

ESTUDO COMPARATIVO DE CRITÉRIOS TEÓRICOS DE FRATURA DÚCTIL

Augusta Cercean Isaac Neta

Divisão de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica,
Pç. Marechal Eduardo Gomes, 50 – 12228-900 - São José dos Campos – SP – Brasil
augusta@mec.ita.br

Lindolfo Araújo Moreira Filho

Divisão de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica,
Pç. Marechal Eduardo Gomes, 50 – 12228-900 - São José dos Campos – SP – Brasil
lindolfo@mec.cta.ita.br

Jánes Landre Júnior

Mestrado em Engenharia Mecânica e Departamento de Engenharia Mecatrônica, PUC Minas,
Av. D. José Gaspar, 500 – 30535-610 - Belo Horizonte – MG – Brasil
janes@pucminas.br

Resumo. A fratura dúctil é fator limitante de alguns processos de conformação e, dessa forma, muitos critérios têm sido desenvolvidos para a sua predição. Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo entre dois critérios distintos, especificamente modelos de energia plástica acumulativa e de coalescência de vazios. Para isso, os critérios sugeridos por Cockcroft & Latham e Lemaitre foram integrados ao software de elementos finitos MSC.SuperForm 2002 e seu comportamento avaliado diante de resultados experimentais. Para o estudo de diferentes condições de carregamento, foram realizados ensaios de tração e compressão de corpos de prova axissimétricos.

Palavras-chave: conformação mecânica, elementos finitos, fratura dútil.

1. INTRODUÇÃO

Em muitos processos, a conformabilidade é determinada pela ocorrência da fratura dútil e, dessa forma, limitações são impostas pelo aspecto da superfície ou por trincas internas de regiões altamente deformadas devido ao fluxo intenso de material.

Com o advento dos métodos numéricos, especificamente aqueles baseados no método dos elementos finitos para grandes deformações, têm sido possível com relativo sucesso a análise dos processos de conformação durante a fase de projeto. Entretanto, técnicas numéricas existentes ainda apresentam limitações na predição da ocorrência da fratura.

Muitos critérios teóricos têm sido desenvolvidos para a predição da fratura dúctil. Alguns deles são baseados somente em dados experimentais (conhecidos como critérios empíricos), enquanto outros foram desenvolvidos a partir de fundamentos teóricos (semi-empíricos). Os critérios empíricos podem basear-se na tensão ou na deformação; enquanto, os semi-empíricos, em integrais de funções de tensão e deformação ou de coalescência de microcavidades.

Ao longo dos últimos anos, a maior parte das aplicações encontradas na literatura e nas implementações computacionais esteve restrita aos critérios de fratura dúctil baseados em integrais de

funções de tensão e deformação. Entretanto, com os avanços recentes no campo da modelagem do dano, estes critérios passaram a ser amplamente investigados.

Dentre os modelos baseados na mecânica do dano contínuo, destaca-se como o mais usado o modelo da tensão efetiva (MTE) proposto por Lemaitre, devido à simplicidade envolvida na determinação das variáveis necessárias à equação constitutiva do dano.

Neste trabalho, o critério de Cockcroft & Latham e o modelo da tensão efetiva de Lemaitre foram implementados ao software de elementos finitos MSC.SuperForm 2002 e seu comportamento avaliado diante de resultados experimentais. Para isso, foram realizados ensaios de ensaios de tração e compressão de corpos de prova axissimétricos para a validação das previsões teóricas obtidas.

2. CRITÉRIOS DE DANO PARA PREDIÇÃO DA FRATURA DÚTIL

2.1 Critérios Baseados em Integrais de Funções de Tensão e Deformação

Uma das principais abordagens deve-se a Freudenthal (1950), que supõe que ocorrerá fratura quando o trabalho plástico atingir um valor crítico C_1 :

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = C_1 \quad (1)$$

Conscientes de que as tensões de tração representam o principal elemento para a ocorrência da fratura, Cockcroft & Latham (1968), sugeriram um novo critério de fratura, que baseia no valor crítico da energia de tração, por unidade de volume. A versão normalizada deste critério pode ser escrita como:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma_1}{\sigma} d\bar{\varepsilon} = C_2 \quad (2)$$

Partindo dos estudos de Bridgman (1952) que disserta sobre a importância da tensão hidrostática nos processos de conformação, Brozzo et al. (1972) propuseram a introdução da influência desta tensão no critério anterior, que passou a ser escrito como:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1 - \sigma_m)} d\bar{\varepsilon} = C_3 \quad (3)$$

2.2 Modelo da Tensão Efetiva Proposto por Lemaitre

Com o objetivo de descrever matematicamente o dano dútil segundo o modelo da tensão efetiva, foi considerada a média entre as cavidades microscópicas, o que levou à definição do elemento volumétrico representativo (EVR). O tamanho do EVR é tal que as leis macroscópicas são aplicáveis e os efeitos microscópicos são mensuráveis.

