

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**



**DEPARTAMENTO DE RESISTENCIA DE MATERIALES
Y ESTRUCTURAS EN LA INGENIERÍA**

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE PROCESOS DE COMPACTACIÓN Y EXTRUSIÓN DE MATERIALES PULVERULENTOS

Aplicación a la Pulvimetalurgia Industrial

TRABAJO REALIZADO COMO PARTE DE LOS REQUISITOS
EXIGIDOS PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR.

Presentada por:

RAFAEL WEYLER PÉREZ

Dirigida por el profesor:

Dr. XAVIER OLIVER OLIVELLA

Barcelona, Mayo de 2000.

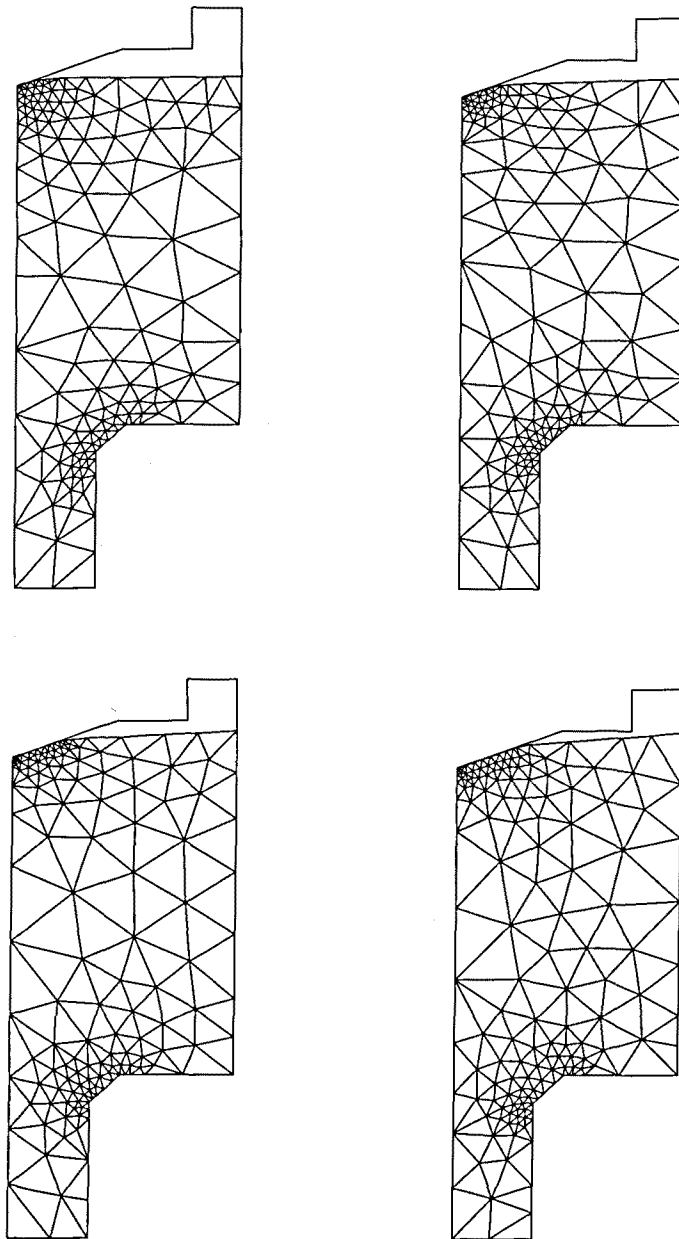


Figura 6.28: Discretización en distintos instantes del proceso de transferencia.

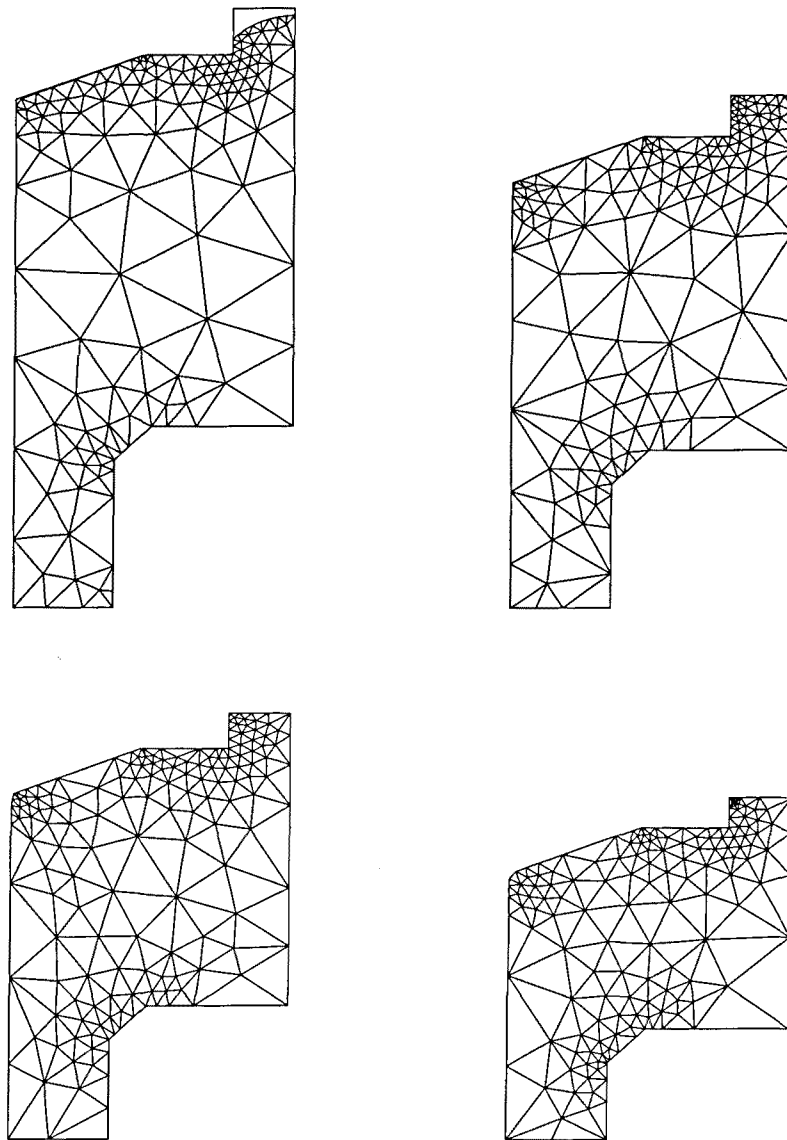


Figura 6.29: Discretización en distintos instantes del proceso de compactación suponiendo una cámara inicial parcialmente llena.

