

AValiação NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA FRATURA DÚCTIL EM PROCESSOS PREDOMINANTEMENTE TRATIVOS E COMPRESSIVOS

N. de Santi Jr.

Departamento de Desenvolvimento de Produto, Schulz S.A.,
Rua Dona Francisca, 6901, 89219-000 Joinville, Brasil. E-mail: nelson.santi@schulz.com.br

M. Vaz Jr.

Departamento de Engenharia Mecânica Universidade do Estado de Santa Catarina,
Campus Universitário, 89223-100 Joinville, Brasil. E-mail: m.vaz@joinville.udesc.br

G. O. Verran

Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica,
Campus Universitário, 89223-100 Joinville, Brasil. E-mail: dem2gov@joinville.udesc.br

Resumo: *A predição da fratura em materiais virgens na presença de um histórico tensão – deformação genérico tem sido um grande desafio para os pesquisadores. Apesar do fato de que a avaliação numérica da fratura dúctil em estados de tensão trativos ter sido razoavelmente bem descrita na literatura, a definição de um critério de falha, ou modelo material, capaz de prever o início da fratura em um caminho de tensão-deformação genérico é ainda objeto de intensa pesquisa. Este trabalho apresenta uma estratégia computacional para a predição do início da falha tanto em processos predominantemente trativos quanto compressivos, utilizando critérios de fratura associados a um modelo de dano. Adicionalmente também é apresentada uma comparação com outros critérios de fratura avaliados a posteriori. A formulação em elementos finitos é baseada em um modelo material elasto-plástico totalmente acoplado ao modelo de dano, enquanto que o algoritmo de integração utiliza um esquema implícito. São efetuados ensaios de tração e compressão visando a validação das predições numéricas.*

Palavras-chave: *elementos finitos, falha de materiais, mecânica do dano*

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a análise da fratura dúctil de materiais virgens no contexto de processos de conformação mecânica tem recebido uma atenção crescente devido ao rápido desenvolvimento de técnicas computacionais para problemas elasto(visco)-plásticos. A maioria dos trabalhos utiliza critérios de fratura dúctil e / ou modelos de dano contínuo. O primeiro tipo é baseado no cálculo *a posteriori* de indicadores de fratura enquanto que no segundo caso se assume que a degradação mecânica é uma componente intrínseca do modelo constitutivo do material.

Desde o trabalho pioneiro de Clift *et al.*⁽¹⁾ têm sido apresentadas análises comparativas numérico-experimentais para diversas operações de conformação mecânica^(2,3). Apesar das dificuldades de modelamento, a descrição acoplada entre a deformação inelástica e a degradação mecânica do material tem provado ser a melhor aproximação para o processo de fratura dúctil. Em geral, tais formulações são conhecidas como *Modelo de Dano Contínuo – CDM* e utilizam ou (a) conceitos de materiais porosos, propostos por Gurson⁽⁴⁾ e outros, ou (b) princípios de equivalência, discutidos inicialmente por Kachanov⁽⁵⁾ e desenvolvidos por Lemaitre⁽⁶⁾ e outros.

O presente trabalho foca a fratura dúctil para elasto-plasticidade finita para materiais descritos por modelos J_2 associados à abordagem de dano de Lemaitre ⁽⁶⁾. A solução por elementos finitos utiliza um esquema de integração implícito e a formulação do modelo de dano considera a degradação mecânica do material causada de forma distinta pelos estados de tensão trativos e compressivos. Propõe-se a combinação entre o CDM e os indicadores de fratura para a predição do início da falha em ensaios de tração e compressão. Além de uma avaliação experimental baseada em ensaios de tração e compressão, comparações com outros critérios de fratura calculados *a posteriori* também são apresentadas.

2. A MECÂNICA DO DANO CONTÍNUO

A *Mecânica do Dano Contínuo* se propõe a modelar a degradação mecânica progressiva para diferentes condições de carregamento através da introdução de novas variáveis de estado no modelo constitutivo do material. Na abordagem utilizada, o processo é governado pela variável de dano, D , a qual, fisicamente, representa a área líquida de uma superfície unitária cortada por um plano, corrigido pela presença de micro-vazios e micro-fraturas. Esta formulação assume que o dano é isotrópico e baseia-se na hipótese de equivalência de deformação ⁽⁶⁾, na qual o tensor tensão efetivo, $\tilde{\sigma}$, está relacionado às tensões do material não danificado, σ , através da relação

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D}. \quad (1)$$

A variável de dano pode assumir valores entre 0 (estado não danificado) e 1 (ruptura). Adicionalmente à relação constitutiva, função de escoamento, lei de fluxo e evolução das variáveis de encruamento ⁽⁷⁾, o problema elasto-plástico considera a lei de dano,

$$\dot{D} = \left(\frac{-Y}{r} \right)^s \dot{\epsilon}_p, \quad (2)$$

onde $\dot{\epsilon}_p$ é taxa de deformação plástica equivalente, r e s são parâmetros de dano e $(-Y)$ é a *taxa de liberação de energia de deformação de dano*.