Para um melhor entendimento deste modelo, considere o EVR solicitado por uma força \vec{F} suficiente para deformá-lo plasticamente, conforme apresentado na Fig. 1. As cavidades resultantes da deformação plástica que intersectam o plano de carregamento A_0 determinam a área danificada, isto é, a soma das áreas de todas as cavidades:

$$\tilde{A} = \sum_i \partial A_i \quad (4)$$

A razão entre as áreas danificada e original define a variável escalar dano:

$$D = \tilde{A}/A_0, \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (5)$$

onde $D=0$ representa o EVR não danificado e $D=1$ a falha devido à ruptura.

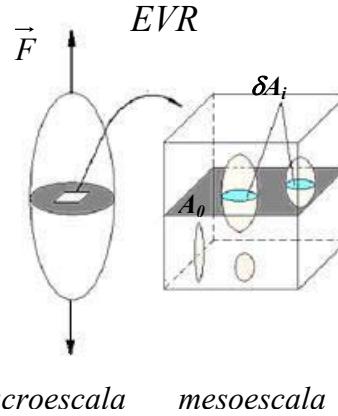


Figura 1 – Definição do EVR e da variável dano D

Sob o carregamento \vec{F} , a tensão σ deve ser modificada no caso de dano, já que o carregamento será transferido a um área transversal reduzida, $A_0 - \tilde{A}$. Isto leva a definição de tensão efetiva como apresentada a seguir

$$\bar{\sigma} = \frac{\vec{F}}{A} = \frac{\vec{F}}{A_0 \left(1 - \frac{\tilde{A}}{A_0} \right)} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (6)$$

De acordo com os conceitos básicos do MTE, a modificação da tensão deve ser transferida a outras variáveis como, por exemplo, o módulo de elasticidade.

Entretanto, para tensões de compressão, alterações do modelo acima foram necessárias devido ao início mais tardio dos fenômenos de nucleação e crescimento de microcavidades, bem como o fechamento parcial de defeitos preexistentes e surgimento de novos vazios sob tensões muito mais elevadas. Para quantificar o efeito do fechamento de microcavidades, Lemaître introduziu a variável h como a seguir:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - h \cdot D}, \quad 0 \leq h \leq 1 \quad (7)$$

Na prática, a variável h é determinada a partir de medidas do módulo de elasticidade em ensaios de tração e compressão. Normalmente, para a maioria dos materiais dúcteis, é encontrado o valor $h=0,2$.

A equação constitutiva do dano absoluto consiste de um parâmetro dependente do material $\delta D/\delta \varepsilon$ (declividade da equação do dano para um ensaio de tração uniaxial), uma função de triaxialidade $f(\eta)$ e o incremento de deformação plástica $d\varepsilon$:

$$\dot{D} = \frac{\delta D}{\delta \varepsilon} \cdot f(\eta) \cdot d\varepsilon \quad (8)$$

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Etapa Experimental

Para avaliação da modelagem numérica na predição da ocorrência de fraturas, foi escolhido o aço ABNT 1045, laminado a quente, cuja composição química - fornecida pelo fabricante - está listada na Tab. 1.

Tabela 1. Composição química do aço ABNT 1045

	C(%)	Mn(%)	Si(%)	S(%)	P(%)
1045	0,490	0,660	0,200	0,011	0,013

Em seguida, foram realizados ensaios de tração uniaxial nos corpos de prova, segundo as normas da ABNT, para obtenção da equação da tensão de fluxo, apresentada a seguir:

$$\bar{\sigma} = 1117 \bar{\varepsilon}^{0,263} \text{ MPa} \quad (9)$$

Já na Tab. 2 estão dispostos os valores das constantes necessárias ao MTE proposto por Lemaitre, determinados a partir de ensaios de tração e compressão de corpos-de-prova pertencentes a uma mesma corrida – em material previamente definido – e diâmetros iguais.

Tabela 2 – Constantes MTE para o aço ABNT 1045

Variável	Valor
D_{1c}	0,357
ε_B^{pl}	0,184
$k_f(\varepsilon_B^{pl})$	715,46 MPa

3.2 Ensaios de Tração e Compressão

A aplicabilidade dos critérios de Cockcroft & Latham e Lemaitre foi avaliada em dois exemplos numéricos por meio de comparações com resultados experimentais, atentando para a posição de surgimento de trincas. O primeiro corresponde à simulação do ensaio de tração de um corpo-de-prova axissimétrico submetido a um carregamento axial monotônico. Já no segundo exemplo, foi realizada a simulação do ensaio de compressão simples de um corpo-de-prova cilíndrico.

Para a simulação numérica dos processos físicos, foi usada a formulação rígido-plástica e modelos de deformação axissimétricos. Soluções das equações de rigidez foram obtidas pelo método direto.

Com relação à formulação das condições de atrito interfacial, foi empregada a lei de Coulomb; e para contornar problemas de distorção da malha, foi aplicado o remalhamento automático do programa.

A geometria dos corpos-de-prova e a malha de elementos finitos inicial para o ensaio de tração e compressão estão mostrados na Fig. 2. Devido à axissimetria da seção transversal dos corpos-de-prova, foram confeccionadas apenas a $\frac{1}{2}$ das geometrias originais.