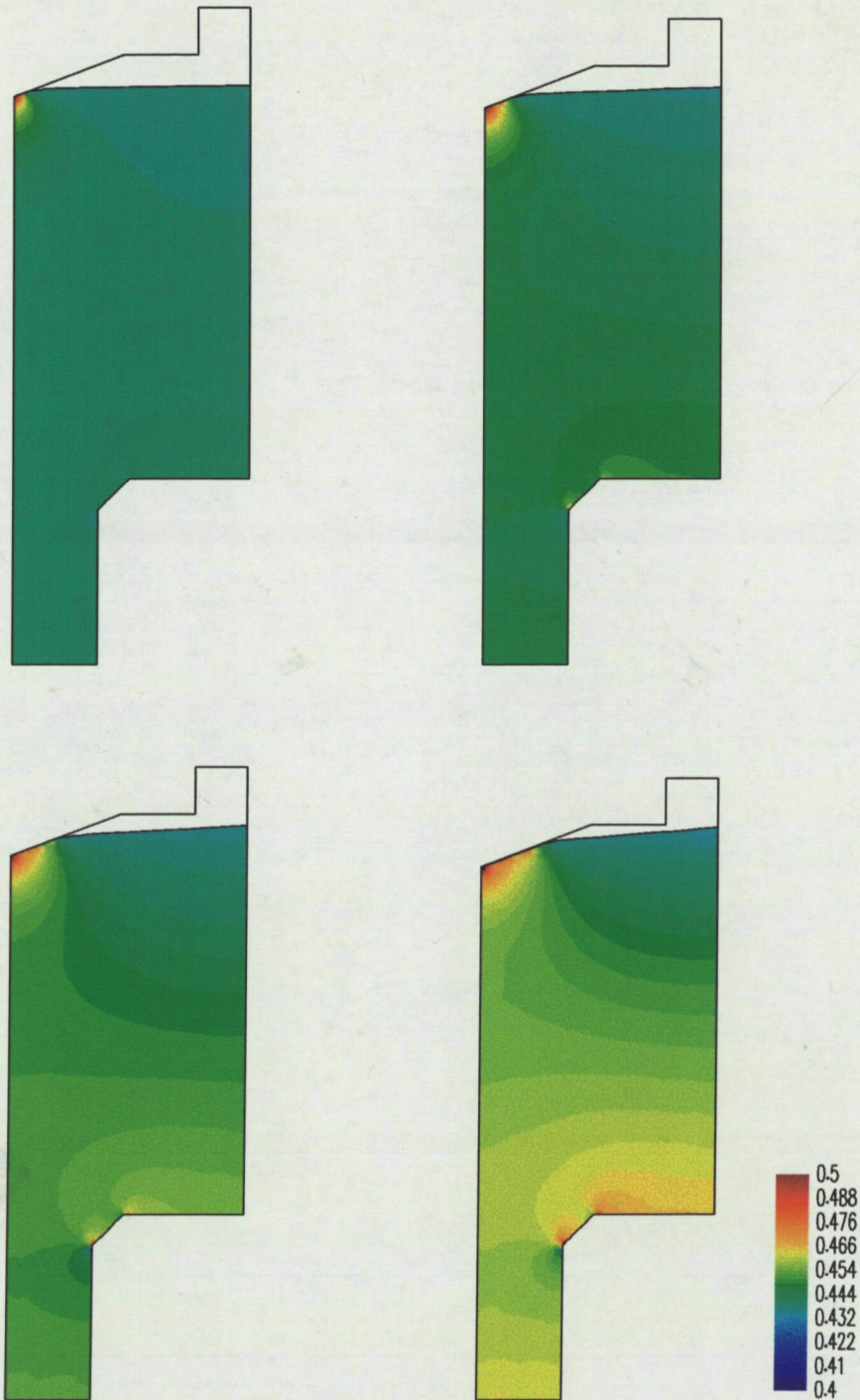


Figura 6.30: Distribución de la densidad relativa η correspondiente al 25%, al 50%, al 75% y al 100% de la etapa de transfencia.

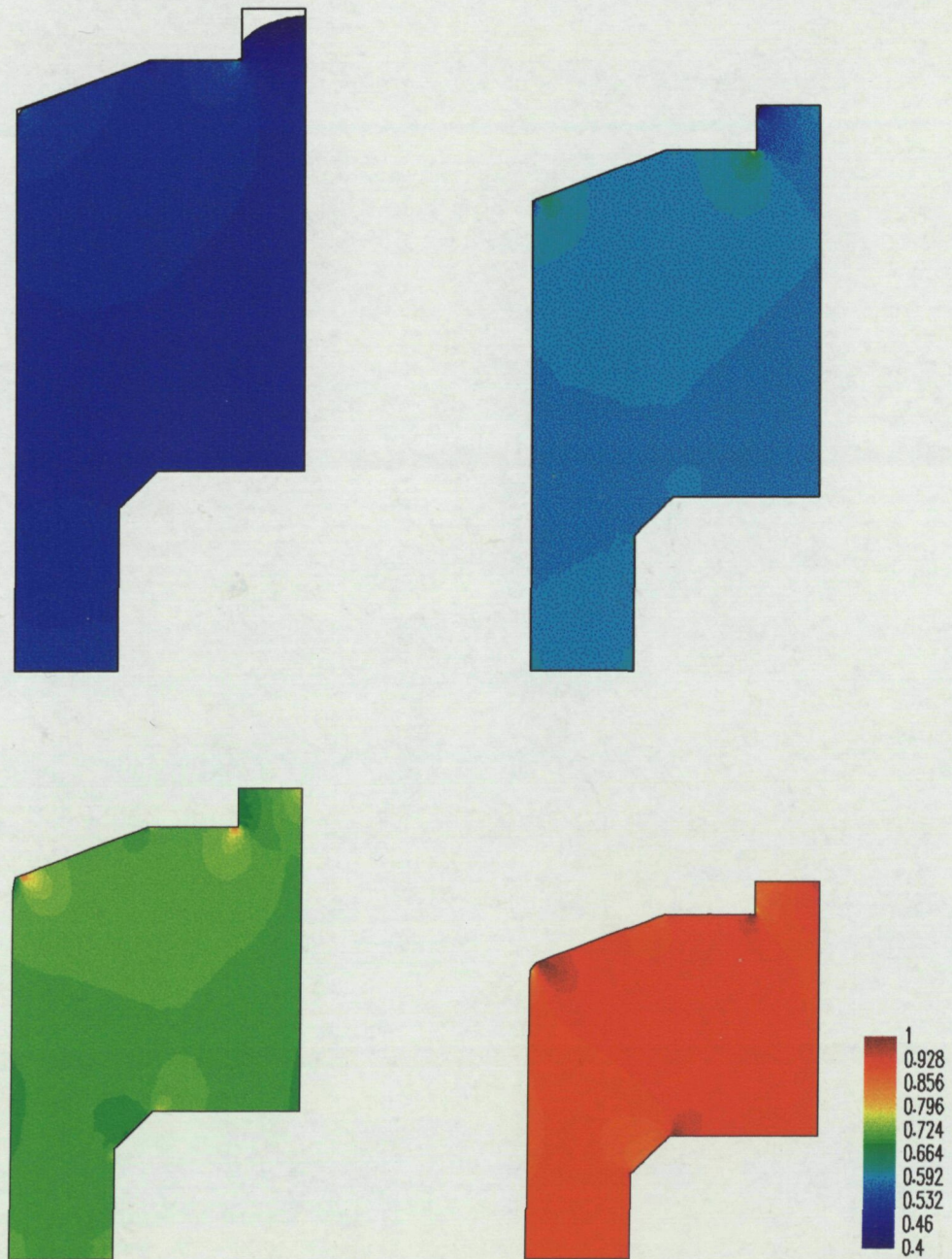


Figura 6.31: Distribución de la densidad relativa η para distintos instantes del proceso de compactación suponiendo una cámara inicial parcialmente llena.

