

SIMULACIÓN ELASTOPLÁSTICA DE LOS CONTACTOS ENTRE PARTÍCULAS EN MATERIALES GRANULARES

M^a Dolores Riera <mailto:md.riera@upc.es>
José Manuel Prado <mailto:jm.prado@upc.es>

Centro Tecnológico de Manresa <http://www.ctm.upc.es/>
Universidad Politécnica de Catalunya <http://www.upc.es/>

RESUMEN

Los mecanismos que rigen la densificación de los materiales granulares durante su compactación son fuertemente dependientes de los estados de tensión y deformación en las zonas de contacto entre partículas. Un modelo micromecánico puede, por lo tanto, ser muy útil en el análisis de los fenómenos involucrados en el proceso de compactación. En el presente trabajo se presentan los resultados de simulaciones numéricas que muestran las distribuciones de tensión y deformación en modelos que contienen dos y cuatro partículas en contacto. Se analizan la evolución de la deformación en las áreas de contacto, las tensiones residuales tras la retirada de la carga compresiva y sus consecuencias en el comportamiento mecánico macroscópico de los compactos.

ABSTRACT

The mechanisms governing the densification of powdered materials under compaction are highly dependent on the deformation and the state of stress in the contact among particles. Therefore, a micromechanical model can be very useful in studying the phenomena involved in the compaction process. In this work numerical simulations showing the distributions of strain and stress in models containing two and four particles are presented. The evolution of the deformation in the contact area among particles, the residual stresses appeared after releasing the compressive load and their consequences on the macroscopic mechanical behaviour of powder compacts are here analysed

1 INTRODUCCIÓN

Al igual que en muchos otros procesos industriales, la simulación numérica de la compactación de polvo metálico está recibiendo en los últimos años una creciente atención por parte de los investigadores. Las propiedades mecánicas de las piezas pulvimetalúrgicas dependen de la homogeneidad de la distribución de densidades y ésta puede variar de forma notable con la cinemática de los punzones de compactación. Las tolerancias dimensionales de las piezas tras su eyección del molde dependen de la magnitud de la recuperación elástica, que varía con la geometría de la pieza y el material de la matriz. Por lo tanto, pueden obtenerse indiscutibles beneficios económicos de la utilización de las técnicas de simulación en la fase de diseño de nuevas piezas.

En el proceso pulvimetalúrgico, la simulación está todavía en desarrollo debido a la falta de los modelos elastoplásticos que puedan representar el comportamiento

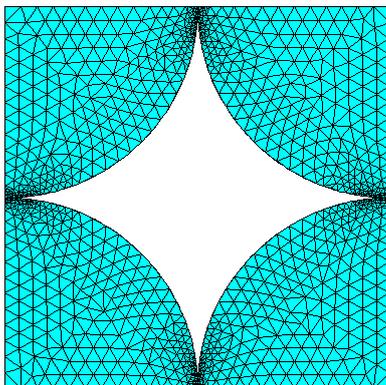
mecánico del material en las diversas etapas del proceso industrial. Así, modelos inicialmente definidos para materiales geológicos, tales como los de Cam-Clay y Cap^(1, 2, 3, 4), se han aplicado a la modelización del comportamiento plástico de las partículas metálicas durante su compactación en el interior de la matriz. La validez de estos modelos es inevitablemente limitada debido a la distinta naturaleza y, por lo tanto, distinto comportamiento mecánico, de las partículas metálicas y de las de los materiales geológicos.

Otra aproximación es la que consiste en el estudio micromecánico del contacto entre las partículas metálicas^(5, 6, 7). Aunque la complejidad de este tipo de análisis limita su aplicación, puede obtenerse información muy valiosa acerca de los mecanismos de ablandamiento y endurecimiento que ocurren durante la compactación y durante los ensayos de compresión uniaxial utilizados para caracterizar el comportamiento del material^(8, 9).

