



MODELAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO FORJAMENTO A FRIO DE SINTERIZADOS DE COBRE

LUÍS M. M. ALVES, JORGE M. C. RODRIGUES

Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Mecânica,
Secção de Tecnologia Mecânica
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
e-mail: luisalves@ist.utl.pt

Resumo: Neste artigo analisa-se a mecânica da densificação de sinterizados de cobre em condições de compressão uniaxial e hidrostática, usando quatro critérios de plasticidade - Shima e Oyane, Doraiverlu et al., Lee e Kim e um proposto pelos autores -. Os resultados experimentais são comparados com os teóricos usando a formulação do escoamento plástico para materiais porosos implementada no programa de elementos finitos Iform. As diferenças decorrentes da aplicação dos diferentes critérios de plasticidade considerados são analisadas através da simulação numérica da operação de calibração dum casquilho auto-lubrificante para a indústria automóvel.

1. INTRODUÇÃO

A pulverometalurgia (PM) tem vindo nos últimos anos a revelar-se como um processo de fabrico muito importante. Existem algumas razões que explicam esta tendência, sendo de destacar as seguintes; (i) pode produzir-se massivamente componentes na forma definitiva ou quase definitiva, dispensando operações subsequentes de acabamento, (ii) o desperdício de matéria prima é muito pequeno, estimando-se que em média cerca de 97% do pó inicial seja incorporado no produto final, (iii) as características do processo de fabrico permitem fabricar peças com uma porosidade adaptada à aplicação (por exemplo, filtros ou chumaceiras e engrenagens impregnáveis por lubrificantes), (iv) a generalidade dos materiais que são difíceis de transformar por processos de fabrico convencionais (fundição, forjamento, etc.), são possíveis de trabalhar por PM, sendo mesmo possível criar ligas com composições impossíveis de obter por outros processos e (v) podem obter-se componentes com uma densidade final muito próxima da do metal denso, com excelentes propriedades mecânicas resultantes da sua homogeneidade, isenção dos defeitos típicos dos processos de transformação dos materiais densos ou ainda pelas suas características metalúrgicas, com realce para dimensão do grão que se consegue obter [1].

Em termos gerais, o fabrico por PM contempla quatro etapas básicas; a *mistura dos pós*, destinada a tornar a mistura homogénea, a *compactação*, na qual o pó adquire uma resistência suficiente para poder ser manipulado, passando a pré-forma a designar-se por compacto verde, a *sinterização*, que é um tratamento térmico que se executa sobre o compacto com a finalidade de ligar as partículas metálicas e fornecer resistência à peça e por fim os *operações secundárias de pós-sinterização*, que dependem da aplicação, citando-se como exemplos a densificação, a calibração, o forjamento, a extrusão, a impregnação, a infiltração ou o tratamento térmico e acabamento [2].

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de técnicas numéricas, recorrendo ao método dos elementos finitos, destinadas ao estudo de operações secundárias de pós-sinterização que envolvam processos de deformação plástica, permitindo analisar detalhadamente a mecânica da deformação, avaliar a integridade estrutural dos componentes produzidos, prever a distribuição da densidade nas

peças produzidas e ainda antever as zonas das ferramentas mais solicitadas, e consequentemente, as regiões das matrizes com maior propensão ao desgaste, dando, assim, origem a um conjunto de elementos fundamentais para a optimização do processo de fabrico e do próprio projecto das ferramentas.

O estudo da deformação plástica de materiais sinterizados envolve uma complexidade diferente da dos materiais densos, não só por o volume não se conservar ao longo da deformação e os habituais critérios de plasticidade para materiais densos não poderem ser aplicados, mas também por as condições tribológicas entre o sinterizado e as ferramentas terem características próprias. Neste trabalho começa por se analisar as características das funções limites de elasticidade mais usadas na simulação numérica de sinterizados, em conjugação com os requisitos necessários à respectiva implantação no programa de elementos finitos Iform [3], seguindo-se a apresentação do procedimento experimental desenvolvido para caracterizar os sinterizados de cobre e simultaneamente avaliar o desempenho de cada um dos critérios de plasticidade. Finalmente aplica-se o método de análise descrito ao estudo do fabrico de um casquilho auto-lubrificante para a indústria automóvel, analisando-se as principais diferenças decorrentes do uso dos diferentes critérios de plasticidade.

2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

2.1. Função Limite de Elasticidade

A modelação de processos de deformação plástica de materiais porosos requer uma função limite de elasticidade diferente da de von Mises, uma vez que nestes casos o material não conserva o volume durante a deformação. Para incluir esta característica do processo, Kuhn e Downey [4] e Green [5] propuseram uma lei de escoamento plástico para materiais porosos que depende do segundo invariante do tensor desviador das tensões, J'_2 , e do primeiro invariante do tensor das tensões, J_1 , dada por,

$$A J'_2 + B J_1^2 = \delta Y_0^2 = Y_R^2 \quad (1)$$

em que, A , B e δ são parâmetros que dependem da densidade relativa (R) do sinterizado e Y_0 e Y_R são, respectivamente, a tensão limite de elasticidade do material denso que constitui a matriz do material poroso e a tensão limite de elasticidade do material poroso.

Analizando a forma genérica da superfície de elasticidade associada à função limite de elasticidade dada pela equação (1), verifica-se que se trata de uma superfície fechada que satisfaz as condições de simetria e de convexidade exigidas para o desenvolvimento da teoria da plasticidade. A sua representação no espaço das tensões, fig. 1, revela que tem a forma de um elipsóide com o eixo maior coincidente com o eixo das tensões médias aparentes, σ_m , o qual irá degenerar na superfície cilíndrica de von Mises, quando o material se tornar denso ($R=1$).

Assumindo a forma geral da função limite de elasticidade da equação (1) vários investigadores propuseram critérios de plasticidade, distinguindo-se fundamentalmente pelas funções da densidade relativa que adoptam para os parâmetros A , B e δ , obtidas experimentalmente através de metodologias e considerações específicas. Neste estudo foram considerados os três critérios de plasticidade mais usados em simulação numérica de materiais porosos —Shima e Oyane [6], Doraivelu et al. [7] e Lee e Kim [8]— e um critério recentemente proposto pelos autores [9], que será designado ao longo do texto por *Presente critério*. A tabela 1 apresenta as funções da densidade relativa para os parâmetros A , B e δ de cada um dos critérios atrás referidos.