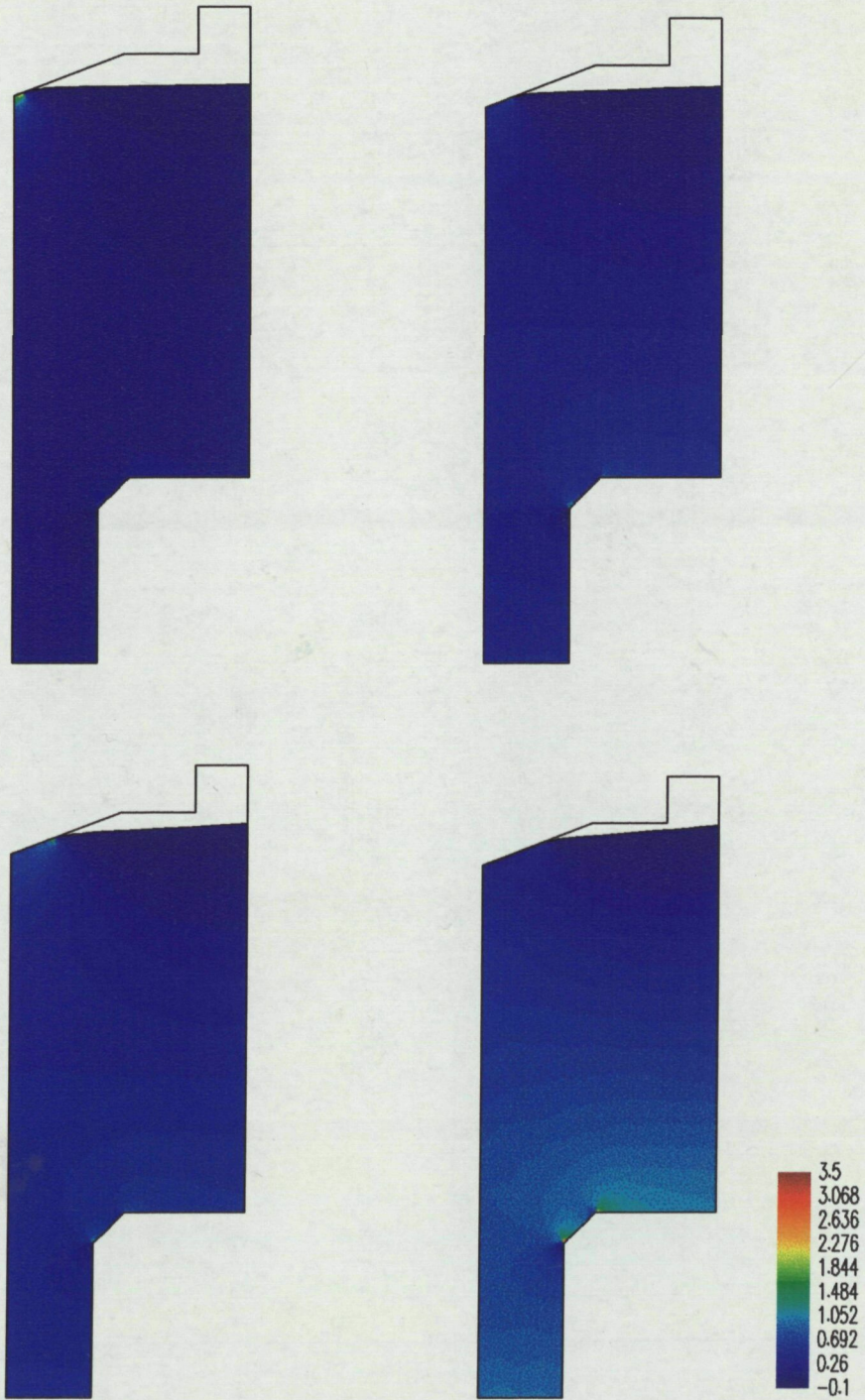


Figura 6.32: Distribución de la presión $p = -I_1/3$ para distintos instantes de la etapa de transferencia.

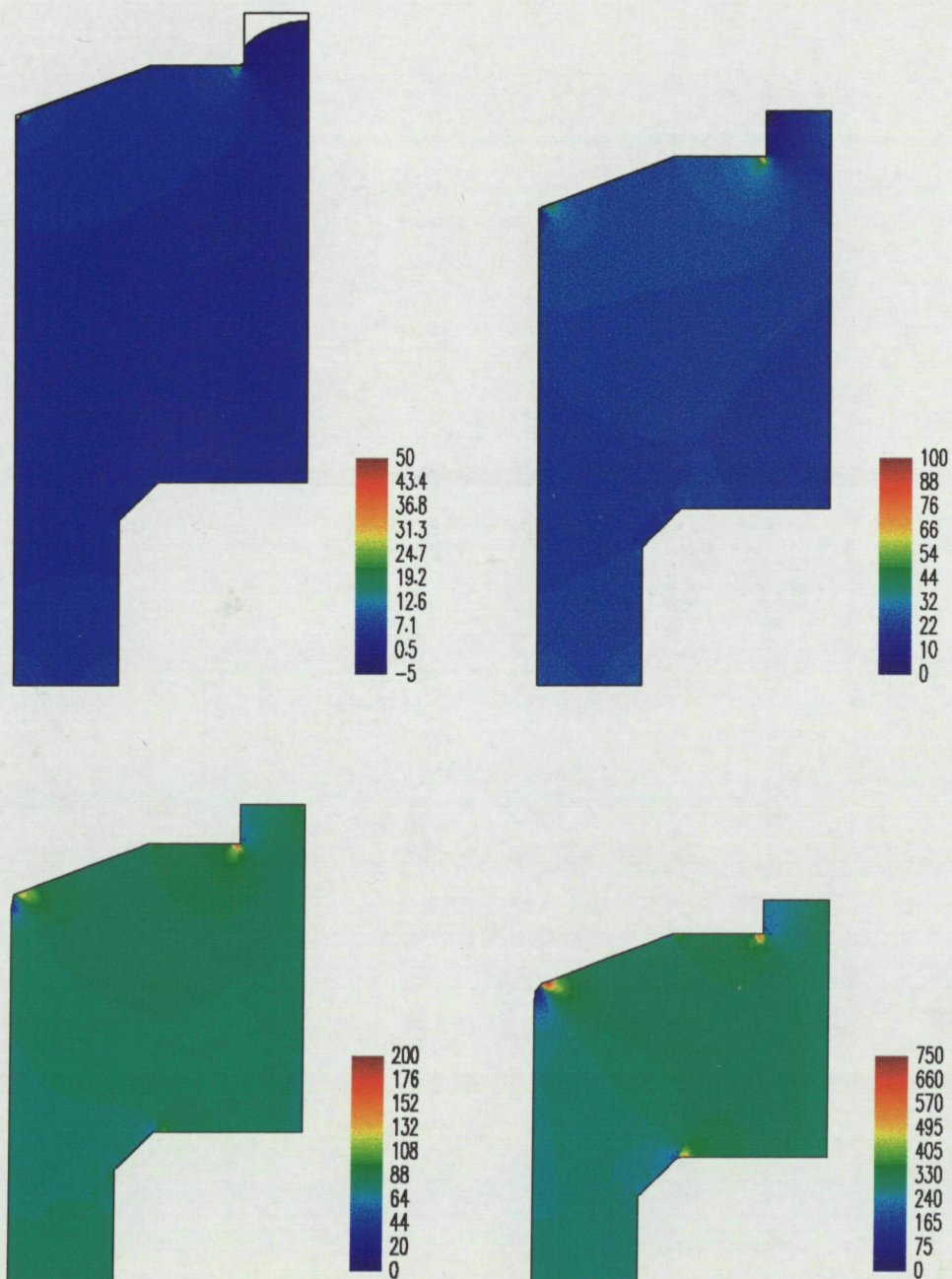


Figura 6.33: Distribución de la presión $p = -I_1/3$ en distintos instantes de la etapa de prensado para una secuencia que parte de una cámara inicial parcialmente llena.

