

INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO PUNÇÃO NA LOCALIZAÇÃO DA REGIÃO DE FALHA

Rogério Helvídio Lopes Rosa

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFETMG, Av. Amazonas 5253, Campus I, B. Hte, MG, 30480-000, hlopes@deii.cefetmg.br

Antônio Eustáquio de Melo Pertence

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos 6627, Campus da Pampulha, B. Hte., Minas Gerais, Cep. 31270-901, pertence@demec.ufmg.br

Antônio Ferreira Ávila

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos 6627, Campus da Pampulha, B. Hte., Minas Gerais, Cep. 31270-901

Haroldo Béria Campos

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos 6627, Campus da Pampulha, B. Hte., Minas Gerais, Cep. 31270-901

Paulo Roberto Cetlin

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Rua Espírito Santo 35, Belo Horizonte, Minas Gerais, Cep. 31130-030, pcetlin@demet.ufmg.br

Resumo: Neste trabalho, a localização e o deslocamento da região de falha para chapas de aço inoxidável austenítico AISI 304 foram avaliadas variando a velocidade do punção na modelagem e simulação numérico-computacional do ensaio Nakazima. Os aplicativos numérico-computacionais utilizados LS-Dyna™ e LS-Post™ baseiam-se em Métodos de Elementos Finitos – análise explícita. Os resultados obtidos por modelagem e simulação indicam concordância qualitativa.

Palavras-chave: Simulação, Modelagem, Métodos de Elementos Finitos, Conformação de Chapas, Formabilidade.

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho será verificada a Influência da velocidade do punção ou da taxa de deformação na ocorrência da falha ou no formato das DLE's através de aplicativos computacionais de modelagem e simulação numérico-computacional baseados em Métodos de Elementos Finitos, tendo como objetivo mais amplo a validação consistente deles. Os conceitos e definições de conformação mecânica de chapas são fundamentais para a análise e conclusão sobre os resultados gerados pelos aplicativos numérico-computacionais.

As definições de formabilidade são variadas e muitas vezes associadas a determinados processos de estampagem e a um grande número de variáveis. A formalidade pode ser definida como o nível de deformação que pode ser alcançado em um processo particular sem que seja criada uma condição indesejável (Dieter, 1984).

As variáveis do processo são aquelas que prescrevem a natureza da aplicação do esforço externo, como a geometria da matriz e do punção, pressões no prensa-chapas e freios, taxa temporal

de deformação, alinhamento da matriz e punção, temperatura, lubrificação, velocidade do punção, etc. (Gosh et al, 1984).

As variáveis do material determinam o tipo de resposta que o mesmo apresenta sob a ação de esforço externo. Entre estas, podem ser citadas a composição química, a estrutura cristalina, os elementos de liga, a presença de outras fases cristalinas, o tamanho de grão, a textura cristalográfica, a subestrutura celular de deslocações, entre outras (Rauch, 1994).

A fratura é o defeito mais comum ligado a formabilidade na conformação (Gosh et al, 1984). A falha de uma chapa metálica sujeita a estiramento geralmente ocorre pelo surgimento de uma estrição localizada bem delineada na superfície do material. A estrição localizada não deve ser confundida com estrição difusa, que precede a primeira e normalmente leva a fratura (Hosford & Caddell, 1993).

Cada tipo de material pode ser trabalhado até um certo grau de deformação antes do surgimento de estrição localizada ou fratura. Esse estado de deformação é normalmente expressado pela combinação das deformações principais na forma de uma deformação maior (ε_1) e uma deformação menor (ε_2). A forma mais largamente utilizada para definir o limite de deformação antes da falha é o Diagrama Limite de Estampagem (DLE). Os DLE's caracterizam o valor máximo de deformação maior que pode ser imposta ao material para cada valor de deformação menor sem que haja falha.

Um DLE típico para metais está ilustrado na Fig. (1). Os pontos acima da curva expressam estados de deformação que levam à falha do material (fratura), enquanto os que estão abaixo expressam estados de deformação sem falha, considerados seguros. Certas regiões podem ser destacadas a partir da linha onde $\varepsilon_2 = 0$ (deformação plana) e da marca circular de referência no esboço.

