



**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

CAMBIO DE LA ESTRUCTURA DE CONTACTOS

En el presente trabajo se supone que el mecanismo propuesto por Kotera et al. [77] acerca del cambio de ciertos contactos entre partículas, ocurre; y no sólo en la compresión del compacto, sino, también, como consecuencia de la recuperación elástica en los ensayos de carga y descarga; las sucesivas *pérdidas y restablecimientos de las uniones entre las partículas* intervienen en la deformación macroscópica medida en el agregado durante su sollicitación mecánica. La figura 4.56 presenta unos sencillos esquemas para ilustrar este fenómeno.

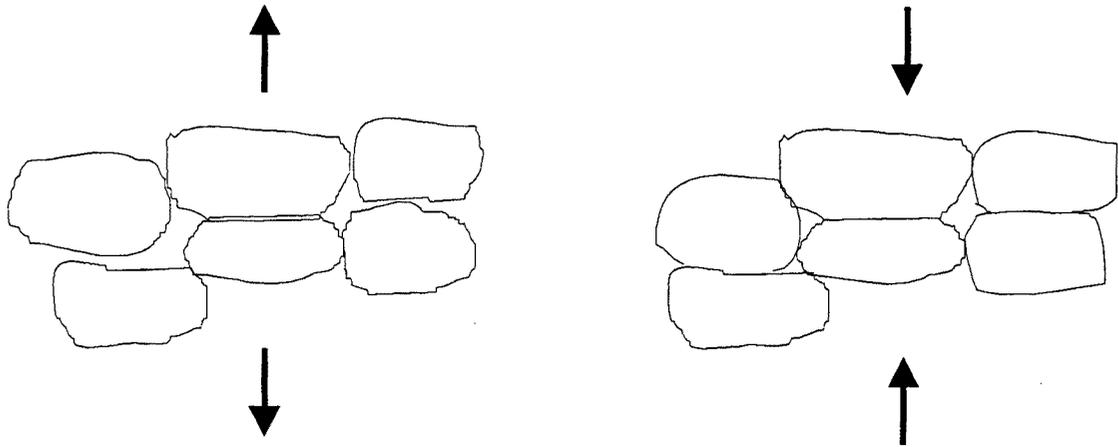


Fig. 4.56.- Los contactos durante la eyección del compacto, o debido a la recuperación elástica en los ensayos de carga y descarga se restablecen en la compresión uniaxial.

Otro fenómeno que puede dar lugar a la variación de la estructura de contactos y, por lo tanto, participar en el proceso de deformación, es el *cambio de posición relativa de las partículas*, y de sus contactos, debido a su recuperación elástica. Los esquemas de la figura 4.57 muestran cómo la recuperación elástica de dos partículas de gran tamaño, obliga a otras más pequeñas a modificar su disposición inicial. En este caso concreto, se ha perdido un contacto que, probablemente, se restablecerá en una compresión posterior.

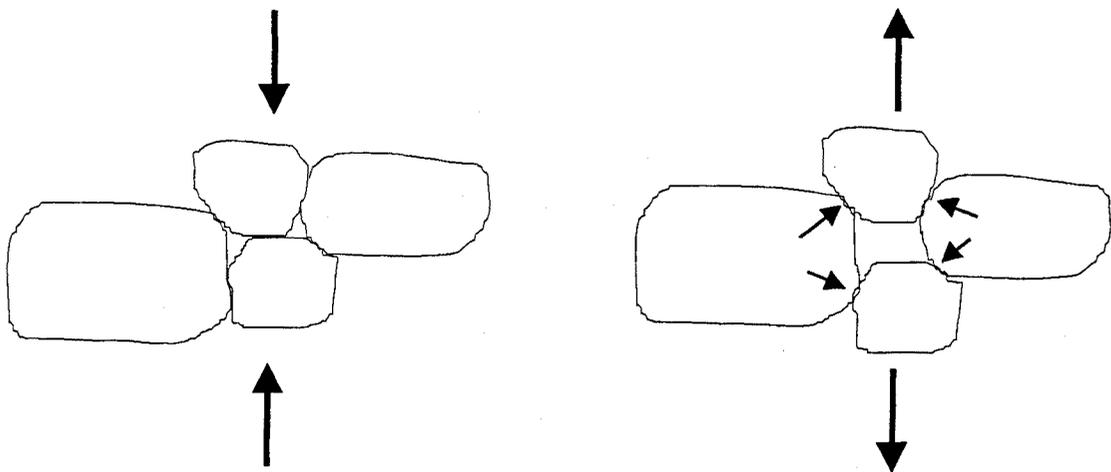


Fig. 4.57.- Cambio de la estructura de contactos en las descargas elásticas durante el ensayo cíclico.

DESLIZAMIENTO (FRICCIÓN) ENTRE PARTÍCULAS

Durante la compresión uniaxial de un compacto, el estado tensional en los contactos es del tipo mostrado en el esquema de la figura 4.58. Los contactos normales a la dirección de aplicación de la carga, están sometidos a compresión y su área aumenta elástica o plásticamente. En cambio, en los contactos inclinados con respecto a la carga aplicada, además de una componente normal, σ , se desarrolla una tensión de cizalladura, τ , esta última es la responsable del *deslizamiento entre partículas*.

A medida que aumenta la densidad del compacto y/o el nivel de tensión compresiva aplicado, la proporción de contactos perpendiculares a la dirección de la carga es cada vez mayor; así, pues, la fricción entre partículas disminuye progresivamente.

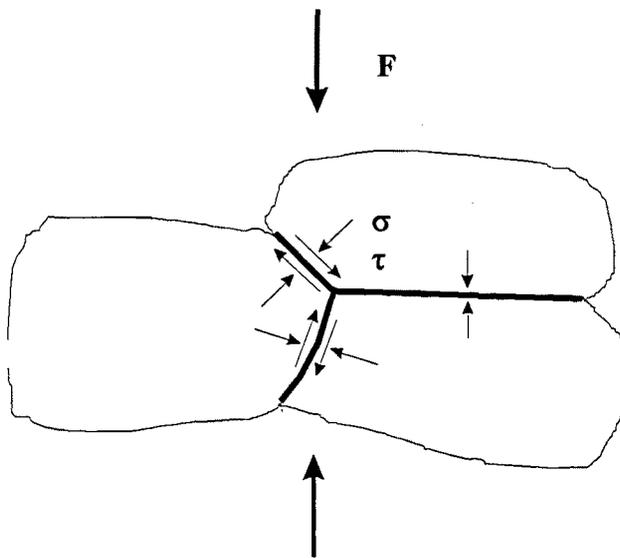


Fig. 4.58.- Estado tensional en los contactos entre partículas durante la compresión del compacto.

Este mecanismo, en particular, juega un papel fundamental en el comportamiento elástico de los compactos metálicos, tal como se verá en el capítulo siguiente.

4.5. RELACIÓN DE POISSON ELASTOPLÁSTICA

Uno de los parámetros clásicos en el estudio del comportamiento mecánico de los materiales es la *relación de Poisson*, ν , elástica y elastoplástica. En la literatura del campo pulvimetalúrgico no hay ningún trabajo completo acerca de este parámetro, sobre todo en lo que se refiere al comportamiento plástico. No obstante, debe destacarse el publicado por Pléney y Meyer [2] en el que se definen relaciones de Poisson elástica y plástica durante el proceso de compactación de un polvo de hierro (NC100.24, de Höganäs). Son expresiones que ligan ν a la porosidad instantánea del compacto; incluso incorporan la fuerte anisotropía característica de estos materiales; pero, son sólo válidas para el tipo de polvo ensayado y, en modo alguno, pueden considerarse universales.

En apartados anteriores de este mismo capítulo, se han presentado los resultados de ensayos de compresión uniaxial en forma de relaciones entre la tensión aplicada y las diferentes componentes de la deformación; y, se han interpretado estos datos en forma de mecanismos de

control de la deformación. En este sentido, la relación de Poisson, como es habitual en materiales convencionales, puede aportar información de gran interés para apoyar las tesis planteadas.

En las figuras 4.59 a 4.61, se presentan las relaciones entre las componentes radial y axial de la deformación, durante la compresión, de las distintas muestras ensayadas.

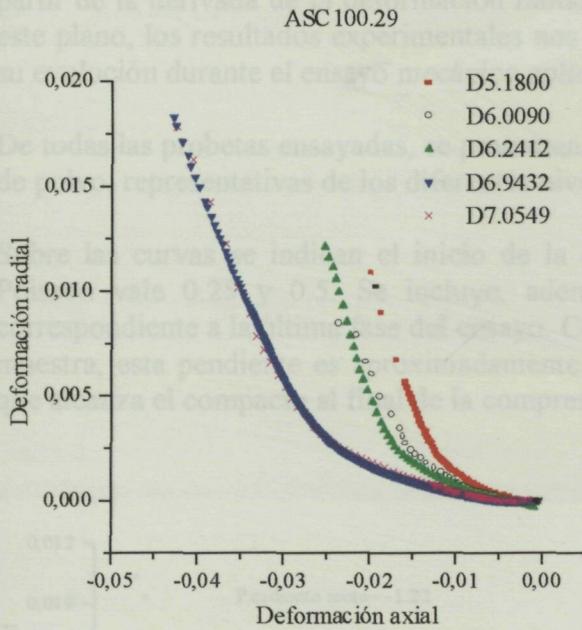


Fig. 4.59.- Relaciones entre las componentes radial y axial durante la compresión.
ASC100.29.