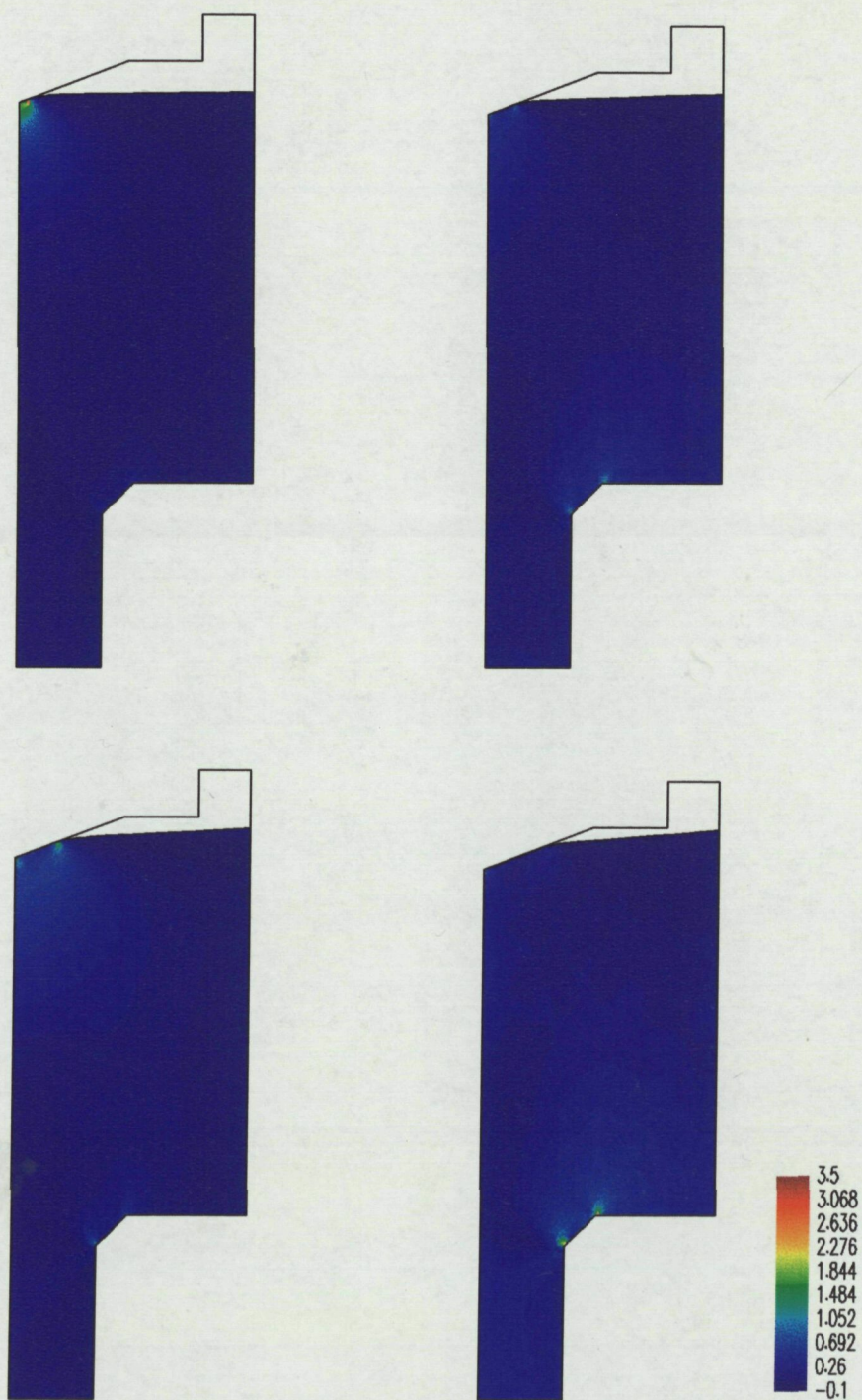


Figura 6.34: Distribución del término desviador $q = \sqrt{3}J_2$ para distintos instantes de la etapa de transferencia.

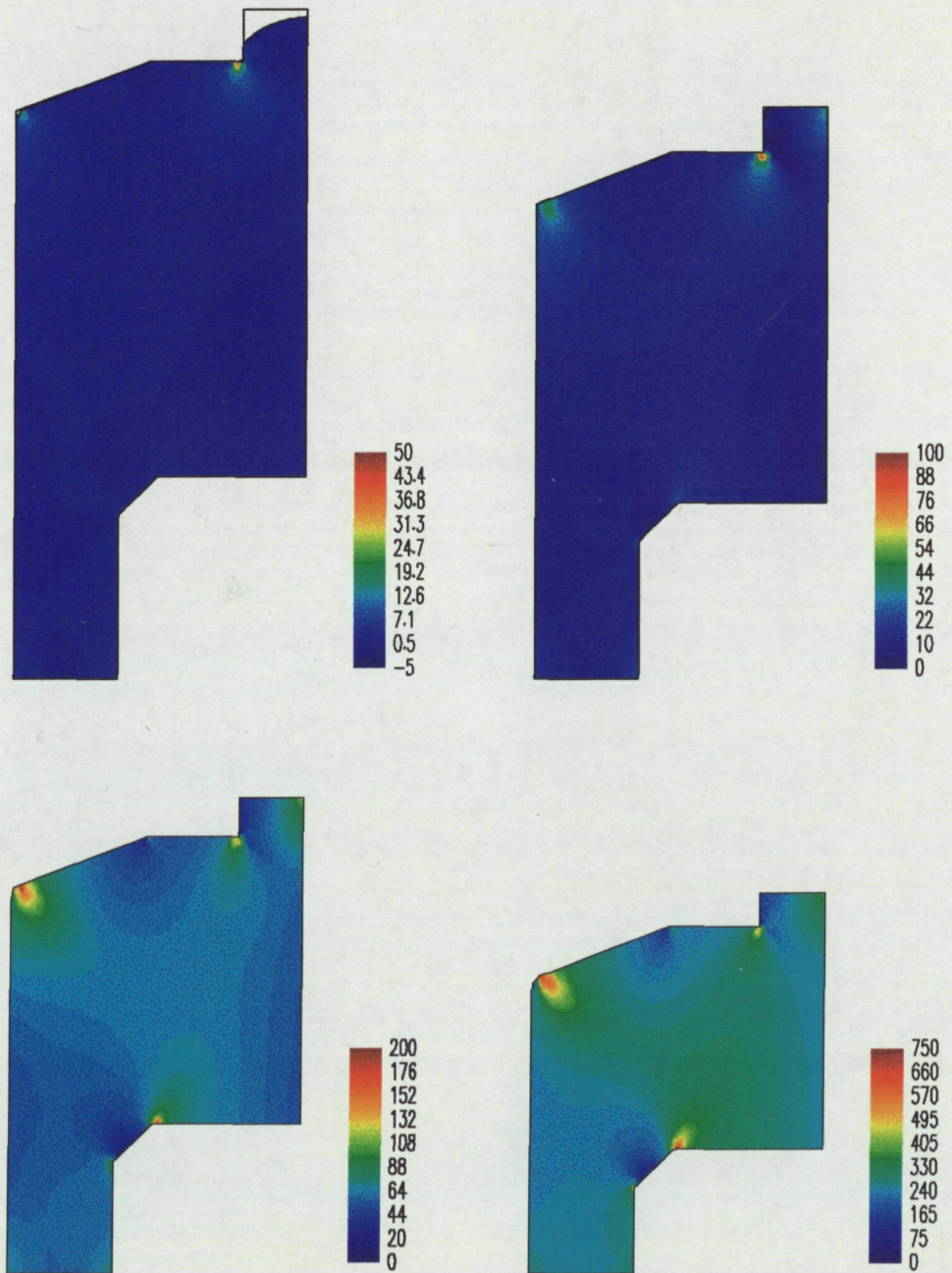


Figura 6.35: Distribución del término desviador $q = \sqrt{3}J_2$ en distintos instantes de la etapa de prensado para una secuencia que parte de una cámara inicial parcialmente llena.