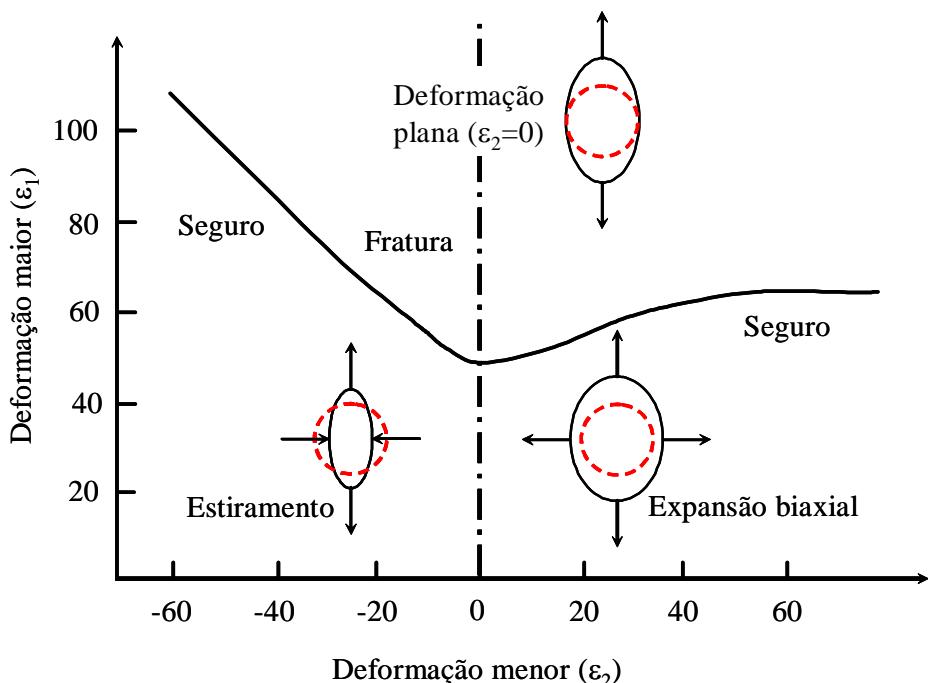


Figura 1. Diagrama limite de estampagem DLE.

Os diagramas são um importante instrumento para a avaliação da formabilidade dos metais e constituem uma grande ferramenta, particularmente na indústria automobilística, para o estudo de problemas na linha de produção (Hosford & Caddell, 1993).

O ensaio de Nakazima consiste em estirar esboços em forma de tiras de diversas larguras (de 25 a 200 mm) através do movimento de um punção hemisférico ao penetrar uma matriz, conforme representado na Fig. (2). O movimento do punção é interrompido no instante de tempo em que ocorrer a falha ou fratura no esboço, indicando término do ensaio. Estas tiras não estarão restritas

pela presença ou atuação de freios. Tiras mais estreitas equivalerão a estados de deformação do ensaio de tração. Normalmente, no ensaio de Nakazima, a força submetida pelo prensa-chapas é de 178 kN e o punção desloca-se à velocidade constante de 0,42 mm/s (Dieter, 1984). Para abranger um amplo espectro de trajetórias de deformação tanto para o lado direito quanto esquerdo do Diagrama Limite de Estampagem (DLE), variações de largura das chapas são realizadas, além de variação da condição de atrito (lubrificação) entre punção e esboço.

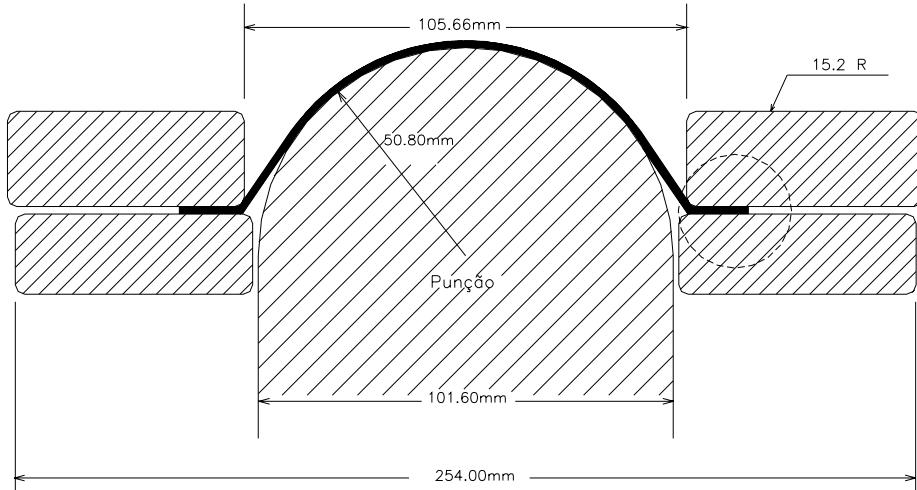


Figura 2. Representação esquemática do ensaio Nakazima.

A simulação numérica do processo de estampagem é uma área científica de grande complexidade, devido fundamentalmente à não-linearidade do processo motivada pelo comportamento cinemático não-linear, devido aos grandes deslocamentos, rotações e deformações; pelo comportamento não-linear dos materiais, devido à característica inelástica da deformação, ao comportamento anisotrópico e a evolução da anisotropia com a deformação plástica; pelas características não-lineares das "fronteiras", devido à interação (contato e atrito) produzida entre os corpos (chapa e ferramentas) ao longo da superfície de contato, que muda durante o processo e que é desconhecida à "priori" (Santos, 1993).

O aplicativo utilizado para modelagem e simulação foi o LS-Dyna™ 3D versão 960 (versão educacional) presente no Laboratório de Compósitos/Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. O aplicativo utilizado para tratamento e correlação de dados foi o LS-Post™. Os dados gerados pelo LS-Dyna™ no formato binário são interpretados através do LS-Post™ possibilitando a correlação gráfica entre parâmetros e variáveis de processo associados à modelagem e simulação. Além disso, possibilita a observação dinâmica da simulação através de figuras com a evolução temporal do modelo geométrico (frames). Portanto cada figura representa o aspecto ou estado do modelo geométrico para cada instante de tempo entre o início e o término da simulação.

A formulação explícita dinâmica é utilizada pelo LS-Dyna™ e está fundamentada na equação de movimento de Cauchy como a base para a formulação dos elementos finitos. O equilíbrio dinâmico de um corpo pode ser escrito conforme a Eq. (1) (Zienkiewicz, 1977; Duarte, 1997; Assan, 1999). A solução da equação de movimento na forma de elementos finitos é obtida usando um esquema de integração do tempo explícita: conhecida a solução na etapa n, a solução na etapa n+1 é obtida.

$$\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial t} + \rho \frac{d}{dt} b = f \quad (1)$$

em que

σ - tensor tensão de Cauchy;
 x - vetor posição;
 ρ - massa específica;
 b - vetor força do corpo por unidade de massa.