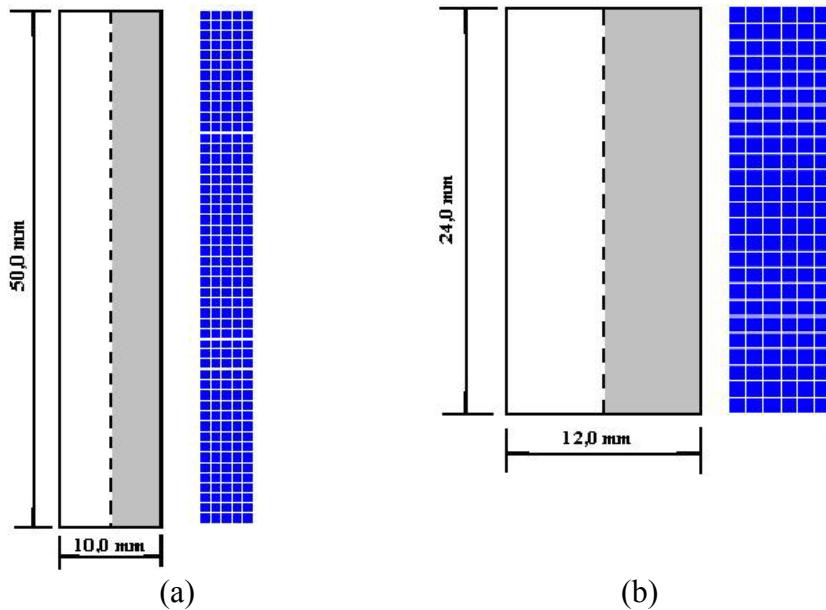


Figura 2 – Dimensões e malha inicial do corpo-de-prova para o ensaio de tração (a) e ensaio de compressão (b).

Diante desta condição, a malha do corpo de prova para o ensaio de tração consistia de 250 elementos isoparamétricos quadrilaterais de quatro nós, interconectados por 306 nós; enquanto que o corpo de prova para o ensaio de compressão, possuía 150 elementos e 182 nós.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A simulação do ensaio de tração foi conduzida até o nível de deformação no qual a fratura foi detectada experimentalmente, especificamente à meia altura do corpo-de-prova alongado de 20%.

A distribuições teóricas dos valores de dano segundo os critérios de Cockcroft & Latham e Lemaitre ao longo do ensaio de tração estão apresentadas nas Fig. 4 e 5, respectivamente.

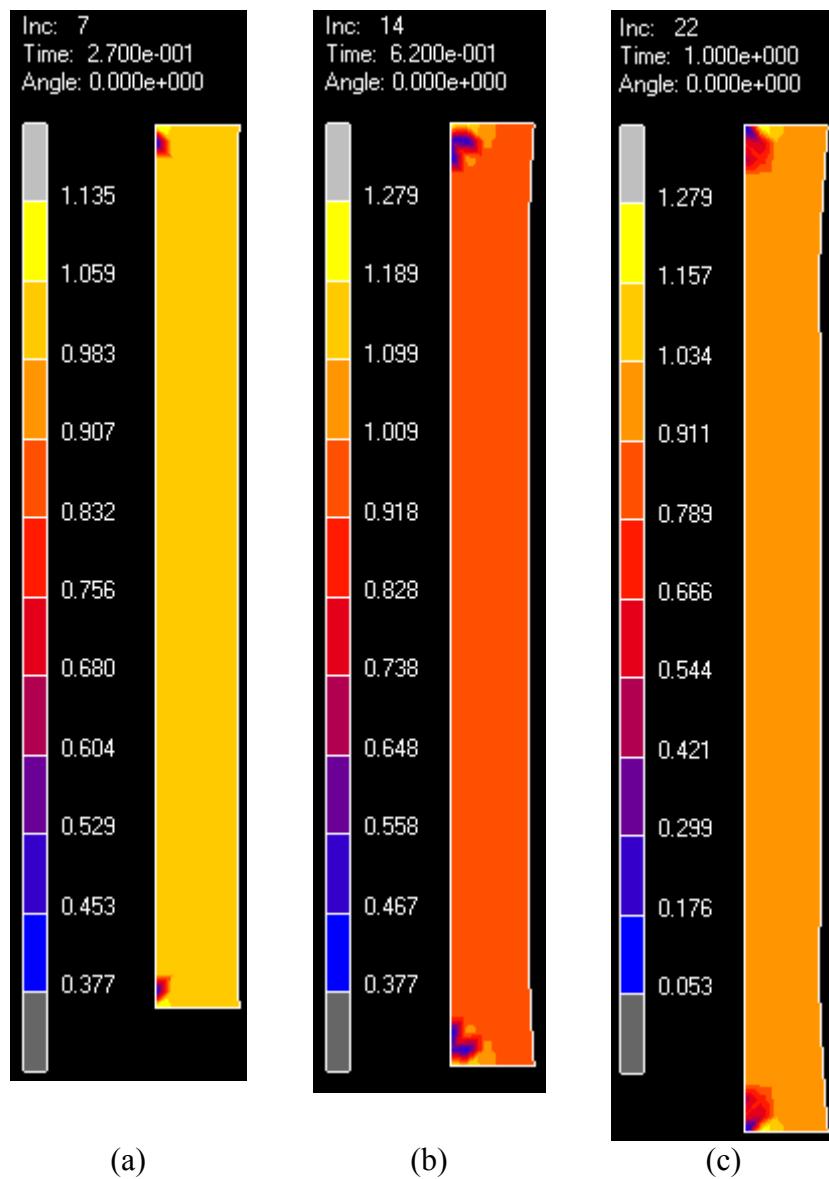


Figura 4 – Distribuição teórica do valor de dano relativo de Lemaitre, para alongamentos de 5,4% (a), 12,4% (b) e 20% (c).