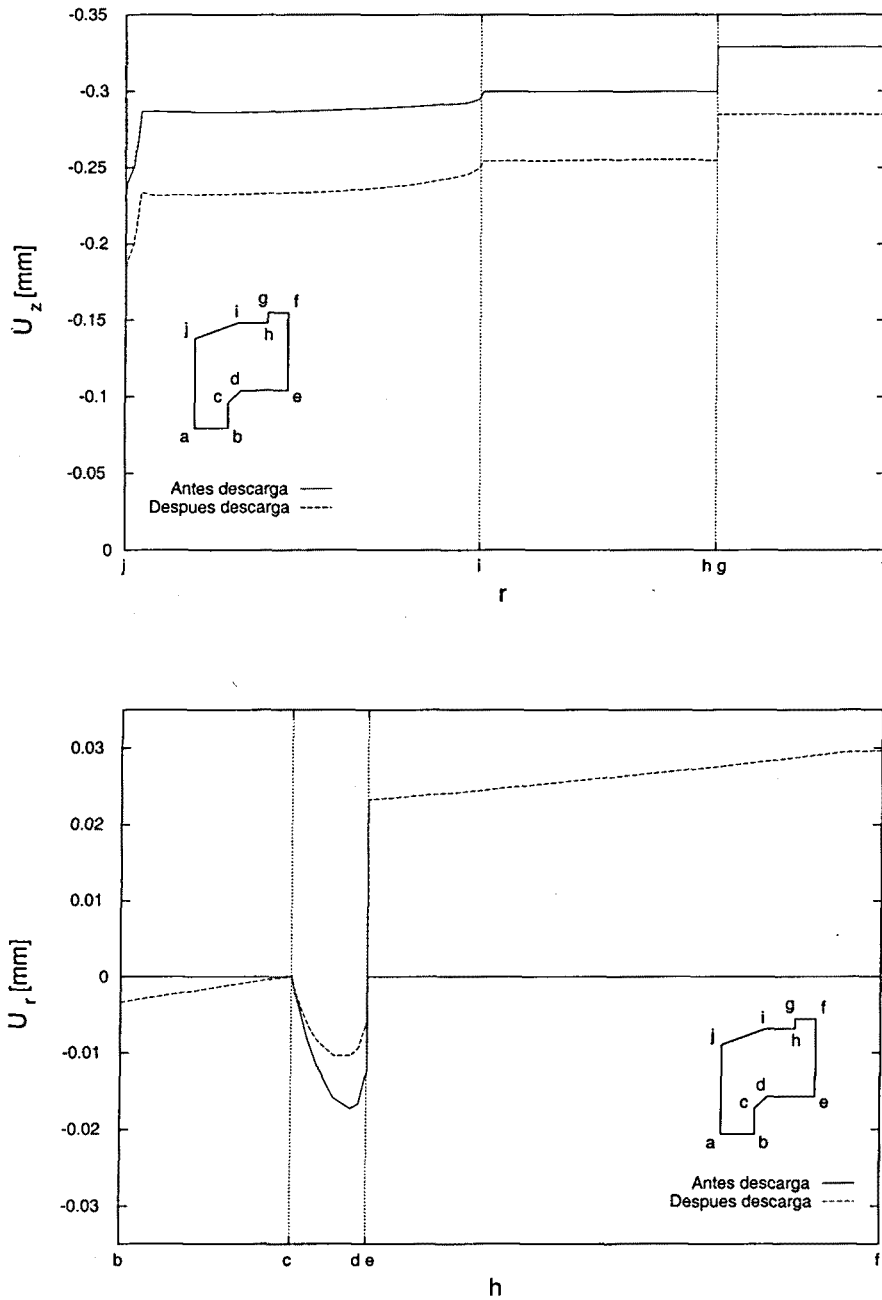


Figura 6.36: Recuperación elástica (Spring-back) de la pieza obtenida a partir de la cámara inicial parcialmente llena.

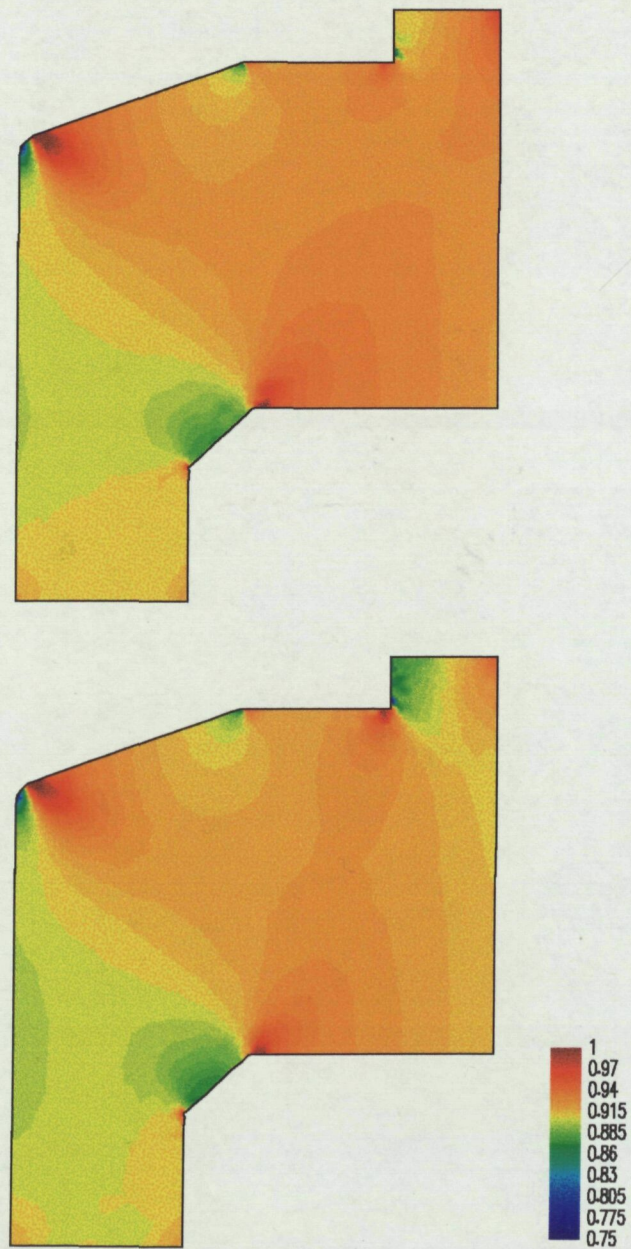


Figura 6.37: Distribución final de densidades relativas η obtenidas con una cámara inicial completamente llena (arriba) y una cámara inicial parcialmente llena (abajo).

Capítulo 7

Conclusiones y líneas futuras.

7.1 Conclusiones.

En esta tesis se ha desarrollado un modelo constitutivo destinado al estudio numérico de procesos de compactación haciendo especial énfasis en la fase de transferencia y transporte de cámaras. Básicamente las principales líneas de actuación han sido: el estudio del proceso de compactación con una perspectiva más amplia, al considerar adicionalmente las etapas de transferencia y transporte de cámaras; y la proposición de un modelo constitutivo más realista y apropiado. Los principales resultados obtenidos pueden ser resumidos en los siguientes puntos:

1. El modelo constitutivo presentado en este trabajo es capaz de describir la fase de transferencia/transporte de cámaras y de prensado de forma simultánea. Este modelo constituye una generalización del modelo propuesto en trabajos precedentes destinados al estudio de la fase de prensado [15][83], conservando con ello las principales características logradas durante la simulación de esta fase. No obstante, ha sido ampliado para tener en cuenta fenómenos característicos de la fase de transferencia/transporte de cámaras como el comportamiento del polvo a tracción, la dilatancia, así como la fricción interna entre partículas que caracterizan la fluidez de las mismas. Con ello, inevitablemente se ha incrementado el número de parámetros necesarios para la definición del modelo aunque la complejidad añadida es mínima, siendo sobradamente recompensada por los resultados proporcionados. De esta manera, el modelo permite mantener un equilibrio entre simplicidad y eficiencia.

El modelo propuesto es apropiado para predecir el desplazamiento, las densidades y las tensiones tanto en la fase de transferencia/transporte de cámaras como en la fase de prensado.

2. Teniendo en cuenta la finalidad del transporte de cámaras y la regla de flujo considerada se ha propuesto el empleo de una formulación mixta. Sin embargo, el uso de tal formulación se ha mostrado innecesaria. En realidad, el material tiene una compresibilidad tan elevada a bajas densidades que durante el transporte de cámaras es prácticamente imposible impedir la compactación del polvo, haciendo injustificado el empleo de una formulación específica para materiales incompresibles.

Por otro lado, en el capítulo 3 se mostró que cuando el material está altamente consolidado, el incremento de deformaciones plásticas sólo tiene componente desviadora. Sin embargo, en este caso se tiende a una superficie de fluencia no acotada que permite la compresión elástica del material, proporcionando una compresibilidad lo suficientemente grande como para eludir la necesidad de emplear la formulación mixta.

En el modelo propuesto, la formulación mixta se ha mostrado innecesaria en la fase de transferencia/transporte de cámaras y durante toda la fase de prensado. En estas circunstancias es preferible el empleo de un elemento convencional como el elemento triangular lineal en detrimento del elemento mixto P2Q1B. El menor tiempo de cómputo necesario y la robustez son los principales argumentos que justifican esta elección. Por otro lado, el empleo de elementos lineales implica utilizar un mayor número de elementos para mantener la precisión de la malla. Sin embargo, la frontera se discretiza de una forma más precisa al ser utilizados un número mayor de elementos, mejorando la respuesta del modelo numérico sobre todo en geometrías complejas.

3. Los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran que prescindir de las etapas de transferencia/transporte de cámaras en muchos casos proporciona una secuencia de prensado alejada de la secuencia óptima, llegando incluso a ser inviable.

La consideración de la fase de transferencia/transporte de cámaras implica una mejora en las hipótesis efectuadas sobre las condiciones iniciales. En particular, la simulación exclusiva de la fase de prensado implica admitir una cámara inicial de compactación completamente llena con una distribución de densidades uniforme. Sin embargo, la consideración de etapas adicionales previas al prensado traslada estas conjeturas al inicio de las fases de transferencia/transporte de cámaras, tendiendo a reproducir el proceso de una forma más realista.

Básicamente, la consideración de las etapas previas al prensado tiene dos ampliaciones: una distribución variable de densidades al inicio del prensado y una imposibilidad de llenar la cámara que es considerada cámara inicial de prensado. Esta última tiene una incidencia notable en la elección del movimiento

de los punzones, siendo la principal responsable de las discrepancias surgidas entre considerar o no las etapas previas al prensado.