A utilização de elementos finitos de casca reduz a "dimensão" do problema, em relação à utilização de elementos sólidos (Chou, 1996). Estes elementos apresentam bons resultados ao nível da distribuição das tensões e deformações, sendo normalmente a deformação segundo a espessura obtida através da lei da incompressibilidade (Rebelo, 1989). Os elementos de casca são os mais utilizados atualmente na simulação dos processos de conformação plástica de chapas, principalmente pelo seu bom compromisso tempo de cálculo/desempenho (Belytschko et al, 1979).

2. DESENVOLVIMENTO

Análise comparativa entre os resultados gerados por modelagem e simulação numérico-computacional e os resultados obtidos por métodos e processos experimentais foi realizada considerando os estados de deformação correspondentes.

Os resultados numérico-computacionais foram obtidos por modelagem e simulação através de métodos de elementos finitos (análise explícita) do ensaio Nakazima, utilizando os aplicativos computacionais LS-Dyna™ e LS-Post™.

Os resultados experimentais foram levantados a partir de pesquisa bibliográfica na literatura atual.

Os parâmetros e variáveis mecânicos do material utilizados na presente análise estão relacionados ao aço inoxidável austenítico AISI 304 e são apresentados na Tab. (1).

Tabela 1. Dados Experimentais do Aço Inox 304

Massa específica, (kg/mm^3)	$8,00 \cdot 10^{-6}$
Módulo de Young, (GPa)	188
Coeficiente de Poisson	0,30
Tensão de Escoamento, (GPa)	0,275
Limite de Resistência (GPa)	0,636
Modulo Tangente, (GPa)	0,914
Espessura da Peça, (mm)	0,70
Coeficiente de Anisotropia	1,0725
Coeficiente de Encruamento	0,41

(Campos et al, 2004)

Para a modelagem geométrica do ensaio foram consideradas quatro partes mecânica e geometricamente distintas, apresentadas a seguir.

* Punção hemisférico (punch), de diâmetro de 100,0 mm;

* Matriz (die) com raio de quina de 6,35 mm;

* Prensa-chapas (holder);

* Esboço (blank) com dimensão circular, de diâmetro de 160,0 mm.

A Figura 3 representa o modelo geométrico o ensaio Nakazima, considerando uma chapa circular, onde estão identificadas as quatro partes mencionadas anteriormente.

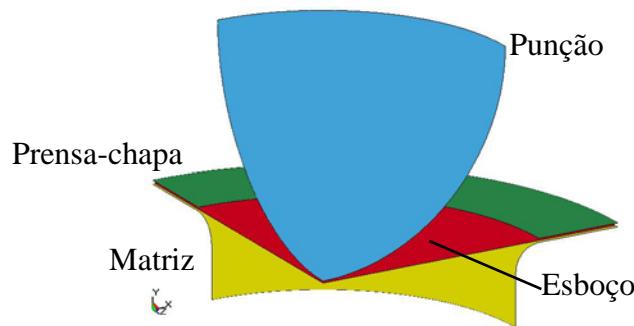


Figura 3. Modelo geométrico do ensaio Nakazima.

Como referência inicial para a modelagem do ensaio Nakazima utilizou-se do trabalho de Honecker & Mattiason (1989). No aplicativo de modelagem e simulação, foram utilizados o material Tipo 39 e os elementos de casca do tipo Belytschko-Tsay com cinco pontos de integração na espessura (Belytschko & Tsay, 1983; Belytschko et al, 1992). O material Tipo 39 modela o comportamento elástico e plástico transversalmente anisotrópico para materiais que possuem o diagrama limite de estampagem (DLE) prévio. Os parâmetros e características necessários nesta modelagem são a massa específica, o módulo de Young, o coeficiente de Poisson, o limite de escoamento, o módulo tangente, o coeficiente de anisotropia normal, os valores experimentais de tensão-deformação efetivas da curva de escoamento e de deformação maior e menor do diagrama limite de estampagem (DLE) (Campos et al, 2004). O modelo geométrico considerado para a simulação é correspondente à quarta parte simétrica do sistema, o que contribui para um tempo de processamento aceitável e um maior controle das variáveis e dos resultados.

O ensaio Nakazima foi modelado e simulado para diferentes condições de processo. As condições de atrito (lubrificação) entre punção e esboço foram adotadas considerando o coeficiente de atrito nulo e 0,15. As condições de deslocamento do punção foram adotadas considerando a velocidade do punção de 0,21 mm/s, 0,42 mm/s e 0,84 mm/s. A demais condições, parâmetros e características foram mantidas (Dieter, 1984).

3. RESULTADOS

Na Tabela (2) são apresentados os resultados de determinados parâmetros das regiões (elementos numéricos) de falha obtidos por modelagem e simulação para as diferentes condições de processo adotadas.

Tabela 2. Resultados das regiões de falha para diferentes condições adotadas.