É amplamente aceito que a fratura dúctil para estados de tensão trativos é causada pela nucleação, crescimento e coalescência de vazios, fenômenos estes naturalmente descritos pelos modelos CDM clássicos. Entretanto, a fratura dúctil em processos predominantemente compressivos pode ser causada pela conhecida “decoesão cisalhante” e o mecanismo de crescimento e coalescência de vazios no sentido anteriormente descrito parece desempenhar um papel secundário ⁽³⁾. Portanto, os efeitos causados pela *abertura de vazios e decoesão cisalhante / fechamento de vazios* foram introduzidos no modelo de dano original partindo do princípio de que as *tensões principais trativas e compressivas* impõem efeitos distintos na evolução do dano ⁽⁷⁾. Uma das primeiras tentativas de utilizar este conceito no contexto de conformação mecânica foi apresentada por Andrade Pires et al. baseado em um modelo material rígido-plástico ⁽⁸⁾ e utilizando um esquema de integração explícito das equações de equilíbrio ⁽⁹⁾. A presente abordagem decompõe as tensões principais em componentes trativas e compressivas, $\sigma = \sigma^+ + \sigma^-$, e redefine as tensões efetivas como,

$$\tilde{\sigma}^+ = \frac{\sigma^+}{1-h^+D} \quad \text{e} \quad \tilde{\sigma}^- = \frac{\sigma^-}{1-h^-D}, \quad (3)$$

onde h^+ e h^- são, respectivamente, os parâmetros de abertura de vazios e decoesão cisalhante. Portanto, uma nova taxa de liberação de energia de deformação de dano pode ser obtida como

$$(-Y) = \frac{h^-}{2E(1-h^-D)^2} \left[(1+\nu)\sigma^- : \sigma^- - \nu \text{tr}[\sigma^-]^2 \right] + \frac{h^+}{2E(1-h^+D)^2} \left[(1+\nu)\sigma^+ : \sigma^+ - \nu \text{tr}[\sigma^+]^2 \right] - \frac{\nu}{E} \frac{\sqrt{h^+}}{(1-h^+D)} \text{tr}[\sigma^+] - \frac{\nu}{E} \frac{\sqrt{h^-}}{(1-h^-D)} \text{tr}[\sigma^-] \quad , \quad (4)$$

onde E é o módulo de Young e ν é o coeficiente de Poisson. É relevante mencionar que a Equação (4) aproxima a definição original de Lemaitre ⁽⁶⁾ quando h^- e h^+ forem iguais a um (maiores discussões sobre as diferenças entre a formulação de Andrade Pires et al. ^(8,9) e a presente abordagem são apresentadas em Vaz Jr. et al. ⁽¹⁰⁾).

3. CRITÉRIOS DE FRATURA DÚCTIL

A literatura mostra uma grande variedade de princípios e modelos sobre os quais se baseiam critérios de fratura dúctil. Entretanto, modelos baseados no crescimento de vazios são postulados pela maioria dos autores, que os têm sugerido para processos predominantemente trativos. Este trabalho apresenta resultados para os critérios de fratura dúctil mostrados na Tabela 1, com ênfase no *trabalho de dano total* ⁽¹¹⁾,

Tabela 1. Critérios de fratura dúctil.

Modelo	Critério	Definição
Absorção de energia	Deformação plástica ⁽¹²⁾	$\int d\varepsilon_p$
	Trabalho plástico total ⁽¹³⁾	$\int \sigma_Y d\varepsilon_p$
Geometria do micro-vazio	McClintock ⁽¹⁴⁾	$\int \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2(1-n)} \sinh \left[\frac{\sqrt{3}}{2} (1-n) \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\sigma_Y} \right] + \frac{3}{4} \left(\frac{\sigma_a - \sigma_b}{\sigma_Y} \right) \right\} d\varepsilon$
	Rice e Tracey ⁽¹⁵⁾	$\int 0.283 \exp \left(\frac{3}{2} \frac{\sigma_H}{\sigma_Y} \right) d\varepsilon_p$
Mecanismo de crescimento do micro-vazio	Trabalho plástico trativo ⁽¹⁶⁾	$\int \sigma_1 d\varepsilon_p$
	Brozzo <i>et al.</i> ⁽¹⁷⁾	$\int \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1 - \sigma_H)} d\varepsilon_p$
	Norris <i>et al.</i> ⁽¹⁸⁾	$\int \frac{1}{(1-c\sigma_H)} d\varepsilon_p$
Modelo material	Oyane <i>et al.</i> ⁽¹⁹⁾	$\int \left[1 + \frac{1}{A} \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_Y} \right) \right] d\varepsilon_p$
	Dano desacoplado ⁽²⁰⁾	$\int (1-D)^{2s} dD$
	Trabalho total de dano ⁽¹¹⁾	$\int (-Y) dD$

4. EXEMPLOS E DISCUSSÕES

Esta seção ilustra a aplicação dos conceitos anteriores ao (i) ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos entre duas placas planas e (ii) ensaio de tração de corpos de prova com entalhe em “U”. A altura e raio dos corpos de prova para o ensaio de compressão são $H = 15 \text{ mm}$ e $r_0 = 5 \text{ mm}$, respectivamente. A geometria do corpo de prova com entalhe em “U” é apresentada na Figura 1 enquanto que as propriedades materiais usadas nas simulações de ambos os ensaios são dadas na Tabela 2. Maiores detalhes do procedimento experimental são descritos em De Santi Jr. ⁽²¹⁾.