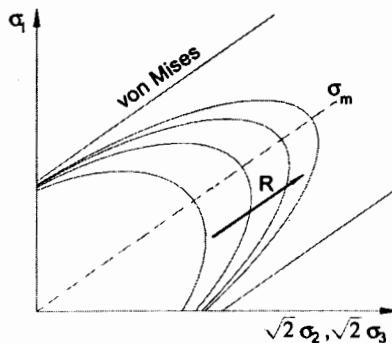


Fig. 1. Representação no espaço das tensões da superfície limite de elasticidade para materiais porosos.

Tabela 1. Constantes, e para os diferentes critérios de plasticidade.

	A	B	δ
Shima e Oyane	$\frac{3}{1+(2.49/3)^2(1-R)^{1.028}}$	$\frac{(2.49/3)^2(1-R)^{1.028}}{1+(2.49/3)^2(1-R)^{1.028}}$	$\frac{R^5}{1+(2.49/3)^2(1-R)^{1.028}}$
Doraivelu <i>et al.</i>	$(2+R^2)$	$(1-R^2)/3$	$(2R^2-1)$
Lee e Kim	$(2+R^2)$	$(1-R^2)/3$	$\left(\frac{R-R_c}{1-R_c}\right)^2$
Presente	$(2+R^D)$	$(1-R^D)/3$	$\frac{0.29 R_0^{3.21} R}{0.29 R_0^{3.21} + (1-R)}$

Numa breve análise sobre os critérios de plasticidade apresentados na tabela 1, verifica-se que todos eles tendem para o de von Mises à medida que a densidade relativa do sinterizado se aproxima da unidade ($R = 1$). Nesta situação limite, $\sigma = 1$ e a energia total aparente de deformação converte-se na energia elástica de distorção, pois $A = 3$ e $B = 0$. Por outro lado, os critérios de Doraivelu e de Lee Kim envolvem o conceito de *densidade crítica de desagregação do sinterizado*, R_c , na determinação do parâmetro δ , o qual estabelece que existe uma densidade crítica do sinterizado para a qual o material se desagrega quando solicitado. Enquanto que no critério de plasticidade de Doraivelu é assumido que o valor da densidade crítica é constante e igual a $R_c = \sqrt{1/2} \cong 0.71$, e cuja substituição na equação genérica proposta por Doraivelu, $\delta = \frac{R^2 - R_c^2}{1 - R_c^2}$, permite obter a sua expressão (ver tabela 1), no caso do critério de Lee e Kim o parâmetro δ depende da determinação experimental do valor da densidade crítica de desagregação, em conformidade com a equação genérica que se apresenta na tabela 1. Por outro lado, o Presente critério distingue-se dos restantes por ser função da densidade relativa inicial (R_0) do material sinterizado, o que se reflecte na funções δ e $D = f(R_0)$, sendo este último o expoente da densidade relativa nos parâmetros A e B . Não obstante, neste trabalho considerou-se o seu valor constante e igual a $D = 2$, à semelhança dos critérios de Doraivelu e de Lee Kim.

Um modo de avaliar as características de cada um dos critérios consiste em tomar dois estados de tensão diferentes —compressão uniaxial e compressão hidrostática—, simples de reproduzir

experimentalmente, para analisar o modo como se processa a densificação do material em cada um deles. Iniciando com a compressão uniaxial, ($\sigma_1 = Y_R$ e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ou $J'_2 = 2/6 Y_R$ e $J_1 = YR$), a substituição destas condições na expressão genérica da função limite de elasticidade, equação (1), obtém-se a seguinte lei de densificação para a compressão uniaxial,

$$\left(\frac{Y_R}{Y_0} \right) = \sqrt{\delta} \quad (2)$$

Na fig.2 representa-se graficamente a densificação para a compressão uniaxial, expressa pela equação (2), para os quatro critérios em análise. Refira-se que no caso do critério de Lee e Kim se adoptou $R_c = 0.5$, em conformidade com os resultados obtidos experimentalmente para o cobre sinterizado, enquanto que para o critério Presente tomaram-se dois valores extremos de densidade relativa inicial, 0.5 e 0.9, para evidenciar o respectivo campo de aplicação.

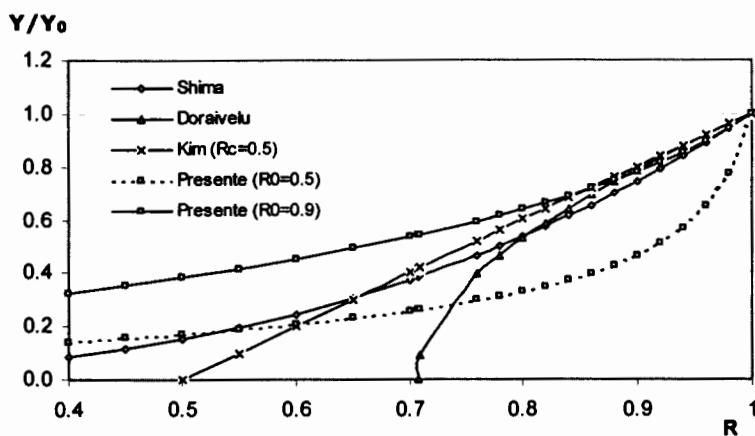


Fig. 2. Densificação na compressão uniaxial segundo os quatro critérios de plasticidade.

Procedendo de modo semelhante para o ensaio de compressão hidrostática, caracterizado por; $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = p$ ou $J'_2 = 0$ e $J_1 = 3p$, em que p é a pressão hidrostática, a lei de densificação que se obtém é a seguinte,

$$\left(\frac{p}{Y_0} \right) = \frac{1}{3\sqrt{B}} \sqrt{\delta} \quad (3)$$

em que Y_0 é a tensão limite de elasticidade do material denso da matriz do poroso e B e δ são os parâmetros experimentais do critério de plasticidade poroso, cuja representação gráfica se faz na fig. 3, para cada um dos critérios de plasticidade.