Deslocamento do punção (mm/s)	Condição de atrito	Elementos numéricos		Deformação maior (%)	Deformação menor (%)	Redução de espessura (%)	
0,21	0,00	7	1	34,6	33,5	32,4	33,4
0,42		2	1	35,9	34,8	33,6	34,7
0,84		8	1	33,3	32,4	31,3	32,2
0,21	0,15	36	8	34,2	24,6	12,4	19,9
0,42		35	30	33,8	31,7	13,3	12,4
0,84		30	36	33,4	33,1	13,2	11,8

Nas Figuras (4), (5), (6), (7), (8) e (9) estão representados os perfis do esboço com a localização das regiões de falha para as diferentes condições de atrito (lubrificação) e de velocidade de deslocamento do punção adotadas.

INOX304 SA MAT39 VELO 21
TEMPO = 20,5 s

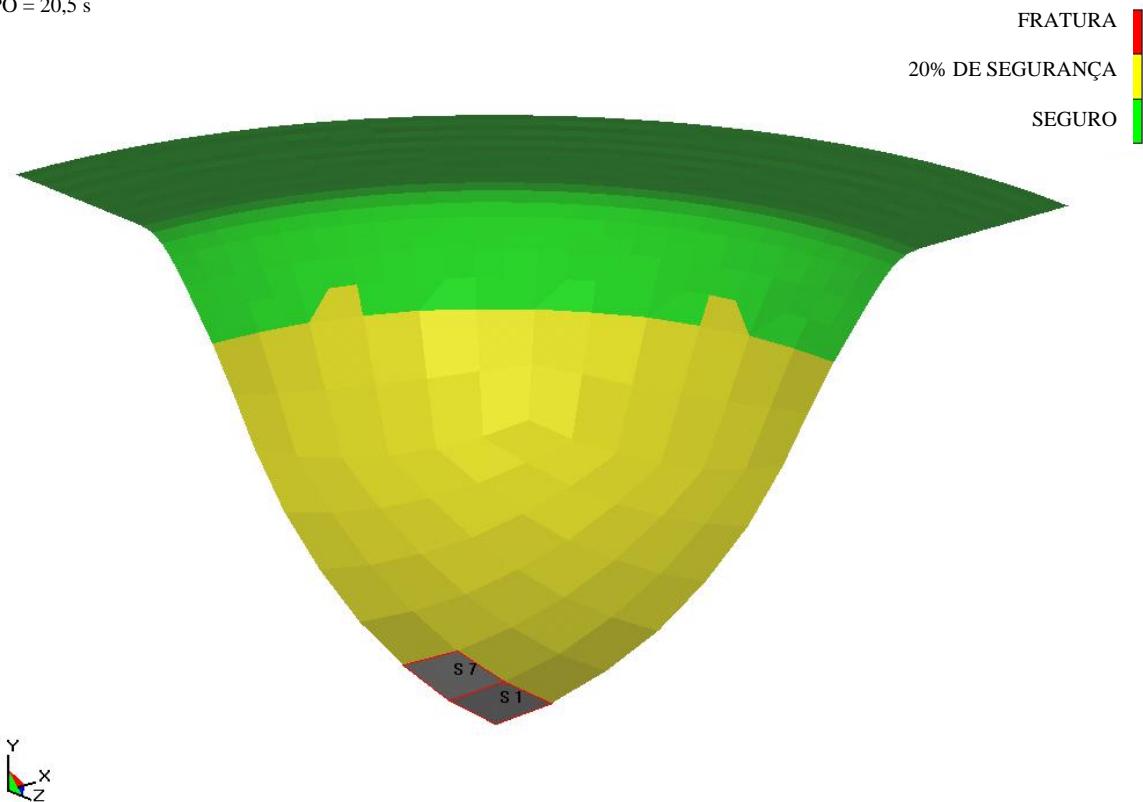


Figura 4. Região de falha para velocidade do punção de 0,21 mm/s e atrito nulo.