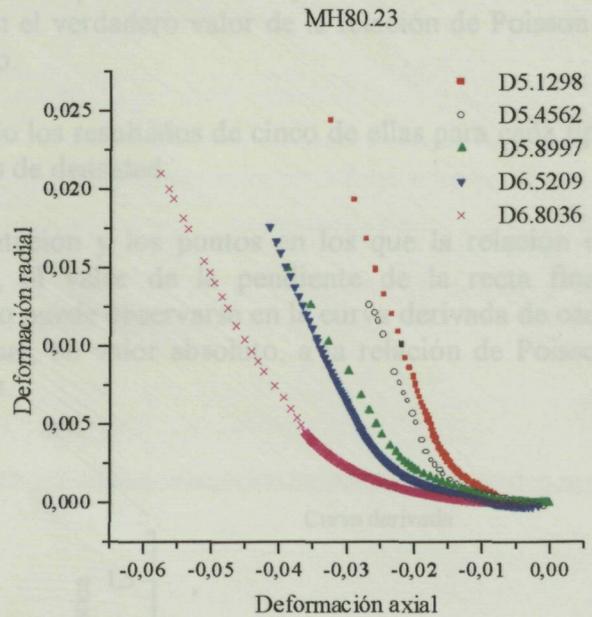


Fig. 4.60.- Relaciones entre las componentes radial y axial durante la compresión.
MH80.23.

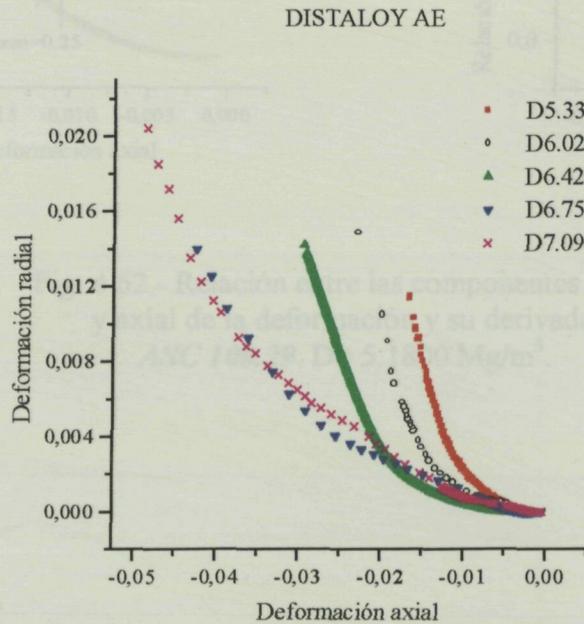


Fig. 4.61.- Relaciones entre las componentes radial y axial durante la compresión.
DISTALOY AE.

En los tres casos, el aspecto general de la evolución de la relación deformación radial/deformación axial es similar. No obstante y aún a riesgo de resultar tedioso, se incluyen las curvas individuales, a fin de realizar una valoración más cuidadosa de estos resultados. Hay que ser prudente, sin embargo, ante esta representación: puede llegarse fácilmente a la conclusión de que la relación de Poisson es constante durante amplios intervalos del ensayo, a medida que el compacto va cambiando de volumen. Una información más realista se obtiene a partir de la derivada de la deformación radial, con respecto de la axial, frente a esta última. En este plano, los resultados experimentales nos dan el verdadero valor de la relación de Poisson y su evolución durante el ensayo mecánico aplicado.

De todas las probetas ensayadas, se presentan sólo los resultados de cinco de ellas para cada tipo de polvo, representativas de los diferentes niveles de densidad.

Sobre las curvas se indican el inicio de la dilatación y los puntos en los que la relación de Poisson vale 0.25 y 0.5. Se incluye, además, el valor de la pendiente de la recta final, correspondiente a la última fase del ensayo. Como puede observarse en la curva derivada de cada muestra, esta pendiente es aproximadamente igual, en valor absoluto, a la relación de Poisson que alcanza el compacto al final de la compresión.

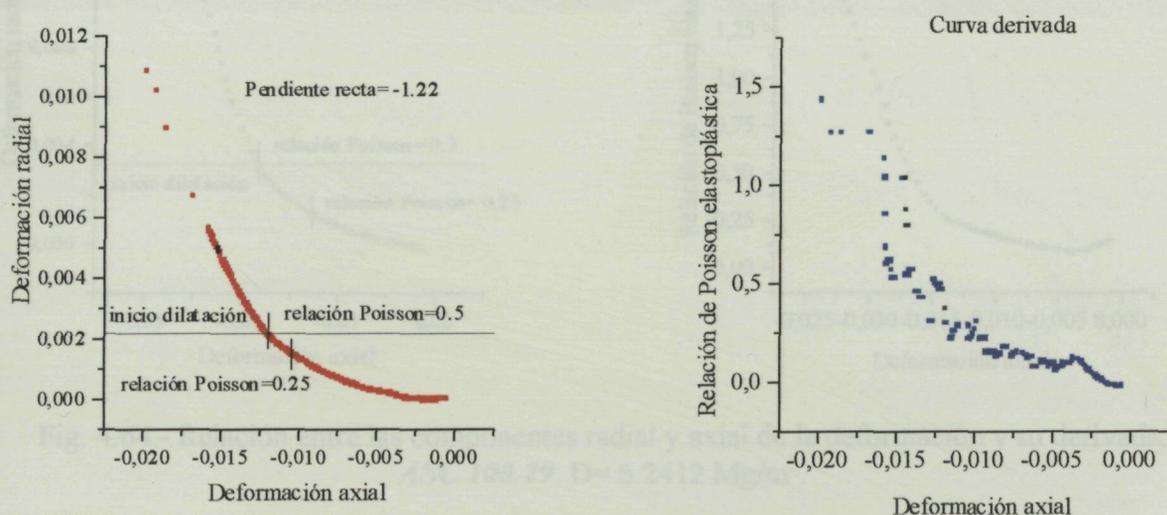


Fig. 4.62.- Relación entre las componentes radial y axial de la deformación y su derivada.
ASC 100.29. D= 5.1800 Mg/m³.

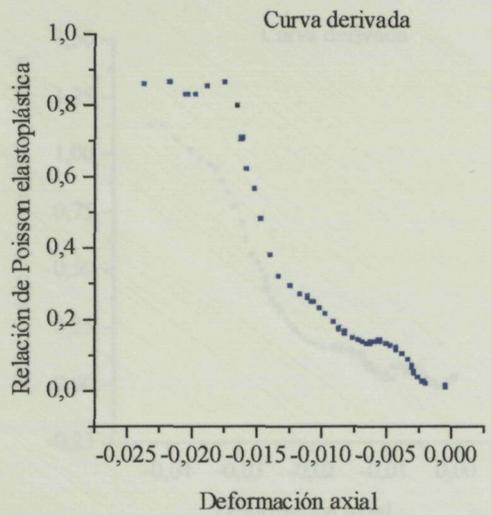
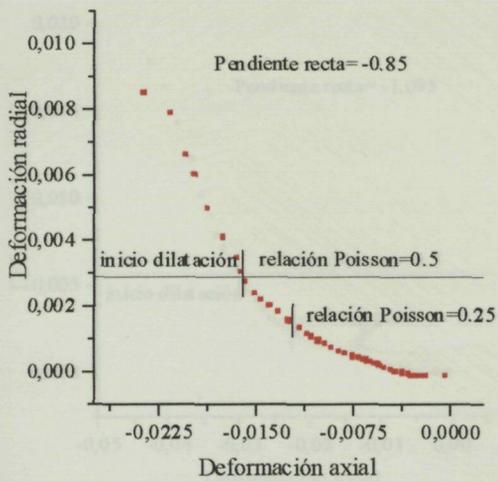


Fig. 4.63.- Relación entre las componentes radial y axial de la deformación y su derivada.
ASC 100.29. D= 6.0090 Mg/m³.

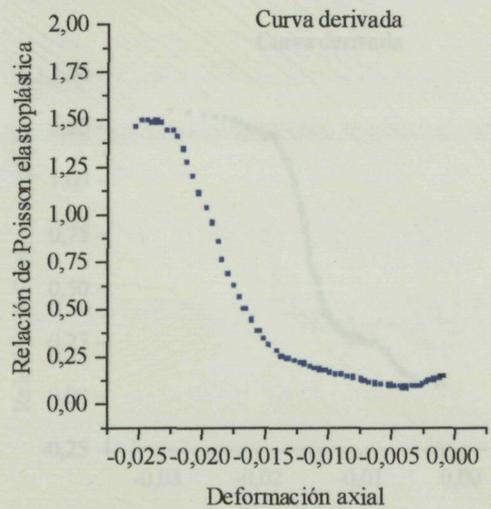
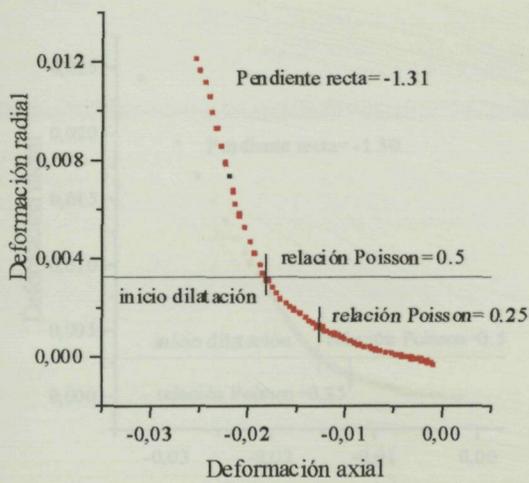


Fig. 4.64.- Relación entre las componentes radial y axial de la deformación y su derivada.
ASC 100.29. D= 6.2412 Mg/m³.

