

PREDIÇÃO DA FRATURA DÚCTIL EM ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Bruno Reis Morais

Engenharia Mecatrônica, IPUC - PUC Minas,
Av. D. José Gaspar, 500 – 30535-610 - Belo Horizonte – MG – Brasil
moraisbr@hotmail.com

Augusta Cerneau 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.ita.br

Jánes Landre Júnior

Engenharia Mecatrônica, IPUC - PUC Minas,
Av. D. José Gaspar, 500 – 30535-610 - Belo Horizonte – MG – Brasil
janes@pucminas.br

Resumo. Para a maioria dos processos, a forjabilidade é determinada pela ocorrência da fratura dúctil e, dessa forma, limitações são impostas pelo aspecto da superfície ou por trincas internas. Muitos critérios têm sido desenvolvidos para a predição da fratura dúctil; alguns deles são baseados somente em dados experimentais, enquanto outros foram desenvolvidos a partir de fundamentos teóricos. O presente trabalho tem o propósito de realizar um estudo comparativo da influência de duas variáveis do processo – especificamente, o atrito interfacial e a razão entre altura e diâmetro – na posição e instante de surgimento de trincas em corpos de prova cilíndricos. Com este intuito, o critério proposto por Cockcroft & Latham foi integrado ao software de elementos finitos MSC.SuperForm 2002 e seu comportamento avaliado diante de observações experimentais, através do ensaio de compressão simples que pretende simular o forjamento a frio.

Palavras-chave: fratura dúctil, atrito interfacial, razão altura diâmetro, elementos finitos.

1. INTRODUÇÃO

A alguns anos a industria metal mecânica tem passado por consideráveis transformações tanto de caráter tecnológico quanto estrutural, sendo que uma das mais significativas é o aumento do campo de utilização do processo de forjamento. Atualmente observa-se que tal processo vem substituindo outros na fabricação de diversos tipos de peças, o que vem trazendo grandes benefícios para as industrias de modo geral.

Alem de ser um dos mais antigos processos de fabricação conhecidos pelo homem, o forjamento apresenta alta qualidade e custo reduzido. Quando feito a frio o processo confere às peças melhor estrutura de material pois dureza, tensão de escoamento e de ruptura são aumentados. Alem disso,

por apresentar pouca ou nenhuma perda de material, em sua grande maioria as peças não precisam passar por operações subsequentes, o que contribui para o aumento da produtividade do processo.

Em vista do contínuo desenvolvimento pelo qual o forjamento vem passando, este artigo tem como objetivo estudar o comportamento de uma de suas características fundamentais; a forjabilidade, que de certo modo é determinante na execução do processo. Definida como uma propriedade do material que resolve o quanto este pode ser trabalhado sob determinada condição, a forjabilidade é, de maneira geral limitada pela ocorrência de um fratura dúctil na peça. Dessa forma, o estabelecimento de critérios que possibilitem determinar a influência de variáveis do processo no surgimento de uma fratura é de grande importância, uma vez que perdas de peças ou componentes podem ser evitadas.

Para o estudo de critérios matemáticos que possam prevenir o aparecimento da fratura foi usado o ensaio de compressão para simular o processo de forjamento livre. Foram verificados a influência do coeficiente de atrito e a razão entre altura e diâmetro do corpo no ensaio de compressão.

2. CONCEITOS BÁSICOS

Há dois conceitos fundamentais neste artigo que devem ser contemplados para permitir o perfeito entendimento do problema. O primeiro deles é o método matemático de solução chamado de elementos finitos, e o segundo é o critério de avaliação de dano formulado por *Cockcroft & Latham*.

2.1. O método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos é uma ferramenta matemática surgida nos anos 50 e que inicialmente era utilizada na resolução de problemas de engenharia civil. A partir dos anos 60 o método começou a ser aplicado à conformação, sendo as simulações planas e axissimétricas voltadas para a solução de problemas elasto-plásticos, de compressões simples e extrusão.

A essência do método está na divisão o domínio contínuo, que pode ser uma peça ou outra estrutura em subdomínios, os chamados elementos. A conexão dos elementos é então feita por meio dos nós, sendo que cada nó possui um número finito de graus de liberdade, Fig.(1). Para que o método possa fornecer a resposta, a contribuição de cada elemento no qual o domínio foi dividido é somada, estabelecendo-se novamente o nível do contínuo, KOAYASHI et al, (1989).