INOX304 CA MAT39 VELO 21
TEMPO = 19,5 s

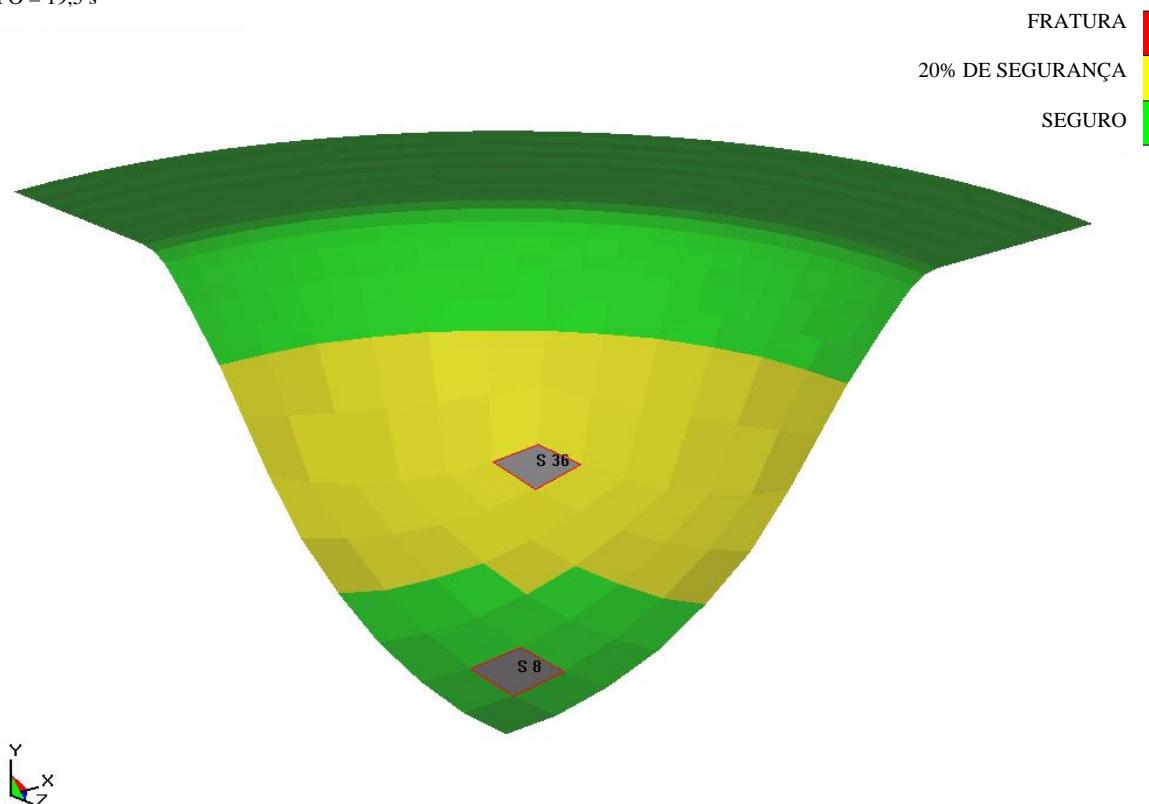


Figura 5. Região de falha para velocidade do punção de 0,21 mm/s e atrito de 0,15.

INOX304 SA MAT39 VELO 42
TEMPO = 10,5 s

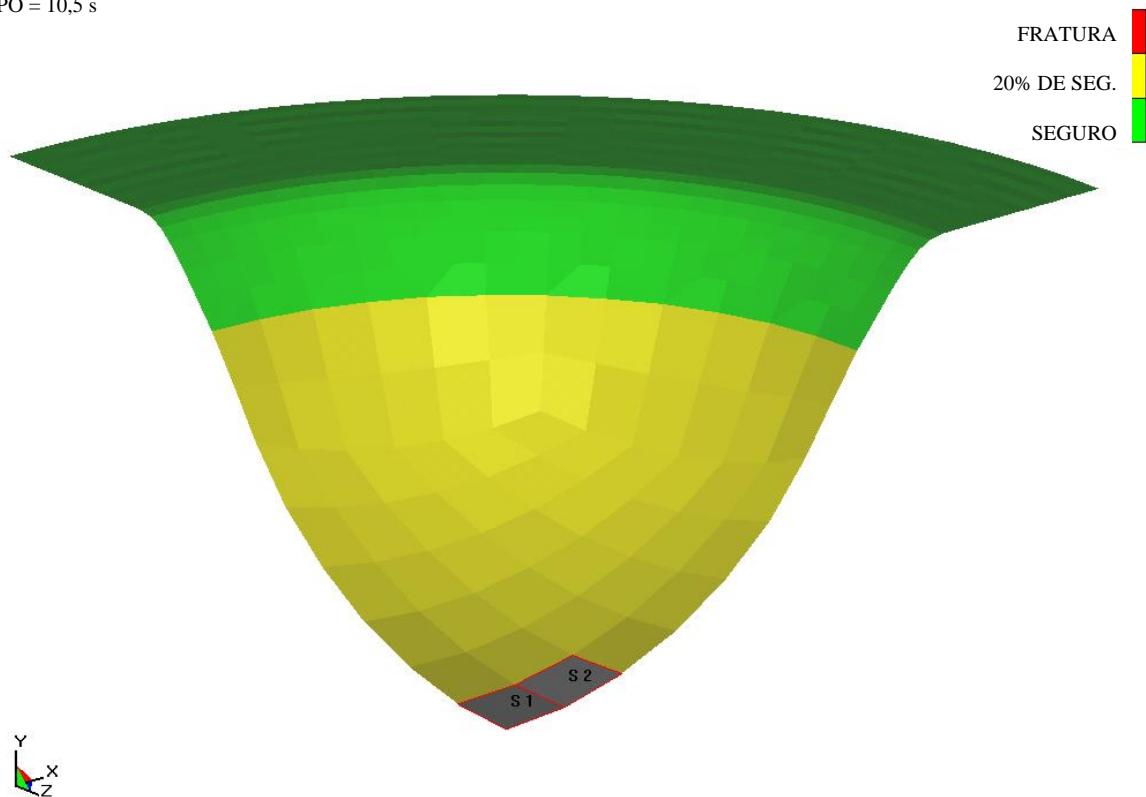


Figura 6. Região de falha para velocidade do punção de 0,42 mm/s e atrito nulo.