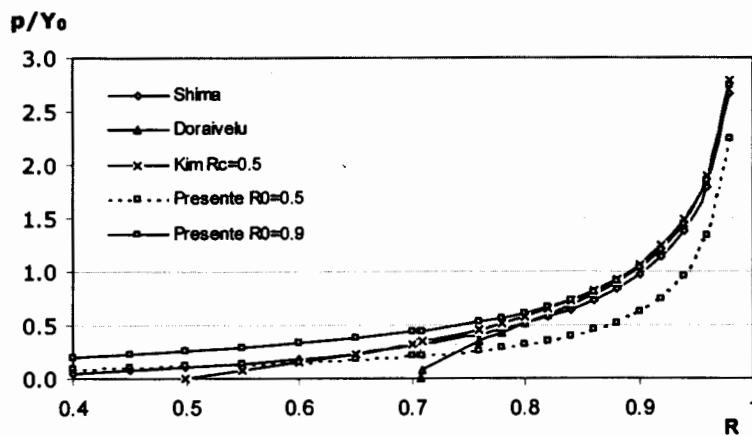


Fig. 3. Densificação na compressão hidrostática segundo os quatro critérios de plasticidade.

Através da observação das leis de densificação apresentadas nas figuras 2 e 3 para os critérios de Shima e Oyane, Doraivelu e Lee e Kim, verifica-se que em termos práticos não existem diferenças assinaláveis para densidades relativas superiores a $R \approx 0.8$.

Torna-se, então, notório que as maiores diferenças na previsão da densificação irão sobrevir nos casos em que a densidade relativa do material poroso for baixa, agravando-se naturalmente nos casos em que a deformação plástica introduzida pelo processo tecnológico for igualmente pequena, como são os casos das operações de calibração. Nesta perspectiva o critério Presente revela-se mais abrangente que os restantes, pois sendo função da densidade inicial (R_0) do material sinterizado apresenta-se mais flexível nas baixas densidades, mantendo as características fundamentais dos restantes para as densidades mais elevadas.

2.2. Fundamentos teóricos da simulação numérica

O trabalho numérico desenvolvido para simular a deformação plástica de materiais porosos consistiu em estender a aplicabilidade do programa de elementos finitos I-Form [3], desenvolvido para estudar processos de enformação plástica na massa, com base na formulação do escoamento plástico, a problemas envolvendo materiais porosos, onde a densidade relativa do material varia com a deformação. O conceito básico que permite fazer esta adaptação é introduzido pelo próprio critério de plasticidade usado para caracterizar o comportamento do material poroso, o qual assume que este material pode ser tratado como contínuo, levando a que as variáveis calculadas durante a deformação plástica do material poroso (tensões, extensões e velocidades de deformação) sejam referidas como aparentes, mas relacionáveis com as do material denso que constitui a matriz do poroso, admitindo que a energia de deformação é a mesma em ambos os casos.

Para formular a teoria rígido-viscoplástica compressível de elementos finitos, considere-se um corpo poroso de volume V num instante genérico da deformação, delimitado pela superfície S , a qual é constituída por três parcelas, $S = S_u + S_F + S_A$, a primeira, S_u , associada às velocidades u_i , onde se aplicam as condições de fronteira essenciais ou impostas e, portanto, $\delta u_i = 0$, a segunda, S_F , onde são introduzidas as condições de fronteira naturais ou não essenciais, definidas pela tensão $F_i = \sigma_{ij}n_j$ e a terceira, S_A , de natureza mista (envolvendo em simultâneo tensões e velocidades), destinada à introdução das condições de fronteira associadas ao atrito que se desenvolve nas interfaces peça-ferramenta. Então, admitindo que neste instante se conhece a distribuição de extensão aparente e da densidade relativa no interior do corpo poroso em deformação, a forma variacional das equações de equilíbrio, para ser discretizada por elementos finitos exprime-se do seguinte modo [3],

$$\delta\phi = \int_V Y_R \delta\dot{\epsilon}_R dV - \int_S F_i \delta u_i dS = 0 \quad (4)$$

em que o primeiro integral do funcional representa a dissipação de energia no interior do corpo poroso em deformação e o segundo integral resume as condições de fronteira. A discretização deste funcional segue o procedimento habitualmente utilizado em elementos finitos, podendo ser consultado em [10].

Por outro lado, admitindo que o material poroso é contínuo, que o encruamento é isotrópico e que a deformação se processa em condições isotérmicas, a teoria infinitesimal da plasticidade para materiais poroso aplicada à função limite de elasticidade genérica adoptada neste trabalho (equação (1)), permite estabelecer as equações constitutivas do domínio plástico,

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\dot{\epsilon}_R}{\bar{\sigma}_R} \left(\frac{A}{2} \sigma'_{ij} + (3 - A) \sigma_m \delta_{ij} \right) \quad (5)$$

em que A é um parâmetro que depende da densidade relativa, $\dot{\epsilon}_R$ é a velocidade de deformação efectiva aparente, $\bar{\sigma}_R$ é a tensão efectiva aparente, σ_m é a tensão média aparente e δ_{ij} o delta de Kronecker.

Sendo a tensão efectiva aparente, $\bar{\sigma}_R$, e a velocidade de deformação efectiva aparente, $\dot{\bar{\epsilon}}_R$, dadas por,

$$\bar{\sigma}_R = \sqrt{(AJ_2 + BJ_1^2)} \quad ; \quad \dot{\bar{\epsilon}}_R = \left[\frac{2}{A} \dot{\epsilon}'_{ij}^2 + \frac{1}{3(3-A)} \dot{\epsilon}_v^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

em que $\dot{\epsilon}_v$ é a velocidade de deformação volumétrica aparente, dada por; $\dot{\epsilon}_v = \dot{R}/R$, sendo \dot{R} a taxa de variação da densidade relativa e R a densidade relativa.