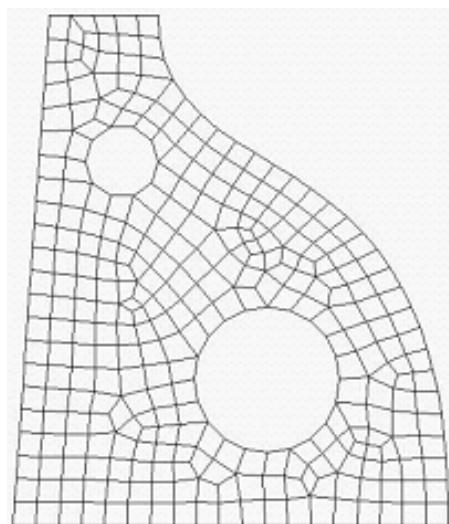


Figura 1. Exemplo de malha de elementos finitos

A possibilidade de se estudar qualquer tipo de peça, independente da geometria ou das condições de contorno entre material e ferramenta torna o método dos elementos finitos extremamente versátil, o que justifica o fato do método ser o mais utilizado atualmente.

2.2 O critério de dano de Cockcroft & Latham

A trabalhabilidade dos metais é, de maneira geral, definida como a quantidade máxima de deformação que o material pode sofrer sem que haja a ocorrência da fratura. Porém, na prática, tal quantidade não é facilmente determinável uma vez que, dependendo do processo e da sua ductilidade básica, a fratura do material pode ocorrer mesmo para pequenas deformações.

A necessidade de se prever o surgimento da fratura dúctil dos metais fez com que critérios que determinassem o seu início fossem desenvolvidos. Objetivando estabelecer uma relação entre a situação proposta pelo critério e a situação em estudo, os modelos existentes pretendem prever a fratura por meio de condições fenomenológicas particulares ou por meio de um valor crítico de um grandeza.

Considerado atualmente como um dos mais conceituados, o critério de Cockcroft & Latham considera que o principal elemento para o surgimento da fratura são as tensões de tração, COCKROFT et al (1968). Para o critério, a fratura do material irá acontecer quando, em uma determinada região do corpo, a energia de tração por unidade de volume atingir um certo valor, Eq. (1).

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \sigma_1 d\bar{\varepsilon} = C_C \quad (1)$$

Sendo $\bar{\varepsilon}_f$ a deformação de fratura, $\bar{\varepsilon}$ a deformação efetiva e σ_1 a máxima tensão de tração desenvolvida em um ponto.

A eficácia do critério de Cockcroft & Latham, em relação a outros critérios tem sido comprovada em diversos trabalhos, LANDRE et al (2003), o que justifica inicialmente a sua utilização no desenvolvimento do artigo. Além disso, um outro fator determinante para tal escolha é o fato do critério já ser um parâmetro incorporado ao programa de simulação; *MSC.SuperForm 2002*.

3. METODOLOGIA

3.1. Avaliação do atrito

A verificação da influência do atrito no surgimento da fratura no corpo de prova foi avaliada comparando-se o ensaio de compressão do corpo com a simulação numérica. Após o ensaio, avaliou-se numericamente qual foi o valor de atrito presente entre as placas da prensa e as extremidades do corpo de prova, tomando então esse resultado como base para o estudo da variável razão altura diâmetro.

Confeccionado a partir de um barra de aço 1045 trefilada, o corpo ensaiado possuía 12.60mm de diâmetro e 12.60mm de altura, sendo polido em suas extremidades superior e inferior.

A formulação de atrito utilizada para a análise das condições propostas foi a de Coulomb, em que a tensão provocada pela força de atrito é proporcional à tensão proveniente da força normal, Eq. (2).

$$\tau_F = \mu \sigma_N \quad (2)$$

Nos ensaios numéricos realizados adotou-se o modelo axissimétrico rígido-plástico de análise em que apenas a metade do corpo, no sentido longitudinal, é representada. A malha em elementos finitos foi construída com 338 elementos e 378 nós, sendo que para o material, foi adotado a curva de fluxo do aço 1045 disponível no banco de dados programa. O critério de remalhamento adotado foi o automático.