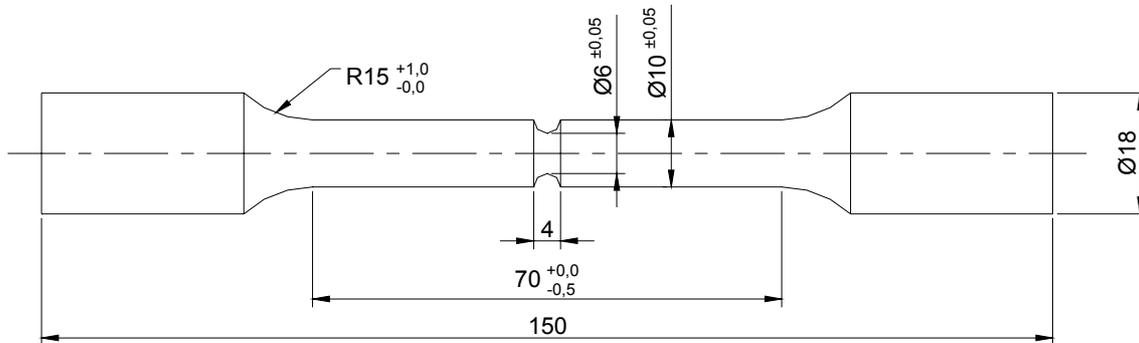


Figura 1. Corpo de prova de tração com entalhe em “U”.

Tabela 2. Propriedades materiais para o aço Carbono AISI 1045.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Módulo de Young	E	200 GPa
Coefficiente de Poisson	ν	0.3
Parâmetro de dano	s	1.0
Parâmetro de dano	r	3.9 MPa
Fechamento de vazios	h^-	0.001
Abertura de vazios	h^+	1.0
Tensão de escoamento		$1271.3(0.00648 + \varepsilon_p)^{0.2384}$ MPa

4.1. Ensaio de Compressão

A simulação do ensaio de compressão utilizando materiais elasto-plásticos, embora seja aparentemente simples, apresenta características típicas de uma operação de forjamento e exibe um estado de tensão predominantemente compressivo. Os corpos de prova foram submetidos a deformações progressivas e a existência de micro-fraturas foi verificada utilizando Microscópio Eletrônico de Varredura. A figura 2 ilustra os estágios de compressão do corpo de prova até o surgimento de micro-fraturas. Nesta figura são indicados os valores de compressão para os estágios intermediários $U_{tot} = 3,0 \text{ mm}$, $4,5 \text{ mm}$, $6,0 \text{ mm}$ e $7,5 \text{ mm}$.

Observou-se, inicialmente, a formação de um padrão difuso de micro-fraturas junto ao equador do cilindro. À medida que o abaulamento aumenta, as micro-fraturas crescem, como ilustrado na Figura 3(a), levando à falha total do material. A Figura 3(b) mostra que não ocorreram micro-fraturas junto à superfície superior do mesmo corpo de prova.

As simulações são resumidas na Figura 4, que apresenta o Índice de Fratura, II_{max} , ao longo do raio na região do entalhe (linha de simetria R-R'). O critério baseado no trabalho total de dano apresenta o maior gradiente próximo do local de início da fratura, enquanto que os indicadores baseados na *deformação plástica equivalente*⁽¹²⁾, *trabalho plástico total*⁽¹³⁾, *Rice e Tracey*⁽¹⁵⁾ e *Norris et al.*⁽¹⁸⁾ falham na predição do local correto do início da falha. Uma melhor percepção do sucesso ou não da indicação do início do processo de fratura pode ser vista na Figura 5.

