

PROPOSTA DE UM NOVO CRITÉRIO DE PLASTICIDADE PARA MATERIAIS SINTERIZADOS

Luís M. M. Alves, Paulo A. F. Martins e Jorge M. C. Rodrigues

Instituto Superior Técnico, STM, DEM, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
e-mail: luisalves@ist.utl.pt, jrodrigues@ist.utl.pt, pmartins@ist.utl.pt fax: 218419058

***Resumo.** Neste trabalho começa por se fazer uma análise da mecânica da densificação para sinterizados de cobre em condições de compressão uniaxial, usando três critérios de plasticidade – Shima e Oyane, Doraivelu et al. e Lee e Kim. A dedução das leis teóricas de densificação para os diferentes critérios de plasticidade permitiu correlacionar os resultados teórico-experimentais. Em face desta análise decidiu-se propor um novo critério de plasticidade, cuja correlação teórico-experimental em condições de compressão uniaxial se revelou melhor que as anteriores. Este critério de plasticidade foi implementado no programa I-form e utilizado para simular a operação de forjamento de uma flange, tendo-se obtido uma boa correlação entre os resultados numéricos e os experimentais.*

***Palavras-chave:** Enformação de sinterizados, Processos de fabrico, Simulação Numérica.*

1. INTRODUÇÃO

A pulverotecnologia é um processo de fabrico caracterizado por produzir componentes na forma definitiva, ou quase definitiva, dispensando, ou minimizando o uso de operações complementares de acabamento. O sucesso deste processo de fabrico depende largamente do modo como as ferramentas são concebidas e, nessa conformidade, dos próprios mecanismos de deformação envolvidos. Geralmente, as ferramentas são concebidas por dois processos; um envolvendo uma aproximação empírica sistematizada de tentativa e erro e um outro fazendo uso da prototipagem virtual, assente na simulação numérica do processo de fabrico. O método de concepção empírica envolve tempos e custos que podem ser deveras significativos, tanto mais agravados quanto mais escassa for a experiência do projectista. Em contrapartida, a prototipagem virtual oferece ao projectista, mesmo pouco experiente, soluções que lhe permitem reduzir substancialmente os tempos e os custos envolvidos.

Neste contexto, é fundamental avaliar o desempenho dos critérios de plasticidade mais usados na simulação de operações de deformação plástica na massa de materiais sinterizados - Shima e Oyane, Doraivelu et al. e Lee e Kim -. Antes de introduzir a metodologia seguida na avaliação do desempenho dos vários critérios de plasticidade, convém referir que durante a realização dos ensaios experimentais foram detectadas algumas lacunas na generalidade dos critérios atrás referidos, facto que motivou uma proposta para um novo critério de plasticidade, o qual foi denominado por Critério da Densidade Inicial (CDI), por a densidade relativa inicial intervir na sua formulação. Resta referir que o critério CDI proposto neste trabalho será introduzido durante o ensaio de compressão uniaxial e, à semelhança dos restantes, a determinação dos seus parâmetros efectuada com base nos dados experimentais deste ensaio.

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⁽¹⁾ e Green⁽²⁾ propuseram uma lei de escoamento plástico para materiais porosos que depende do segundo invariante do tensor desviador das tensões, \mathbf{J}'_2 , e do primeiro invariante do tensor das tensões, \mathbf{I}_1 , dada por,

$$\mathbf{A} \mathbf{J}'_2 + \mathbf{B} \mathbf{I}_1^2 = \delta \mathbf{Y}_0^2 = \mathbf{Y}_R^2 \quad (1)$$

em que \mathbf{A} , \mathbf{B} e δ são parâmetros que dependem da densidade relativa (\mathbf{R}) do sinterizado e \mathbf{Y}_0 e \mathbf{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.

Assumindo a forma geral da função limite de elasticidade da (Equação 1) vários investigadores propuseram diferentes critérios de plasticidade, distinguindo-se fundamentalmente pelas funções da densidade relativa que adoptam para os parâmetros \mathbf{A} , \mathbf{B} e δ , obtidas experimentalmente através de metodologias próprias. Neste estudo foram considerados os três critérios de plasticidade mais usados em simulação numérica de materiais porosos - Shima e Oyane⁽³⁾, Doraivelu et al.⁽⁴⁾ e Lee e Kim⁽⁵⁾. A (Tabela 1) apresenta as funções da densidade relativa para os parâmetros \mathbf{A} , \mathbf{B} e δ de cada um dos critérios atrás referidos.

Tabela 1 – Constantes \mathbf{A} , \mathbf{B} e δ para os diferentes critérios de plasticidade.