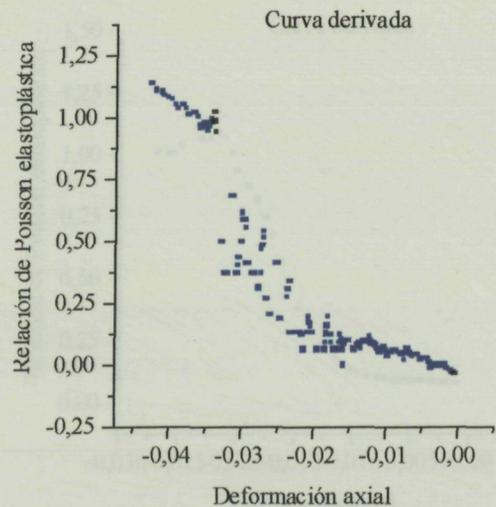
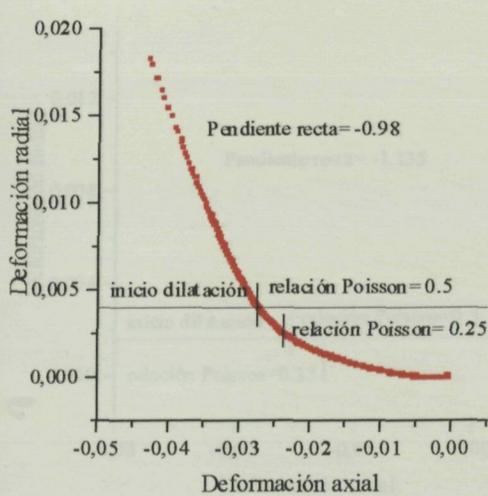


Fig. 4.65.- Relación entre las componentes radial y axial de la deformación y su derivada.
ASC 100.29. D= 6.9432 Mg/m³.

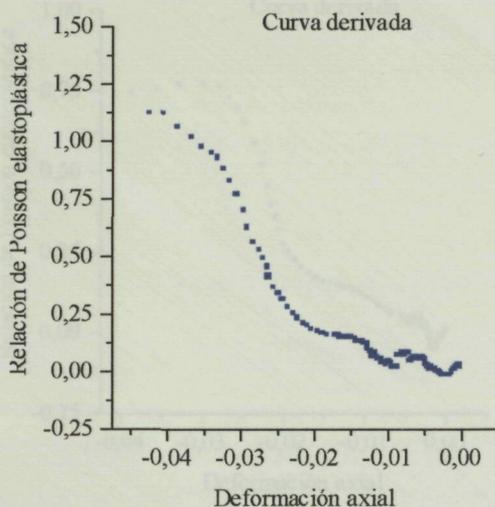
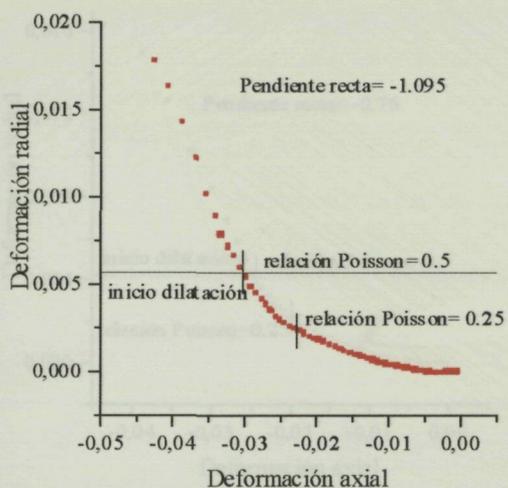


Fig. 4.66.- Relación entre las componentes radial y axial de la deformación y su derivada.
ASC 100.29. $D= 7.0549 \text{ Mg/m}^3$.

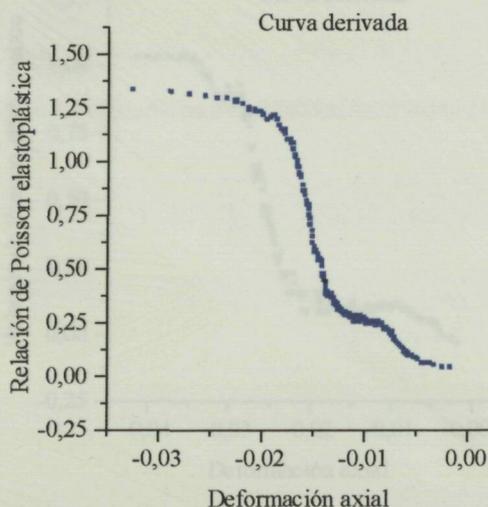
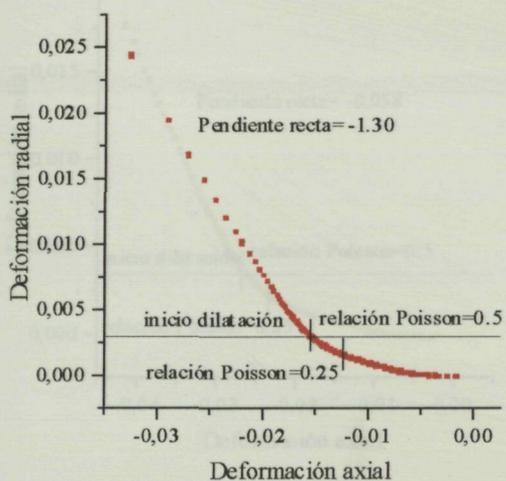


Fig. 4.67.- Relación entre las componentes radial y axial de la deformación y su derivada.
MH 80.23. $D= 5.1298 \text{ Mg/m}^3$.

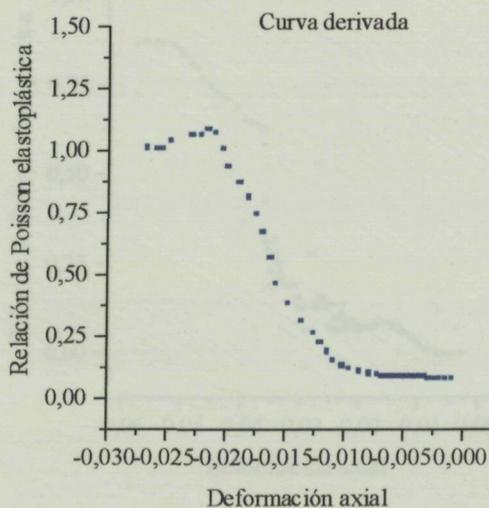
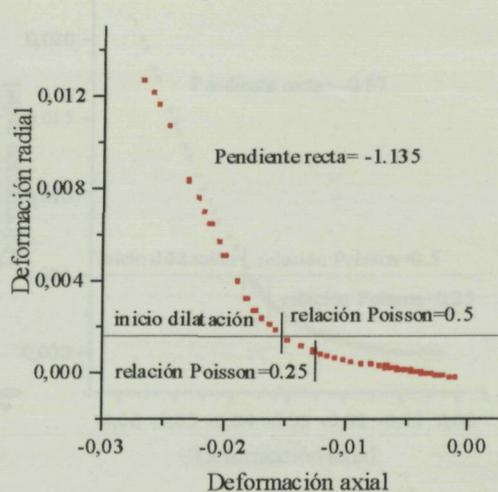


Fig. 4.68.- Relación entre las componentes radial y axial de la deformación y su derivada.
MH 80.23. $D= 5.4562 \text{ Mg/m}^3$.

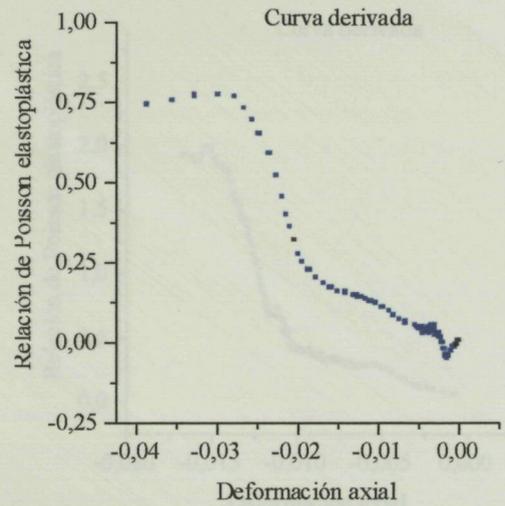
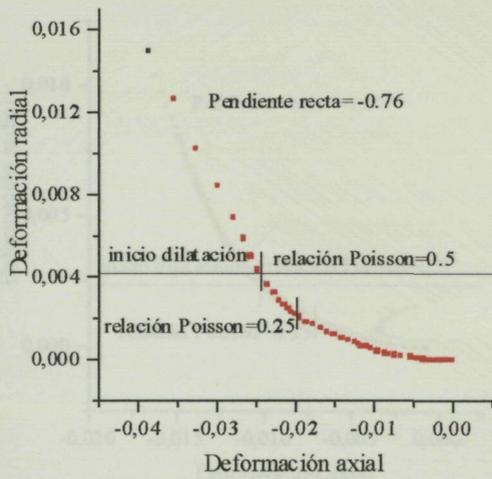


Fig. 4.69.- Relación entre las componentes radial y axial de la deformación y su derivada.
MH 80.23. D= 5.8997 Mg/m³.