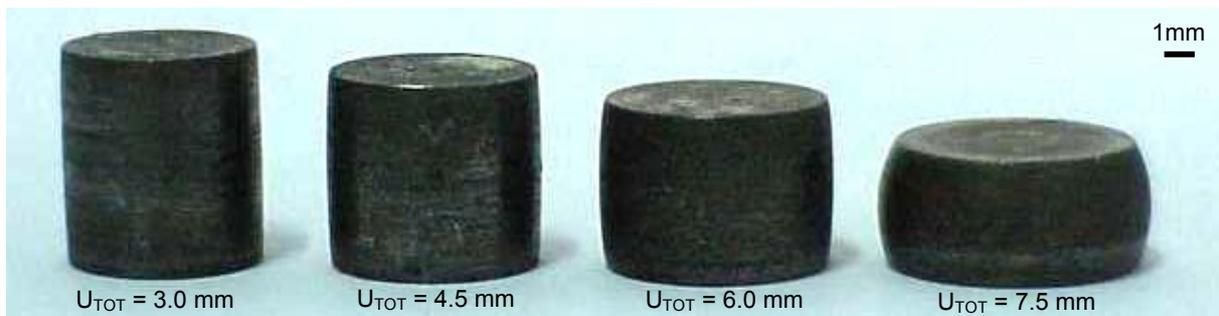
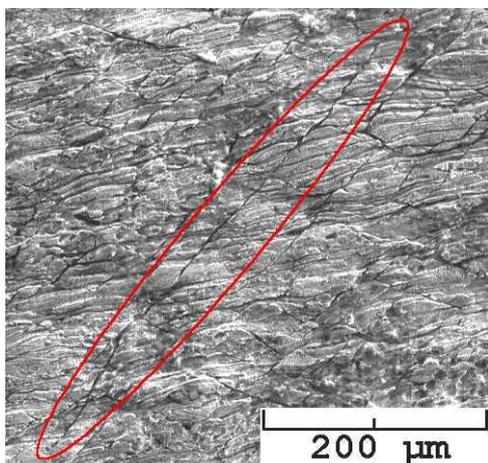


Figura 2. Estágios de deformação progressiva do corpo de prova.

(a) Micro-fraturas no equador.



(b) Ausência de micro-fraturas junto à superfície superior.

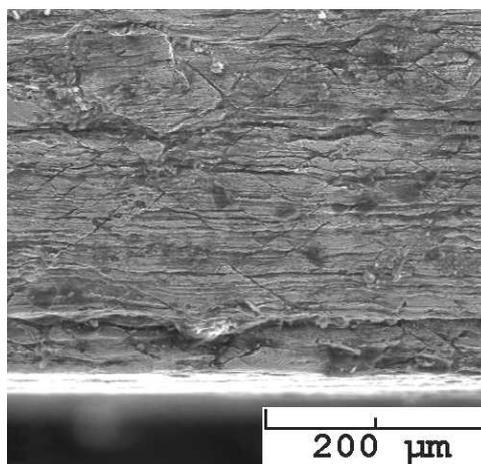


Figura 3. Micrografias do corpo de prova – ensaio de compressão.

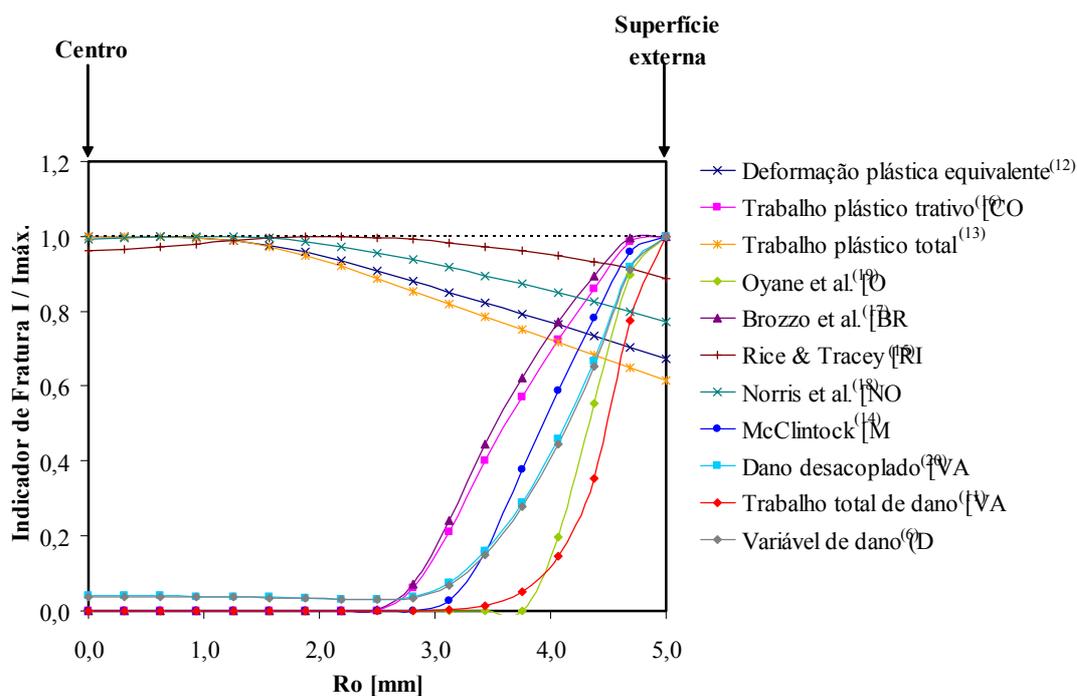


Figura 4. Índice de fratura ao longo da linha de simetria R-R'.