Critério	\mathbf{A}	\mathbf{B}	δ
Shima e Oyane	$\frac{3}{1 + (2.49/3)^2 (1 - \mathbf{R})^{1.028}}$	$\frac{(2.49/3)^2 (1 - \mathbf{R})^{1.028}}{1 + (2.49/3)^2 (1 - \mathbf{R})^{1.028}}$	$\frac{\mathbf{R}^5}{1 + (2.49/3)^2 (1 - \mathbf{R})^{1.028}}$
Doraivelu <i>et al.</i>	$(2 + \mathbf{R}^2)$	$(1 - \mathbf{R}^2)/3$	$(2\mathbf{R}^2 - 1)$
Lee e Kim	$(2 + \mathbf{R}^2)$	$(1 - \mathbf{R}^2)/3$	$(\mathbf{R} - \mathbf{R}_c)^2 / (1 - \mathbf{R}_c)^2$

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 ($\mathbf{R} = 1$). Nesta situação limite, $\delta = 1$, e a energia total aparente de deformação converte-se na energia elástica de distorção, pois $\mathbf{A} = 3$ e $\mathbf{B} = 0$. Por outro lado, os critérios de Doraivelu e de Lee Kim envolvem o conceito de densidade crítica de desagregação do sinterizado, \mathbf{R}_c , para determinar o parâmetro δ ; enquanto que no critério de plasticidade de Doraivelu é assumido que o valor da densidade crítica é constante e igual a $\mathbf{R}_c = \sqrt{1/2} \cong 0.71$, no caso do critério de Lee e Kim o parâmetro δ depende do valor experimental determinado para a densidade crítica de desagregação⁽⁵⁾, em conformidade com a equação genérica que se apresenta na (Tabela 1).

2.2 Fundamentos Teóricos da Simulação Numérica

O trabalho numérico realizado para simular a deformação plástica de materiais porosos consistiu em estender a aplicabilidade do programa de elementos finitos I-Form⁽⁶⁾, desenvolvido para estudar processos de enformação plástica na massa, a problemas envolvendo materiais porosos, onde a densidade relativa do material varia com a deformação.

Para formular a teoria rígido-viscoplástica compressível de elementos finitos, considere-se um corpo poroso de volume \mathbf{V} num instante genérico da deformação, delimitado pela superfície \mathbf{S} . Admitindo que 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⁽⁶⁾,

$$\delta\phi = \int_V \mathbf{Y}_R \delta \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_R dV - \int_S \mathbf{F}_i \delta \mathbf{u}_i dS = 0 \quad (2)$$

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 ⁽⁷⁾.

Por outro lado, a teoria infinitesimal da plasticidade para materiais porosos aplicada à função limite de elasticidade genérica adoptada neste trabalho (Equação 1), permite estabelecer as equações constitutivas do domínio plástico ⁽⁸⁾,

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

em que $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_R$ é a velocidade de deformação efectiva aparente, $\bar{\boldsymbol{\sigma}}_R$ é a tensão efectiva aparente, $\boldsymbol{\sigma}_m$ é a tensão média aparente e δ_{ij} o delta de Kronecker, sendo a tensão efectiva aparente, $\bar{\boldsymbol{\sigma}}_R$, e a velocidade de deformação efectiva aparente, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_R$, dadas por,

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}}_R = \sqrt{(A \mathbf{J}'_2 + B \mathbf{I}_1^2)} \quad ; \quad \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_R = \left[\frac{2}{A} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij}'^2 + \frac{1}{3(3-A)} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_v^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

em que $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_v$ é a velocidade de deformação volumétrica aparente, dada por; $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_v = \dot{\mathbf{R}}/\mathbf{R}$, sendo $\dot{\mathbf{R}}$ a taxa de variação da densidade relativa e \mathbf{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), considerada na formulação pelo 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,

$$\dot{w} = \bar{\boldsymbol{\sigma}}_R \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_R V_R = \bar{\boldsymbol{\sigma}}_0 \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_0 V_0 = \bar{\boldsymbol{\sigma}}_0 \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_0 \mathbf{R} V_R \quad (5)$$

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 determinam-se as relações entre as velocidades de deformação efectiva e a extensão efectiva do material denso e do poroso,

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_0 = \frac{\sqrt{\delta}}{\mathbf{R}} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_R \quad ; \quad \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_0 = \int_0^t \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_0 dt = \int_0^t \frac{\sqrt{\delta}}{\mathbf{R}} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_R dt \quad (6)$$

3. TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1 Ensaio de Compressão Uniaxial

O material usado neste trabalho foi o cobre puro com um teor de pureza de 99.5%, uma densidade aparente de 2.86 g/cm³ e uma granulometria com a seguinte distribuição: 94.92 % $\leq 45 \mu\text{m}$, 5.08% $\geq 45 \mu\text{m}$ e 0 % $\geq 75 \mu\text{m}$. A (Figura 1) mostra duas fotomicrografias do pó de cobre usado neste trabalho; a primeira, (Figura 1 a), apresenta o pó solto, enquanto que a segunda, (Figura 1 b), mostra as ligações entre os grãos de pó após ter sido compactado e posteriormente sinterizado à temperatura de 825°C, durante 30 min, em atmosfera de vácuo a 0.55mbar.

