



## SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CORTE DE CHAPAS METÁLICAS

**José Divo Bressan<sup>1</sup>, Miguel Vaz Junior<sup>2</sup>**

Depto. de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Tecnológicas - CCT

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Joinville/SC, Brasil, 89223-100

Fone (0xx47)473-1111 ; (1) [dem2jdb@dcc.fej.udesc.br](mailto:dem2jdb@dcc.fej.udesc.br) , (2) [dem2mvj@joinville.udesc.br](mailto:dem2mvj@joinville.udesc.br)

**Eráclito Meireles da Silva Junior**

Fábrica de Componentes, Bl. 14 , EMBRACO, Rua Rui Barbosa 1020, Cx. P. 91 , 89.219-901

Joinville , SC , Brasil. [Eracilito\\_M\\_Silva\\_Jr@embraco.com.br](mailto:Eracilito_M_Silva_Jr@embraco.com.br)

**Resumo.** *A simulação numérica do corte de chapas é semelhante a da operação de usinagem de metais, mas sem a formação de cavacos e sem a utilização de critérios de fusão do metal. Embora existam vários tipos de processos de corte como cisalhamento direto, estampagem, furação, punçionamento e outros, a mecânica do corte e o comportamento do material durante o processo são semelhantes. Observações experimentais mostram que, em geral, o corte se dá em tres estágios distintos: deformação plástica, penetração e fratura. Nos estágios iniciais do processo de corte, a pequena folga e o movimento do punção de compressão para dentro da peça produz a deformação localizada de cisalhamento ao longo do plano paralelo a direção de corte. Quando a penetração está entre 15% e 60% da espessura da chapa, dependendo da ductilidade o material da chapa remanescente na zona de cisalhamento se rompe ou fratura, produzindo uma rebarba indesejável que depende da folga e desgaste do punção.*

*O presente trabalho apresenta um novo modelamento matemático por elementos finitos que permite a visualização dos níveis de tensão, deformação, e temperatura que ocorrem na região de cisalhamento da chapa afim de se investigar o processo de corte de chapas metálicas. Emprega-se o software comercial ELFEN para a simulação do corte o qual realiza o remalhamento automático desejável neste tipo de análise. Os resultados teóricos da simulação como tensões, deformações e temperatura são apresentados na forma de figuras com a distribuição dessas variáveis importantes para análise do processo de corte de chapas de aço. Utilizam-se chapas de titânio de 1mm e de aço de 0,5mm de espessura e sem o uso de prensa chapa, uma folga de 8% entre punção e matriz, velocidade de corte de 0,75m/s e coeficiente de atrito igual a 0,1 . Emprega-se a curva do comportamento plástico e elástico do aço da chapa obtidos do ensaio de tração simples. Os resultados da simulação mostram tensões máxima de cisalhamento de 476 MPa e 355 MPa de tensão normal, e temperatura máxima de 97°C na região de cisalhamento da chapa.*

**Palavras-chave :** *Simulação Numérica, Corte de Chapas, Elementos Finitos.*

## 1. INTRODUÇÃO

A simulação do corte de chapas é semelhante a da operação de usinagem de metais, mas sem a formação de cavacos e sem a utilização de critérios de fusão do metal. Embora existam vários tipos de processos de corte como cisalhamento, estampagem, furação, puncionamento e outros, a mecânica do corte e o comportamento do material durante o processo são semelhantes.

Observações experimentais mostram que, em geral, o corte se dá em tres estágios distintos: deformação plástica, penetração e fratura. Nos estágios iniciais do processo de corte, a pequena folga e o movimento de compressão do punção para dentro da peça produz uma deformação por dobramento. Em seguida temos a penetração do punção na chapa e uma deformação localizada de cisalhamento ao longo do plano paralelo a direção de corte como mostrado na fig.1 abaixo. Quando a penetração está entre 15% e 60% da espessura da chapa, dependendo da ductilidade, o material da chapa remanescente na zona de cisalhamento se rompe, produzindo uma rebarba indesejada que depende da folga e desgaste do punção.