Durante a deformação plástica de um material poroso surgem duas formas de encruamento; uma associada à densificação (geralmente designado por *encruamento geométrico*), integrada na formulação através do parâmetro δ do critério de plasticidade e outra devida à alteração das propriedades mecânicas do material denso da matriz do material poroso, dependente dos valores efectivos da velocidade de deformação e da extensão no material denso, no caso mais geral. Deste modo, para relacionar a extensão do material poroso com a do material denso da sua matriz, considera-se o seguinte balanço da potência de deformação,

$$\dot{w} = \bar{\sigma}_R \dot{\bar{\epsilon}}_R V_R = \bar{\sigma}_0 \dot{\bar{\epsilon}}_0 V_0 = \bar{\sigma}_0 \dot{\bar{\epsilon}}_0 R V_R \quad (7)$$

em que V_0 e V_R são, respectivamente, o volume do material denso e o volume do material poroso. Combinando este resultado com o critério de plasticidade pode determinar-se as relações entre as velocidades de deformação efectiva e a extensão efectiva do material denso e do poroso,

$$\dot{\bar{\epsilon}}_0 = \frac{\sqrt{\delta}}{R} \dot{\bar{\epsilon}}_R \quad ; \quad \bar{\epsilon}_0 = \int_0^t \dot{\bar{\epsilon}}_0 dt = \int_0^t \frac{\sqrt{\delta}}{R} \dot{\bar{\epsilon}}_R dt \quad (8)$$

3. TRABALHO EXPERIMENTAL

O material usado para realizar os ensaios experimentais foi pó de cobre (99,7% Cu), com a seguinte granulometria; 93,56 % < 44 µm e 6,44 % > 44 µm. Os compactos de geometria cilíndrica foram produzidos numa matriz flutuante, com 1 cm² de área projectada, para diferentes densidades iniciais. A sinterização foi realizada em atmosfera de vácuo ($5,5 \times 10^{-1}$ mbar), a uma temperatura de 825°C, durante 30min. O trabalho experimental foi desenvolvido com a finalidade de determinar o parâmetro δ do *Presente* critério, a densidade crítica de desagregação do critério de Lee e Kim ($R_c = 0.5$), a lei de comportamento mecânico do material denso da matriz e, simultaneamente, comparar o desempenho dos critérios de plasticidade implementados no programa de elementos finitos *Iforn*. Para o efeito foram realizados ensaios de compressão uniaxial sem atrito e ensaios de compressão hidrostática.

Para os ensaios de compressão uniaxial o procedimento experimental consistiu em efectuar ensaios incrementais, lubrificados com folha de teflon, registando-se em cada paragem a força de compressão, o deslocamento do prato compressor, as dimensões do provete e respectiva densidade. A medida rigorosa da densidade foi feita segundo a técnica da submersão, usando uma balança com precisão de 0.0001 g, e tendo o cuidado de impermeabilizar os provetes com verniz, com uma densidade previamente determinada.

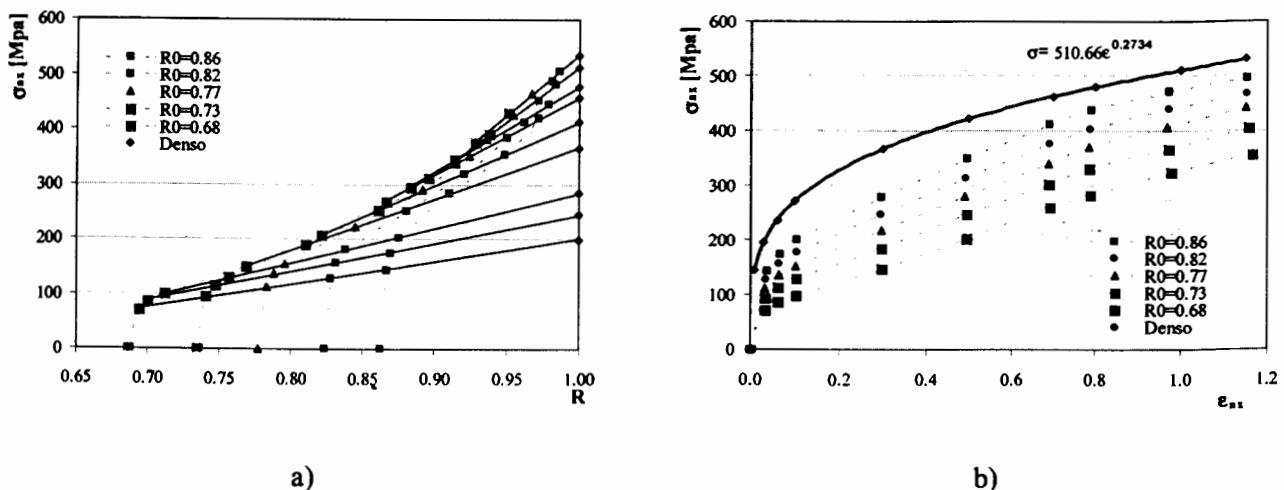


Fig. 4. Ensaios de compressão lubrificados. a) Tensão axial (σ_{ax}) versus densidade relativa (R) e b) tensão axial (σ_{ax}) versus extensão axial (ϵ_{ax}).

A fig. 4 a) mostra a evolução da tensão axial com a densidade relativa no ensaio de compressão uniaxial sem atrito, para diferentes valores da densidade relativa inicial. Um dos problemas que se põe com maior acuidade na modelação da deformação plástica de materiais porosos consiste na determinação da lei de escoamento plástico do material denso que constitui a matriz do poroso. Na generalidade dos casos não é possível encontrar um material denso com a mesma composição ou com as mesmas características metalúrgicas, levando a que as técnicas directas convencionais usadas para obter a curva tensão-extensão não possam ser aplicadas. Fazendo uso de técnicas indirectas, constata-se experimentalmente que a tensão axial aparente (σ_{ax}) varia linearmente com a densidade inicial (R_0) para deformações em que a extensão axial aparente (ϵ_{ax}) é igual, conforme se pode ver no gráfico da fig. 4 a). Então, extrapolando as respectivas rectas para uma densidade unitária, obtém-se pontos da curva tensão-extensão do material denso, já que neste caso a extensão axial coincide com a extensão efectiva do denso. Este procedimento encontra-se resumido no gráfico da fig. 4 b), onde se apresenta a evolução da tensão axial com a extensão axial aparente para diferentes densidades. Assim, ajustando a equação empírica de Ludwik-Hollomon aos pontos extrapolados para o material denso da matriz obteve-se a seguinte relação tensão-extensão: $\bar{\sigma} = 510.66\bar{\epsilon}^{0.273}$. Introduzidos os parâmetros que caracterizam cada um dos diferentes critérios de plasticidade no programa de elementos finitos *Iform* foi possível comparar os resultados teóricos com os experimentais, para os ensaios de compressão uniaxial e hidrostático de compressão.