A obtenção do coeficiente de atrito para o ensaio experimental foi feita comparando-se as dimensões do corpo de prova conformado com as dimensões dos corpos de prova obtidos nas simulações numéricas. Essas dimensões se referem ao valor dos diâmetros superior, equatorial e inferior dos corpos, como mostrado na Fig. (2).

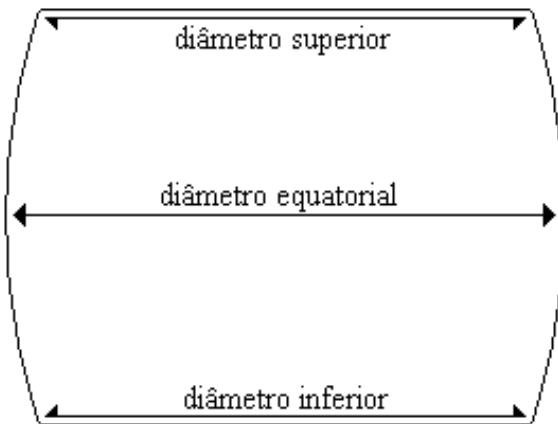


Figura 2. Posição de tomada dos diâmetros nos corpos de prova

Como o atrito interfacial é responsável pelo maior ou menor escoamento das extremidades do corpo, determinando então o valor dos diâmetros finais desse, foi admitido que o coeficiente de atrito que gerasse as dimensões mais próximas das do corpo experimental seria escolhido. Associado a esse coeficiente o valor de dano de Cockroft & Latham encontrado na simulação passaria a servir de referência na avaliação da razão altura diâmetro.

3.2. Avaliação da razão altura diâmetro

Nos processo de conformação os fatores geométricos do sistema são os principais responsáveis pela definição dos mecanismos de deformação do componente que se quer fabricar. A modificação da geometria do material ou da ferramenta permite alterar esses mecanismos, tornando possível a eliminação de defeitos, a diminuição do tempo de fabricação, ou a redução das forças de trabalho.

Para determinar que influência a geometria do material exerce sobre a formação da trinca em um processo de conformação, foram simulados ensaios de compressão de corpos cilíndricos, sendo que cada um possuía uma razão altura diâmetro diferente. Uma vez que a simulação para a razão unitária já foi feita, foram testados então as razões 0.75 e 1.25. As simulações realizadas para a avaliação da razão altura diâmetro também foram construídas a partir do modelo axissimétrico rígido-plástico, utilizando a curva de fluxo do aço 1045 e o critério de remalhamento automático. Para o atrito adotou-se o valor estabelecido na avaliação anterior, como também o valor de dano encontrado.

A partir do momento em que o dano crítico foi inserido no programa, os ensaios numéricos de compressão foram processados. Durante os ensaios quando o corpo de prova atingir o valor de dano crítico estabelecido anteriormente será considerado que houve a fratura do mesmo. Nesse ponto será medida a redução sofrida pelo corpo, permitindo determinar o que a mudança da altura acarreta no surgimento da trinca.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No ensaio experimental de compressão foi observado que o início de surgimento da trinca se deu para uma redução de 20%. Como mostrado na Figura (3), a trinca se formou no sentido longitudinal da superfície livre do corpo de prova, indicando que nessa região os níveis de tensão ultrapassaram o limite de ruptura.



Figura 3. Trinca no corpo de prova do ensaio de compressão

Os coeficiente de atrito utilizados nas simulações numéricas foram 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 e 0.5, sendo que o valor 0.2 gerou o resultado menos discrepante. A justificativa para tal afirmação está no fato de que as dimensões encontradas do corpo de prova numérico para esse valor de atrito foram, na média, muito próximas das do corpo experimental, como pode ser visto na Tab. (1).

Tabela1. Dimensões e valores de dano dos corpos de prova dos ensaios numérico e experimental

Tipo de ensaio	Numérico					Experimental
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
coefic. de atrito						
dimensão						X
Diâmetro superior (mm)	14.00	13.80	13.60	13.50	13.40	13.90
Diâmetro equatorial (mm)	14.68	14.86	14.90	14.86	14.84	15.12
Diâmetro inferior (mm)	14.00	13.80	13.60	13.50	13.60	13.80
Dano encontrado	0.041	0.070	0.087	0.086	0.085	X

Os valores de dano encontrados para cada condição de atrito revelaram que o surgimento da trinca nos corpos é bastante dependente dessa variável. Para todas as simulações o surgimento da trinca se deu na região periférica do corpo, estando de acordo com o encontrado experimentalmente. As figuras (4) e (5) mostram os resultados das simulações, apresentando os valores de dano crítico obtidos por cada corpo.