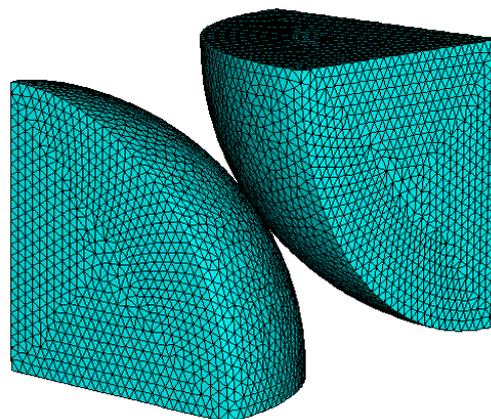
Aunque la simulación mediante el método de los elementos finitos parece una técnica muy apropiada para este tipo de estudio, ha sido muy raramente empleada en este campo. Así, en este trabajo se analiza el comportamiento elastoplástico del contacto interpartículas mediante la simulación numérica y se derivan conclusiones relativas a la ley de comportamiento elástico seguida por los materiales granulares metálicos y, también, sobre la distribución de tensiones durante su deformación plástica.

2 SIMULACIÓN

Se ha simulado, mediante el método de los elementos finitos, la compresión uniaxial, en los regímenes elástico y elastoplástico, de diferentes arreglos geométricos de esferas, que se muestran, ya mallados, en la Fig. 1 ((a), (b) y (c) para el caso elástico, y (d) para el elastoplástico); corresponden a empaquetamientos de esferas (a) cúbico simple, (b) cúbico centrado en el cuerpo, (c) cúbico centrado en las caras, y (d) cúbico simple, con densidades relativas 0.52, 0.68, 0.74 y 0.52, respectivamente.



(a)



(b)

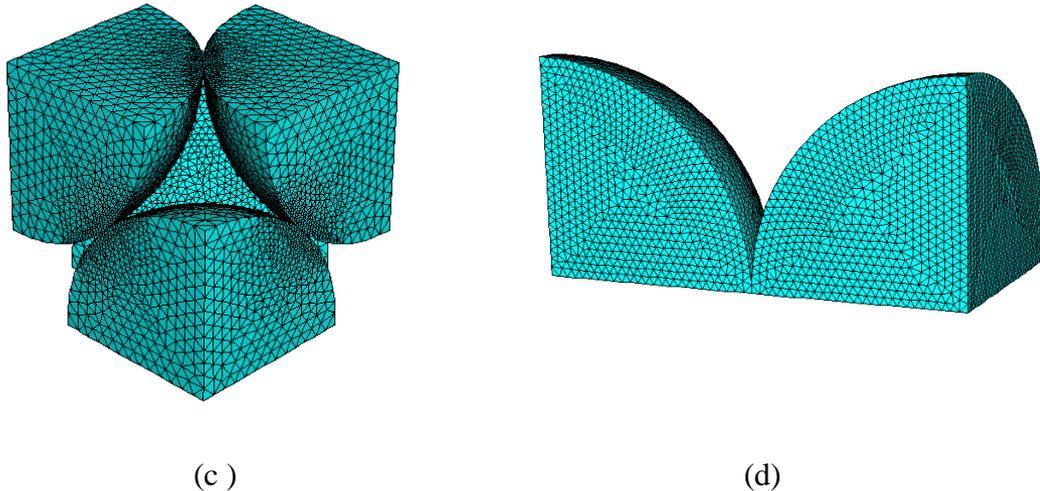


Fig.1.- Arreglos geométricos mallados con elementos tetragonales de 10 nodos. Caso elástico: a) cúbico simple, b) cúbico centrado en el cuerpo, c) cúbico de caras centradas. Caso elastoplástico: d) cúbico simple.

Las áreas de contacto se han mallado muy finamente para asegurar un análisis correcto y detallado de esta zona. En el estudio del comportamiento elástico, se ha evitado el deslizamiento entre partículas acoplado los nodos que están en contacto inicialmente.