Para a compressão uniaxial, a fig. 5 mostra a evolução da tensão axial e da densidade relativa com a extensão axial, respectivamente para os critérios de Shima e Oyane, Doraivelu, Lee e Kim e Presente critério. Da sua análise pode constatar-se que a previsão da densificação é muito semelhante para todos os critérios de plasticidade e a correlação com os dados experimentais muito boa. No entanto, os critérios de Shima e Oyane, Doraivelu e Lee e Kim apresentam desvios significativos relativamente à evolução da tensão axial com a extensão axial para valores elevados da extensão axial, agravando-se no caso das densidades relativas iniciais serem relativamente baixas. Refira-se, mesmo, que o critério de Doraivelu não é aplicável para densidades relativas iguais ou inferiores a $R_c \approx 0.71$. Em oposição, o Presente critério revela-se suficientemente flexível para se adaptar aos pontos experimentais, mesmo quando as densidades relativas iniciais são baixas o que, de facto, foi conseguido fazendo o parâmetro δ , ou melhor, o encruamento geométrico ser função da densidade relativa inicial do sinterizado.

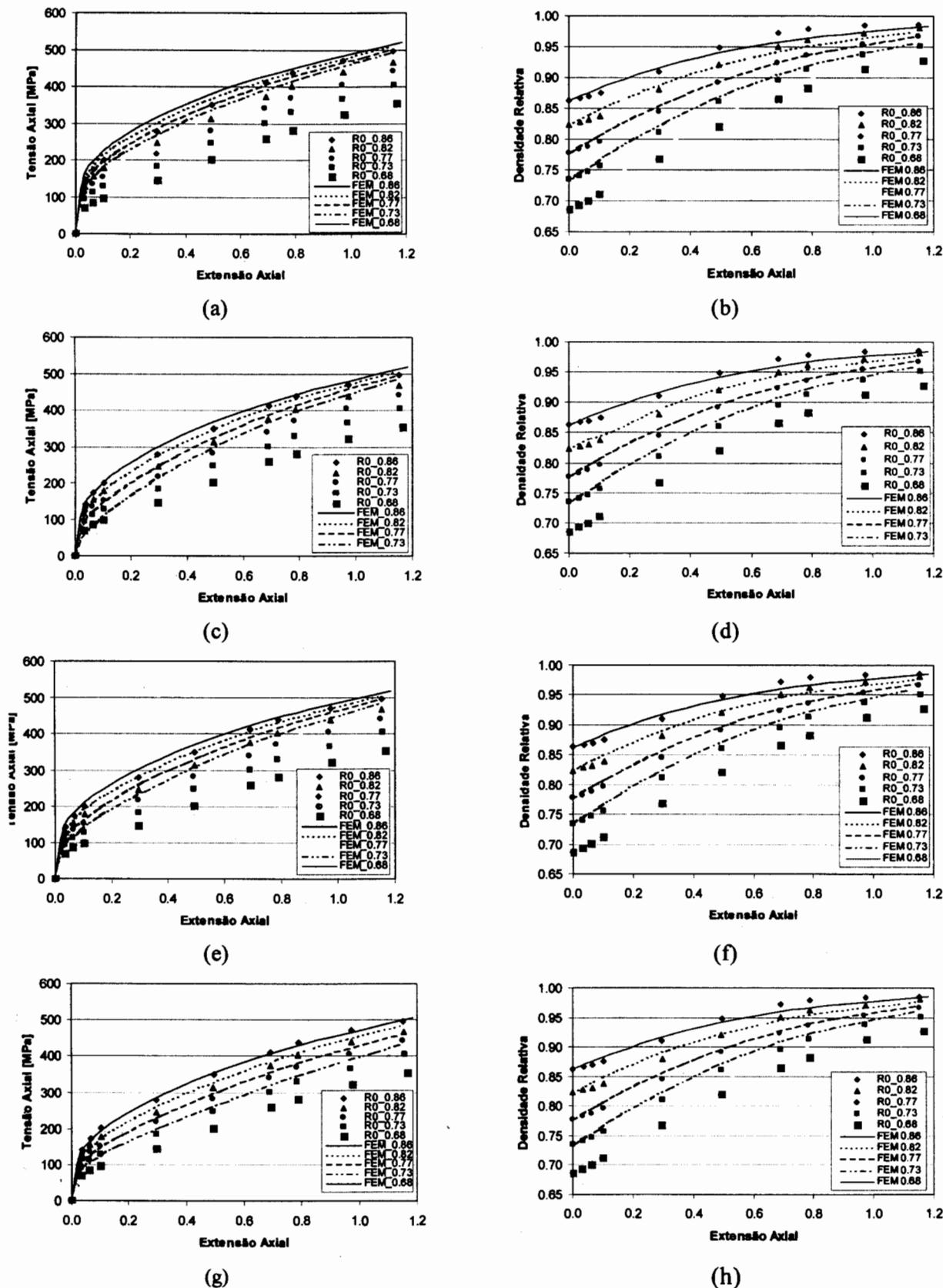


Fig. 5. Comparação entre a evolução da tensão axial e da densidade relativa com a extensão axial, para diferentes densidades iniciais, usando o critério de plasticidade de a) e b) Shima e Oyane, c) e d) Doraivelu, e) e f) Lee e Kim, e g) e h) Presente critério.

O ensaio de compressão hidrostática foi efectuado de modo incremental usando uma câmara de compressão hidrostática. Em cada paragem era registada a pressão na câmara, as dimensões do provete e a respectiva densidade relativa. Na fig. 6 compara-se a evolução experimental da pressão hidrostática com a extensão volumétrica, com as previstas teoricamente pelos critérios de plasticidade que têm vindo a ser estudados. A fig. 7 apresenta a evolução experimental da densificação neste ensaio com as respectivas previsões teóricas.