Nos últimos anos, a análise numérica do processo de puncionamento e de cisalhamento tem aumentado significativamente devido ao constante desenvolvimento das ferramentas de simulação numérica tais como os algoritmos para grandes deformações e grandes deslocamentos, e os procedimentos de remalhamento automático.

Brokken (1997) propôs um modelo numérico do processo de puncionamento no qual foi utilizado o método de Euler-Lagrange combinado com um remalhamento. A fratura dútil foi modelada, usando uma progressão simples da fissura em conjunto com o critério de Rice e Tracey (1969). Por outro lado, Morançai (1997) em vez de usar qualquer algoritmo de separação dos elementos da malha empregou o modelo de dano de Gurson (1977) aliado ao remalhamento contínuo. De acordo com o autor, do ponto de vista numérico, a geração e crescimento de uma fissura num sólido é equivalente a diminuir gradualmente a rigidez do elemento. Um outro modelo também foi proposto por Yukawa (1997) para analisar o efeito da folga e do raio da aresta do punção e da matriz no processo de corte. A solução numérica utilizou um remalhamento contínuo e a fratura foi dita ser afetada pela pressão hidrostática.

Hambli e colaboradores (1997) apresentaram um modelo matemático de elementos finitos que permite a inclusão do dano interno na estrutura do material e um critério de fratura dútil afim de investigar o problema do corte de chapas metálicas. Empregaram o software Abaqus para a simulação do corte, entretanto a versão 5.4 utilizada não realizava o remalhamento automático desejável. Os resultados teóricos da força de corte versus deslocamento do punção foram comparados com resultados experimentais do processo de corte de chapas de aço de 3,5mm de espessura e com uma folga de 5% entre punção e matriz. Concluíram que a previsão teórica da força total de corte no punção em função do seu deslocamento se ajusta bem com os resultados experimentais somente quando se introduz um mecanismo de evolução do dano interno no material conforme a teoria do dano de Lemaitre (1988). A ruptura completa da chapa ocorre para uma penetração do punção de 65% da sua espessura.

Owen e colaboradores (1999) apresentaram recentemente uma simulação numérica do corte de chapas de titânio, utilizando o software ELFEN com remalhamento automático, considerando estado plano de deformações e uma de sua extremidade era livre. Os resultados da simulação e as tabelas de dados do material e parâmetros do processo são vistos na Tabela 1 e nas conclusões abaixo.

**Tabela 1:** Parâmetros de Simulação do Processo de Corte de Chapa de Liga de Titânio.

Descrição	Símbolo	Valores
Intervalo de acoplamento		em cada passo
Erro	$\eta_{I\phi}$	8%
Tamanho máximo do elemento	$h_{max}$	0.2 mm
Tamanho mínimo do elemento	$h_{min}$	0.0146 mm
Velocidade do punção	$v$	10 m/s
Folga entre punção e matriz	$c$	0.07 mm
Espessura da chapa	$t$	1.0 mm
Raio do canto vivo do punção	$r$	25 microns
Módulo de elasticidade	$E$	115.7 GPa
Coefficiente de Poisson	$\nu$	0.321
Limite de escoamento	$\sigma_o$	1231.5 Mpa
Encruamento inicial	$\epsilon_o$	0.008
Coefficiente de encruamento	$n$	0.059
Taxa de amolecimento	$\partial\sigma_o/\partial T$	-2.3 MPa/ K
Parâmetro do dano	$s$	1
Fator de dissipação de calor	$\xi$	0.85
Coefficiente de atrito	$\mu$	0.1

## 2. RESULTADOS E COMENTÁRIOS

### 2.1 Chapa de 1mm de liga de titânio:

A folga ( $c$ ) entre o punção e a matriz é um dos parâmetros mais importantes nos processos de corte. Valores de folga pequeno, geralmente usadas para metais duteis, leva a um desgaste mais rápido do ferramental, em quanto que valores grandes de  $c$  permite grandes deformações provocando a formação de rebarbas indesejáveis. Nas aplicações industriais, a folga ( $c$ ) é geralmente adotada como sendo de 4% a 12% da espessura da chapa (Schey, 1987). Neste exemplo a folga usada foi de 7%.