Las partículas se han supuesto isotropas y homogéneas; las esferas son de iguales tamaño y naturaleza, y se les ha asignado las propiedades mecánicas del hierro puro: módulo de Young igual a 196 GPa, relación de Poisson, 0.33; límite elástico, 170 MPa.

El objetivo de la simulación en el caso elástico es encontrar la ecuación constitutiva que rige este tipo de deformación; la simulación en el régimen elastoplástico, en cambio, se ha llevado a cabo con el fin de obtener información sobre las tensiones residuales desarrolladas alrededor de los contactos locales entre partículas.

Las simulaciones se han llevado a cabo mediante el programa de cálculo ABAQUS 6.3.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Comportamiento elástico

La simulación numérica permite encontrar las curvas que relacionan la tensión axial y la componente axial de la deformación elástica para cada configuración geométrica, para cada densidad. Los resultados se presentan en la Fig. 2.

En los tres casos estudiados, la ecuación seguida por las curvas es del tipo:

$$\sigma_{ax} = K (\varepsilon_{ax}^{el})^n \quad (1)$$

en la que K y n son dos parámetros del material, que toman los valores dados en la Tabla I para cada una de las configuraciones analizadas.

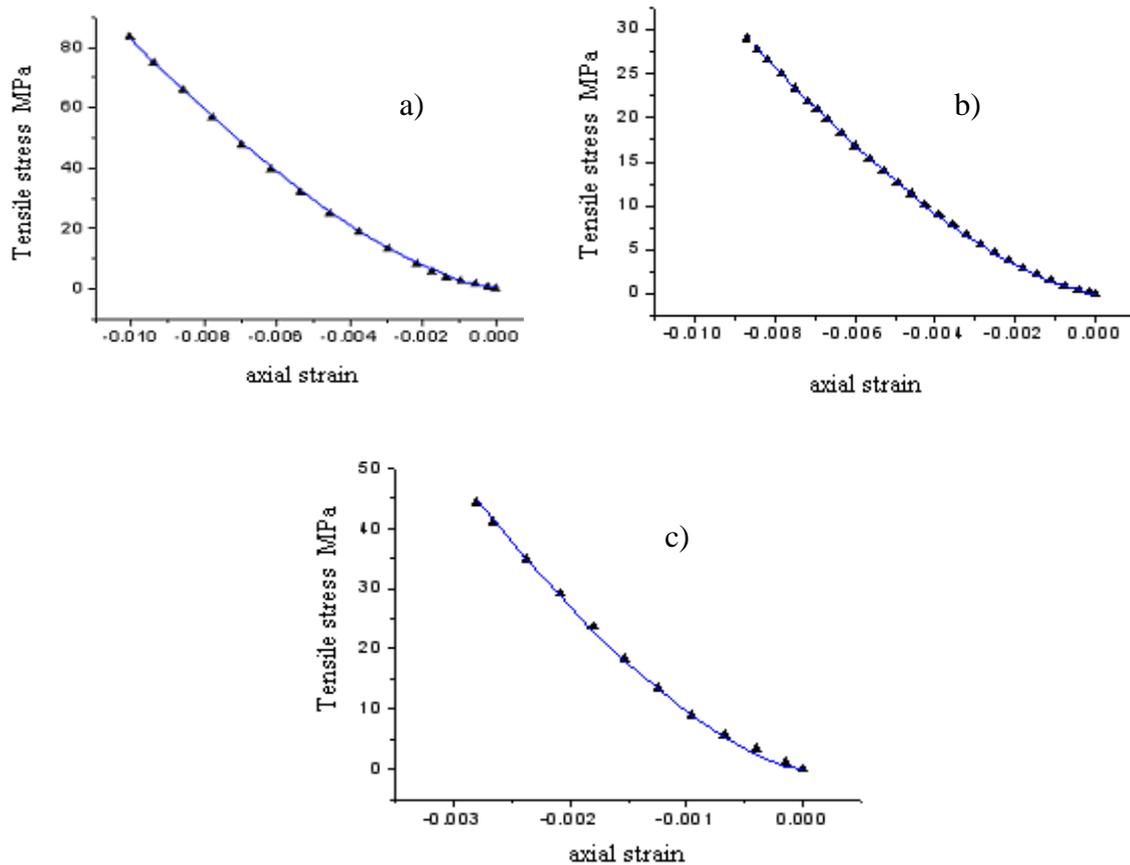


Fig.2.- Curvas que relacionan la tensión axial vs. la deformación axial. a) Cúbico simple. b) Cúbico centrado en el cuerpo. c) Cúbico centrado en las caras.

Tabla I.- Valores de los parámetros K y n obtenidos en la simulación.

Arreglo geométrico	Densidad relativa	K	n
Cúbico simple	0.52	82386	1.5
Cúbico centrado en el cuerpo	0.68	36073	1.5
Cúbico centrado en las caras	0.74	302602	1.5

Riera et al. ⁽¹⁰⁾ han encontrado, para el comportamiento elástico, el mismo tipo de ley a partir de ensayos cíclicos de compresión uniaxial aplicados a compactos de partículas metálicas. En ⁽¹⁰⁾ el valor de n evoluciona, con el ciclado, desde valores cercanos a 2, hasta 1.5, que es el valor obtenido en el presente trabajo. Sin embargo, el parámetro K deducido a partir de la simulación es diferente del experimental. En este último caso, el polvo metálico está arreglado de forma desordenada, siendo el número de coordinación el parámetro que representa el ampaquetamiento de partículas para cada densidad. En la simulación, las