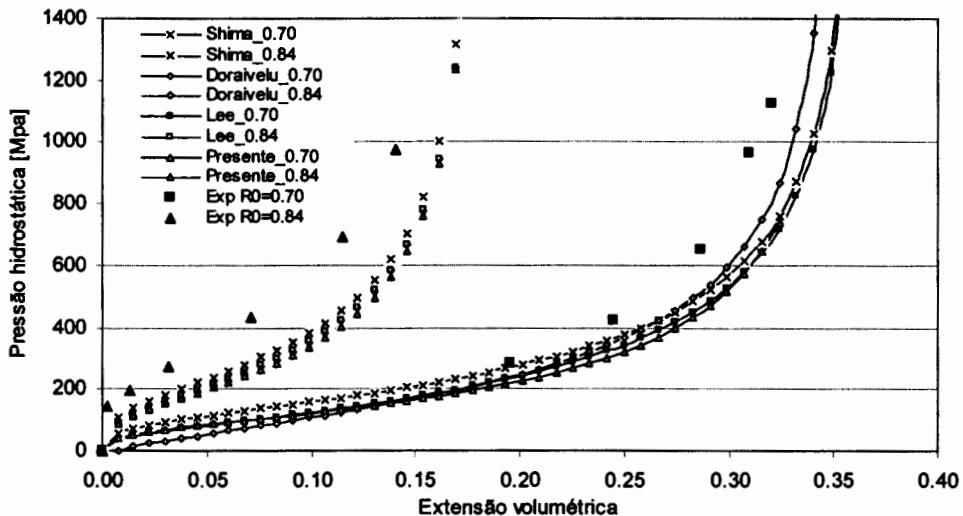


Fig. 6. Comparação teórico-experimental da evolução da pressão hidrostática com a extensão volumétrica no ensaio hidrostático de compressão.

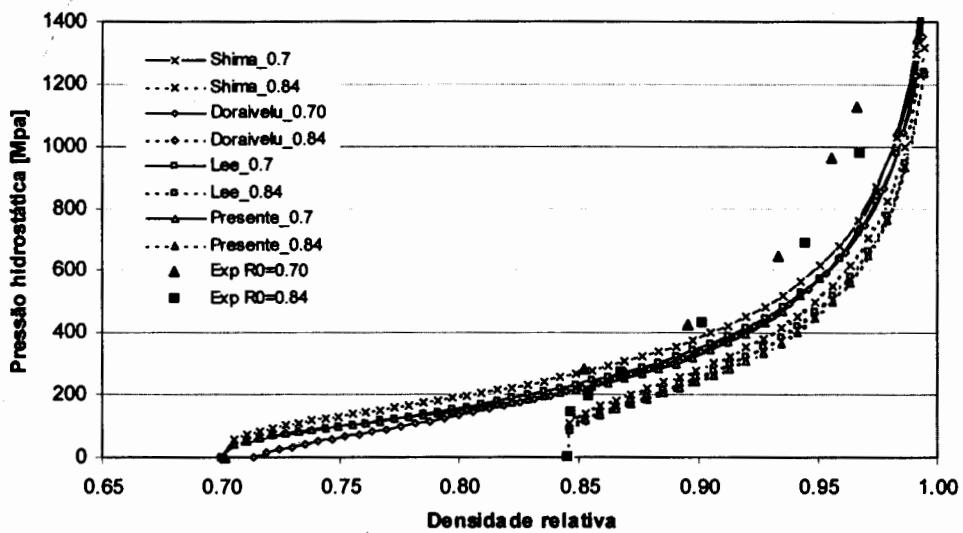


Fig. 7. Comparação teórico-experimental da evolução da pressão hidrostática com a densidade relativa no ensaio hidrostático de compressão.

Refira-se que apenas foram representados os ensaios realizados com os provetes de maior e de menor densidade relativa inicial, respectivamente, 0.70 e 0.84, para assegurar legibilidade gráfica dos resultados. A análise dos resultados evidencia imediatamente a dificuldade em se conseguir atingir a densificação total com este tipo de solicitação. No que se refere ao desempenho dos critérios de plasticidade para este tipo de solicitação extrema, constata-se que a correlação entre as previsões e os resultados experimentais

não se apresenta tão rigorosa como no ensaio de compressão uniaxial, agravando-se para valores elevados da densidade relativa. Estas diferenças podem ser atribuídas à natureza do critério de plasticidade, em particular ao modo como geralmente é reproduzido o encruamento geométrico, facto que pode justificar as pequenas diferenças existentes entre os vários critérios nas previsões deste ensaio.

4. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE UM CASQUILHO AUTO-LUBRIFICANTE

A fig.8 mostra o casquilho auto-lubrificante para a indústria automóvel no final de três etapas do seu fabrico; depois de compactado ou compacto verde, após sinterização e no final da operação de calibração.

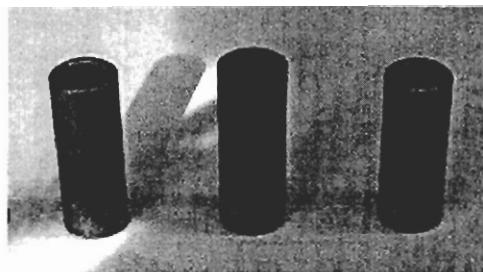


Fig. 8. Fases do fabrico de um casquilho auto-lubrificante para a indústria automóvel; compacto verde, sinterizado e calibrado.

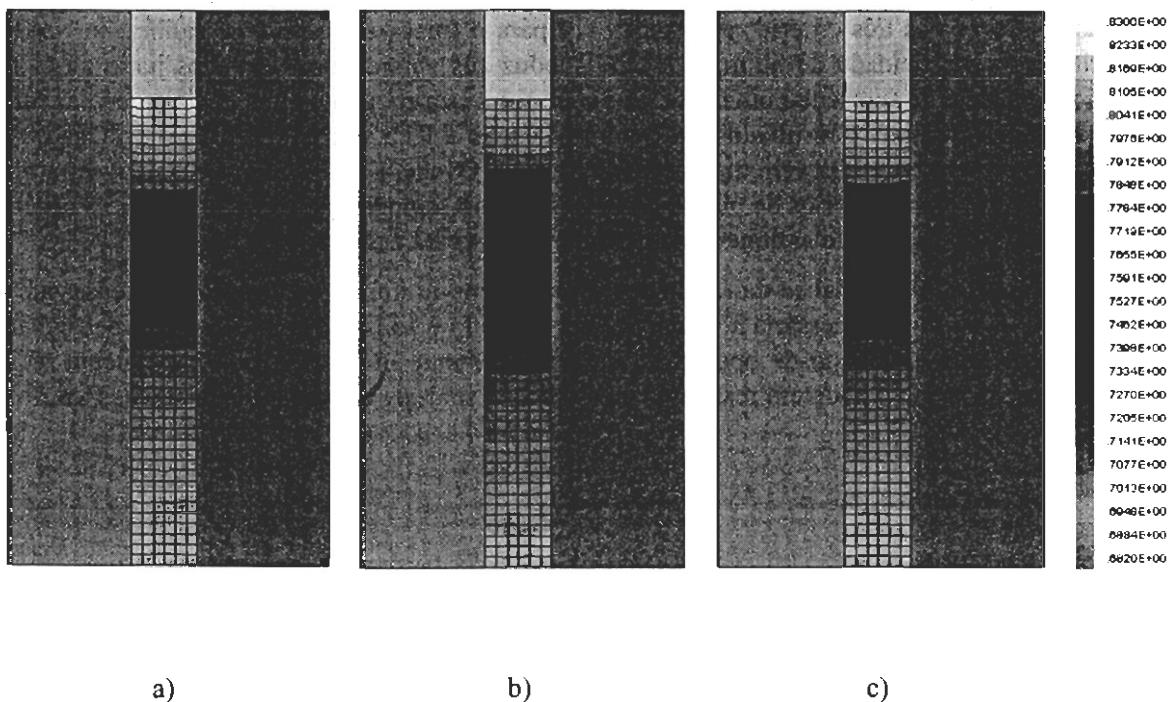
Uma vez que após calibração o casquilho irá ser impregnado com lubrificante é fundamental conhecer-se a distribuição da densidade relativa no componente no início desta operação para se poder avaliar as características auto-lubrificantes do casquilho. Na tabela 2 apresenta-se as dimensões e a densidade relativa média do casquilho no final de cada uma das etapas do processo de fabrico.