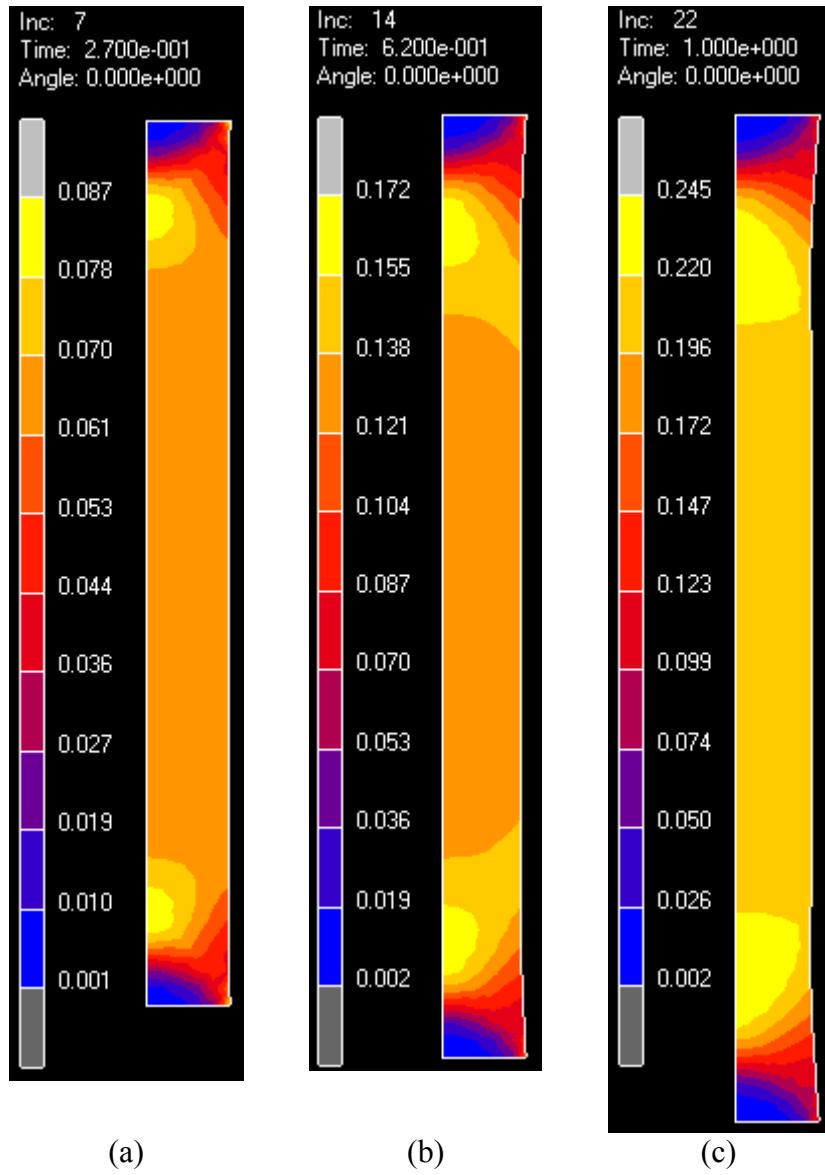


Figura 5 – Distribuição teórica do valor de dano Cockcroft & Latham, para alongamentos de 5,4% (a), 12,4% (b) e 20% (c).

Para a predição obtida pelo modelo de Lemaitre, o dano máximo foi detectado em regiões próximas à interface matriz – corpo-de-prova ao longo de todo processo; enquanto que, nos resultados apresentados pelo critério de Cockcroft & Latham, o dano máximo localizou-se na região central do corpo-de-prova.

Segundo Reed-Hill (1982) e Callister (2002), durante o ensaio de tração, a trinca se desenvolve no centro do corpo-de-prova e propaga radialmente até a superfície. Sendo assim, Cockcroft & Latham foi o único capaz de indicar corretamente a posição de início da fratura.

Da mesma forma, a simulação do ensaio de compressão foi conduzido até o instante de surgimento de trincas observado experimentalmente, isto é, na superfície livre equatorial para uma redução de 70% da altura dos corpos-de-prova.

Nas Fig. 6 e 7 estão apresentadas as distribuições teóricas do valor de dano ao longo do ensaio de compressão, segundo o critério de Cockcroft & Latham e o modelo MTE de Lemaitre, respectivamente.