esferas están ordenadamente colocadas, como en las estructuras cristalinas, para las que la elasticidad es fuertemente anisotrópica. Por lo tanto, la conclusión básica que puede derivarse de la simulación mediante métodos numéricos es la no linealidad del comportamiento elástico, que sigue una ley potencial del tipo de la ecuación (1). Incluso el valor $n=1.5$ corresponde sólo a un caso elástico ideal.

3.2. Comportamiento elastoplástico

Los modelos de plasticidad que suelen emplearse para simular el comportamiento a compactación de los polvos metálicos están basados en modelos geológicos. Sin embargo, las partículas metálicas y las geológicas (cerámicas) son, desde un punto de vista plástico, de naturaleza muy distinta. Las partículas cerámicas son duras y frágiles y, por lo tanto, no se endurecen por deformación con la tensión aplicada; por otra parte, las partículas metálicas son dúctiles y se endurecen por deformación intensamente al ser deformadas. Así, pues, los materiales geológicos, al ser compactados, sólo tienen endurecimiento volumétrico, mientras que las metálicas combinan los endurecimientos volumétrico y de partícula.

Otro aspecto a considerar y que no ha sido considerado en modelos previos, es la heterogeneidad de la deformación plástica que ocurre en la compactación de polvos metálicos: las áreas de contacto entre partículas se deforman plásticamente, mientras que el resto de la partícula permanece en régimen elástico.

Este comportamiento puede apreciarse en la Fig. 3, que muestra la distribución de la tensión de von Mises desarrollada alrededor de los contactos cuando se aplican dos niveles de tensión, 44 y 82 MPa. En el interior de las zonas más oscuras de la figura, las tensiones equivalentes superan el límite elástico del material, indicando que son regiones deformadas plásticamente. Puede también observarse que, a pesar de que el campo de tensiones en el interior de las partículas aumenta con la tensión externamente aplicada, la extensión de las áreas plastificadas permanece prácticamente constante. Esta simulación muestra, además, que durante la compresión uniaxial los contactos laterales entre las esferas están fuertemente desarrollados; esto significa que las fuerzas se transmiten básicamente en dirección paralela a la máxima tensión aplicada.