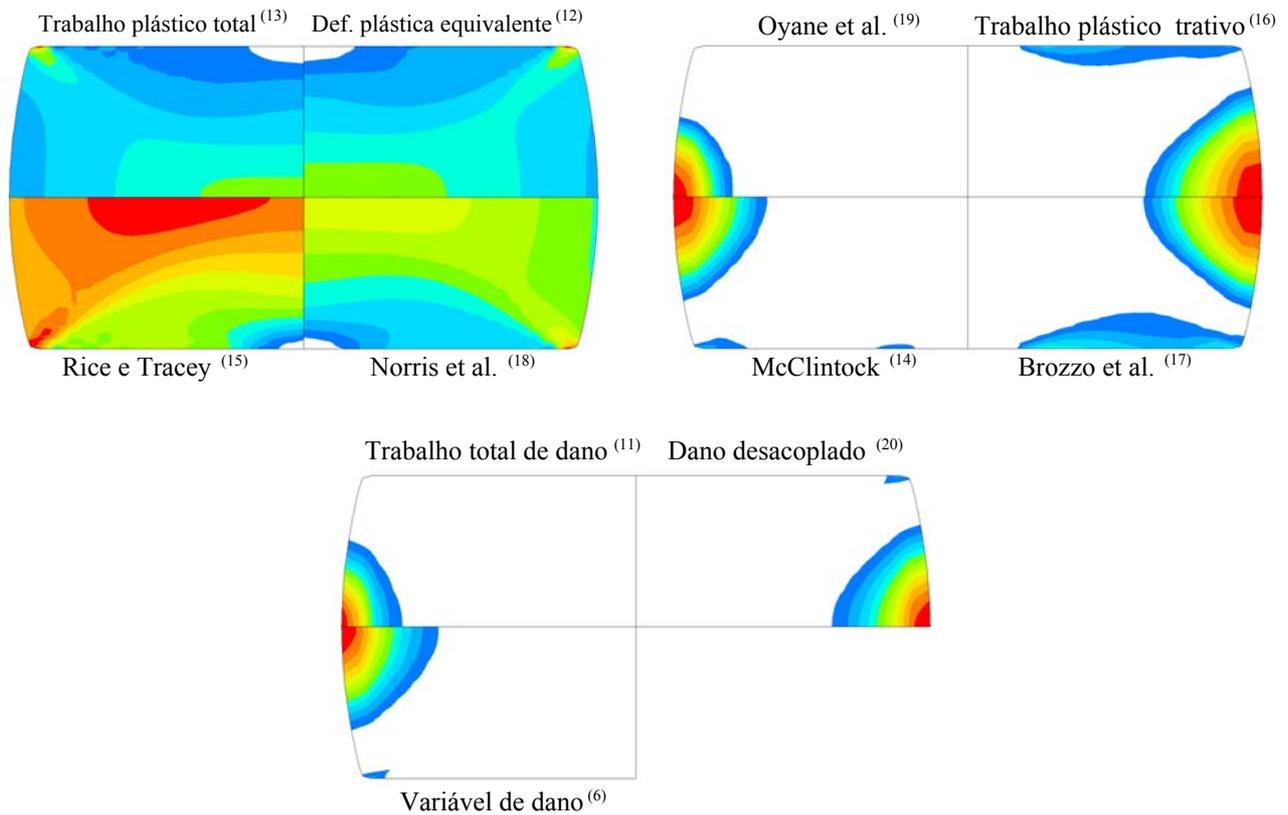
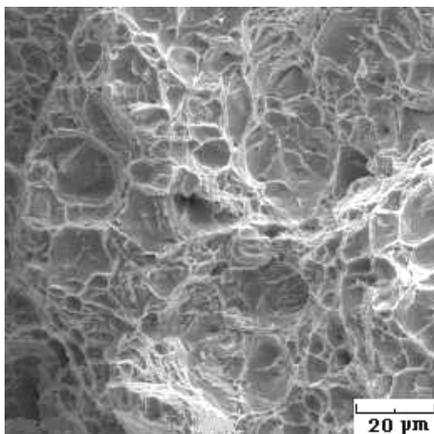


Figura 5. Distribuição do índice de fratura I / I_{max} para o corpo de prova do ensaio de compressão.

4.2. Ensaio de Tração

A predição da fratura sob um estado de tensão predominantemente trativo foi avaliada através de ensaios de tração de corpos de prova com entalhe em “U”. Esta configuração geométrica favorece uma distribuição de tensões e deformações tal que a fratura tem início no centro do corpo de prova (apesar da grande deformação plástica junto à superfície externa). A presença dos ressaltos e rebaixos claramente observados na superfície fraturada mostrada na Figura 6(a) indica que o início da falha foi causado pela nucleação e crescimento de vazios. Neste caso, à medida que o corpo de prova é tracionado e vazios são nucleados, a área resistente real diminui, levando a uma eventual falha catastrófica do material remanescente. A análise micrográfica mostrou micro-planos de clivagem, indicando que fratura do tipo frágil ocorreu próximo à superfície externa do corpo de prova, apresentada na figura 6(b).