A compactação dos corpos de prova cilíndricos foi efectuada numa ferramenta flutuante, lubrificada com estearato de zinco, para diferentes valores de pressão, o que permitiu obter corpos

de prova sinterizados com uma boa homogeneidade de densidade e valores diferentes para a densidade relativa inicial, R_0 .



Figura 1 – Fotomicrografia do pó de cobre utilizado. a) Pó de cobre solto (ampliação 1000x) e b) sinterizado de cobre (ampliação 4000x).

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em condições de deformação homogênea, registrando-se em cada paragem a força de compressão, o deslocamento do prato compressor, as dimensões do corpo de prova e a respectiva densidade. A densidade foi medida segundo a técnica da submersão, usando uma balança com precisão de 0.0001g, e tendo o cuidado de impermeabilizar os corpos de prova com verniz, com uma densidade previamente determinada. A (Figura 2) mostra alguns dos corpos de prova antes e após a realização do ensaio de compressão uniaxial.



Figura 2 – Corpos de prova de cobre de densidades iniciais decrescentes antes e após deformação.

Numa primeira fase do trabalho estes ensaios foram efectuados com o intuito de avaliar os critérios de plasticidade seleccionados para implementação no programa I-form, todavia, a detecção de certas discrepâncias no confronto teórico-experimental de alguns desses resultados conduziu a que, numa segunda fase, fosse desenvolvido um critério de plasticidade alternativo, cuja formulação será apresentada seguindo a cronologia experimental deste ensaio. Este novo critério de plasticidade será designado por Critério da Densidade Inicial (CDI), por a densidade relativa inicial intervir na sua formulação.

3.2 Determinação das Características Mecânicas do Material Denso da Matriz

Contrariamente ao que é feito por muitos utilizadores de soluções numéricas para porosos, as características mecânicas do material denso da matriz do sinterizado não podem ser determinadas a partir do material denso apenas com a mesma composição química, pois as condições metalúrgicas influenciam igualmente o comportamento mecânico do material, conforme se pode verificar, nas (Figuras 3 a) e b)) o tamanho do grão do material denso é muito superior ao do material sinterizado.

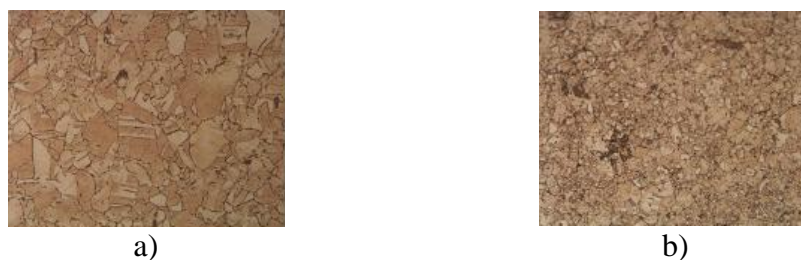


Figura 3 – Micrografias mostrando a estrutura de, a) um cobre electrolítico denso e de b) um sinterizado de cobre de pureza equivalente. Ampliação de 400x em ambos os casos.

Na verdade, esta é uma das vantagens que normalmente se atribui às componentes obtidos por pulverometalurgia, onde a reduzida dimensão do grão confere melhores propriedades mecânicas, em especial quando as porosidades são reduzidas. Para ultrapassar as dificuldades inerentes à determinação das características mecânicas do material denso da matriz do sinterizado por métodos directos, desenvolveu-se uma técnica indirecta para o efectuar. Deste modo, foram realizados vários ensaios incrementais de compressão uniaxial sem atrito, partindo de corpos de prova com diferentes densidades relativas iniciais, mas conduzidos de modo a que os pontos de paragem correspondessem a valores de extensão efectiva aparente previamente estabelecidos. A (Figura 4 a)) mostra graficamente a evolução obtida entre a tensão axial aparente e a densidade relativa, para diferentes valores iniciais da densidade relativa do sinterizado.

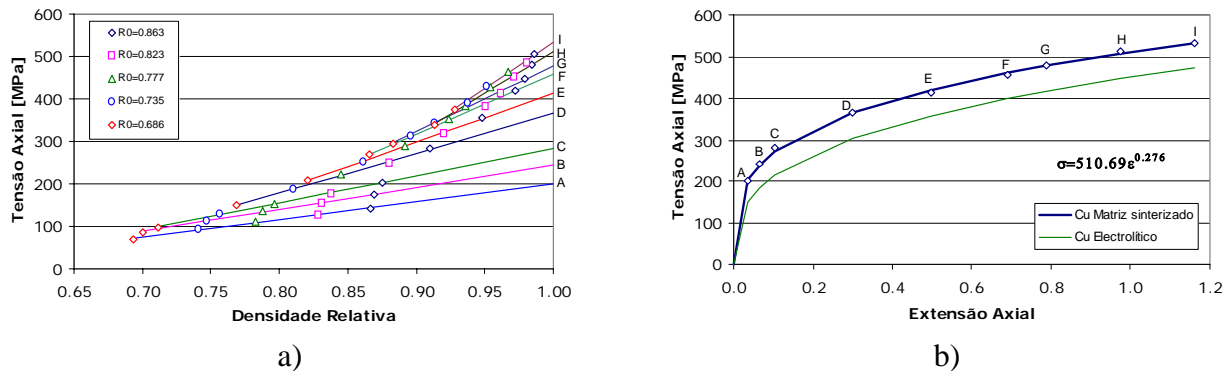


Figura 4 – a)Evolução da tensão axial aparente com a densidade relativa para diferentes densidades relativas iniciais. b) Curvas de comportamento mecânico do cobre denso que constitui a matriz do sinterizado e do cobre electrolítico