INOX304 CA MAT39 VELO 42
TEMPO = 9,745 s

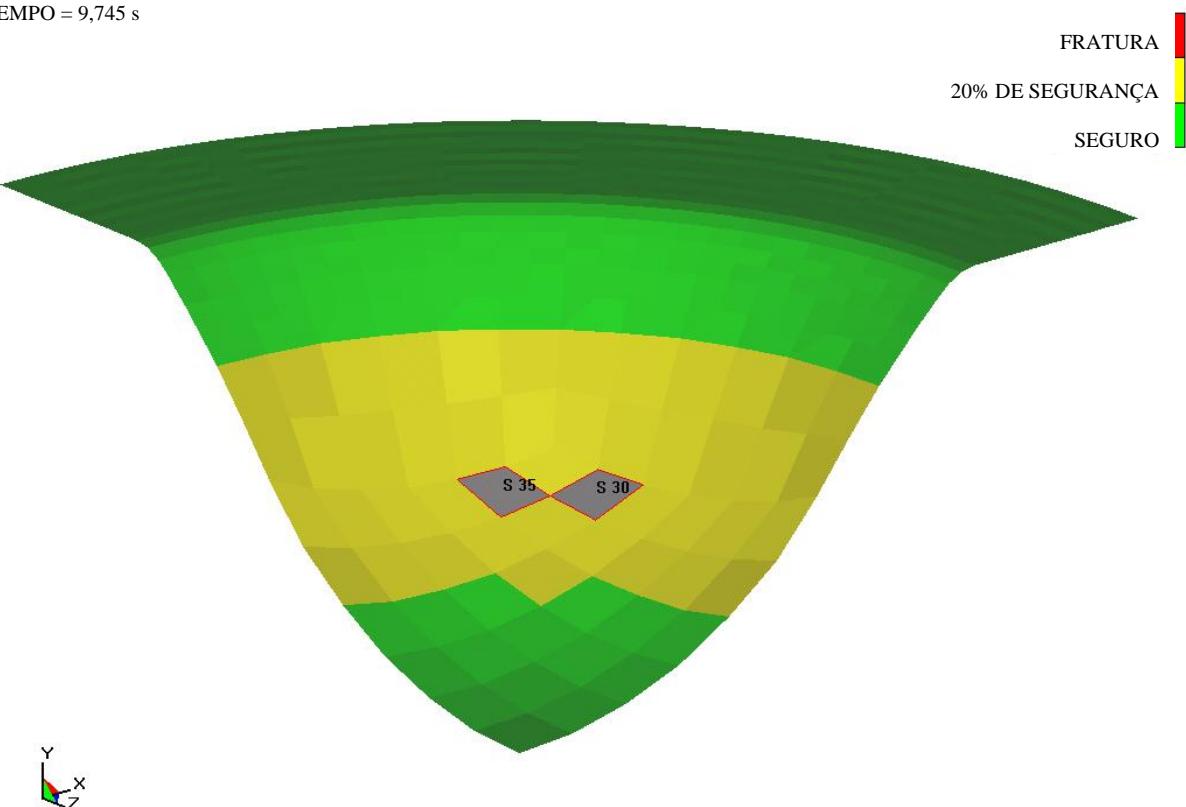


Figura 7. Região de falha para velocidade do punção de 0,42 mm/s e atrito de 0,15.

INOX304 SA MAT39 VELO 84
TEMPO = 5,625 s

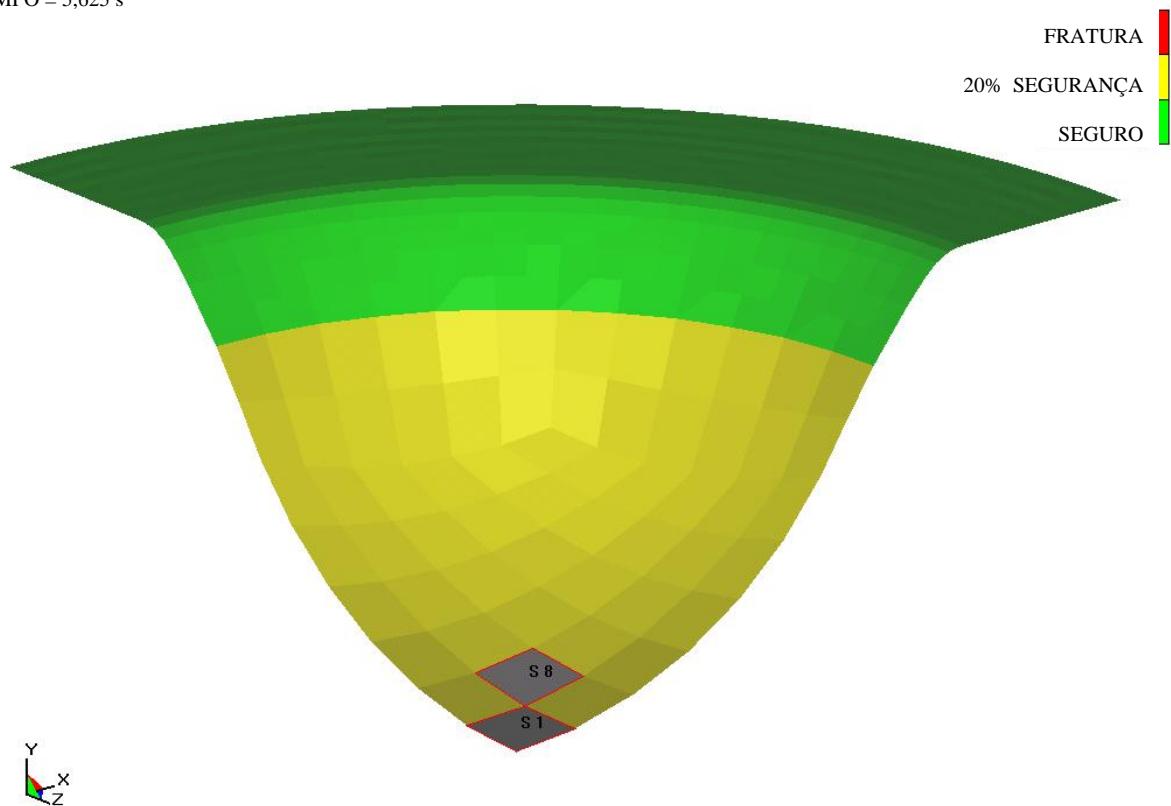


Figura 8. Região de falha para velocidade do punção de 0,84 mm/s e atrito nulo.