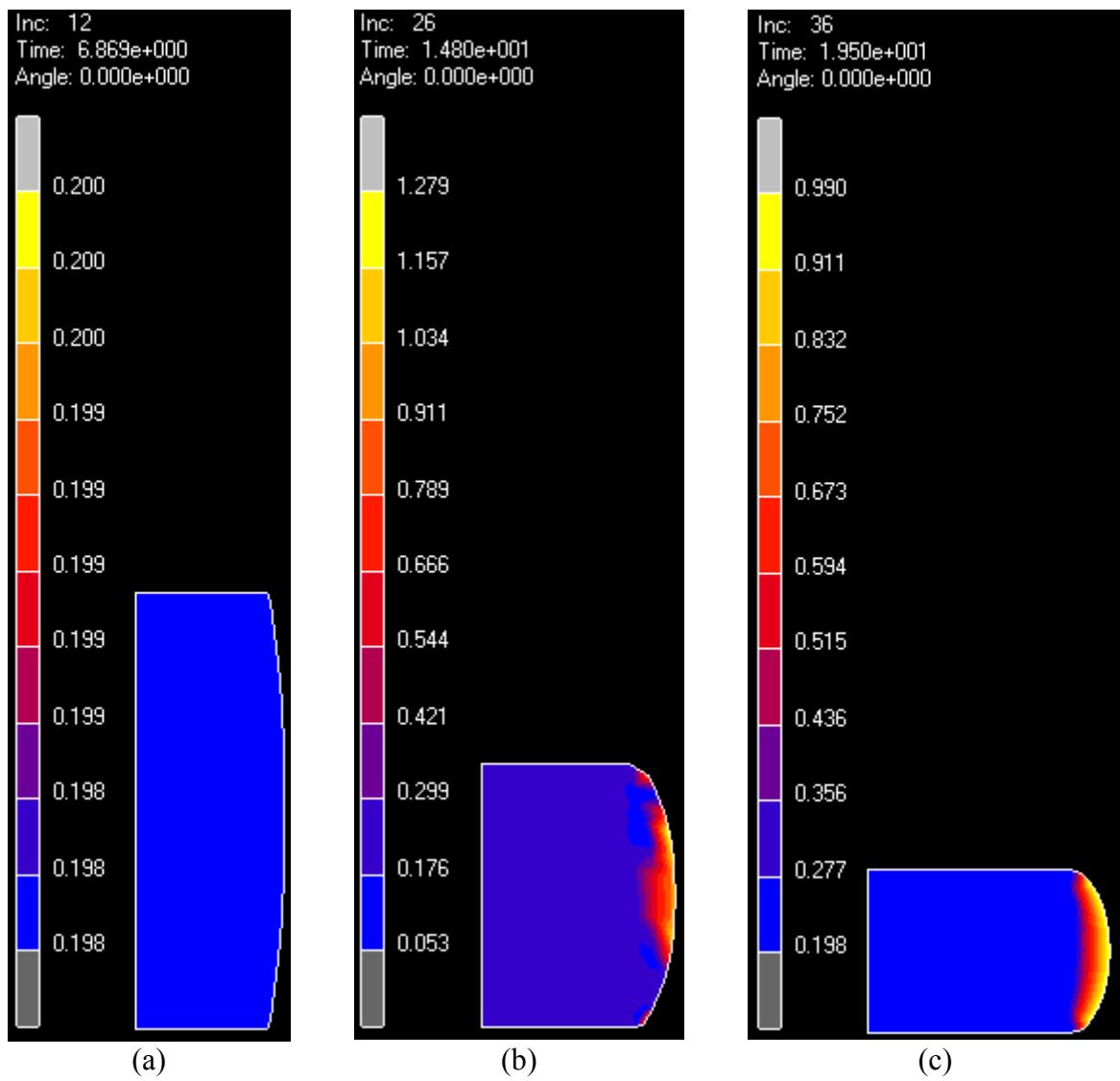


Figura 6 – Distribuição teórica do valor de dano relativo de Lemaitre, para reduções de altura de 25% (a), 51% (b) e 70% (c).