O desgaste do ferramental no processo de corte é manifestado, com o seu uso intensivo nesta operação, na forma de arredondamento dos cantos vivos ou arestas de ambos punção e matriz, e isto pode produzir o aparecimento de rebarbas na peça cortada mesmo com a folga  $c$  ótima. Nesta simulação, o desgaste do punção e da matriz foi considerado assumindo-se um raio da aresta de  $r = 25$  microns que corresponde a 2,5% da espessura da chapa.

Os resultados da simulação numérica obtido por Owen et al (1999) mostram que a alta velocidade do punção, aliada as características das ligas de titânio, provocam o aparecimento de bandas estreitas de deformação plástica de cisalhamento localizada e adiabáticas, durante o processo de corte descrito neste exemplo. A alta taxa de geração de energia de deformação plástica e o baixo coeficiente de difusão térmica do material provoca o aquecimento localizado, que por sua vez produz o amolecimento térmico e, conseqüentemente a formação de bandas estreitas de deformação plástica localizada na região de cisalhamento da chapa.

## 2.2 Chapa de 0,5 mm de aço elétrico :

A seguir apresentamos uma simulação numérica do corte de chapas de aço elétrico, utilizando o software ELFEN com remalhamento automático, considerando o processo de corte axissimétrico de um disco de chapa de 100mm de diâmetro, produzindo um furo de 60mm de diâmetro a partir da chapa de aço. Os resultados da simulação para uma penetração do punção de  $U = 0.2025\text{mm}$  na chapa são vistos nas Fig. 1, Fig.2 , Fig.3 e Fig.5 abaixo. Os parâmetros do processo são vistos na Tabela 2 abaixo e foram obtidos da prática.

O comportamento mecânico do material da chapa é dado pela seguinte equação constitutiva,

$$\sigma_o = k(\varepsilon_o + \varepsilon)^n + \frac{\partial \sigma_o}{\partial T}(T - T_o)$$

onde  $\sigma_o$  é a tensão de escoamento corrente,  $\varepsilon_o$  é o encruamento inicial,  $n$  é o coeficiente de encruamento,  $\partial \sigma_o / \partial T$  é a taxa de amolecimento do material com a temperatura  $T$  ; e  $T_o$  é a temperatura ambiente ou de referência.

**Tabela 2:** Parâmetros de Simulação do Processo de Corte de Chapa de Aço de 0,5 mm de espessura.

Descrição	Símbolo	Valores
Intervalo de acoplamento		em cada passo
Erro para remalhamento	$\eta_{I\phi}$	5 %
Tamanho máximo do elemento	$h_{\max}$	0.4 mm
Tamanho mínimo do elemento	$h_{\min}$	0.04 mm
Velocidade do punção	$v$	0.75 m/s
Folga entre punção e matriz	$c$	0.04 mm (8% t)
Espessura da chapa	$t$	0.5 mm
Raio do canto vivo do punção	$r$	50 microns
Módulo de elasticidade	$E$	210 GPa
Coefficiente de Poisson	$\nu$	0.29
Temperatura de referência	$T_o$	298 K
Limite de escoamento	$\sigma_o$	1084.5 MPa
Encruamento inicial	$\varepsilon_o$	0.002
Coefficiente de encruamento	$n$	0.15
Taxa de amolecimento	$\partial \sigma_o / \partial T$	-1.7 MPa/ K
Parâmetro do dano	$s$	1
Fator de dissipação de calor	$\xi$	0.85
Coefficiente de atrito	$\mu$	0.1

Na Fig.1 observamos que o ponto crítico, de máxima tensão normal ou de compressão  $\sigma_{yy}$  é de 355 MPa atuando no canto vivo do punção. Na Fig.2 vemos que a tensão  $\sigma_{xx}$  que atua no mesmo canto vivo do punção é de 340 MPa. Entretanto, na Fig.3 a tensão de cisalhamento que está atuando no mesmo canto vivo ou ponto no punção é bem superior, ou seja  $\tau_{xy}$  é aproximadamente 476 MPa.