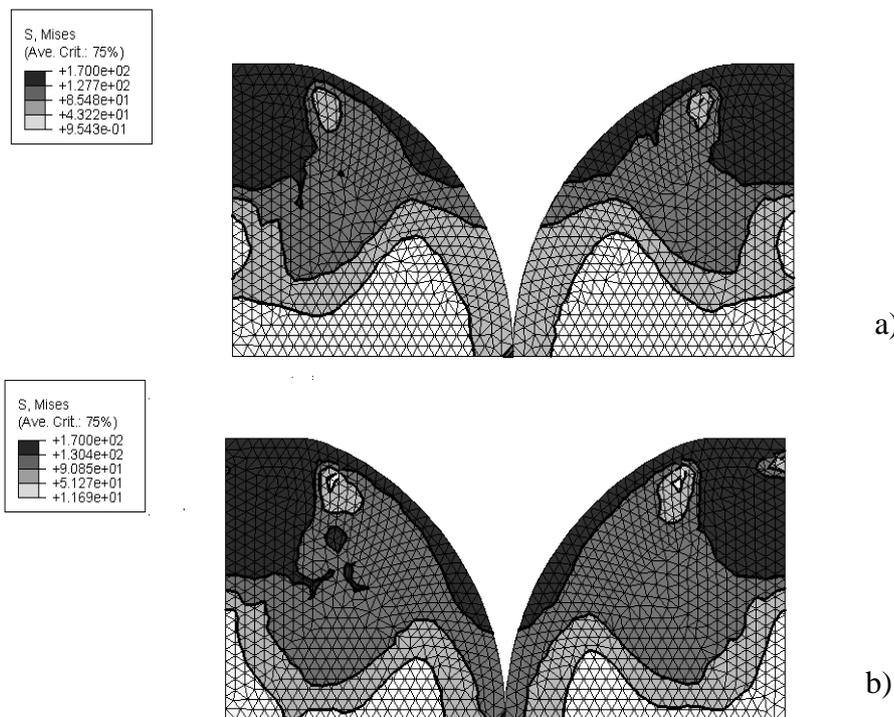


Fig.3.- Distribución de la tensión de von Mises tras dos ciclos de carga con tensiones máximas aplicadas de a) 44 MPa, y b) 82 MPa.

Una consecuencia de la plastificación localizada es el desarrollo de tensiones residuales alrededor de las áreas de contacto; esto, a su vez, puede alterar la respuesta mecánica de los agregados granulares, modificando, sobre todo, parámetros tales como el módulo elástico y el módulo volumétrico del material.

El estado de tensiones residuales desarrollado durante la deformación plástica es compleja. La Fig. 4 muestra la distribución de las tensiones residuales en dirección de la carga compresiva aplicada, σ_y , alrededor de las áreas de contacto una vez se ha retirado la carga. Aparece una zona en la región del contacto en la que las tensiones residuales son de naturaleza compresiva; por debajo de ella, se observa una amplia banda sometida a tracción seguida de otra nuevamente compresiva. Los contactos laterales entre esferas da lugar a tensiones residuales compresivas. De forma similar a la distribución de la tensión equivalente, las tensiones residuales no cambian apreciablemente al aumentar la carga externa.