Tabela 2. Dimensões e características do casquilho durante as três fases de fabrico.

	Altura [mm]	Diâmetro interior [mm]	Diâmetro exterior [mm]	Volume [mm ³]	Densidade Relativa Média
Verde	25.16	6.1	9.48	1040.60	0.688
Sinterizado	25.66	6.22	9.55	1058.33	0.682
Calibrado	23.79	6.22	9.49	959.86	0.754

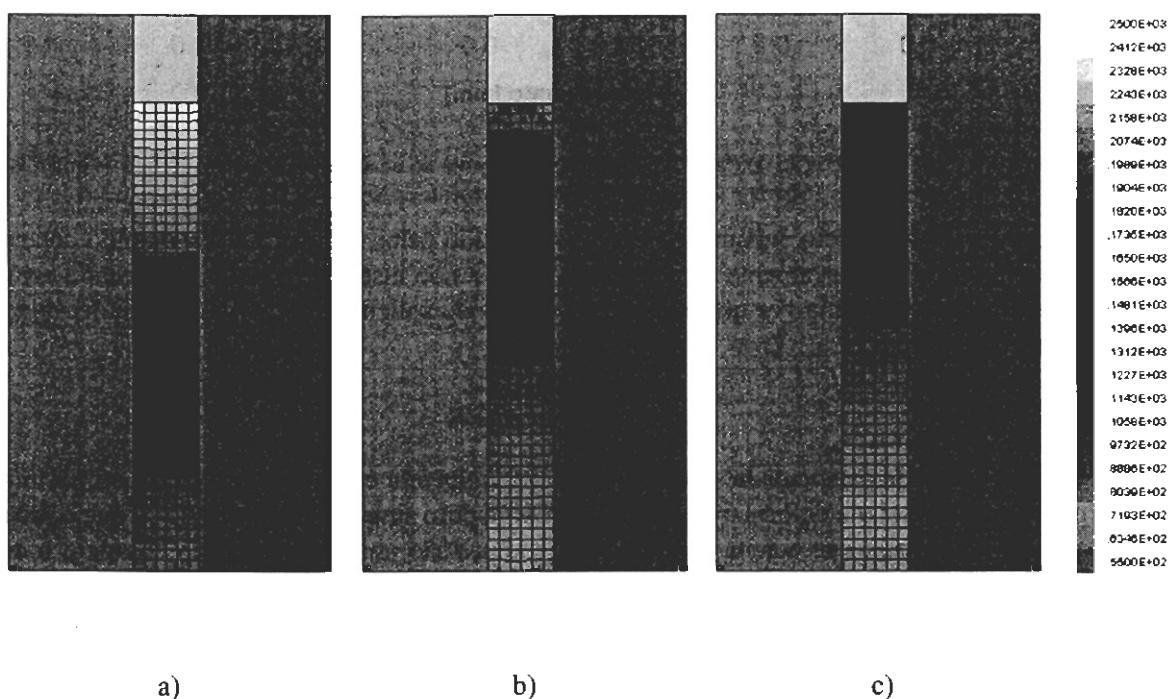
Para simular a operação de calibração do casquilho considerou-se apenas meia altura do componente, uma vez que esta operação se processa numa ferramenta flutuante. Assim, admitiu-se que o casquilho sinterizado tinha uma densidade relativa inicial homogénea e igual a 0.682, com as dimensões especificadas na tabela 2. Em face da geometria de revolução que o componente apresenta, a simulação numérica foi efectuada recorrendo ao programa *I-form 2D*, discretizando a peça em 282 elementos quadriláteros lineares. Para modelar o atrito na interface material/ferramenta foram usados elementos de atrito lineares e assumiu-se um factor de atrito de 0.15. Dos quatro critérios de plasticidade em análise, apenas foram usados três, pois o critério de Doraivelu não pode ser aplicado quando a densidade relativa é inferior a 0.71, conforme referido anteriormente.

A simulação numérica mostra que para os três critérios de plasticidade o valor médio da densidade relativa é igual a $\bar{R} = 0.735$, diferindo apenas 2.5% do valor medido experimentalmente no casquilho calibrado, $\bar{R}_{exp} = 0.754$. Este resultado é, desde logo, indicador que a previsão para a distribuição da densidade relativa é muito semelhante para os três casos. De facto, examinando a fig. 9, onde se mostra a distribuição de densidade relativa determinada a partir de cada um dos critérios de plasticidade, não se detectam diferenças dignas de referência.



Nota: O eixo de simetria situa-se do lado esquerdo.

Fig. 9. Distribuição da densidade relativa no final da operação de calibração, segundo os critérios de; a) Shima e Oyane, b) Lee e Kim e c) Presente critério.



Nota: O eixo de simetria situa-se do lado esquerdo.

Fig. 10. Distribuição da tensão efectiva aparente no final da operação de calibração, segundo os critérios de; a) Shima e Oyane, b) Lee e Kim e c) Presente critério.