(a) Centro do corpo de prova.



(b) Superfície externa.

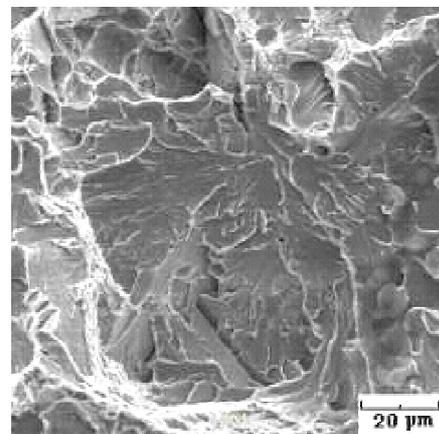


Figura 6. Micrografia da superfície fraturada do corpo de prova de tração.

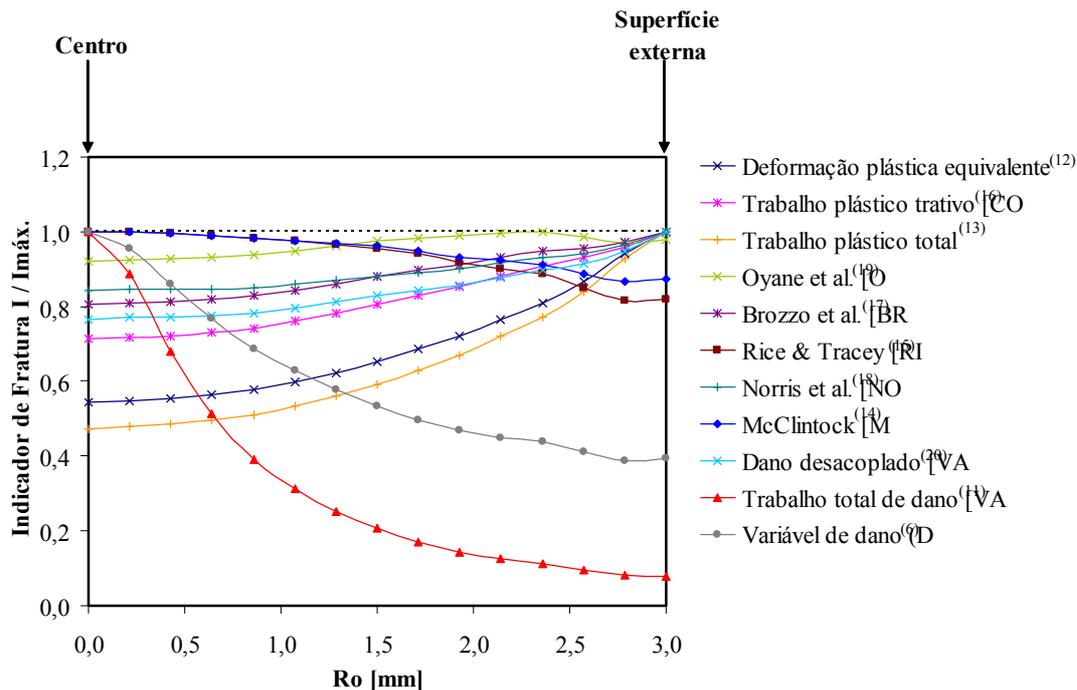


Figura 7. Índice de falha ao longo da linha de simetria R-R'.

A Figura 7 resume as simulações numéricas do ensaio de tração. Os resultados para o índice de fratura calculado ao longo da linha de simetria R-R' indicam que os critérios *variável de dano*⁽⁶⁾, *trabalho total de dano*⁽¹¹⁾, *McClintock*⁽¹⁴⁾ e *Rice e Tracey*⁽¹⁵⁾ apresentaram uma indicação correta do local de início da fratura. Ressalta-se que os critérios *trabalho plástico trativo*⁽¹⁶⁾, *Brozzo et al.*⁽¹⁷⁾, *Oyane et al.*⁽¹⁹⁾ e *dano desacoplado*⁽²⁰⁾, apesar de terem obtido sucesso na predição do início da fratura no ensaio de compressão, apresentaram uma predição inaceitável neste caso. A Figura 8 ilustra a distribuição do índice de falha junto ao entalhe, a partir da qual se percebe o maior gradiente resultante do critério baseado no *trabalho total de dano*.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho enfoca a predição da fratura dúctil de materiais virgens submetidos a estados de tensão predominantemente trativos e compressivos. A formulação em elementos finitos utiliza um modelo de dano totalmente acoplado associado com um esquema de integração implícito. É apresentada uma extensão da formulação de dano original que inclui os efeitos de *fechamento de vazios / decoesão cisalhante* e *abertura de vazios*. Evidência experimental baseada em microscopia eletrônica de varredura mostrou que a nova abordagem foi capaz de prever com sucesso o início da fratura dúctil tanto no ensaio de tração quanto no ensaio de compressão.