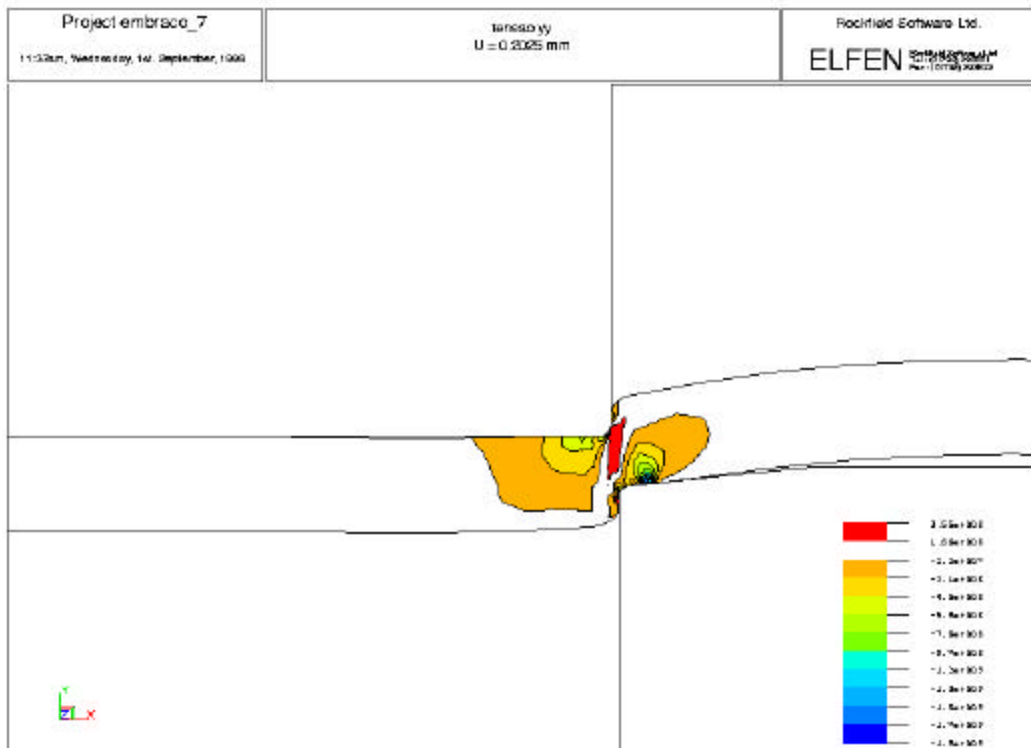


Figura 1. Simulação Numérica do Processo de Corte de Chapa de Aço de 0,5 mm.  
Distribuição da Tensão Normal  $\sigma_{yy}$ .