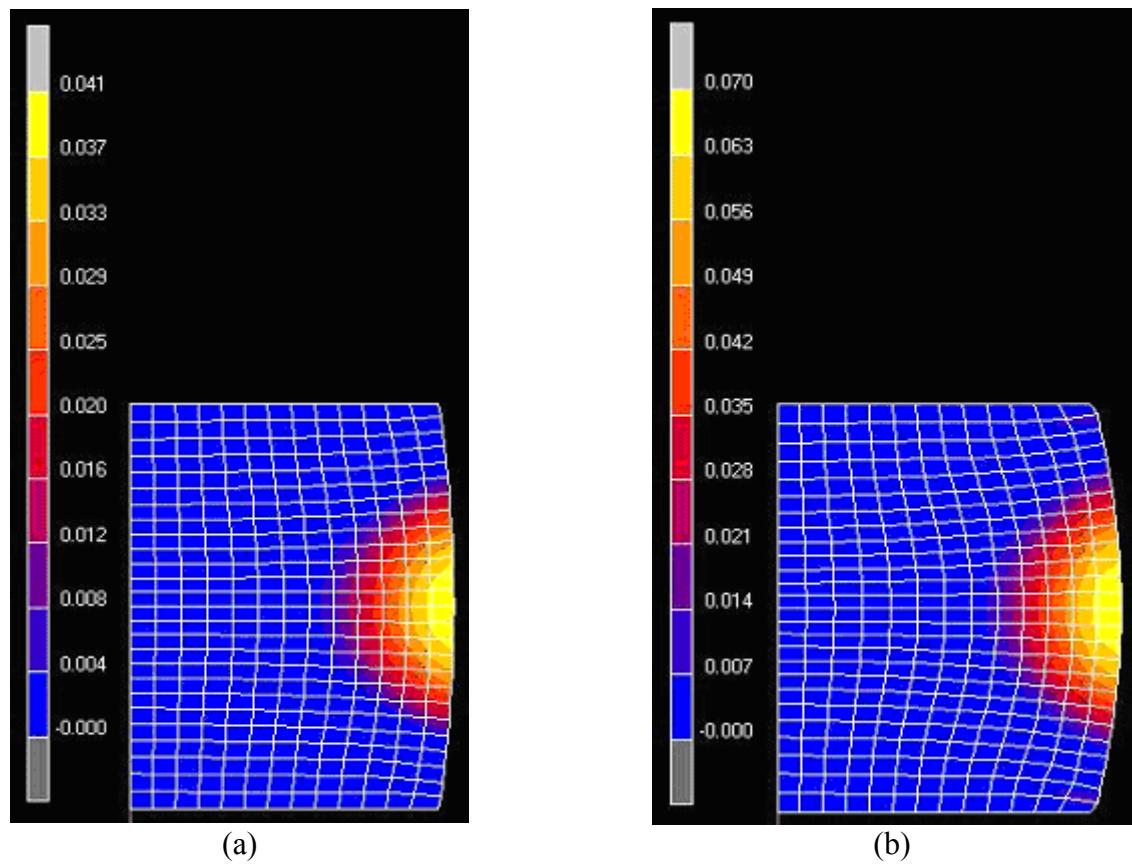


Figura 4. Valor e posição do dano para os corpos com atrito 0.1 (a) e 0.2 (b)