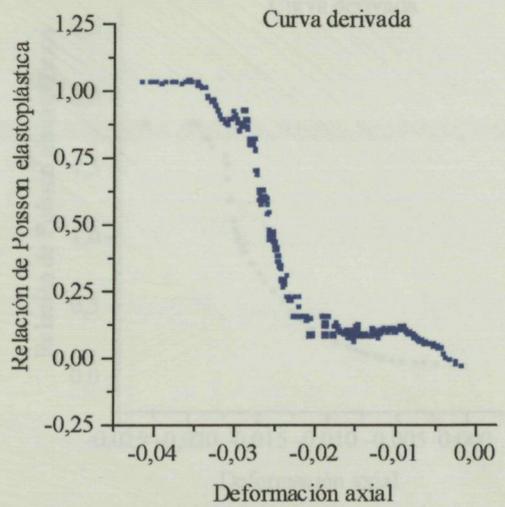
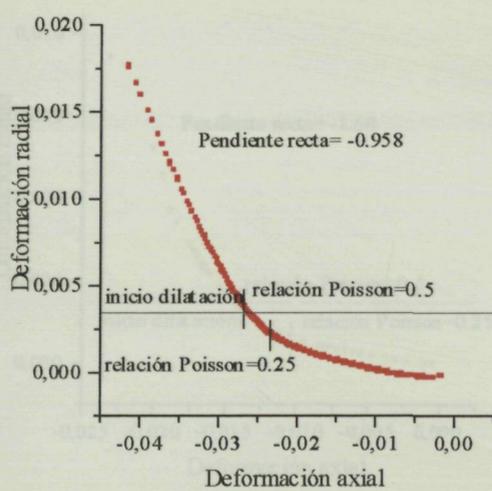


Fig. 4.70.- Relación entre las componentes radial y axial de la deformación y su derivada.
MH 80.23. D= 6.5209 Mg/m³.

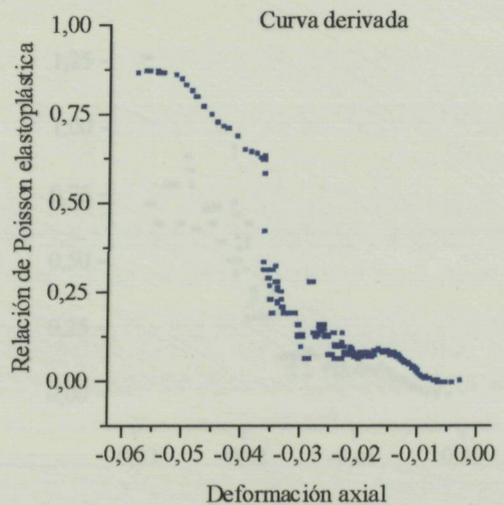
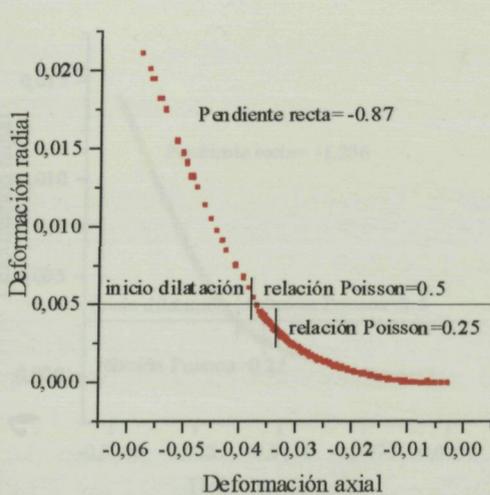


Fig. 4.71.- Relación entre las componentes radial y axial de la deformación y su derivada.
MH 80.23. D= 6.8036 Mg/m³.

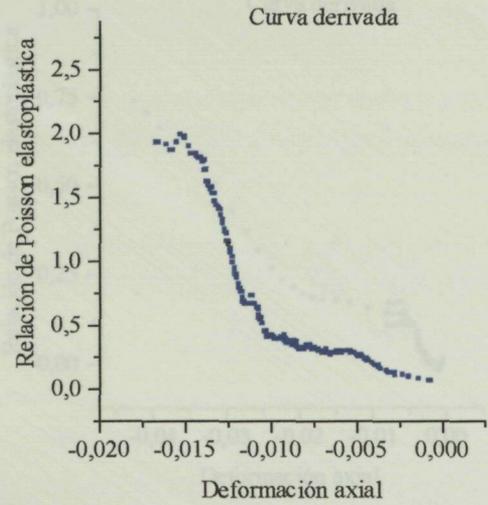
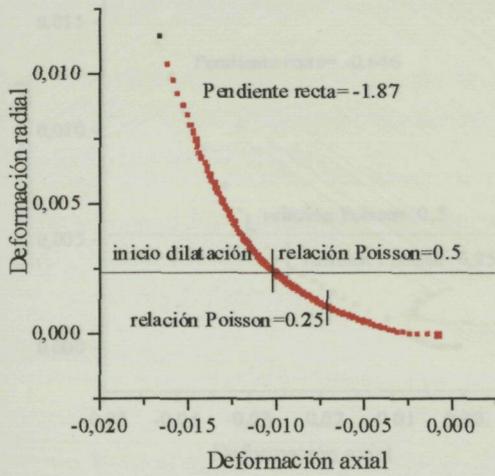


Fig. 4.72.- Relación entre las componentes radial y axial de la deformación y su derivada.
DISTALOY AE. $D = 5.3395 \text{ Mg/m}^3$.

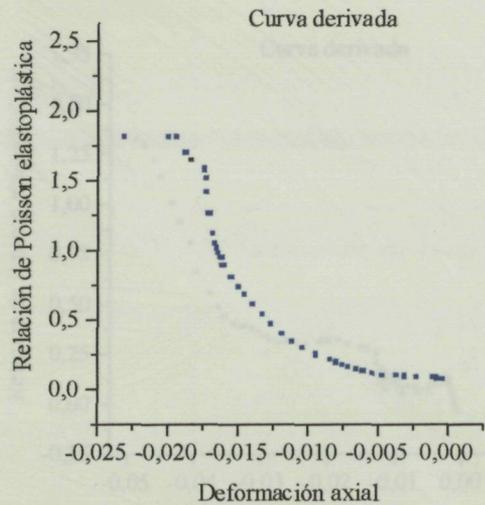
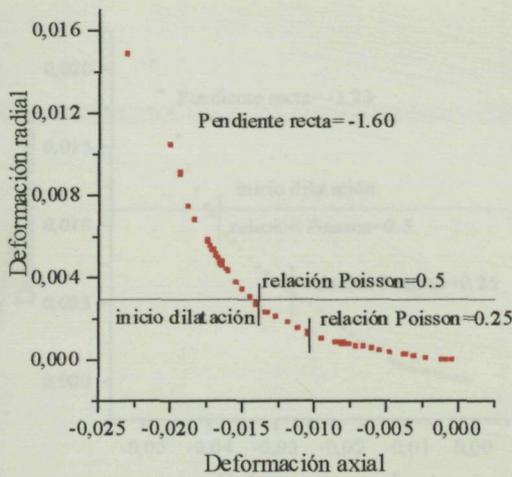


Fig. 4.73.- Relación entre las componentes radial y axial de la deformación y su derivada.
DISTALOY AE. $D = 6.0290 \text{ Mg/m}^3$.

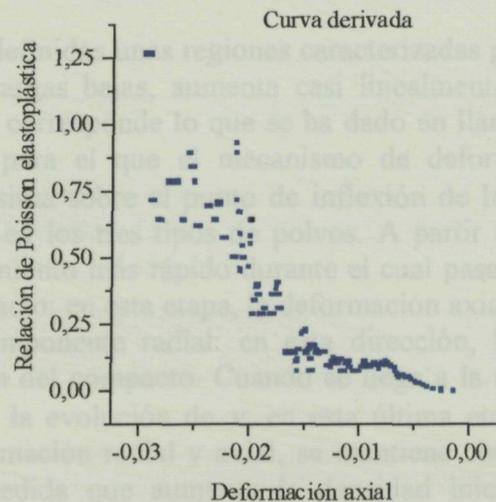
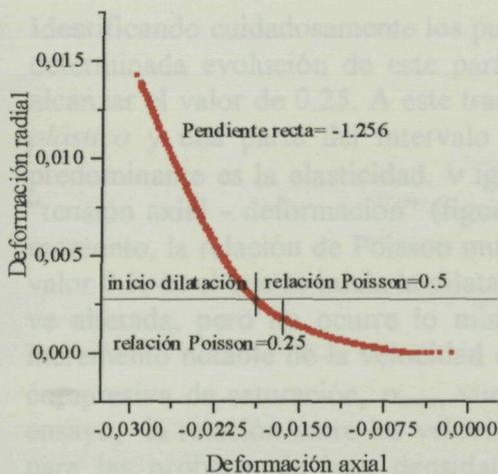


Fig. 4.74.- Relación entre las componentes radial y axial de la deformación y su derivada.
DISTALOY AE. $D = 6.4294 \text{ Mg/m}^3$.

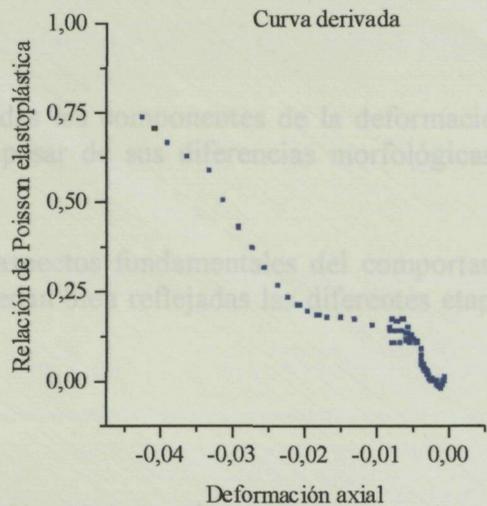
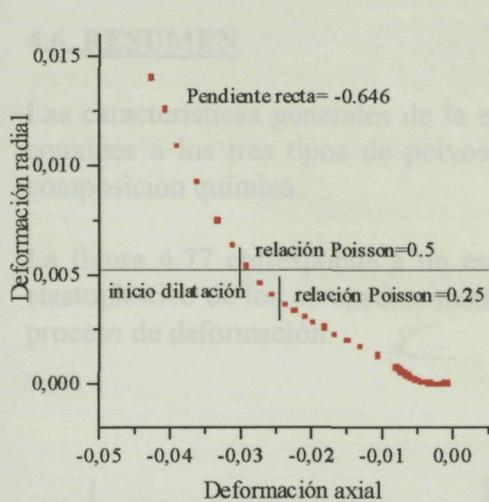


Fig. 4.75.- Relación entre las componentes radial y axial de la deformación y su derivada.
DISTALOY AE. $D = 6.7537 \text{ Mg/m}^3$.