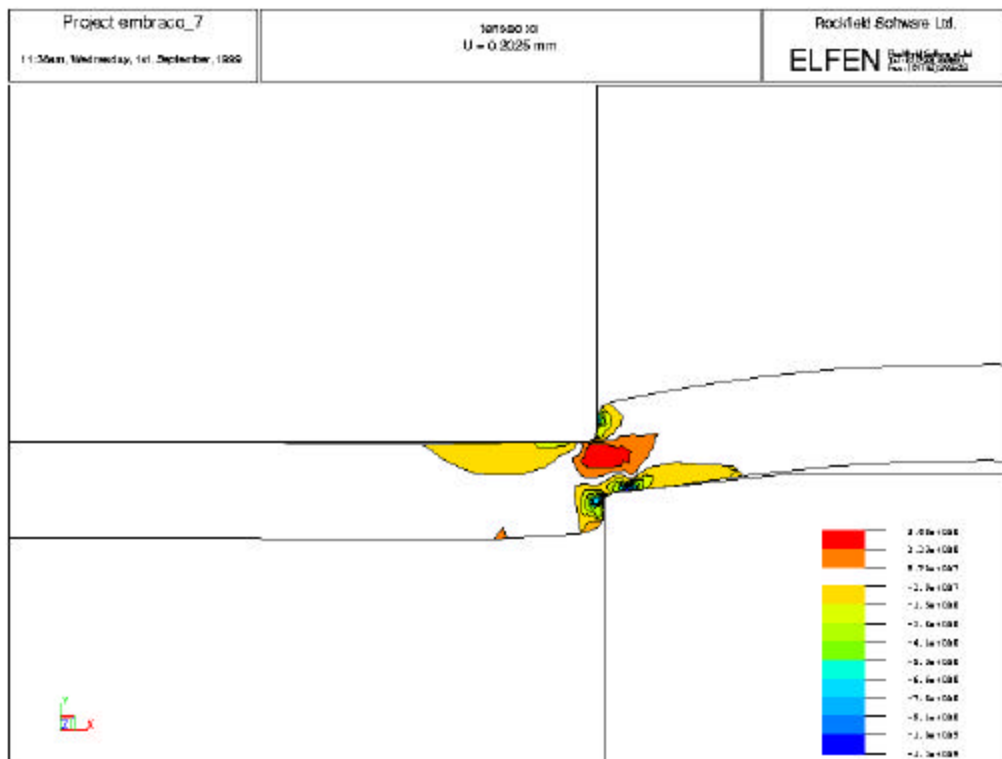


Figura 2. Simulação Numérica do Processo de Corte de Chapa de Aço de 0,5 mm.  
Distribuição da Tensão  $\sigma_{xx}$ .

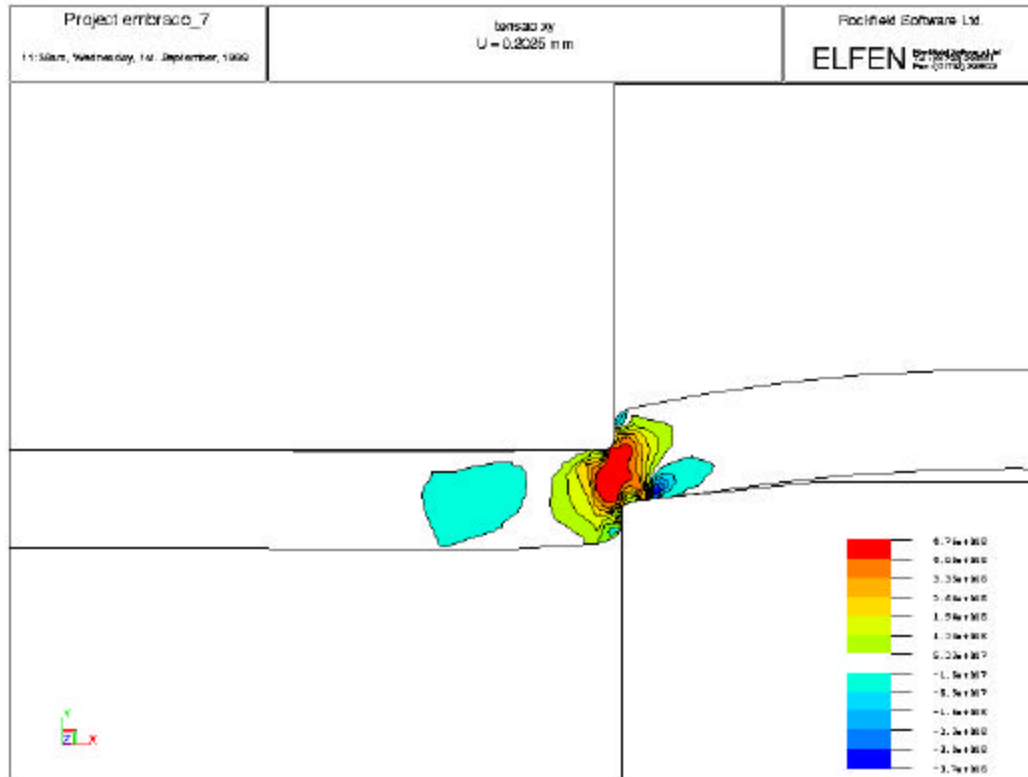


Figura 3. Simulação Numérica do Processo de Corte de Chapa de Aço de 0,5 mm. Distribuição da Tensão de Cisalhamento  $\tau_{xy}$ .