A análise dos resultados permitiu concluir que para a mesma extensão axial aparente os pontos experimentais apresentam uma evolução praticamente linear entre a tensão axial aparente e a densidade relativa. Então, extrapolando para uma densidade relativa unitária cada uma das rectas obtidas por regressão linear é possível determinar um conjunto de pares tensão efectiva-extensão efectiva que definem o comportamento mecânico do material denso da matriz do sinterizado. A aplicação desta técnica indirecta na determinação das características mecânicas do material denso encontra-se representado na (Figura 4 b)), onde se mostra igualmente, para comparação, a lei de comportamento mecânico do cobre electrolítico determinada experimentalmente.

3.3 Determinação do Coeficiente de Poisson Plástico para os Sinterizados.

Revedo os critérios de plasticidade em análise, verifica-se que nenhum deles considera o coeficiente de Poisson plástico dependente da densidade inicial do poroso. No entanto, a mecânica da deformação mostra que o coeficiente de Poisson plástico depende da densidade relativa inicial, conforme se irá provar em seguida através do método desenvolvido para determinar o coeficiente de Poisson plástico no Critério da Densidade Inicial (CDI).

Combinando a definição de incremento de extensão volumétrica, $d\epsilon_v = dV/V = -dR/R = d\epsilon_{ii}$, em que V é o volume, R a densidade relativa e $d\epsilon_{ii}$ o traço da matriz dos incrementos de extensão aparente, com a definição de coeficiente de Poisson, $\nu = -d\epsilon_2/d\epsilon_1$, e considerando isotropia, é possível relacionar o incremento da extensão axial aparente, $d\epsilon_1$, com a densidade relativa, R , e o coeficiente de Poisson plástico, ν , através de,

$$d\epsilon_1 = -dR/[R(1-2\nu)] \quad (7)$$

Admitindo que a lei de variação geral do coeficiente de Poisson plástico com a densidade relativa é do tipo $\nu = 0.5 R^d$, conforme proposto por Zhdanovich⁽⁹⁾ e Kuhn⁽¹⁾, a (Equação 7) pode ser reescrita para, $d\varepsilon_1 = -dR/[R(1-R^d)]$, que após integração fica,

$$-\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) + \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1-R_0^d}{1-R^d}\right) \quad (8)$$

Aplicando a (Equação 8) aos vários ensaios realizados, verifica-se que o expoente do coeficiente de Poisson plástico, d , depende da densidade relativa inicial, R_0 , conforme se pode constatar no gráfico da (Figura 5 a)), obtendo-se, assim, a seguinte expressão para o coeficiente de Poisson plástico,

$$\nu = \frac{1}{2} R^{(4.15 R_0 - 1.23)} \quad (9)$$

Na (Figura 5 b)) compara-se o coeficiente de Poisson plástico obtido para o CDI com os determinados experimentalmente para diferentes densidades relativas iniciais.

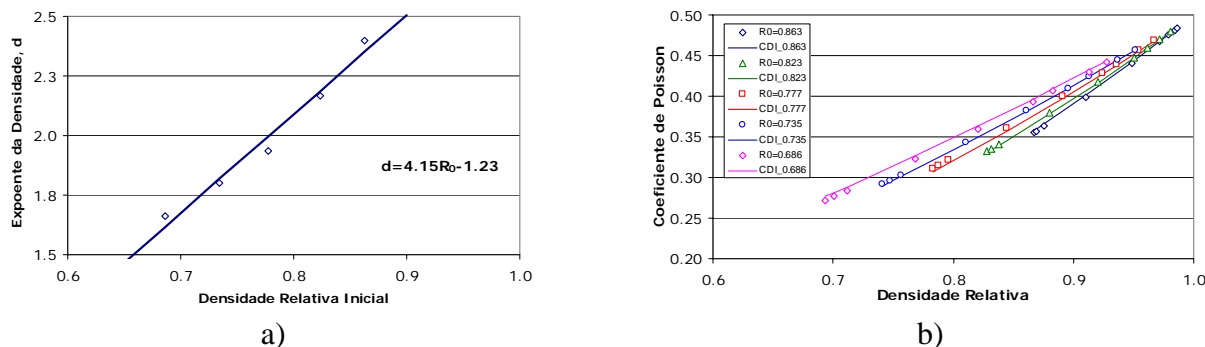


Figura 5 – a) Evolução do expoente do coeficiente de Poisson, d , com a densidade relativa inicial, R_0 , e b) . Coeficiente de Poisson plástico para o critério CDI

A (Tabela 2) resume os valores adoptados por cada um dos critérios para o coeficiente de Poisson plástico. Conforme se pode constatar apenas a dependência da densidade relativa inicial é tida em conta pelo CDI, verificando-se que os valores adoptados pelos restantes critérios correspondem a uma solução média que se pode considerar aceitável para valores de densidade relativa superiores a 0.8 .