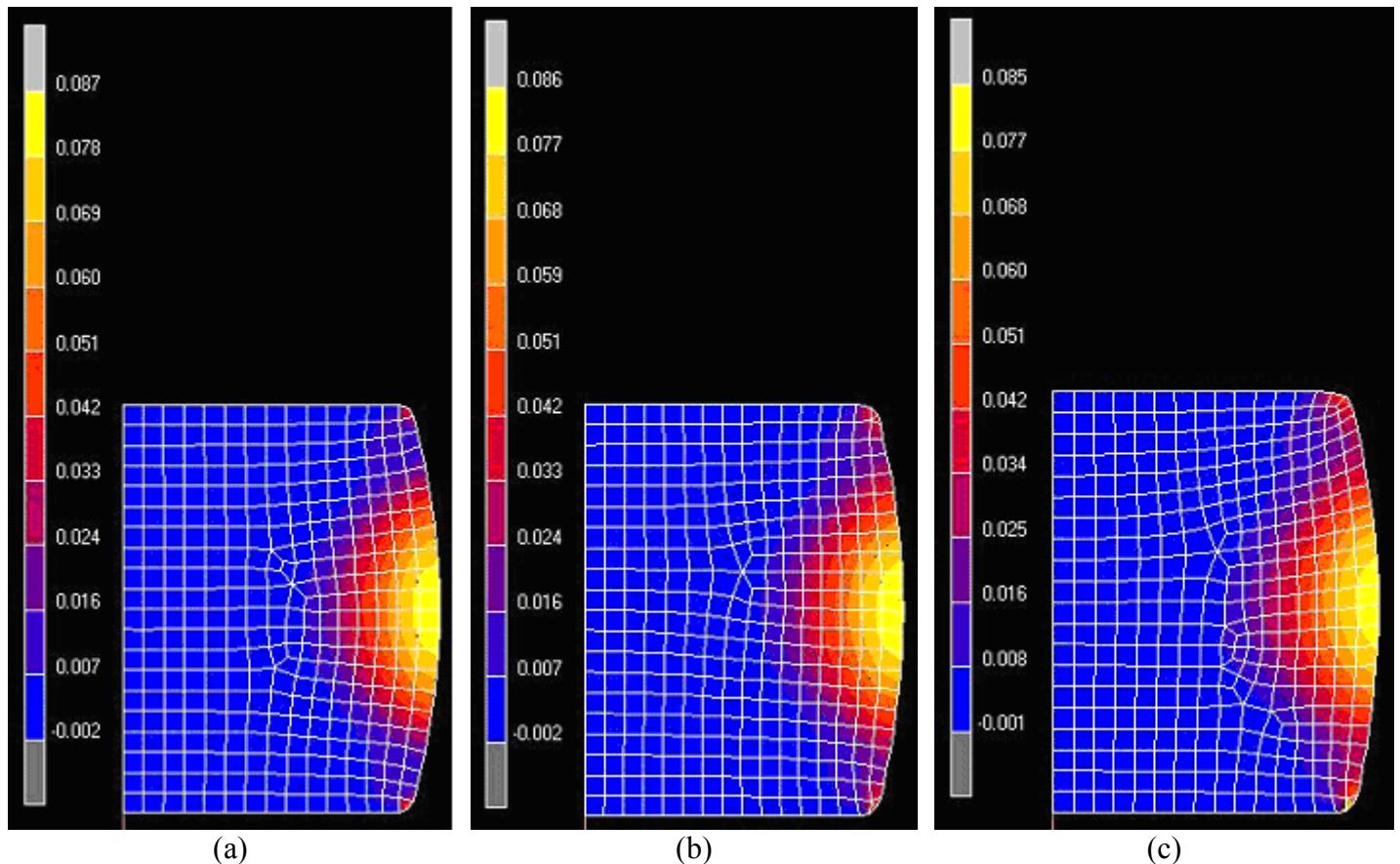


Figura 5. Valor e posição do dano para os corpos com atrito 0.3 (a), 0.4 (b) e 0.5 (c)

Foi observado que quanto maior fosse a dificuldade do corpo em escorregar sobre as placas da máquina, mais claro se tornava o fenômeno de barrilamento. A associação desse fenômeno com o surgimento das trincas fica clara na medida em que é analisado o escoamento interno do material.

Durante a compressão, uma vez que o corpo não pode se expandir radialmente com toda a sua superfície lateral, devido ao atrito nas extremidades, as porções de material dessas regiões começa a escoar para o equador, Fig. (6). Dessa forma, o contínuo processo de compressão faz com que cada vez mais a deformação circumferencial do corpo aumente, até que em um determinado momento os níveis de tensão alcançados pela periferia do corpo provoquem o seu rompimento. Portanto quanto maior for o atrito aplicado ao corpo no processo de compressão, maior será a sua deformação circumferencial, e por conseqüência mais provável será da trinca aparecer. A maior deformação dos corpos, em conseqüência do aumento do atrito, provoca o aumento da energia gasta para rompe-los, aumentando assim o valor do dano crítico.