4. El empleo de una formulación lagrangiana implica que durante la simulación del proceso de compactación se generen distorsiones considerables, sobre todo en la fase de transferencia/transporte de cámaras. Las distorsiones tienen su origen en la evolución de la cámara de compactación, en el transporte de material de unas zonas a otras y en la fricción con las paredes.

Los problemas motivados por la distorsión son inevitables durante la transferencia/transporte de cámaras, haciéndose imprescindible el uso de una estrategia automática de remallado. En general, la necesidad de remallar se hace menos patente durante la fase de prensado, aunque las regiones esbeltas y el distanciamiento de la secuencia de compactación óptima impiden eludir esta estrategia.

Por otro lado, se ha observado que los elementos lineales son más sensibles a la distorsión causada por la fricción que los elementos mixtos, requiriendo una frecuencia mayor de remallados.

5. El modelo de fricción dinámica no describe satisfactoriamente el rozamiento entre el polvo y las paredes del molde en las zonas con velocidad muy pequeña. Esto es debido a la incorporación de la velocidad en el modelo, tendiendo a anular el efecto del coeficiente de fricción en el momento que el movimiento tiende a detenerse cuando experimentalmente se ha observado la existencia de un valor umbral.
6. El estado tensional observado durante la transferencia/transporte de cámaras es prácticamente despreciable en comparación con el estado tensional generado durante la fase de prensado, dificultando la calibración del modelo en estas etapas. Ello implica rediseñar a bajas densidades los ensayos empleados en la calibración del modelo.

7.2 Líneas futuras.

Durante el desarrollo de este trabajo han surgido propuestas que merecen ser estudiadas, pudiendo generar nuevas líneas de investigación que permitan mejorar y generalizar algunos aspectos del modelo propuesto.

- Un primer objetivo estaría encaminado a la reducción del tiempo de cómputo necesario para evaluar el tensor constitutivo tangente. Esto podría conseguirse sustituyendo los numerosos cálculos analíticos por la evaluación numérica del

tensor. Se propone estudiar y desarrollar un algoritmo capaz de proporcionar la elevada precisión exigida por la fuerte no linealidad del problema, y a ser posible, preservar la convergencia cuadrática. En una segunda etapa, este estudio podría ser ampliado para considerar el cálculo numérico de la parte material y geométrica correspondientes a la matriz tangente.

- Desarrollar y diseñar una campaña de ensayos experimentales apropiados para la evaluación de las propiedades del pulvimaterial a bajas densidades con la finalidad de calibrar el modelo constitutivo en esta zona. En este sentido, el objetivo se centraría en determinar la evolución de la cohesión y la fricción interna en función de la densidad.
- Por otro lado, los fenómenos que caracterizan el comportamiento del polvo en las primeras etapas de la compactación difieren de los observados en las etapas intermedias o finales, haciendo difícilmente extrapolable el comportamiento del material. Desde este punto de vista, conviene estudiar numéricamente la sensibilidad de la respuesta suministrada por el modelo a la extrapolación de la calibración, la cual es efectuada en la fase de prensado.
- Estudiar y valorar la posibilidad de introducir nuevas variables de endurecimiento independientes de la densidad. Bajo esta perspectiva, una posibilidad es eliminar la dependencia de la cohesión respecto a la densidad, cuestionada por algunos autores.
- Desarrollar un modelo de fricción apropiado que considere la fricción estática cuando no exista movimiento relativo entre el polvo y las paredes del molde.
- Efectuar mejoras en el modelo constitutivo a fin de tener en cuenta la anisotropía generada durante la compactación uniaxial y considerar la evolución de los parámetros elásticos durante el proceso de compactación. También se debe considerar la posibilidad de aplicar el modelo al estudio de materiales cerámicos.
- Extender el modelo numérico al caso 3D. Esta extensión obliga a reformular de nuevo el problema de contacto y fricción. Por otro lado, se incrementa el coste de cómputo y de almacenamiento, haciéndose necesario optimizar y desarrollar nuevos algoritmos de cálculo.
- El modelo considera las etapas de transferencia/transporte de cámaras y prensado, ambas correspondientes al proceso de compactación en frío. Una extensión interesante destinada a la simulación de todo el proceso de fabricación es considerar el sinterizado. Otra ampliación posible es considerar el problema térmico para simular procesos de compactación en caliente.

Bibliografía

- [1] Abouaf M. *Modélisation de la compaction de poudres métalliques frittées. Approche par la mécanique des milieux continus*. L'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1985. These.
- [2] Akisaya A.R., Cocks A.C.F. and Fleck N.A. The role of contact-contact interaction in the densification of powders. *Powder Metallurgy World Congress*, pages 757–760, 1994. Paris.
- [3] Alievsky, Kamenin, Kadushnikov and Alievsky. Geometrical modeling of sphere-polyhedrons close packings. *International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes*, pages 371–373, 1997. Grenoble.
- [4] Aryapour G. and Stutz P. Constitutive equation for metal powder compaction. *Powder Metallurgy World Congress and Exhibition*, 2:63–68, 1998. Granada.
- [5] Bagaviev A., Chikanova N. and Alexandrov S. Application of hill's method to the analysis of powder compaction in closed dies. *Powder Metallurgy World Congress and Exhibition*, 2:39–44, 1998. Granada.
- [6] Bandstra J.P., Otto w.L. and Massa T.R. Finite element simulation of cold die compaction leading to sintered part dimension control. *Powder Metallurgy Conferency and Exhibition*, pages 181–196, 1990.
- [7] Barata Marques M.J.M and Martins P.A.F. Finite-element simulation of powder-metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 28:345–363, 1991.
- [8] Bathe K.J. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice-Hall, 1982.
- [9] Bellet M. and Fourment L. A three field formulation for the finite element analysis of compressible viscoplasticity. application to metal powder hot compaction. *Computational Plasticity*, pages 1270–1275, 1997. Barcelona.

- [10] Bolarín A.M. *Efecto de variables pulvimetalúrgicas en el proceso de compactación de polvos metálicos base hierro*. 1999. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona.
- [11] Bouaziz O., Dellis C. and Stutz P. Creation of material data file for modelling hiping of an austenitic stainless steel. *International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes*, pages 67–75, 1997. Grenoble.
- [12] Brekelmans W.A.M., Janssen J.D. and Van de Ven A.A.F. An eulerian approach for die compaction processes. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 31:509–524, 1991.
- [13] Brown S. and Abou-Chedid G. Yield behavior of metal powder assemblages. *J. Mech. Phys. Solids*, 42(3):383–399, 1994.
- [14] Bugada G. Estimación y corrección del error en el análisis estructural por el mef. Technical Report 9, CIMNE, 1991. Monografía.
- [15] Cante J.C. *Simulación Numérica de Procesos de Compactación de Pulvimateriales. Aplicación de Técnicas de Cálculo Paralelo*. 1995. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [16] Cante J.C., Bolarín A., Oliver J. and Bas A. Metodología de calibración de un modelo numérico de simulación del proceso de compactación de polvos metálicos. *XIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, pages 44–49, 1998. Terrassa.
- [17] Cante J.C., Oliver J. y Hernández R. Simulación numérica de las etapas de transferencia y prensado del proceso de compactación de pulvimateriales. *IV Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, 1999. Sevilla.
- [18] Cante J.C., Oliver J. y Oller S. Simulación numérica de procesos de compactación de pulvimateriales. parte 1: Modelo constitutivo, de contacto y fricción. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 14(1):67–99, 1998.
- [19] Cante J.C., Oliver J. y Oller S. Simulación numérica de procesos de compactación de pulvimateriales. parte 2: Validación y aplicaciones industriales. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 14(1):101–116, 1998.
- [20] Cescotto S. and Wu Z.D. A variable-density mesh generation for planar domains. *Communications in Applied Numerical Methods*, 5:473–481, 1989.