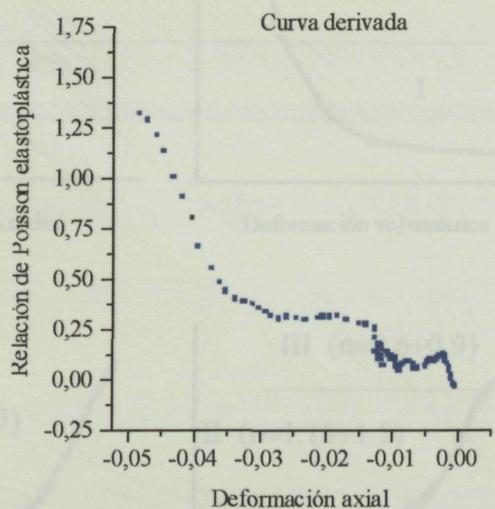
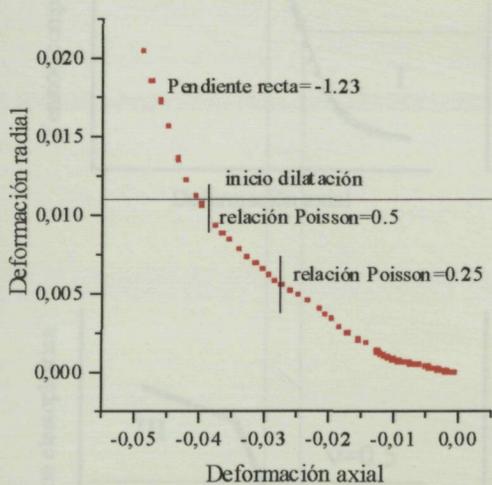


Fig. 4.76.- Relación entre las componentes radial y axial de la deformación y su derivada.
DISTALOY AE. $D = 7.0900 \text{ Mg/m}^3$.

Identificando cuidadosamente los puntos, quedan definidas unas regiones caracterizadas por una determinada evolución de este parámetro: para cargas bajas, aumenta casi linealmente hasta alcanzar el valor de 0.25. A este tramo del ensayo corresponde lo que se ha dado en llamar *pie plástico* y una parte del intervalo de tensiones para el que el mecanismo de deformación predominante es la elasticidad. ν igual a 0.25 se sitúa sobre el punto de inflexión de la curva "tensión axial - deformación" (figuras 4.1 a 4.4), en los tres tipos de polvos. A partir de este momento, la relación de Poisson muestra un crecimiento más rápido durante el cual pasa por el valor 0.5, en el que se inicia la dilatación del compacto; en esta etapa, la deformación axial no se ve alterada, pero no ocurre lo mismo con la componente radial: en esta dirección, hay un incremento notable de la velocidad de deformación del compacto. Cuando se llega a la tensión compresiva de saturación, σ_{max} , vuelve a cambiar la evolución de ν , en esta última etapa del ensayo, la relación entre las velocidades de deformación radial y axial, se mantiene constante para las probetas de baja densidad inicial; a medida que aumenta la densidad inicial del compacto, no obstante, se observa cómo durante la fase final del ensayo la deformación radial aumenta más rápidamente que la axial. En el siguiente apartado se resume esquemáticamente esta evolución.

4.6. RESUMEN

Las características generales de la evolución de todas las componentes de la deformación son comunes a los tres tipos de polvos estudiados, a pesar de sus diferencias morfológicas y de composición química.

La figura 4.77 corresponde a un esquema de los aspectos fundamentales del comportamiento elastoplástico de los compactos metálicos; en él quedan bien reflejadas las diferentes etapas del proceso de deformación.

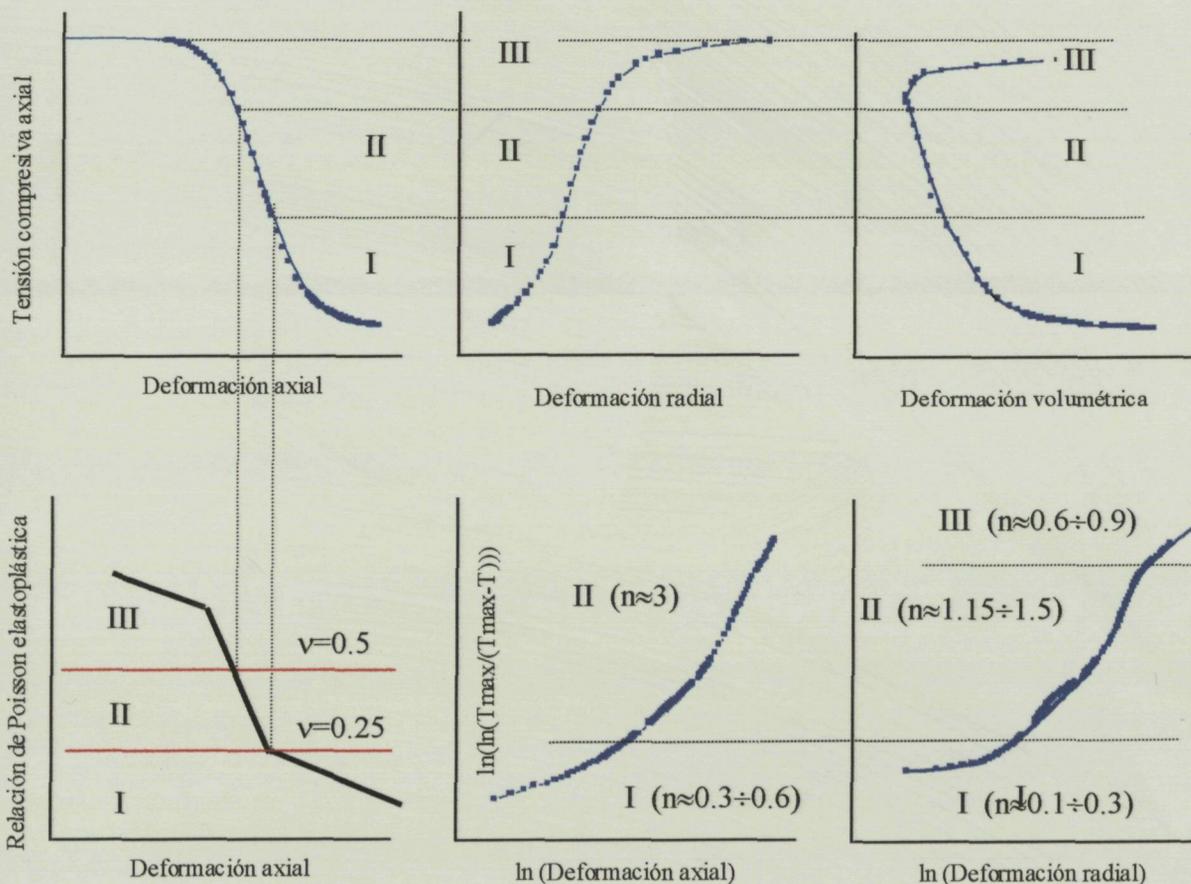


Fig. 4.77.- Evolución de las diferentes componentes de la deformación y de la relación de Poisson elastoplástica durante la compresión uniaxial de los compactos.

Zona I : Preconsolidación. Durante esta fase se eliminan los efectos que, a escala local, han sido inducidos por el proceso de fabricación del compacto. En esta región, la deformación es permanente.

Zona II : Deformación elastoplástica.

Zona III : El compacto metálico se dilata. La deformación es, básicamente, plástica y se observa un incremento de la velocidad de deformación en dirección radial.

5. COMPORTAMIENTO ELÁSTICO DE LOS COMPACTOS PULVIMETALÚRGICOS

5. COMPORTAMIENTO ELÁSTICO DE LOS COMPACTOS PULVIMETALÚRGICOS

5.1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento elástico de los compactos pulvimetalúrgicos ha recibido, hasta ahora, bien poca atención por parte de los grupos de investigación involucrados en este campo del conformado metálico. La gran dificultad de encontrar y refinar un modelo de Plasticidad para la compactación de polvos metálicos, ha restado interés a la componente elástica. Sin embargo, en el proceso industrial pulvimetalúrgico, la eyección de la preforma porosa constituye una etapa crítica y las propiedades del compacto obtenido dependen, también, de su comportamiento elástico.

En general, la elasticidad de los compactos porosos se ha representado mediante un modelo pseudoelástico: la tensión y la deformación se relacionan a través de un *módulo* dependiente de la densidad inicial de la pieza. Con pocas excepciones ([2], [79], ...), se trata de expresiones definidas para compactos sinterizados ([80], [81], ...) y, por lo tanto, no aplicables al caso que nos ocupa en el presente trabajo. En el campo de los materiales geológicos, Roscoe y sus colaboradores [57], [58] y [59] desarrollaron un modelo de comportamiento elástico, que relaciona linealmente el cambio elástico de la proporción residual de poros, de^{el} , y el logaritmo de la componente hidrostática de la tensión, $\ln p$:

$$de^{el} = -kd(\ln(p)) \quad (5.1)$$

en la que k es un parámetro del material.