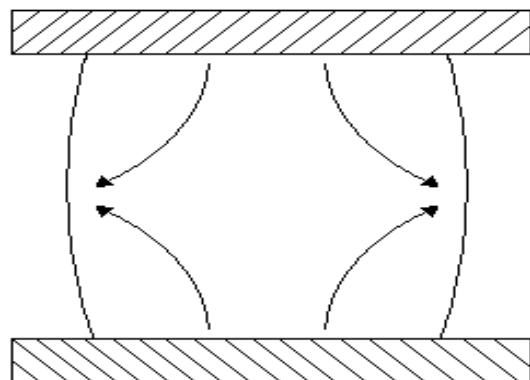


Figura 6. Fluxo de material das extremidades para o equador no corpo de prova

Como o valor do coeficiente de atrito para o ensaio experimental foi admitido como 0.2, tomou-se como referência para o dano crítico o valor 0.070. Dessa forma, a análise numérica da variável razão altura diâmetro no surgimento da trinca foi realizada utilizando esses dois valores.

Para a razão de 0.75 construindo-se uma malha com 247 elementos e 280 nós. O diâmetro de 12.60mm do corpo de prova experimental foi mantido, ficando agora a altura com 9.45mm. Nessas configurações, o surgimento da trinca se deu para uma redução de 25%. Já a razão de 1.25 foi testada com uma malha de 416 elementos e 462 nós, sendo que para um mesmo diâmetro de 12.60mm, a altura assumiu o valor 15.75mm. No ensaio, constatou-se que após 28% de redução houve o aparecimento da trinca.

A observância desses valores indica que o aparecimento da trinca se dá mais tarde para os corpos com a razão altura diâmetro diferente de 1. O aspecto dos corpos no momento de surgimento da trinca pode ser visto na Fig. (7).