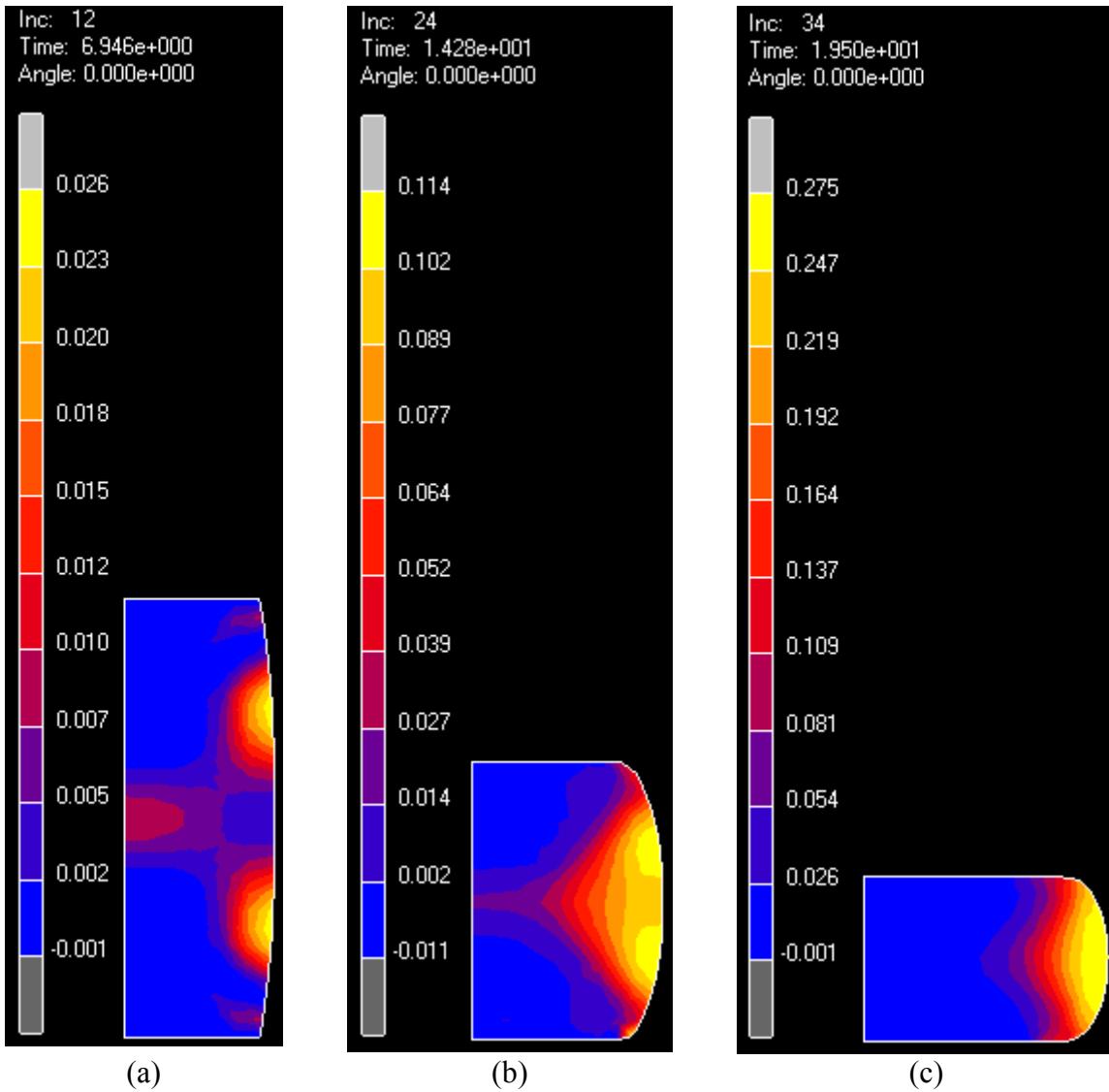


Figura 7 – Distribuição teórica do valor de dano Cockcroft & Latham, para reduções de altura de 25% (a), 51% (b) e 70% (c).

Como pode ser observado, as previsões obtidas pelos dois critérios indicaram o maior valor de dano na superfície livre do corpo de prova ao longo de todo o processo. Sendo assim, no momento da fratura, a localização do surgimento de trincas, segundo os dois critérios em estudo, coincide com observações experimentais.

Para destacar a dependência do modelo de Lemaitre com a razão de triaxialidade, σ_H/σ , bem como a dependência do critério de Cockcroft & Latham com a tensão máxima de tração, σ_1 , as distribuições teóricas das tensões hidrostática, axial e circunferencial para os ensaios de tração e compressão estão ilustradas nas Fig. 8 e 9, respectivamente.