No entanto, quando se analisa a fig. 10, na qual se apresenta a distribuição da tensão efectiva aparente determinada através dos três critérios de plasticidade para o final da operação de calibração, verifica-se que o critério de plasticidade de Shima e Oyane conduz aos valores mais elevados junto ao cunho de calibração, para além de apresentar um maior gradiente entre esta zona e a região da linha média. Por outro lado, as diferenças entre os resultados do critério de Lee e Kim e do Presente critério não são tão significativas como as que sobrevêm do critério de Shima e Oyane. Estas diferenças podem ser atribuídas aos parâmetros A e B dos critérios de plasticidade, pois, como se pode constar na tabela 1, os critérios de Lee e Kim e o Presente critério assumem os mesmos valores para esses parâmetros.

Este último aspecto da análise de resultados revela-se muito importante quando se pensa que se irá reflectir no valor da força necessária à operação (ver fig. 11) e consequentemente no dimensionamento das ferramentas que, neste tipo de operações, é particularmente importante pois geralmente requerem matrizes encamisadas para poderem resistir às pressões que se desenvolvem durante a densificação.

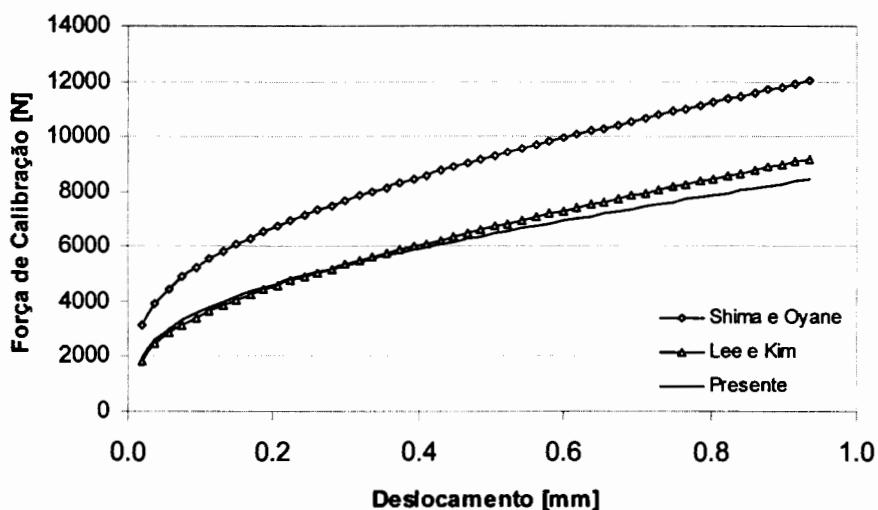


Fig. 11. Evolução da força de calibração do casquilho com o deslocamento do cunho de calibração segundo os critérios de Shima e Oyane, Lee e Kim e o Presente critério.

Resta referir que este aspecto encontra-se a ser investigado pelos autores, não tendo sido conclusivo neste trabalho em virtude da ferramenta de calibração não ter sido instrumentada para registar a evolução da força durante o processo, uma vez que apenas nos tinha sido solicitada a distribuição de densidade no casquilho após calibração.

5. CONCLUSÕES

Dos quatro critérios de plasticidade – Shima e Oyane, Doraivelu et al., Lee e Kim e o proposto pelos autores – usados para simular a deformação plástica do cobre puro sinterizado, verificou-se que o proposto pelos autores é o que melhor se adapta no ensaio de compressão uniaxial, enquanto que para o ensaio hidrostático de compressão todos os critérios apresentam divergências significativas tanto na pressão hidrostática versus extensão volumétrica como na pressão hidrostática versus densidade relativa. Este aspecto encontra-se a ser investigado pelos autores os quais acreditam que se deva à não aplicabilidade dos parâmetros A e B a estados de tensão cuja tensão média seja elevada. A importância da simulação numérica de sinterizados, foi evidenciada com a previsão da evolução do campo de densidades de um casquilho auto-lubrificante para a indústria automóvel.

A qualidade da solução obtida foi aferida comparando a densidade relativa média da peça com a teórica, tendo-se obtido uma correlação muito boa.

6. REFERÊNCIAS

- [1] «Metals Handbook», Powder Metallurgy, Vol. 7, 9th Ed., ASM Int., USA, (1986)
- [2] G. Dowson, *Introduction to Powder Metallurgy: The process and its products*, European Powder Metallurgy Association (EPMA).
- [3] Alves M. L., Rodrigues J. M. C. and Martins P. A. F., «Simulation of three-dimensional bulk forming processes by finite element flow formulation», *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, 11, pp. 803-821, (2003).
- [4] Kuhn H. A. and Downey C. L., «Deformation characteristics and plasticity theory of sintered powder materials», *Int. J. of Powder Metall.*, 7, pp. 15-25, (1971).
- [5] Green R. J., «A plasticity theory for porous solids», *Int. J. Mech. Sci.*, 14, pp. 215-224, (1972).
- [6] Shima S. and Oyane M., «Plasticity theory for porous metals», *Int. J. Mech. Sci.*, 18, pp. 285-291, (1976).
- [7] Doraivelu S. M., Gegele H. L., Gunasekera J. S., Malas J. C., Morgan J. T. and Thomas J. F., «A new yield function for compressible P/M materials», *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 26, No.9/10, pp.527-535, (1984).
- [8] Lee D. N. and Kim H. S., «Plasticity yield behaviour of porous metals», *Powder metallurgy*, 35, pp. 275-279, (1992).
- [9] Alves L. M. M. e Rodrigues J. M. C. «Modelação numérica e experimental de sinterizados metálicos», VII Conferência Internacional de Forjamento (XXIII SENAFOR), Porto Alegre, Brasil, (2003).
- [10] Martins, P. A. F and M.J.M. Barata Marques, «A general three-dimensional finite element approach for porous and dense metal-forming processes», *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 205, pp. 257-263, (1991).

MODELLING OF SINTERING FORGING

Abstract: In this paper the densification behaviour of sintered copper powder under uniaxial compression and hydrostatic compression was investigated using four yield criteria – Shima and Oyane, Doraivelu et al., Lee and Kim and a new yield criterion proposed by the authors -. The flow formulation for P/M materials has been implemented into the general purpose FEM code Iform for the analysis of forming of sintered metal. The correlation between the theoretical and experimental results is critically analysed. The developed code Iform is applied to simulate the sizing operation of a self-lubricant bearing to the automobile industry.