Los resultados experimentales obtenidos ensayando compactos metálicos, no obstante, cumplen una ley ligeramente distinta. Riera y Prado [82] utilizaron la siguiente expresión, propuesta en [83]:

$$de^{el} = -kd(\ln(p + p_i^{el})) \quad (5.2)$$

en la que p_i^{el} es la resistencia a la tracción triaxial del compacto y que estos autores asimilaron a la cohesión del agregado metálico.

Sin embargo, la aplicación de este modelo a compactos metálicos no resulta fácil; los parámetros k y p_i^{el} deben determinarse por ajuste matemático, a partir de los resultados experimentales. Además, trabajos posteriores [84] han demostrado que la cohesión de los compactos pulvimetalúrgicos es muy baja y no parece adecuado mantener el significado físico del parámetro p_i^{el} .

Zienkiewicz y Naylor [85] publicaron una interesante crítica sobre el modelo de Roscoe y sus colaboradores, que concluye con la siguiente reflexión: *"Ya que las deformaciones elásticas son pequeñas, la cuestión que se plantea es ¿por qué no pueden utilizarse unas relaciones lineales, más sencillas, para la elasticidad en la región de sobreconsolidación?"* Esta opinión ha sido compartida por la mayor parte de los grupos investigadores.

Pero, los ensayos que se presentan en este trabajo muestran un comportamiento elástico no lineal, que merece un detallado análisis y la definición de una nueva ley constitutiva.

5.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El estudio del comportamiento elástico de las preformas porosas se ha llevado a cabo sometiendo compactos de distintas densidades (ver tabla 3.II, pg. 34) a los ensayos de compresión uniaxial, descritos en el capítulo tercero, apartado 3.5.3 (pg. 39). Los resultados obtenidos de los diferentes bloques se han unido y se presentan, en un único gráfico, en forma de curva continua. Los que se presentan a continuación (Figs. 5.1 a 5.9) corresponden a una sola probeta de cada tipo de polvo en estudio; los datos completos se incluyen en el *Apéndice de gráficos* (pg. 132).

DEFORMACIÓN AXIAL

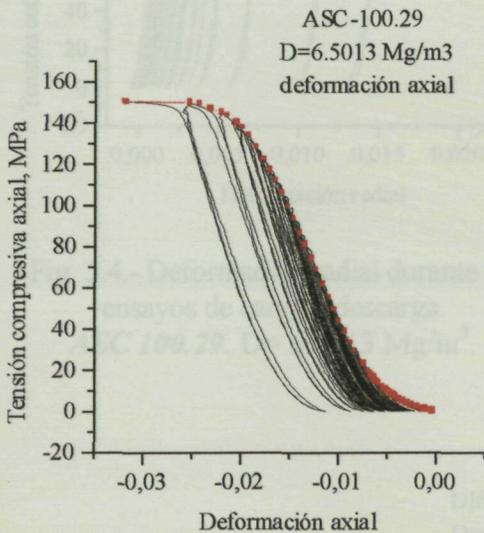


Fig. 5.1.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
ASC 100.29. D= 6.5013 Mg/m³.

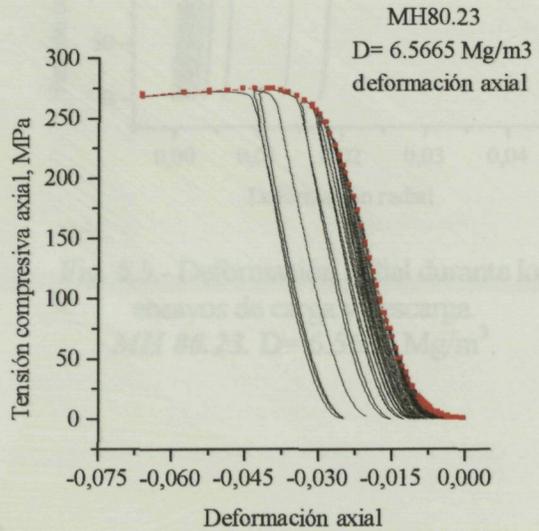


Fig. 5.2.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
MH 80.23. D= 6.5665 Mg/m³.

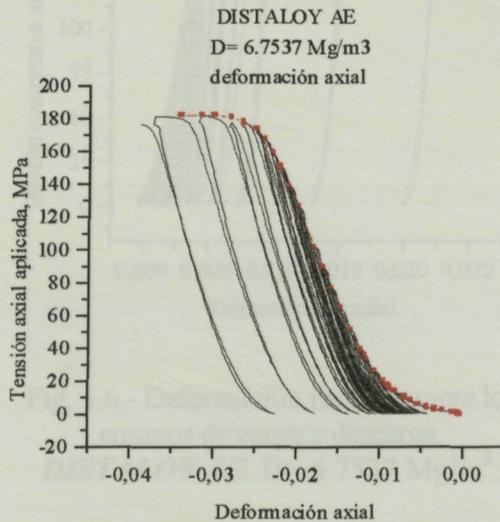


Fig. 5.3.- Deformación axial durante los ensayos de carga y descarga.
DISTALOY AE. D= 6.7537 Mg/m³.

DEFORMACIÓN RADIAL

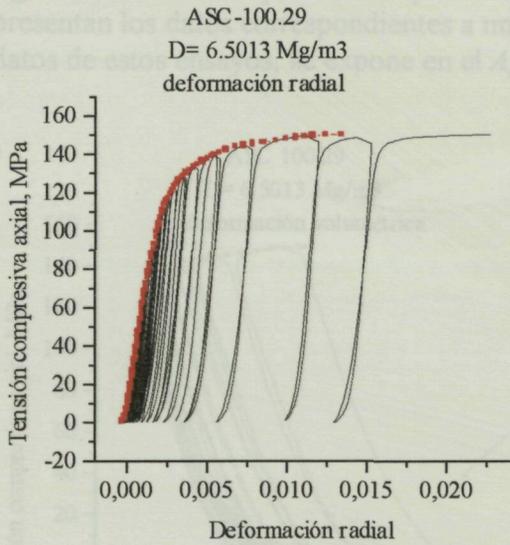


Fig. 5.4.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
ASC 100.29. D= 6.5013 Mg/m³.

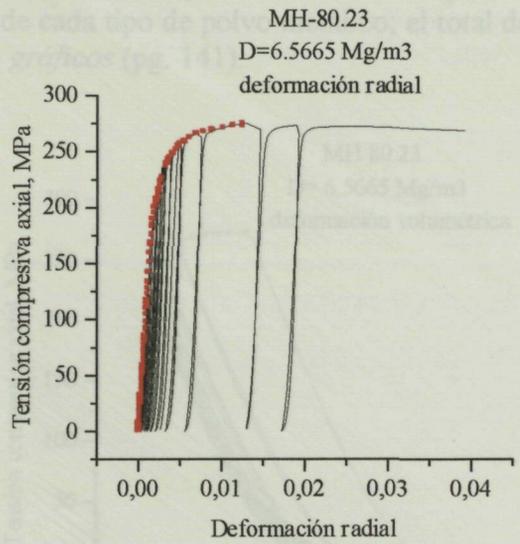


Fig. 5.5.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
MH 80.23. D= 6.5665 Mg/m³.

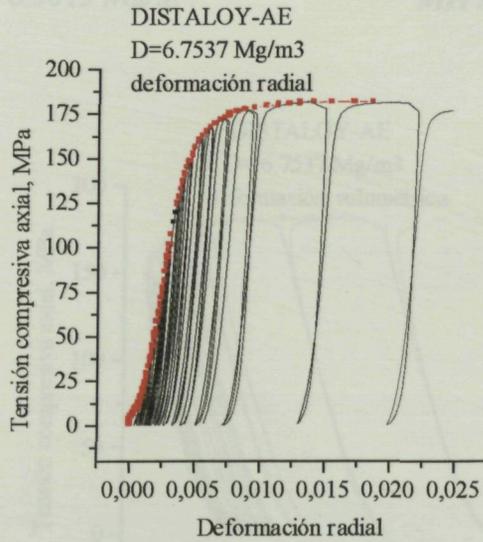


Fig. 5.6.- Deformación radial durante los ensayos de carga y descarga.
DISTALLOY AE. D= 6.7537 Mg/m³.

DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA

A partir de las medidas experimentales de las deformaciones axial y radial, se obtienen los siguientes resultados para la componente volumétrica ($\epsilon_v = \epsilon_{ax} + 2\epsilon_r$). También en este apartado se presentan los datos correspondientes a una muestra de cada tipo de polvo metálico; el total de los datos de estos ensayos, se expone en el *Apéndice de gráficos* (pg. 141).

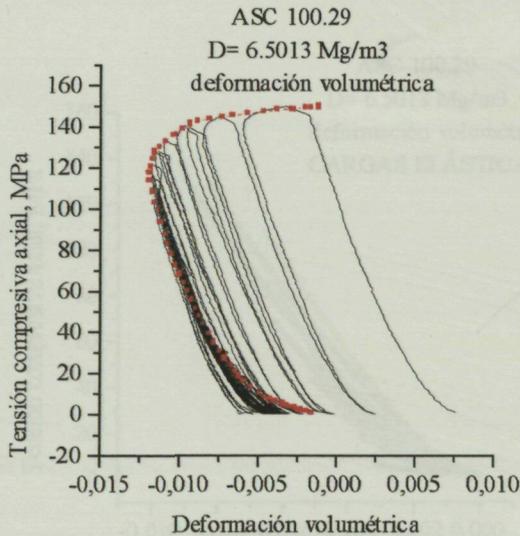


Fig. 5.7.- Deformación volumétrica durante los ensayos de carga y descarga.
DISTALLOY AE. D= 6.5013 Mg/m³.

