud. En el *MH80.23*, en cambio, los valores correspondientes a las bajas tensiones,  $\ln K_{1ax}$  y  $n_{1ax}$ , son algo distintos. En los tres tipos de polvos e independientemente de la densidad inicial del compacto, la segunda recta mantiene una pendiente constante que oscila alrededor de 3. También  $n_{1ax}$  parece poder ajustarse bien a 0.5. Sin embargo, y tal como se expondrá más adelante,  $\ln K_{1ax}$  y  $n_{1ax}$  influyen poco en la curva completa y se simplificará el tratamiento a un solo par de valores de  $\ln K_{ax}$  y  $n_{ax}$ . Por supuesto, esto significará una pérdida de fidelidad con respecto de los resultados experimentales, pero, a cambio, podrá obtenerse una expresión matemática de relación entre la tensión y la deformación volumétrica que, de otra forma, resultaría extremadamente compleja.

En las figuras 4.26 a 4.28 se superponen, a las experimentales, las funciones con los parámetros  $\ln K_{1,2ax}$  y  $n_{1,2ax}$  de ajuste, para los tres tipos de materiales.

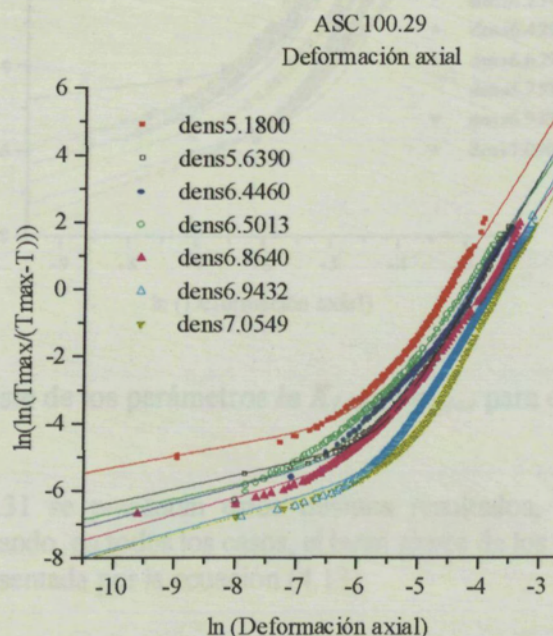


Fig. 4.26.- Ajuste de los parámetros  $\ln K_{1,2ax}$  y  $n_{1,2ax}$  para al *ASC 100.29*.