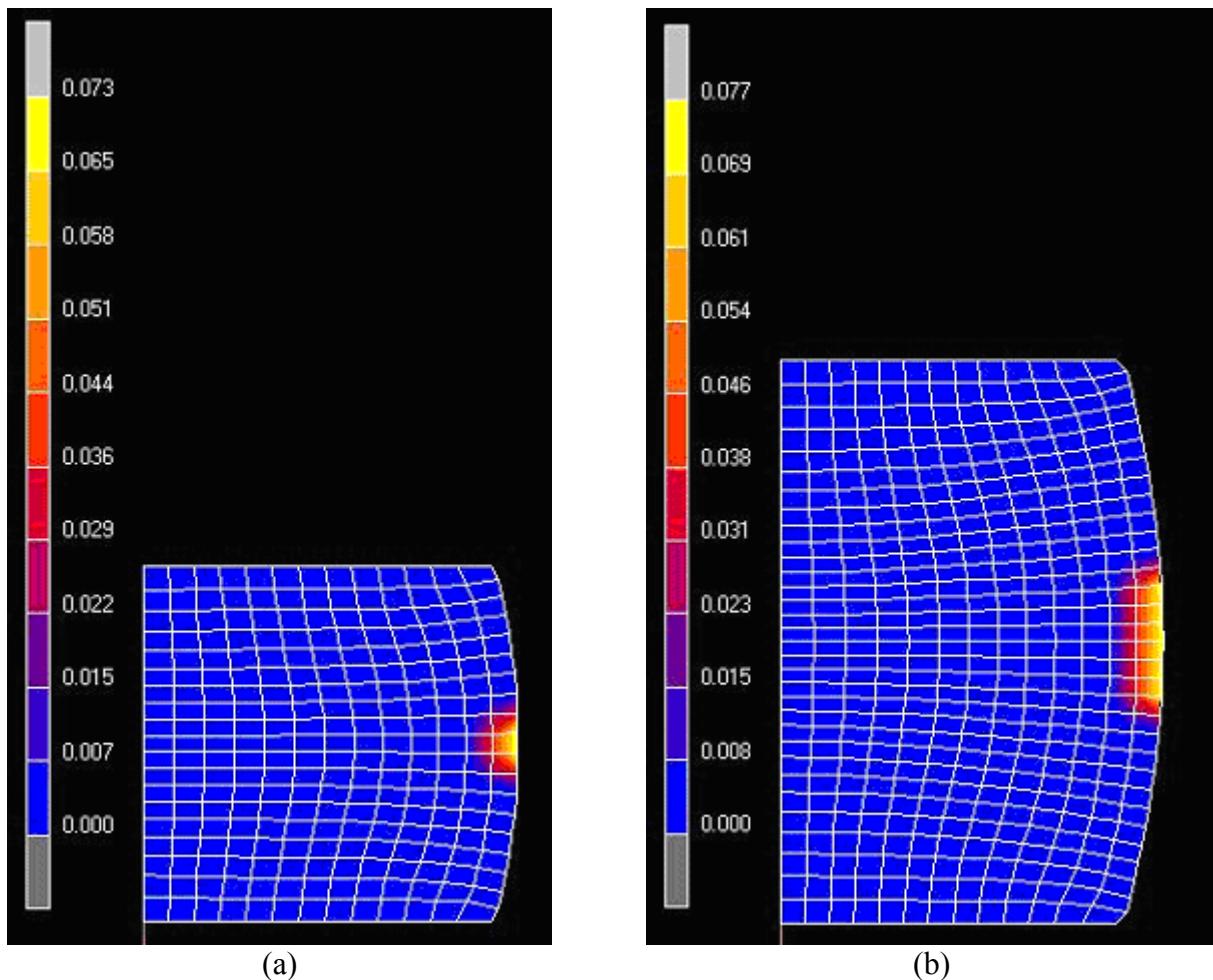


Figura 7. Instante e posição do surgimento da trinca para os corpos com razão 0.75 (a) e 1.25 (b)

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados pode-se concluir que o surgimento da fratura nos corpos de prova está diretamente ligada à condição de atrito impostas em suas extremidades. Foi observado que, analisando o escoamento interno do material, quanto maior fosse a dificuldade do corpo em escorregar sobre as placas da máquina, maior seria o efeito de barrilamento, e por consequência mais facilmente se daria a fratura. Quanto a razão altura diâmetro constatou-se que o surgimento da trinca no material se dá mais tarde para as razões diferentes da unidade. Tal fato pode ser associado há uma falta de homogeneidade na geometria, uma vez que a forma quadrada pode ser considerada mais estável.

5. REFERÊNCIAS

Kobayashi, S., Oh, S.-K., Altan,T., 1989, “Metal Forming and The Finite Element Method”, Oxford University Press, New York.

Landre Junior, J, 2003, “Avaliação de Critérios de Dano na Identificação de Trincas no Processo de Forjamento Usando o Método dos Elementos Finitos”, Relatório de Projeto de Pesquisa FIP, PUC-Minas, 2003.

Cockcroft, M.G., Latham, D.J., 1968, “Ductility and the Workability of Metals”, Journal of the Institute of Metals, Vol. 96, pp. 33-39.

PREDICTION OF DUCTILE FRACTURE IN UPSETTINGS TESTS

Bruno Reis Moraes

Mecatronics Engineering, IPUC - PUC Minas,
D. José Gaspar Av., 500 – 30535-610 - Belo Horizonte – MG – Brazil
moraismbr@hotmail.com

Augusta Cerceau Isaac Neta

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

Jánes Landre Júnior

Mecatronics Engineering, IPUC - PUC Minas,
D. José Gaspar Av., 500 – 30535-610 - Belo Horizonte – MG – Brazil
janes@pucminas.br

Abstract. For the most processes, the forgibility is defined by the event of ductile fracture end this way, restrictions are imposed by surface aspect or by internal fractures. Several criterions have been developed for predict the ductile fracture; some of them are based only in experimental data, when others were developed from theoretical fundaments. The present article have the propose of realize a comparative study of the influence of two variables of the process – specifically, the interfacial friction and the height diameter rate – on the position and moment of fracture rise in cylindrical specimens. With this aim, the Cockcroft & Latham criterion was integrated to finite element software MSCSuperForm2002 and its behavior evaluated in front of experimental observations, through of upsetting test that claim simulate the cold forging.

Keywords: ductile fracture, interfacial friction, height diameter rate, finite elements.