REFERÊNCIAS

1. CLIFT, S.E., HARTLY, P., STURGES, C.E.N., ROWE, G.W. Fracture prediction in plastic deformation process. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 32, 1990, p. 1-17.
2. GUPTA, S., REDDY, N. V., DIXIT, P.M. Ductile fracture prediction in axisymmetric upsetting using continuum damage mechanics. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 141, 2003, p. 256-265.

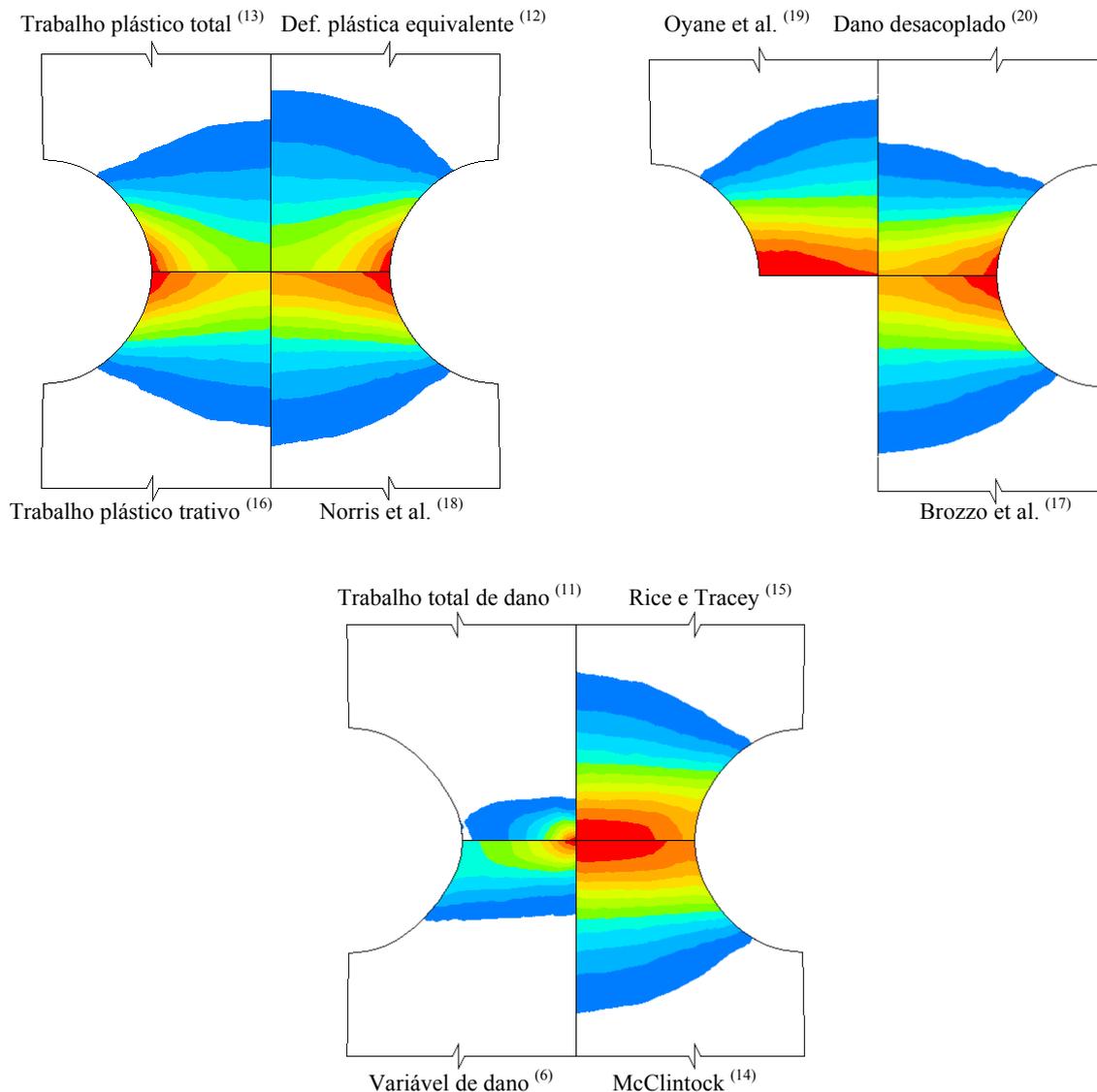


Figura 8. Distribuição do índice de fratura I / I_{max} para o corpo de prova do ensaio de tração.