INOX304 CA MAT39 VELO 84
TEMPO = 5,375 s

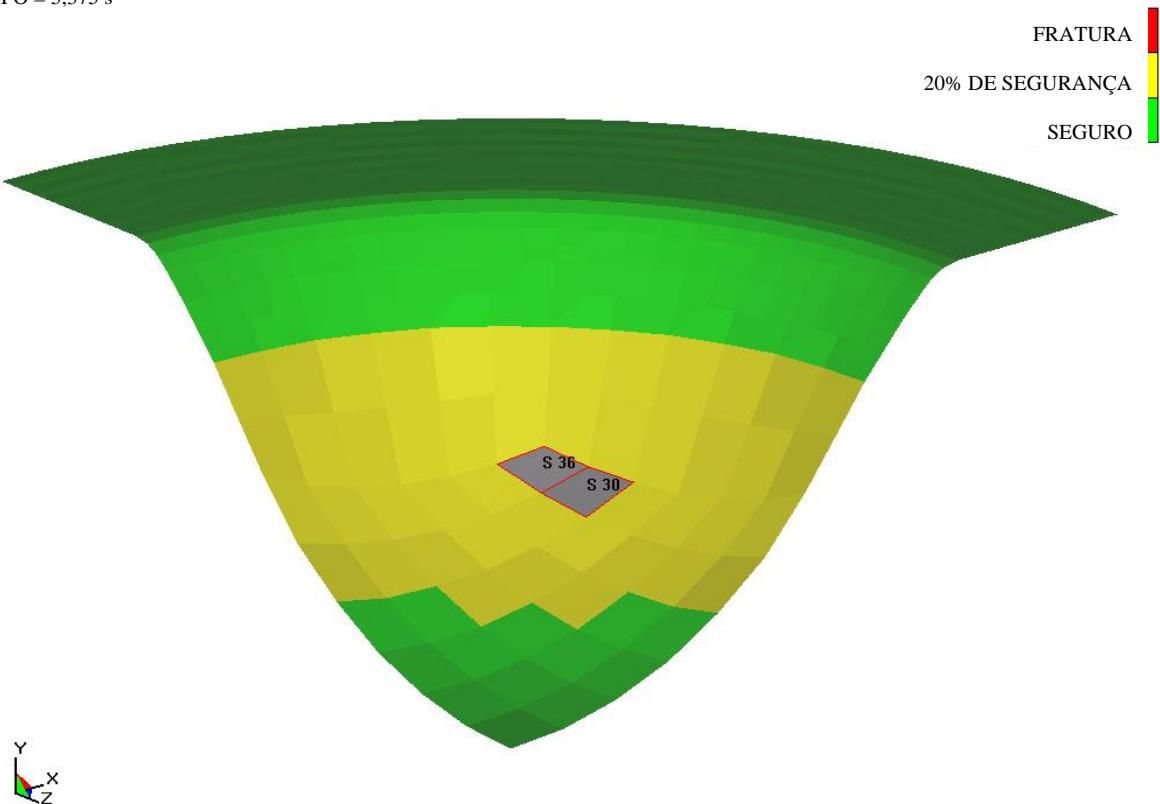


Figura 9. Região de falha para velocidade do punção de 0,84 mm/s e atrito de 0,15.

4.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Sendo o ensaio Nakazima sensível às condições de atrito entre punção e chapa (Duarte, 1997), estas condições podem afetar ou mascarar a influência da velocidade de deslocamento do punção na localização da região de falha e nos níveis de deformação maior e menor e de redução de espessura. É importante ressaltar que o presente trabalho pretende também gerar resultados sob determinadas condições no sentido da validação dos aplicativos de modelagem e simulação utilizados. A verificação ou levantamento da influência de uma variável sobre a outra faz parte deste processo de validação. Assim, as condições de atrito entre punção e chapa foram escolhidas para duas situações-limite de lubrificação: lubrificação ideal (coeficiente de atrito nulo) e lubrificação industrial (coeficiente de atrito 0,15). Verifica-se que, em cada situação-limite de lubrificação, as velocidades de deslocamento do punção de 0,21 mm/s, 0,42 mm/s e 0,84 mm/s não afetam a localização da região da falha e nem os níveis de deformação maior e menor e de redução de espessura, e que as condições de atrito influenciam os resultados do ensaio de Nakazima, como era esperado.

5. CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos por modelagem e simulação dispostos nas Fig. (4), (5), (6), (7), (8), (9), na Tab. (2) e para os valores adotados de velocidade do punção de 0,21 mm/s, 0,42 mm/s e 0,84 mm/s, a variação da velocidade de deslocamento do punção não afetou a localização da região da falha e nem os níveis de deformação maior e menor e de redução de espessura, considerando as mesmas condições de atrito e demais parâmetros do ensaio Nakazima para o aço inoxidável austenítico AISI 304.