- [21] Cheng J.H. Automatic adaptive remeshing for finite element simulation of forming processes. *International Journal for numerical Methods in Engineering*, 26:1–18, 1988.
- [22] Chenot J.L., Bay F. and Fourment L. Finite element simulation of metal powder forming. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 30:1649–1674, 1990.
- [23] Chtourou H., Gakwaya A. and Guillot M. Assessment of the predictive capabilities of the cap material model for simulating powder compaction problems. *Advances in Powder Metallurgy and Particulate materials*, 2(7):245–255, 1996.
- [24] Cocoz G., Bellet M. Lécot R., Ackermann L. and Haggblad H. Cold compaction of iron powder: experiments and simulation. *Powder Metallurgy World Congress*, 1:709–712, 1994. Paris.
- [25] Coube O. *Modelling and numerical simulation of powder die compaction with consideration of cracking*. 1998. Ph.D. Thesis, University Pierre et Marie Curie.
- [26] Curnier A. A theory of friction. *International Journal of Solids Structures*, 20:637–647, 1984.
- [27] Dellis C., Abondance D., Baccino R., Bernier F. and Moret F. Precad, a computer assisted design and modelling tool for powder precision moulding. *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, 2(7):289–302, 1996.
- [28] Desai C.S. and Siriwardane H.J. *Constitutive laws for engineering materials. With emphasis on geologic materials*. Prentice-Hall, 1984.
- [29] Díez P. and Huerta A. A unified approach to remeshing strategies for finite element h-adaptivity. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 176:215–229, 1999.
- [30] DiMaggio F. and Sandler I. Material model for granular soils. *Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of ASCE97*, (EM3):935–950, 1971.
- [31] Doraivelu S.M., Gegel H.L., Gunasekera J.S., Malas J.C. and Morgan J.T. A new yield function for compressible p/m materials. *International Journal of Mechanical Science*, 26:527–535, 1984.

- [32] Doremus P., Imbault D., Bonnefoy V. and Nicolas G. Simulation of die compaction: the example of a part made with tungsten powder. *Powder Metallurgy World Congress and Exhibition*, 2:177–182, 1998. Granada.
- [33] Dowson G. *Powder metallurgy. The process and its products*. Adam Hilger, 1990.
- [34] Duvaut G. *Mécanique des milieux continus*. MASSON, 1990.
- [35] Dyduch M., Cescotto S. and Habraken A.M. Error estimates and indicators for adaptive analysis of bulk forming. *Computational Plasticity: Fundamentals and Applications*, 2:1355–1367, 1995.
- [36] Dyduch M., Habraken A.M. and Cescotto S. Automatic adaptive remeshing for numerical simulations of metalforming. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 101:283–298, 1992.
- [37] Erns E. and Barnekow D. Pressure, friction and density during axial powder compaction. *Powder Metallurgy World Congress*, pages 673–676, 1994. Paris.
- [38] Gethin D.T., Lewis R.W. and Ransing R.S. Compaction of powder via a deformable discrete element approach. *Powder Metallurgy World Congress and Exhibition*, 2:45–50, 1998. Granada.
- [39] Gethin D.T., Lewis R.W., Tran D.V. and Ashoka J.G. Finite element simulation in metal powder die compaction. *Powder Metallurgy World Congress*, 2:11–27, 1992.
- [40] Goetzl C.G. *Treatise on powder metallurgy. Technology of metal powders and their products.*, volume 1. Interscience publishers, 1949.
- [41] Green A.E. and Naghdi P.M. Some remarks on elastic-plastic deformation at finite strains. *International Journal of Engineering Sciences*, 9:1219–1229, 1971.
- [42] Green R.J. A plasticity theory for porous solids. *International Journal of Mechanical Science*, 14:215–224, 1972.
- [43] Gurtin M.E. *An Introduction to Continuum Mechanics*. Academic Press Inc., 1981.
- [44] Habraken A.M. and Cescotto S. An automatic remeshing technique for finite element simulation of forming processes. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 30:1503–1525, 1990.

-
- [45] Häggblad H.A. Constitutive model for powder materials. *Powder Technology*, 67:127–136, 1991.
- [46] Hausner H.H. *Handbook of powder metallurgy*. Chemical Publishing, 1973.
- [47] Huerta A., Díez P. and Rodríguez-Ferran A. Adaptivity and error estimation. *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications*, pages 63–74, 1998. Netherlands.
- [48] Hughes T.J.R. *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. Prentice-Hall, 1987.
- [49] Hwang B.B. and Kobayashi S. Application of finite element method to powdered metal compaction process. *Int. J. Mech. Tools and Man.*, 31(1):123–137, 1991.
- [50] Iankov R. Numerical simulation of powder forming technological processes. Technical report, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 1996.
- [51] Itoh T. and Wanibe Y. Random packing simulation of spheres and practical application for real powders. *International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes*, pages 169–178, 1997. Grenoble.
- [52] Jinka A.G.K., Bellet M. and Fourment L. A new three-dimensional finite element model for the simulation of powder forging processes: application to hot forming of p/m connecting rod. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 40:3955–3978, 1997.
- [53] Khoei A.R. and Lewis R.W. Modelling of powder compaction processes via the displacement formulation and adaptive analysis. *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications*, pages 385–390, 1998. Netherlands.
- [54] Khoei A.R. and Lewis R.W. Numerical simulation of elasto-plastic analysis in metal powder forming using adaptive methods. *Computational Mechanics*, 1998.
- [55] Khoei A.R. and Lewis R.W. Adaptive finite element remeshing in a large deformation analysis of metal powder forming. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 45:801–820, 1999.

- [56] Kim K.T. and Jeon Y.C. Densification behavior of 316l stainless steel powder under high temperature. *International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes*, pages 77–86, 1997. Grenoble.
- [57] Kleiber M. Kinematics of deformation processes in material subjected to finite elastic-plastic strains. *International Journal of Engineering Science*, 13:155–166, 1975.
- [58] Köller R. and Massinger J. Finite-element simulation of warm compaction process. *Powder Metallurgy World Congress and Exhibition*, 2:109–113, 1998. Granada.
- [59] Kotera H., Kitahara H. and Shima S. Particle dynamics simulation for behavior of elliptical particles. *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, 2(7):101–115, 1996.
- [60] Krauss T.M., Petrus G.J. and Ferguson B.L. Die compaction process design part 2: Fem simulation. *Powder Metallurgy Conferency and Exhibition*, 1:111–122, 1991.
- [61] Krishnaswami S. and Trasorras J.R.L. Modelling the compaction of metallic powders with ductile particles. *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications*, pages 853–858, 1995. New York.
- [62] Kröner E. *Arch Ration. Mech. Anal.*, volume 4. 1960.
- [63] Kuhn H.A. and Downey C.L. Deformation characteristics and plasticity theory of sintered powder materials. *International Journal of Powder Metallurgy*, 7:15, 1971.
- [64] Kumar R.K. and Ashok S. Modelling of multilevel pm parts during compaction and ejection. *Powder Metallurgy World Congress and Exhibition*, 2:57–62, 1998. Granada.
- [65] Lee E.H. and Liu D.T. Finite strain elastic-plastic theory particularly for plane wave analysis. *Journal of Applied Physics*, 38:19, 1967.
- [66] Lewis R.W. and Khoei A.R. A plasticity model for metal powder forming processes. Submitted to: *International Journal of Plasticity*.
- [67] Li L.-Y. and Bettess P. Notes on mesh optimal criteria in adaptive finite element computations. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 11:911–915, 1995.

- [68] Li L.-Y., Bettess P., Bull J.W., Bond T. and Applegarth I. Theoretical formulations for adaptive finite element computations. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 11:857–868, 1995.
- [69] Lian J. and Shima S. Powder assembly simulation by particle dynamics method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37:763–775, 1994.
- [70] Lippmann H., Mannl V., Bontcheva N., Iankov R. and Beer O. Numerical simulation of density distribution during compaction of iron powders. *Archive of Applied Mechanics*, 67:191–197, 1997.
- [71] Lubliner L. *Plasticity Theory*. Macmillan Publishing Company, 1990.
- [72] Mandel J. *Plasticité Classique et Viscoplasticité*. (CISM, Udine, 1971) Springer-Verlag, Vienna, 1972.
- [73] Marais P.G. and Mitchell G.P. A material model for powder compaction. *Computational plasticity*, 2:1399–1408, 1997.
- [74] Marsden J.E. and Hughes T.J.R. *Mathematical Foundations of Elasticity*. Prentice-Hall Englewood Cliffs, 1983.
- [75] Mosbah P. and Bouvard D. Finite element simulation of die compaction and ejection of iron powder. *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, 2(7):23–37, 1996.
- [76] Mosbah P., Kojima J., Shima S. and Kotera H. Influence of the third stress invariant on iron powder behavior during compaction. *International Workshop Modelling of Metal Powder Forming Processes*, pages 19–27, 1997. Grenoble.
- [77] Oñate E. *Calculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos. Análisis Estático Lineal*. CIMNE, 1992.
- [78] Oñate E. and Bugeda G. A study of mesh optimality criteria in adaptive finite element analysis. *Engineering Computations*, 10:307–321, 1993.
- [79] Oldenburg M., Häggblad H-Å, and Wikman B. A friction model for iron powder pressing based on a tribological approach. *Advances in Powder Metallurgy and Particulate materials*, 2(7):329–340, 1996.
- [80] Oldenburg M., Wikman B. and Häggblad H-A. Study of metal powder component pressing with use of numerical simulations. *Powder Metallurgy World Congress and Exhibition*, 2:51–56, 1998. Granada.