3. BAO, Y., WIERZBICKI, T., A comparative study on various ductile crack formulation criteria. **Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME**, v. 126, 2004, p. 314-324.
4. GURSON, A.L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I – yield criteria and flow rules for porous ductile media. **Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME**, v. 99, p. 2-15, 1977.
5. KACHANOV, L.M. Time to the rupture process under the creep conditions. **Ivzkestiya Akademii Nauk. SSR, Otdel Technicheskikh Nauk**, v. 8, p. 21-31, 1958.
6. LEMAITRE, J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture. **Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME**, v. 107, p. 83-89, 1985.
7. LEMAITRE J. **A course on damage mechanics**. Heidelberg: Springer, 1996.
8. ANDRADE PIRES, F.M., CESAR DE SÁ, J.M.A., COSTA SOUSA, L., NATAL JORGE, R.M. Numerical modelling of ductile plastic damage in bulk metal forming, **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 45, p. 273–294, 2003.

9. ANDRADE PIRES, F.M., SOUZA NETO, E.A., OWEN, D.R.J., On the finite element prediction of damage growth and fracture initiation in finitely deforming ductile materials. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 193, p. 5223–5256, 2004.
10. VAZ JR., M., DE SANTI JR., N., VERRAN, G. O., SAOUZA NETO, E. A. Further studies on assessing ductile fracture using continuous damage coupled to an elasto-plastic material model. In: D.R.J. Owen, E. Oñate, B. Suárez (Eds.), **Computational Plasticity VIII - Fundamentals and Applications**, CIMNE, Barcelona, p. 355-359, 2005.
11. VAZ JR., M., OWEN, D.R.J. Aspects of ductile fracture and adaptive mesh refinement in damaged elasto-plastic materials. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 50, p. 29-54, 2001.
12. GILLEMOT, L.F. Criterion of crack initiation and spreading. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 8, p. 239-253, 1976.
13. FREUDENTHAL, A.M. **The Inelastic Behaviour of Engineering Materials and Structures**. John Wiley & Sons, New York, 1950.
14. MCCLINTOCK, F.A. A criterion for ductile fracture by growth of holes. **Journal of Applied Mechanics, Transaction of the ASME**, v. 35, p. 363-371, 1968.
15. RICE, J.R., TRACEY, D.M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. **Journal of Mechanics and Physics of Solids**, v. 17, p. 201-217, 1969.
16. COCKCROFT, M.G., LATHAM, D.J. Ductility and workability of metals. **Journal of the Institute of Metals**, v. 96, p. 33-39, 1968.
17. BROZZO, P., DELUCA, B., RENDINA, R.A. A new method for the prediction of the formability limits of metal sheets. In: Chr. Veerman (Ed.), **Proceedings of the 7th Biennial Conference on International Deep Drawing Research Group**, IDDRG, Amsterdam, p. 3.1-3.5, 1972.
18. NORRIS, D.M., REAUGH, J.E., MORAN, B., QUIÑONES, D.F. A plastic-strain mean-stress criterion for ductile fracture. **Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME**, v. 100, 1978, p. 279-286.
19. OYANE, M., SATO, T., OKIMOTO, K., SHIMA, S. Criteria for Ductile Fracture and their Applications. **Journal of Mechanical Working Technology**, v. 4, p. 65-81, 1980.
20. VAZ JR., M. **Computational Approaches to Simulation of Metal Cutting Processes**. 1998. 266 f. Thesis (Ph.D. in Civil Engineering) - University of Wales, Swansea, 1998.
21. DE SANTI JR., N. **Avaliação Numérico-Experimental da Fratura Dúctil em Processos predominantemente Trativos e Compressivos**. 2006. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2006.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF DUCTILE FRACTURE IN TENSILE AND COMPRESSIVE-DOMINANT PROCESSES

N. de Santi Jr.

Departamento de Desenvolvimento de Produto, Schulz S.A.,
Rua Dona Francisca, 6901, 89219-000 Joinville, Brasil. E-mail: nelson.santi@schulz.com.br

M. Vaz Jr.

Departamento de Engenharia Mecânica Universidade do Estado de Santa Catarina,
Campus Universitário, 89223-100 Joinville, Brasil. E-mail: m.vaz@joinville.udesc.br

G. O. Verran

Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica
Campus Universitário, 89223-100 Joinville, Brasil. E-mail: dem2gov@joinville.udesc.br

***Abstract.** Failure prediction in fracture-free materials under a general stress-strain path has posed a great challenge to researchers. Despite the fact that numerical assessment of ductile failure under tensile stress states has been reasonably well described in the literature, a definition of a failure criterion or modelling approach capable to successfully predict fracture onset under a general stress-strain path has still been object of intense research. This work presents a computational strategy to predict ductile failure onset in both compressive and tensile-dominant processes using fracture criteria based on damage models. The finite element formulation accounts for an elasto-plastic, fully-coupled damage material model and the solution algorithm uses an implicit time integration scheme. The numerical predictions are validated against experimental results for tensile and upsetting tests.*

***Keywords.** finite elements, material failure, damage mechanics*