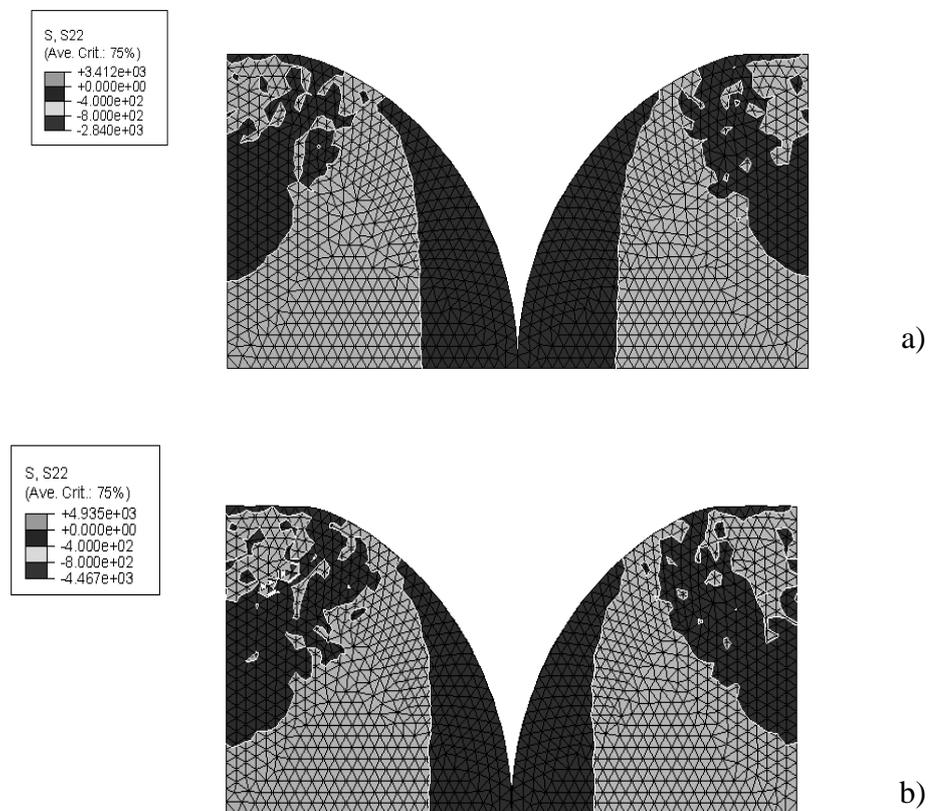


Fig.4.- Distribución de la tensión residual σ_y tras dos ciclos de carga: a) 44 MPa; b) 82 MPa. Las áreas en color más claro están sometidas a tracción; las más oscuras, a compresión.

Las distribuciones de la tensión residual σ_x se presentan en la Fig. 5.

Es obvio que este estado local de tensiones residuales no puede ser ignorado cuando se modeliza el comportamiento elastoplástico durante la compactación de polvos metálicos. Los modelos de plasticidad basados en los materiales geológicos no pueden incorporar la complejidad derivada de la ductilidad de los granos metálicos.