- [81] Oliver J., Cante J.C., Bas J.A. and Bolarín A. A model for numerical simulation of powder compaction processes. *Powder Metallurgy World Congress and Exhibition*, 1998. Granada.
- [82] Oliver J., Cante J.C. y Medina J.F. Validación y calibración del simulador numérico de procesos de compactación de pulvimateriales powcom. Technical report, ETSECCPB y CIMNE, 1998. Informe Técnico.
- [83] Olivier J., Oller S. and Cante J.C. A plasticity model for simulation of industrial powder compaction processes. *International Journal Solids Structures*, 33:3161–3178, 1996.
- [84] Oller S. *Un Modelo de "Daño Continuo" para Materiales Friccionales*. 1988. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [85] Owen D.R.J., Perić D., Crook A.J.L., Souza E.A., Yu J. and Dutko M. Advanced computational strategies for 3-d large scale metal forming simulations. *Fifth International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes*, 1995. New York.
- [86] Park J.K. *Die compaction of powder: constitutive modelling and finite element calculations*. 1985. Ph.D. Thesis, North Carolina State University.
- [87] Pavier E. *Caracterisation du comportement d'une poudre de fer pour le procede de compression en matrice*. L'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1998. These.
- [88] Pavier E. and Dorémus P. Comparison between constitutive equations modelling the compaction of iron powder and experimental data obtained with triaxial tests. *International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes*, pages 1–8, 1997. Grenoble.
- [89] Pavier E. and Dorémus P. Friction behaviour of an iron powder investigated with two different apparatus. *International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes*, pages 335–344, 1997. Grenoble.
- [90] Perić D., Hochard Ch., Dutko M. and Owen D.R.J. Transfer operators for evolvin meshes in small strain elasto-plasticity. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 137:331–344, 1996.
- [91] Ransing R.S., Cameron I., Lavery N.P., Kohei A., Lewis R.W. and Gethin D.T. Powder compaction modeling and material characterisation. *International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes*, pages 189–201, 1997. Grenoble.

- [92] Riera M.D., Miralles A., Cugat G. and Prado J.M. Modelización del proceso de compactación en frío de polvos metálicos. *II Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, pages 1546–1555, 1993.
- [93] Sanchez L., Ouedraogo E., Stutz P. and Dellis C. Numerical simulation of metal powder forming by hot isostatic pressing. *International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes*, pages 295–304, 1997. Grenoble.
- [94] Sanchez L., Ouedraogo F., Stutz P. and Dellis C. Integration of a new viscoplastic constitutive equation in a finite element code. *Powder Metallurgy World Congress and Exhibition*, 2:69–74, 1998. Granada.
- [95] Sava M. Constitutive equations for cold pressed iron powder-formulation and experimental identification. *International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes*, pages 159–167, 1997. Grenoble.
- [96] Shima S. and Kotera H. Study of constitutive behaviour of powders for application to simulation of compaction processes. *Powder Metallurgy World Congress and Exhibition*, 2:240–245, 1998. Granada.
- [97] Shima S. and Oyane M. Plasticity theory for porous materials. *International Journal of Mechannical science*, 18:285–291, 1976.
- [98] Shima S., Kotera H., Mosbah P. and Kojima J. A study of mechanical behaviour of iron powder by three and two dimensional compaction. *International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes*, pages 9–17, 1997. Grenoble.
- [99] Sidoroff F.M. Quelques réflexions sur le principe d'indifférence matérielle pour un milieu ayant un état relâche. *Comptes Rendus Acad. Sciences of Paris*, (271):1026–1029, 1970.
- [100] Simo J.C. *Topics on the numerical Analysis and simulation of plasticity*. HANDBOOK OF NUMERICAL ANALYSIS, VOL. III. Elsevier Science Publishers B.V.
- [101] Simo J.C. and Hughes T.J.R. *Computational Inelasticity*. Springer-Verlag, 1998.
- [102] Simo J.C. and Laursen T.A. An augmented lagrangian treatment of contact problems involving friction. *Computers and Structures*, 42:97–116, 1992.

- [103] Simo J.C. and Ortiz M. A unified approach to finite deformation elastoplastic analysis based on the use of hyperelastic constitutive equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 49:221–245, 1985.
- [104] Simo J.C. and Taylor R.L. Quasi-incompressible finite elasticity in principal stretches continuum basis and numerical algorithms. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 85:273–310, 1991.
- [105] Simo J.C., Kennedy J.G. and Govindjee S. Non-smooth multisurface plasticity and viscoplasticity. loading/unloading conditions and numerical algorithms. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 26:2161–2185, 1988.
- [106] Simo J.C., Taylor R.L. and Pister K.S. Variational and projection methods for volume constraint in finite deformation elasto-plasticity. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 51:177–208, 1985.
- [107] Solimannezhad N. *On Friction in Metal Powder Compaction Process*. 1999. Licentiate Thesis, Luleå University of technology.
- [108] Tamura S., Mitsuno T. and Aizawa T. Powder pressing design analysis by the granular model simulation. *Powder Metallurgy World Congress*, pages 753–756, 1994. Paris.
- [109] Toussaint F., Doremus P. and Bouvard D. Modelling of cold compaction. Technical report, BRITE EURAM IV PROJECT. BE-97-4940.
- [110] Trasorras J., Krauss T.M. and Ferguson B.L. Modeling of powder compaction using the finite element method. *Powder Metallurgy Conferency and Exhibition*, 1:85–104, 1989.
- [111] Trusdell C. *A First Course in Rational Continuum Mechanics.*, volume I. Academic Press, 1977.
- [112] Tsumori F., Aizawa T. and Kihara J. Multi-level fem modeling for hip analysis. *International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes*, pages 123–132, 1997. Grenoble.
- [113] Turner C.D. A micromechanical model of multiaxial powder densification. *Powder Metallurgy World Congress*, pages 713–716, 1994. Paris.
- [114] Watson T.J. and Wert J.A. On the development of constitutive relations for metallic powders. *Metall. Trans.*, 24(A):2071–2081, 1993.

-
- [115] Weber G.G. and Brown S.B. Simulation of the compaction of powder components. Technical report, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1990.
- [116] Wikman B., Häggblad H.-Å. and Oldenburg M. Modelling of powder-wall friction for simulation of iron powder pressing. *International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes*, pages 149–157, 1997. Grenoble.
- [117] Wriggers P. Finite element algorithms for contact problems. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2, 4:1–49, 1995.
- [118] Zavaliangos A. Error analysis in modeling of hot isostatic pressing. *International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes*, pages 287–291, 1997. Grenoble.
- [119] Zienkiewicz O.C. and Taylor R.L. *El Método de los Elementos Finitos: Formulación Básica y problemas lineales*. Mac-Graw Hill, 1994.
- [120] Zienkiewicz O.C. and Zhu J.Z. A simple error estimator and adaptive procedure for practical engineering analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering.*, 24:337–357, 1987.
- [121] Zienkiewicz O.C. and Zhu J.Z. The superconvergent patch recovery and a posteriori error estimates, part 1: the recovery technique. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 33:1331–1364, 1992.
- [122] Zienkiewicz O.C. and Zhu J.Z. The superconvergent patch recovery and a posteriori error estimates, part 2: error estimates and adaptivity. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 33:1365–1382, 1992.

M M M M M M
1 M M M M M M
M M M M M M