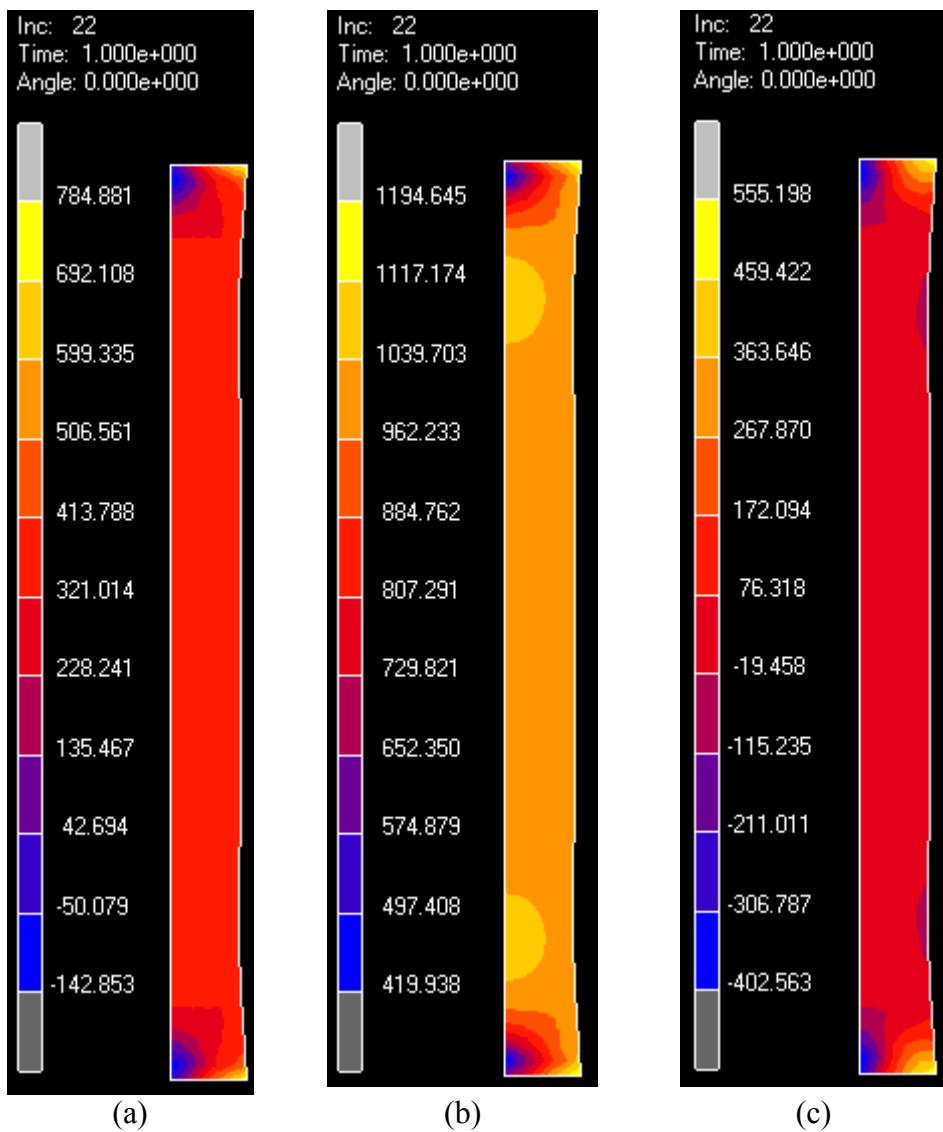


Figura 8 – Distribuições teóricas da tensão hidrostática (a), tensão axial (b) e tensão circunferencial (c), no momento da fratura, para o ensaio de tração.