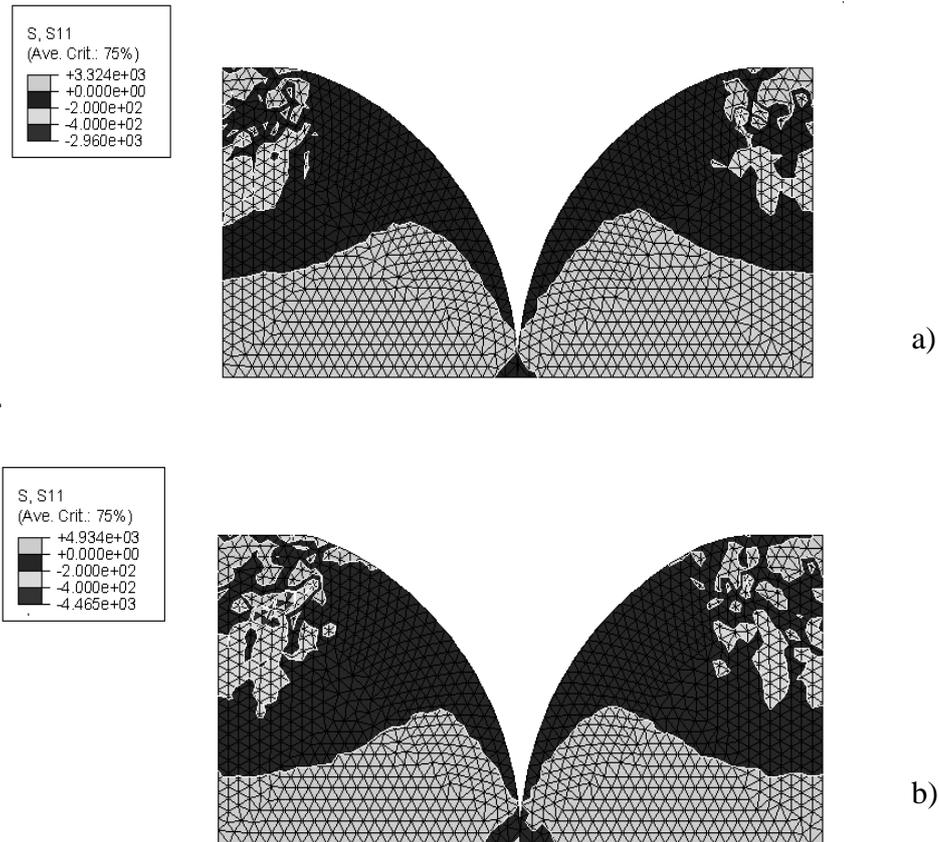


Fig.5.- Distribuciones de la tensión residual σ_x tras dos ciclos de carga: a) 44 MPa; b) 82 MPa. Las regiones en color claro están sometidas a tracción; las zonas más oscuras tienen tensión residual de tipo compresivo.

4 CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en este trabajo, pueden derivarse las siguientes conclusiones:

1. El comportamiento elástico en condiciones de no plastificación de los contactos, sigue una ley potencial, con un exponente igual a 1.5. Por lo tanto, el módulo de Young cambia con la tensión aplicada externamente.
2. La plastificación del área que rodea los contactos entre partículas ocurre inmediatamente a la aplicación de la carga; no obstante, su extensión crece moderadamente durante la deformación posterior. Alrededor de las áreas de contacto se desarrolla un complejo estado de tensiones residuales de tracción y compresión que afecta los parámetros del comportamiento mecánico de este tipo de materiales. Las cargas se transmiten paralelamente a la dirección de la máxima tensión aplicada.

5 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología. Ref: DPI2001-2256-C02-01.

6 REFERENCIAS

1. Mehta. Granular Matter. An interdisciplinary Approach, Springer-Verlag, Birmingham, 1994.
2. D. Kolymbas. Constitutive Modelling of Granular Materials, NY, 2000.
3. Desai, C.S. and Siriwardane, H.J. Constitutive Laws for Engineering Materials with emphasis on Geologic Materials, Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J. USA, 1984.
4. Sandler, I., Dimaggio, F.L. and Baladi, Y. Generalized Cap Model for Geological Materials, Journal of Geotechnical Engineering Division, 102, GT7, 683-699, 1976.
5. C. Claquin and F. Emeriault. Interference Behavior of Granular Materials: Discrete Numerical Simulation and Statistical Homogenization, Powders and Grains 2001, 323-326, Sendai (Japón), 2001.
6. Arzt, E. The influence of an increasing particle coordination on the densification of spherical powders, Acta Metallurgica, 30, 1883, 1982.
7. Fischmeister, H.F. and Arzt, E. Densification of powders by particle deformation, Powder Metallurgy, 26, 2, 82, 1983.
8. M. D. Riera. Comportamiento mecánico de compactos pulvimetalúrgicos. Thesis, Universidad Politécnica de Cataluña, 1999.
9. J. M. Prado y M. D. Riera. Modelling of Elastic Behaviour of Metal Powder Compacts, NATO Advanced Research Workshop. Recent Developments in Computer Modelling of Powder Metallurgy Processes. Series III: Computer and Systems Sciences, 176, ISSN: 1387-6694, 63-70, 2000.
10. M. D. Riera, J. M. Prado, A. Frachon, D. Imbault and P. Doremus. Modelling of green compact elasticity, Proceedings of 2000 Powder Metallurgy World Congress - Part 1. ISBN: 4-9900214-8-7, The Japan Society of Powder Metallurgy, 598-601, Kyoto, 2001.