Tabela 2 - Coeficiente de Poisson plástico dos diferentes critérios de plasticidade.

Critério	Shima e Oyane	Doraivelu	Lee e Kim	CDI
Coef Poisson [ν]	$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{2}{9f^2}\right) / \left(1 + \frac{1}{9f^2}\right)$ com $f = \frac{1}{2.49(1-R)^{0.514}}$	$\frac{1}{2} R^2$	$\frac{1}{2} R^2$	$\frac{1}{2} R^d$ com $d = 4.15 R_0 - 1.23$

3.4 Encruamento Geométrico.

Comparando as previsões da evolução da tensão com a extensão axial aparente, determinadas a partir dos critérios de plasticidade de Shima e Oyane, Doraivelu et al. e Lee e Kim, com os resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial, verificou-se falta de concordância particularmente relevante para os sinterizados com baixos valores de densidade relativa inicial (ver

(Figuras 6 a), b) e c))). Este facto poderá conduzir a previsões incorrectas na determinação da força e da energia necessária à realização das operações de deformação plástica. Para avaliar o que acabou de se afirmar considere-se a expressão geral do critério de plasticidade (Equação 1). Introduzindo as condições particulares do ensaio de compressão uniaxial, $\sigma_1 = Y_R$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ e $J_2 = 1/3 Y_R^2$; $I_1 = Y_R$, obtém-se a seguinte relação entre a tensão limite de elasticidade do poroso, Y_R , e a do denso da matriz, Y_0 ,

$$Y_R^2 = \delta Y_0^2 \quad (10)$$

Esta relação, designada por lei de densificação, é importante na medida em que separa os dois fenómenos de encruamento associados à deformação plástica do sinterizado; o encruamento geométrico, através do parâmetro δ e o encruamento do material denso da matriz do sinterizado, através da tensão limite de elasticidade do denso Y_0 . A lei de encruamento do material denso da matriz do sinterizado já foi determinada no (§3.2). Relativamente à lei de encruamento geométrico, esta foi obtida a partir dos resultados experimentais dos vários ensaios realizados, fazendo intervir na sua definição a densidade relativa inicial, R_0 , e assegurando a condição de denso, ou seja, quando a densidade relativa for unitária também o parâmetro δ terá que ser unitário para verificar o critério de plasticidade, (Equação 1). Nestas condições, a expressão empírica proposta para o encruamento geométrico do CDI tem a seguinte forma,

$$\delta = \frac{C R_0^x R}{C R_0^x + (1 - R)} \quad (11)$$

em que C e x são parâmetros a determinar experimentalmente.

Para determinar os parâmetros C e x começa-se por escrever a (Equação 11) apenas em função das variáveis aparentes dos ensaios de compressão. Assim, introduzindo a lei de comportamento mecânico da matriz densa do poroso, $Y_d = k \bar{\epsilon}_d^n$ e notando que a extensão efectiva no material denso se relaciona com a extensão efectiva aparente por $\bar{\epsilon}_d = \sqrt{\delta/R} \bar{\epsilon}$, obtém-se,

$$Y = k (\delta)^{(n+1)/2} \left(\frac{\bar{\epsilon}}{R} \right)^n \quad (12)$$

Esta será então a expressão geral que rege a densificação no ensaio de compressão uniaxial com deformação homogénea, diferenciando-se em cada critério através do valor que o parâmetro δ assume para cada um deles.

Para determinar os parâmetros C e x do critério CDI ajustou-se por mínimos quadrados a (Equação 12) aos ensaios experimentais realizados, considerando a lei de encruamento da matriz densa determinada no (§3.2), tendo-se obtido $C = 0.343$ e $x = 2.988$.

Na (Tabela 3) resumem-se os parâmetros dos vários critérios de plasticidade em estudo.

Tabela 3 - Parâmetro δ caracterizando o encruamento geométrico de cada um dos critérios de plasticidade em análise.

	Shima e Oyane	Doraivelu	Lee e Kim	CDI
δ	$\frac{R^5}{1 + \left(\frac{2.49}{3}\right)^2 (1-R)^{1.028}}$	$(2R^2 - 1)$	$\frac{(R - R_c)^2}{(1 - R_c)^2}$ com $R_c = 0.529^{(1)}$	$\frac{0.343 R_0^{2.988} R}{0.343 R_0^{2.988} + (1 - R)}$

(1) Densidade relativa crítica de desagregação do sinterizado determinada por extrapolação.