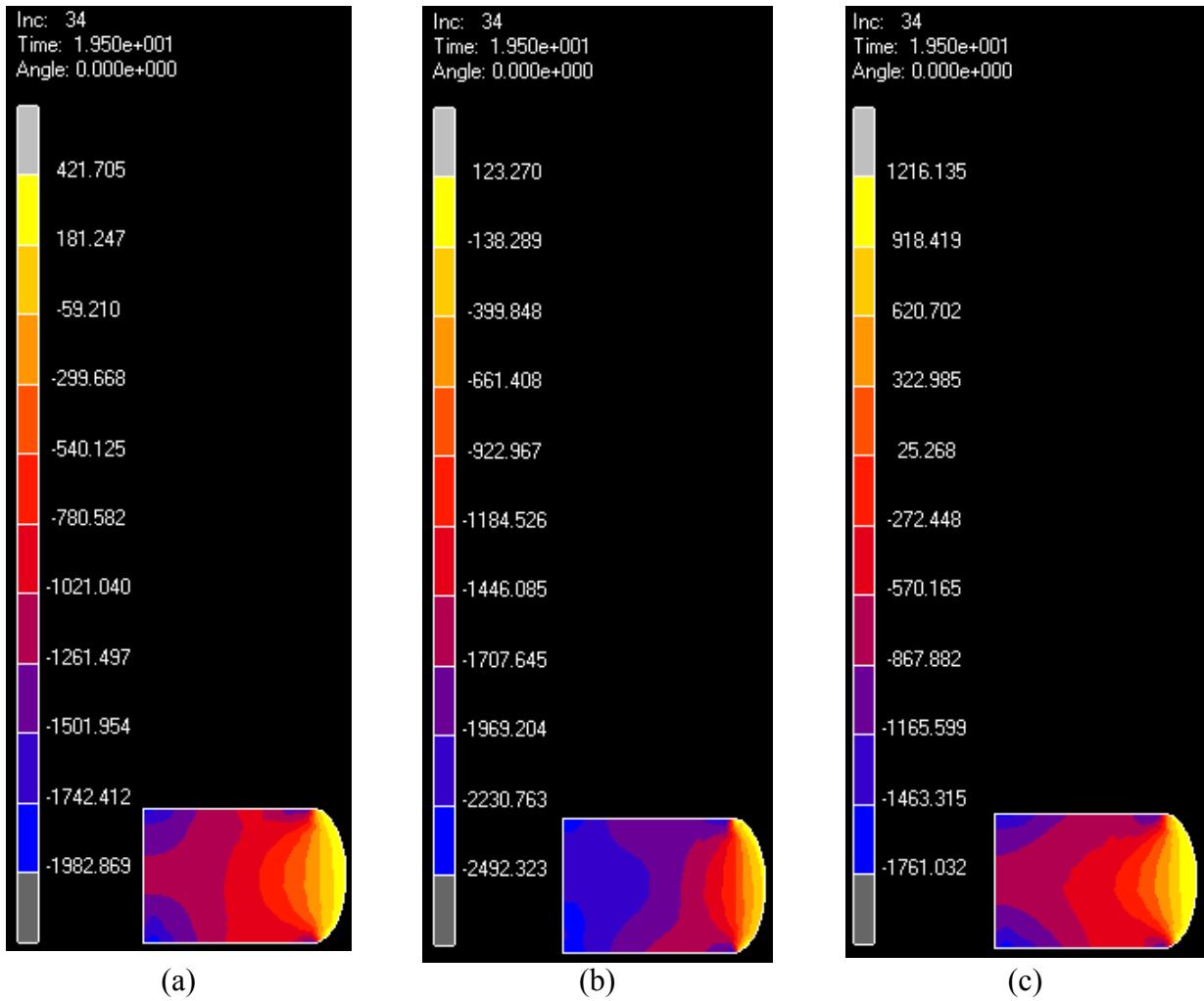


Figura 9 – Distribuições teóricas da tensão hidrostática (a), tensão axial (b) e tensão circunferencial (c), no momento da fratura, para o ensaio de tração.

Como pode ser observado, a região de dano máximo para cada um dos critérios coincide com a localização dos maiores valores da componente de tensão com a qual possuem dependência, conforme previamente mencionado. Confrontando os resultados numéricos e experimentais, foi possível constatar também a influência predominante da tensão máxima de tração sobre a ocorrência da fratura dútil nestes processos.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram avaliados dois critérios de dano para predição da fratura dútil, o modelo da tensão efetiva proposto por Lemaitre e o critério de Cockcroft & Latham. Para validação das previsões teóricas, foram realizados ensaios experimentais de tração e compressão em aço carbono.

Através de comparações entre os resultados numéricos com observações experimentais, constatou-se que o critério de Cockcroft & Latham foi o único capaz de prever com sucesso a posição do surgimento de trincas nos dois processos, enquanto que o modelo de Lemaitre detectou corretamente o local de fratura somente no corpo-de-prova submetido ao ensaio de compressão.

6. REFERÊNCIAS

- Behrens, A., Just, H., Landgrebe, D., 2000, "Prediction of cracks in multistage cold forging operations by finite-element-simulations with integrated damage criteria", Metal Forming 2000, Balkema, Rotterdam, pp. 245-252.
- Brigman, P.W, 1952, "Large plastic flow and fracture", McGraw-Hill, New York.
- Brozzi, P., DeLuca, B., Rendina, R., 1972, "A New Method for the Prediction of Formability Limits in Metal Sheets, Sheet Metal Forming and Formability", Proceedings of the Biennial Conference of the International Deep Drawing Research Group.
- Callister Jr., W.D., 2002, "Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução", 5^a Edição, LTC, Rio de Janeiro.
- Cockcroft, M.G., Latham, D.J., 1968, "Ductility and Workability of Metals", J. Inst. Metals, Vol. 96, pp. 33-39.
- Freudenthal, A.M., 1950, "The Inelastic Behavior of Metals", Wiley, New York.
- Hartley, P.F.R.H., & Pillinger, I., 1997, "Elastic-plastic finite-element modelling of metal forming with damage evolution", Advanced Methods in Materials Processing Defects, p. 135-142.
- Lemaitre, J., Chaboche, J.-L., 1990, "Mechanics of Solid Materials", New York, New Rochelle, Melbourne: Cambridge University Press.
- Reed-Hill, R.E., 1982, "Princípios de Metalurgia Física, 2^a Edição, Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro.

A comparative evaluation of the theoretical ductile fracture criteria

Augusta Cerceau Isaac Neta

Division of Aeronautics and Mechanics Engineering, ITA,
Marechal Eduardo Gomes Sq., 50 – 12228-900 – São José dos Campos – SP – Brazil
augusta@mec.ita.br

Lindolfo Araújo Moreira Filho

Division of Aeronautics and Mechanics Engineering, ITA,
Marechal Eduardo Gomes Sq., 50 – 12228-900 – São José dos Campos – SP – Brazil
lindolfo@mec.ita.br

Jánes Landre Júnior

Master's degree in Mechanical Engineering and Department of Mechatronics Engineering, PUC Minas,
D. José Gaspar Av., 500 – 30535-610 – Belo Horizonte – MG – Brazil
janes@pucminas.br

Abstract. The occurrence of ductile fracture is a major factor governing the limits of metal forming processes and, so, a lot of criteria have been developed for the prediction of its initiation. The aim of this paper is to investigate two criteria, particularly based on accumulative plastic energy and void coalescence models. For this, criteria by Cockcroft & Latham and Lemaitre were integrated into the FE software, MSC.SuperForm 2002, and its behavior was examined in comparison with experimental results. For the study of different conditions of loading, tensile and compressive tests of axisymmetric specimens were performed.

Keywords. Metal forming processes, finite elements method and ductile fracture.