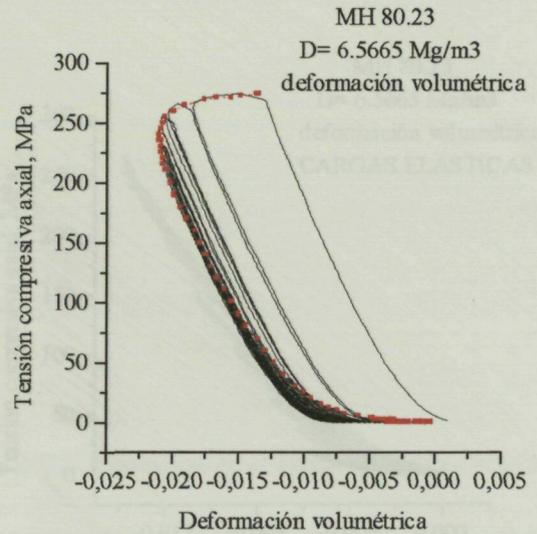


Fig. 5.8.- Deformación volumétrica durante los ensayos de carga y descarga.
MH 80.23. D= 6.5665 Mg/m³.

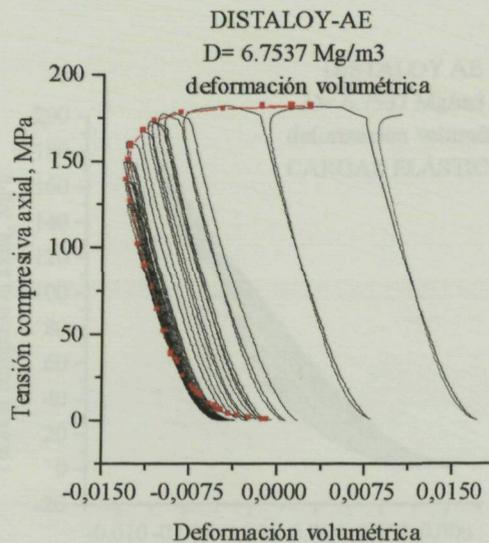


Fig. 5.9.- Deformación volumétrica durante los ensayos de carga y descarga.
DISTALLOY AE. D= 6.7537 Mg/m³.

5. 3. MODELO DE COMPORTAMIENTO ELÁSTICO

Con el fin de definir las relaciones entre la tensión y las componentes de la deformación elástica, se han aislado los datos de carga de cada ciclo correspondientes al régimen elástico. Las figuras 5.10 a 5.12 muestran la evolución de la deformación elástica volumétrica con la tensión aplicada para una probeta representativa de cada tipo de polvo ensayado. (El total de los resultados se adjunta en el *Apéndice de gráficos* (pg. 146).)

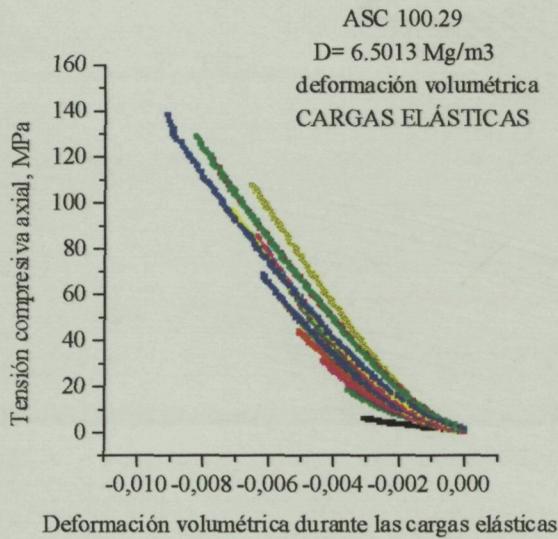


Fig. 5.10.- Deformación volumétrica durante las descargas elásticas.
ASC 100.29. D= 6.5013 Mg/m³.

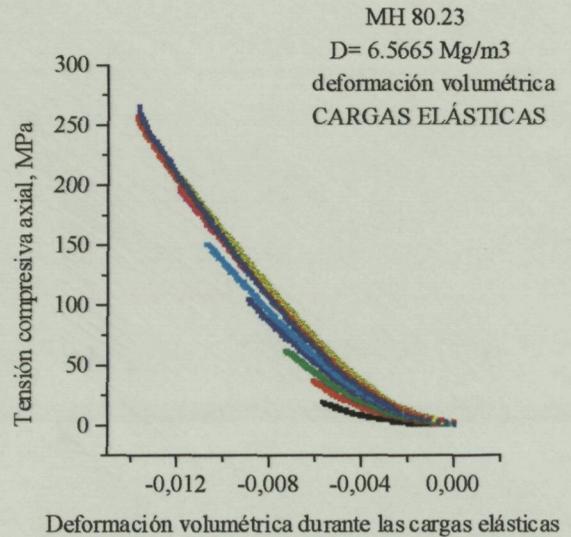


Fig. 5.11.- Deformación volumétrica durante las descargas elásticas.
MH 80.23. D= 6.5665 Mg/m³.

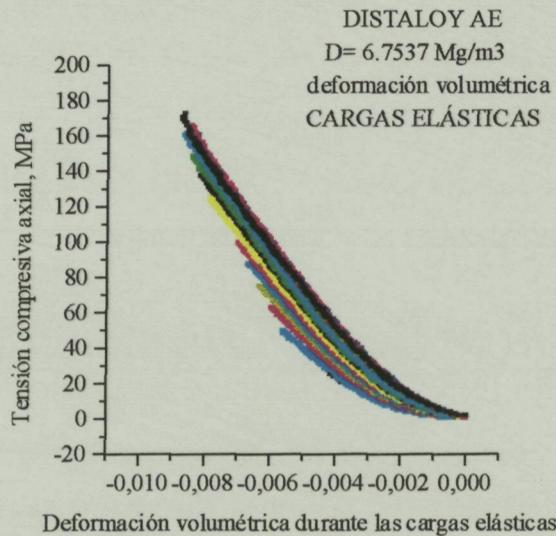


Fig. 5.12.- Deformación volumétrica durante las cargas elásticas.
DISTALOY AE. D= 6.7537 Mg/m³.

Es bien patente la no linealidad del comportamiento elástico de estos materiales. Como se observa en los gráficos anteriores, la composición química y la morfología de las partículas metálicas no alteran el modo general de comportamiento; cabe esperar, no obstante, que sean los valores de los parámetros propios de cada material los que marquen diferencias entre ellos.

En todos los casos, la pendiente de la curva de cada ciclo es distinta (ver Figs. 5.10 a 5.12); hay que tener en cuenta que, en cada ciclo de carga, se añade deformación plástica; por lo tanto, durante el ensayo, el compacto ve modificados su densidad y su estado de endurecimiento. En realidad, cada carga se aplica sobre un material *distinto*.

Nuevamente, la representación en el espacio logarítmico ayuda a comprender los fenómenos involucrados en el proceso de deformación y a la definición de una ecuación constitutiva.

El primer aspecto destacable es una significativa diferencia entre la primera carga de cada bloque de ciclos con respecto de las cargas siguientes. Las figuras 5.13 y 5.14 constituyen un ejemplo que podría corresponder a cualquiera de los compactos ensayados.

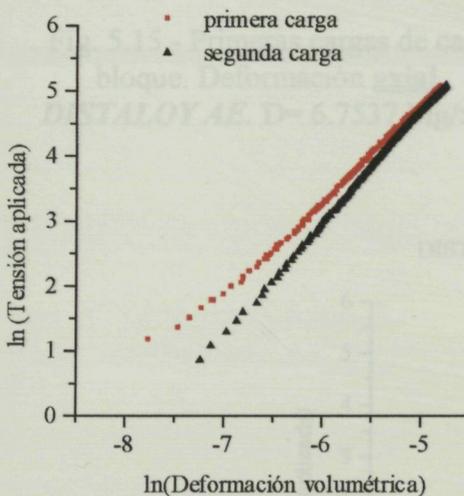


Fig. 5.13.- Evolución de la deformación volumétrica durante el ensayo de compresión. Representación logarítmica.

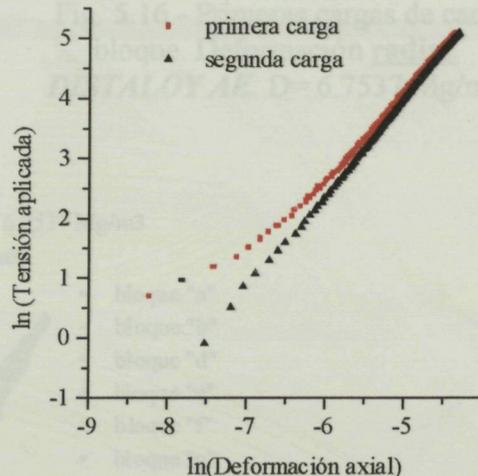


Fig. 5.14.- Evolución de la deformación axial durante el ensayo de compresión. Representación logarítmica.