As (Figuras 6 a), b), c) e d)) apresentam a evolução teórico-experimental da tensão axial aparente com a extensão axial aparente no ensaio de compressão uniaxial, respectivamente para os critérios de Shima e Oyane, Doraivelu et al., Lee e Kim e CDI, considerando sinterizados com várias densidades iniciais.

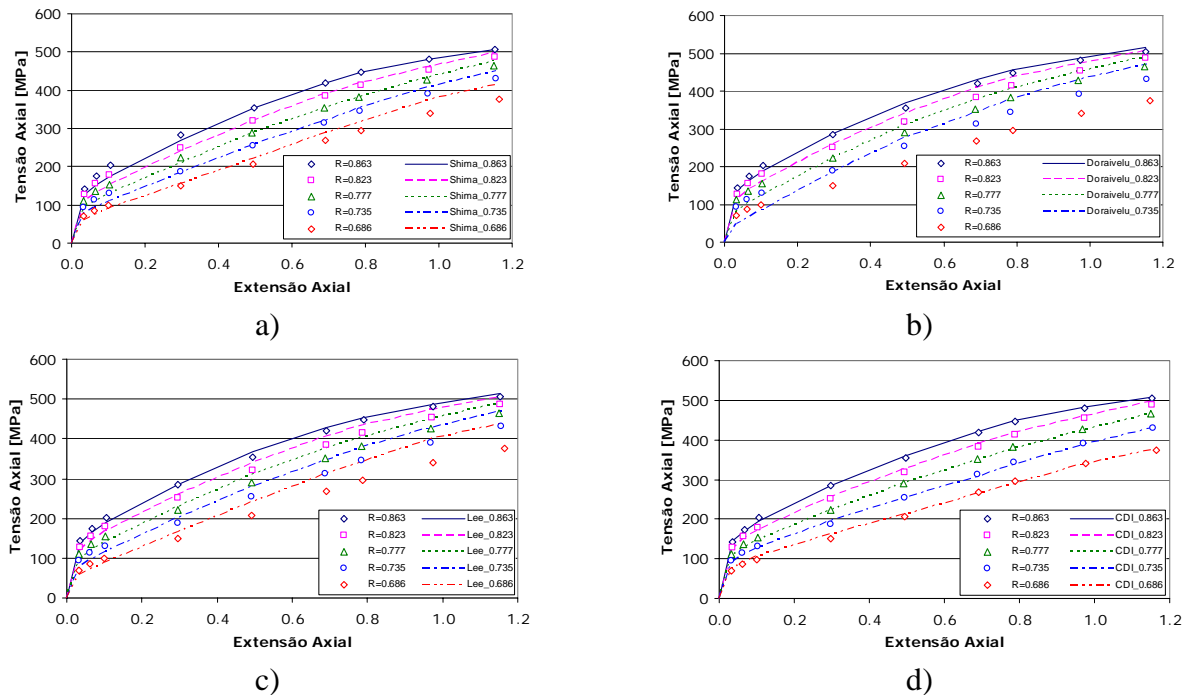


Figura 6 – Comparação teórico-experimental da evolução da tensão axial com a extensão axial aparente, para o critério de a) Shima e Oyane, b) Doraivelu et al, c) Lee e Kim e c) CDI.

Conforme se pode verificar analisando os gráficos anteriores, com excepção do CDI, todos os critérios de plasticidade reproduzem com pouca fidelidade a evolução da tensão efectiva aparente com a extensão efectiva aparente dos sinterizados quando a densidade relativa inicial é baixa. No caso particular do critério de Doraivelu não é mesmo possível reproduzir esta evolução para o sinterizado com uma densidade inicial de $R_0 = 0.686$, uma vez que na determinação do parâmetro δ está subentendida a existência de uma densidade relativa crítica de desagregação de $R_c = 0.707$.

4. MODELAÇÃO NUMÉRICA DO FORJAMENTO DE UMA FLANGE

A (Figura 7 a)) mostra a geometria da pré forma (com uma densidade relativa inicial de $R_0=0.79$) usada no fabrico da flange da (Figura 7 c)). Na (Figura 7 b)) apresenta-se uma forma intermédia deste forjamento. Embora o forjamento da flange seja exequível num único passo, optou-se por fazer uma paragem intermédia para medir a geometria e a densidade relativa e assim avaliar a qualidade da solução numérica desenvolvida.

A simulação numérica foi efectuada com o programa Iform2 versão porosa. Em face da simetria axial da peça apenas meia peça foi discretizada com 584 elementos quadriláteros lineares, ligados por 645 nós. As ferramentas foram modeladas com elementos lineares de atrito, tendo-se usado na simulação um factor de atrito de $m=0.2$ para reproduzir as condições de contacto seco entre o sinterizado e o material da ferramenta (valor determinado a partir do ensaio de anel⁽⁸⁾).