Os resultados obtidos neste trabalho indicam concordância qualitativa com os trabalhos de Pomey e Sanz (apud Barata da Rocha & Duarte, 1992), onde foi relatado que para a faixa de 1 a 11 m/min de velocidade de deslocamento do punção não ocorrem variações significativas da localização da região de falha ou do Diagrama Limite de Estampagem (DLE).

5. REFERÊNCIAS

- Assan, A. E., 1999, "Métodos dos Elementos Finitos - Primeiros Passos", Editora Unicamp. Universidade Estadual de Campinas.
- Barata da Rocha, A. and Duarte, J. F., 1992, "Tecnologia da Embutidura", ed. APTCP-Associação Portuguesa das Tecnologias de Conformação Plástica. Porto.
- Belytschko, T. B. and Tsay, C. S., 1983, "A Stabilization Procedure for the Quadrilateral Plate Element with One-Point Quadrature", Int. J. Num. Method. Eng., 19, pp. 405-419.
- Belytschko, T. B., Yen, .H. R. and Mullen, R., 1979, "Mixed Methods for Time Integration", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 17, pp. 259-175.
- Belytschko, T. B, Wong, B. L. and Chiang, H. Y., 1992, "Advances in One-Point Quadrature Shell Elements. Comp", Meths. Appl. Mech. Eng., 96, pp. 93-107.
- Campos, H. B., Butuc, M. C., Gracio, J. J., Rocha, J. E.; Duarte, J. F., 2004, "Theoretical and Experimental Analysis of the Forming Limit Diagrams for AISI 304 Stainless Steel" (A ser submetido para publicação).
- Chou, C. H., Pan, J., Tang, S. C., 1996, "An anisotropic stress resultant constitutive law for sheet metal forming", International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol.39, pp435-449.
- Dieter, G. E., 1984, "Overview of Workability", In: Workability Testing Techniques, Dieter, G. E. (editor) Metals Park, American Society for Metal, pp. 1-19.
- Duarte, J. M. F. 1997, "Conformação Plástica de Chapas Metálica: Simulação Numérica e Caracterização Mecânica" Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto.

- Gosh, A. K., Hecker, S. S. and Keeler, S. P., 1984, "Sheet Metal Forming and Testing" In: Workability testing techniques, Dieter, G. E. (editor), Metals Park. American Society for Metal, pp. 133-195.
- Honecker, A and Mattiason, K., 1989, "Finite Element Procedures for 3D Sheet Forming Simulation", NUMIFORM 1989, Balkema, pp. 457-464.
- Hosford, W. F. and Caddell, R. M., 1993, "Metal Forming - Mechanics and Metallurgy", 2^a Edition, New Jersey, PTR Prentice-Hall.
- Rauch, E. F., 1994, "Plasticity of Metals During Cold Working", Key Eng. Materials, 97-98, pp. 137. 1994.
- Rebelo, N., Nagtegaal, J. C., Hibbitq, H. D., 1989 "Pratical aspects of modeling sheet forming processes", NUMIFORM'89, Numerical Methods in Industrial Forming Processes, ed. E.G. Thompson, R.D. Wood, O.C. Zienkiewicz, A. Samuelsson.
- Santos, A. D., 1993, "Description of 3-D contact problems in the static explicit finite element method" - Contact descriptions in 3-D FEM, Symposium of Japanese Society for Technology of Plasticity, June 18, Tokyo, Japan.
- Zienkiewicz, O. C., 1997, "The Finite Element Method", 3d Edition, McGraw-Hill. New York.

INFLUENCE OF PUNCH-DISPLACEMENT RATE IN LOCALIZATION OF FAILURE REGION

Rogério Helvídio Lopes Rosa

Federal Center of Technology Education of Minas Gerais, CEFETMG, Av. Amazonas 5253, Campus I, B. Hte, MG, 30480-000, hlopes@deii.cefetmg.br

Antônio Eustáquio de Melo Pertence

Federal University of Minas Gerais, Department of Mechanical Engineering, Av. Antônio Carlos 6627, Campus da Pampulha, B. Hte., Minas Gerais, Cep. 31270-901, pertence@demec.ufmg.br

Antônio Ferreira Ávila

Federal University of Minas Gerais, Department of Mechanical Engineering, Av. Antônio Carlos 6627, Campus da Pampulha, B. Hte., Minas Gerais, Cep. 31270-901

Haroldo Béria Campos

Federal University of Minas Gerais, Department of Mechanical Engineering, Av. Antônio Carlos 6627, Campus da Pampulha, B. Hte., Minas Gerais, Cep. 31270-901

Paulo Roberto Cetlin

Federal University of Minas Gerais, Department of Metallurgy and Materials, Rua Espírito Santo 35, Belo Horizonte, Minas Gerais, Cep. 31130-030, pcetlin@demet.ufmg.br

Abstract: *In this work, localization and displacement of failure region for AISI 304 austenitic stainless steel sheets has been estimated varying the punch-displacement rate in the numerical-computational modeling and simulation for Nakazima assays. The numerical-computational application systems used, LS-Dyna™ and LS-Post™, are based on the finite element method - explicit analysis. The obtained results by modeling and simulation indicate qualitative agreement.*

Keywords: *Simulation, Modeling, Finite Element Method, Sheet Metal Forming, Formability.*