Este comportamiento parece indicar que, al inicio de cada ensayo de compresión (la primera carga de cada bloque de ciclos), la deformación del compacto está dominada por la fricción interna (fenómeno descrito en el capítulo 5º, apartado 4.4. pg. 70). Esta fase es, no obstante, muy breve; para tensiones aún muy bajas, el mecanismo que predomina sobre la muestra es la deformación elástica. Hay, pues, dos etapas controladas por fenómenos distintos; de ahí que, en la escala logarítmica, tensión y deformación (todas sus componentes) se relacionen a través de una curva, tal como muestran las figuras 5.15 a 5.17 para las tres componentes de la deformación de una muestra, como ejemplo.

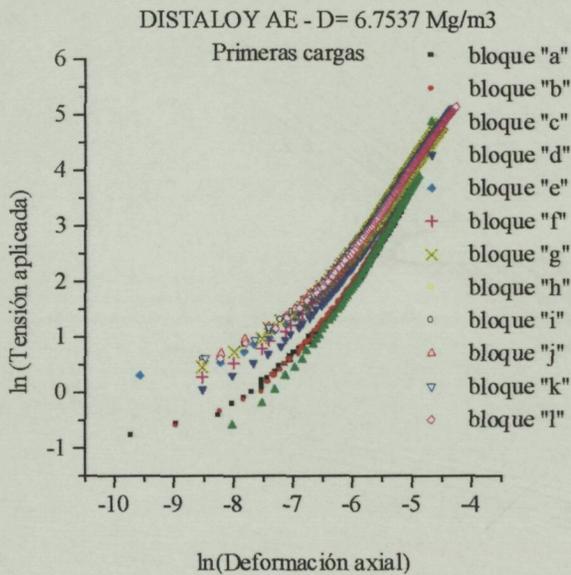


Fig. 5.15.- Primeras cargas de cada bloque. Deformación **axial**.
DISTALOY AE. D= 6.7537 Mg/m³.

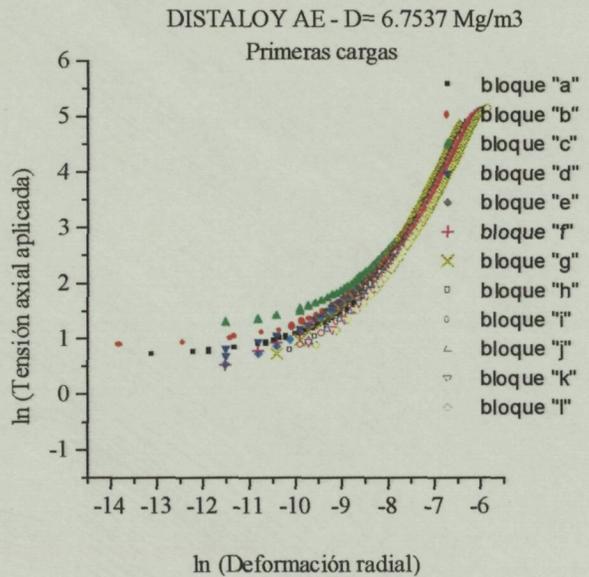


Fig. 5.16.- Primeras cargas de cada bloque. Deformación **radial**.
DISTALOY AE. D= 6.7537 Mg/m³.

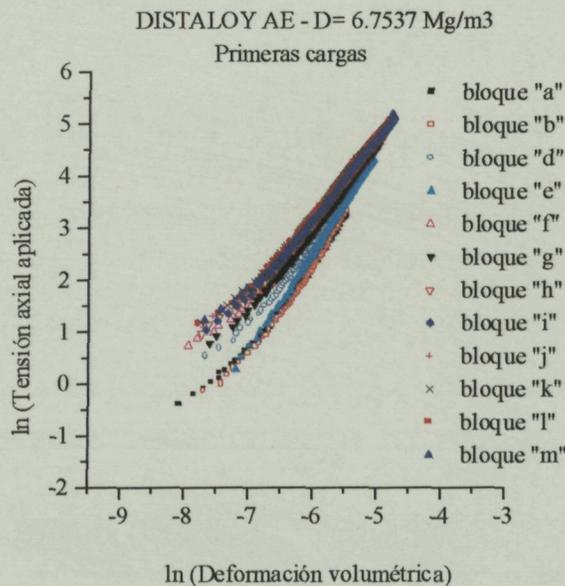


Fig. 5.17.- Primeras cargas de cada bloque. Deformación **volumétrica**.
DISTALOY AE. D= 6.7537 Mg/m³.

Tras esta primera carga, las relaciones que se establecen entre la tensión y las componentes **axial** y **volumétrica** de la deformación elástica, tienden a describir rectas en este espacio logarítmico. Las figuras 5.18 a 5.23 corresponden a un ejemplo para cada tipo de polvo objeto de este trabajo.

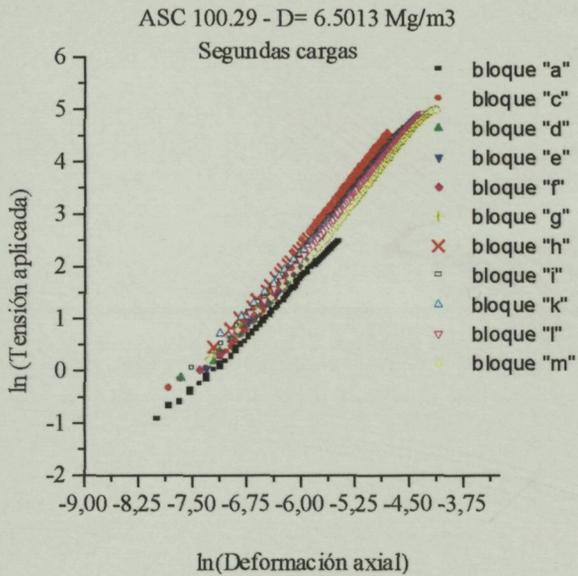


Fig. 5.18.- Segundas cargas de cada bloque. Deformación **axial**.
ASC 100.29. D= 6.5013 Mg/m³.

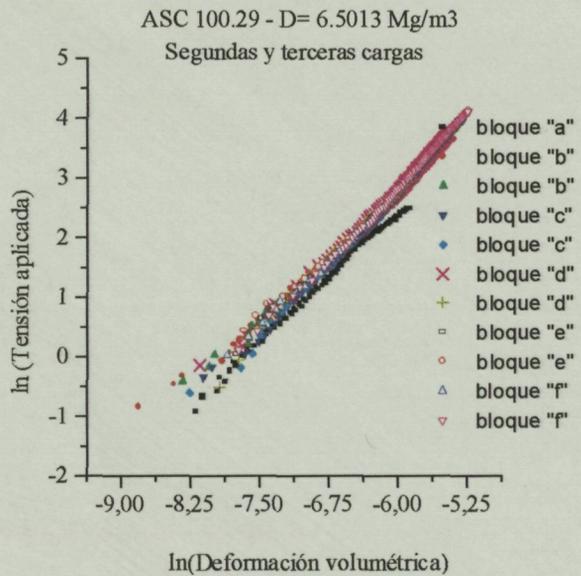


Fig. 5.19.- Segundas cargas de cada bloque. Deformación **volumétrica**.
ASC 100.29. D= 6.5013 Mg/m³.

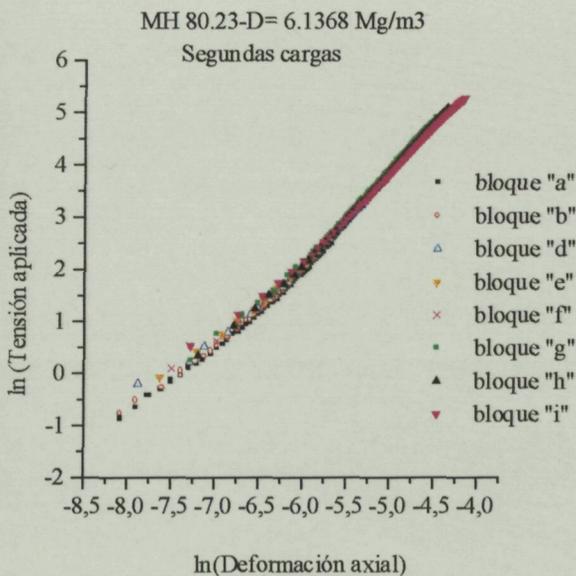


Fig. 5.20.- Segundas cargas de cada bloque. Deformación **axial**.
MH 80.23. D= 6.1368 Mg/m³.

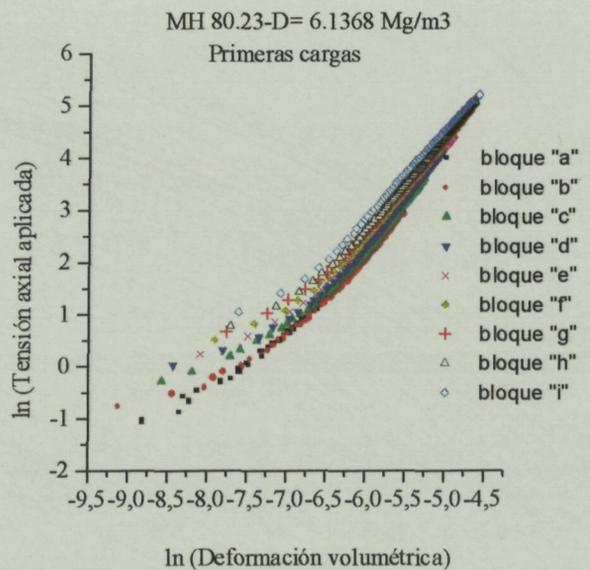


Fig. 5.21.- Segundas cargas de cada bloque. Deformación **volumétrica**.
MH 80.23. D= 6.1368 Mg/m³.