Relativamente à evolução geométrica pode afirmar-se que o critério proposto reproduz com fidelidade a geometria real conforme se pode verificar através dos perfis teórico e experimental mostrados na (Figura 7 d)) para as duas fases da operação de forjamento analisadas.

As (Figuras 8 a) e b)) apresentam, respectivamente, a correlação numérico-experimental da evolução da carga e da densidade relativa média com o deslocamento do punção para o critério CDI. Observa-se que ambas as evoluções numéricas reproduzem com algum rigor as experimentais.

Contudo, os valores da densidade média relativa não são suficientes para aquilatar sobre a qualidade da distribuição desta variável no interior da peça forjada. Este facto levou a que a respectiva distribuição fosse avaliada a partir de um conjunto de micrografias efectuadas em zonas específicas da secção transversal da flange e, assim, conhecer de um modo mais rigoroso o desempenho do CDI na distribuição desta variável de campo. Para tal, foi executado um mapeamento da secção transversal da flange. Este procedimento permitiu concluir que esta variável de campo é reproduzida com rigor na simulação numérica, conforme se pode constatar na (Figura 9).

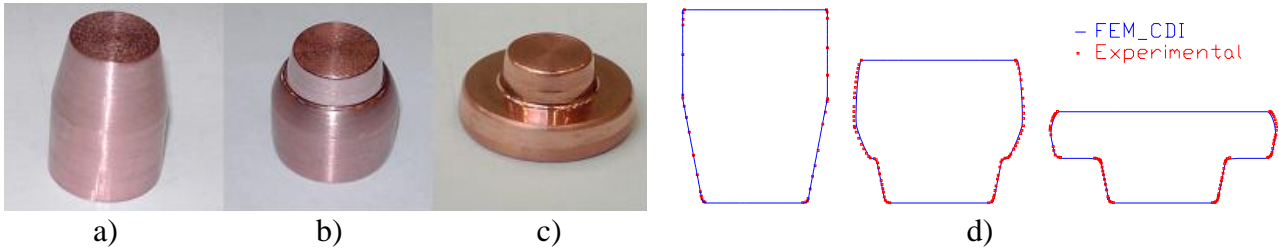


Figura 7 – Fotografias da a) geometria inicial, b) intermédia e c) final e d) respectivas correlações numérico-experimentais.

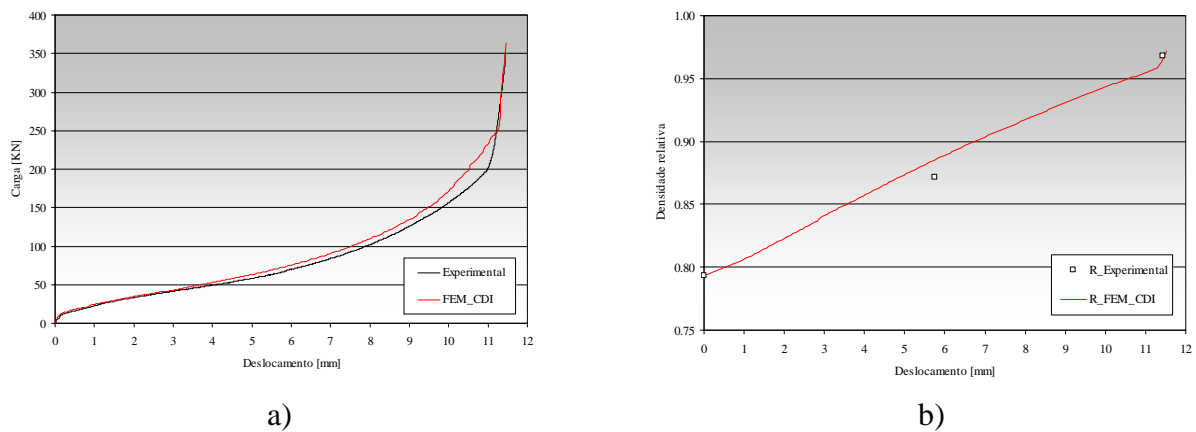


Figura 8 – Evolução; a) da carga e b) da densidade relativa média com o deslocamento.

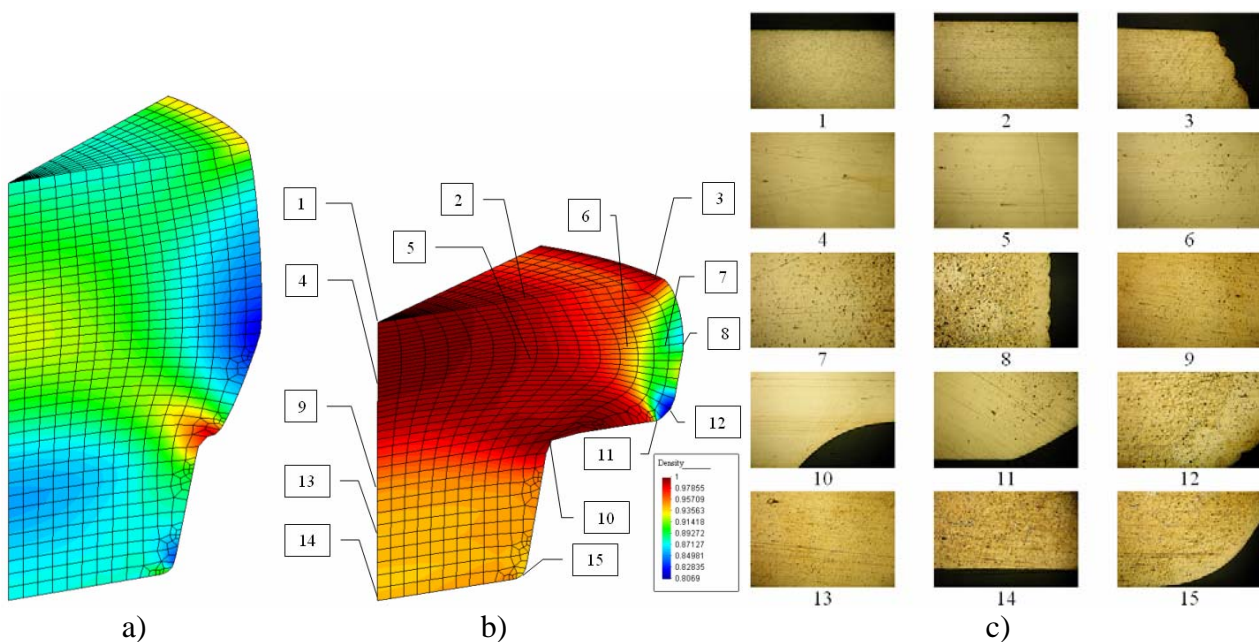


Figura 9 – Distribuição da densidade relativa na a) geometria intermédia e b) final e c) micrografias mostrando a porosidade da flange no final do forjamento, em conformidade com o mapeamento indicado na figura b).

5. CONCLUSÕES

O menor desempenho dos critérios de Shima e Oyane, Doraivelu et al. e Lee e Kim, na previsão do comportamento mecânico de materiais sinterizados com baixos valores de densidade relativa inicial, levou os autores a propor um novo critério para materiais porosos – o CDI –. A adaptação deste critério de plasticidade aos ensaios experimentais de compressão uniaxial de sinterizados de cobre puro revelou ser muito boa. Foi igualmente apresentado um método expedito para determinar a lei de comportamento mecânico do material denso que constitui a matriz do sinterizado.

A solução numérica implantada, conjugada com a implementação do critério CDI, no programa de elementos finitos I-form2 mostrou-se adequada para simular numericamente uma operação de forjamento de uma flange. A qualidade desta solução foi aferida comparando a evolução teórica e experimental da carga de forjamento, da densidade relativa média, da forma geométrica da peça e da distribuição da densidade relativa simulada e registada por micrografias.

6. REFERÊNCIAS

1. Kuhn H. A. and Downey C. L. **Deformation characteristics and plasticity theory of sintered powder materials.** Int. J. of Powder Metall., 7, 1971. 15-25 p.
2. Green R. J. **A plasticity theory for porous solids.** Int. J. Mech. Sci., 14, 1972. 215-224 p.
3. Shima S. and Oyane M. **Plasticity theory for porous metals.** Int. J. Mech. Sci, 18, 1976. 285-291 p.
4. Doraivelu S. M., Gegel 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, 1984. 527-535 p.
5. Lee D. N. and Kim H. S. **Plasticity yield behaviour of porous metals.** Powder metallurgy, 35, 1992. 275-279 p.
6. 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, 2003. 803-821 p.
7. 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. 205. 1991. 257-263 p.
8. Alves L. M. M. **Deformação plástica na massa de sinterizados metálicos: modelação numérica e análise experimental.** Tese de Doutoramento em Eng^a Mecânica, IST, 2004.
9. Zhdanovich G. M. **Theory of compacting of metal powders.** Translated from Teorize pressovaniya metzllchaskikli poroshkov, 1969. 1-262 p.

PROPOSAL OF A NEW YIELD FUNCTION FOR POROUS MATERIALS

Luís M. M. Alves, Paulo A. F. Martins e Jorge M. C. Rodrigues

Instituto Superior Técnico, STM, DEM, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
e-mail: luisalves@ist.utl.pt, jrodrigues@ist.utl.pt, pmartins@ist.utl.pt fax: 218419058

***Summary.** This paper discusses the densification behaviour of sintered copper during uniaxial compression, using three plasticity criterion - Shima & Oyane, Doraivelu et al. and Lee & Kim. The theoretical laws of densification has been developed and compared with the experimental data. Based on this analysis a new yield criterion for compressible P/M materials has been proposed by the authors. The new yield function was experimentally verified for the uniaxial state of compressive stress and excellent agreement was found between theoretical and experimental results. Finally, the new model was implemented in the finite element program I-form and used to simulate the forging of a structural component.*

Keywords: Powder forging, Manufacturing processes, Numerical simulation.