### 3. CONCLUSÕES

As prováveis falhas ou quebras e desgaste, ver Fig.4, que ocorrem no punção durante o processo de corte de chapa são provavelmente devido à tensão de cisalhamento que atua no seu canto vivo e que são superiores as tensões normais à face e lado do punção. Esta elevada tensão de cisalhamento também é a responsável pelo desgaste que ocorre no punção, principalmente na aresta do punção. Na presente simulação numérica do corte de chapas adotamos um coeficiente de atrito igual a 0.1 entre a chapa e o punção ou matriz. A simulação apresentou tensões da ordem de 355 MPa para a tensão normal ou vertical, 340 MPa para a tensão horizontal e 476 MPa para a tensão de cisalhamento. Estes valores devem aumentar um pouco mais quando se adotar um coeficiente de atrito maior e mais próximo do valor real de 0.2 no contato entre punção e chapa. Na Fig.3 acima vemos que a ruptura deverá ocorrer na linha que une a aresta do punção com a aresta da matriz, região de cisalhamento máximo.

Portanto, a princípio, qualquer revestimento ou tratamento superficial do punção afim de aumentar a sua vida útil deverá ter resistência ao cisalhamento ou a aderência bem superior aos 476 MPa obtidos na presente simulação numérica.

Os principais parâmetros geométricos que afetam os resultados dos níveis de tensões são: a folga entre a matriz e punção, o raio da aresta do punção e o deslocamento ou penetração do punção na espessura da chapa. Na Fig.4 vemos que o desgaste real da aresta de corte do punção é do tipo chanfrado de aproximadamente 50 microns em vez de canto arredondado como assumido na presente simulação numérica. Na Fig.5 constatamos que a temperatura máxima atingida na região de cisalhamento da chapa é de 97°C.

Resumindo, na simulação numérica do corte de chapas é muito importante considerar tanto

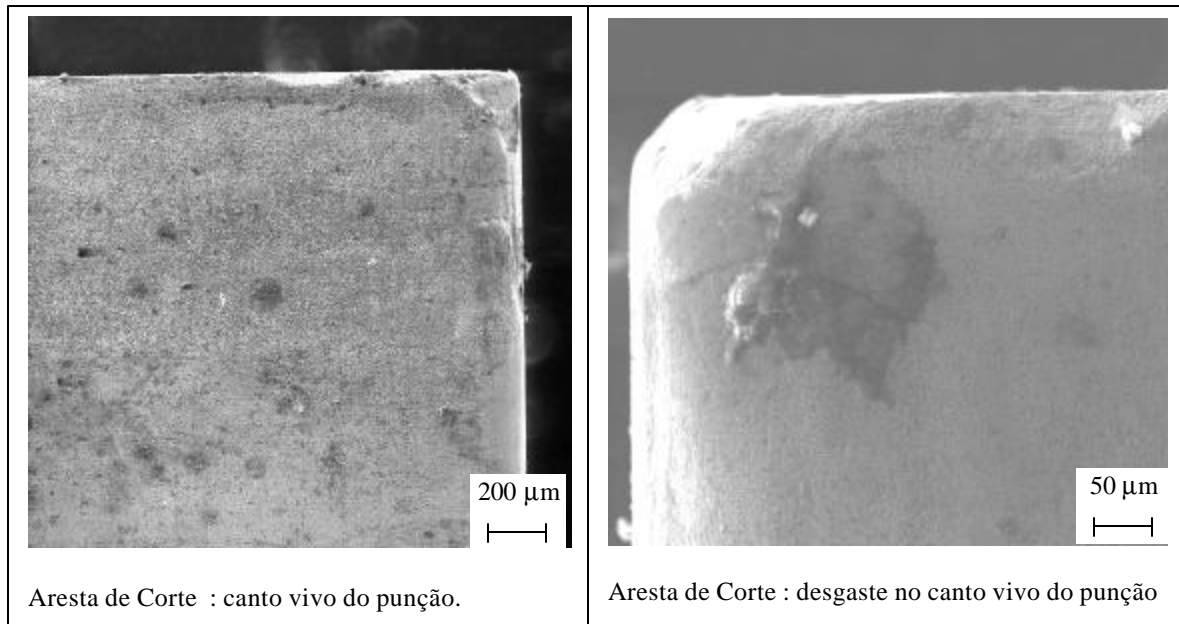


Figura 4. Micrografias da superfície lateral do punção de corte de metal duro. Geometria da aresta de corte.

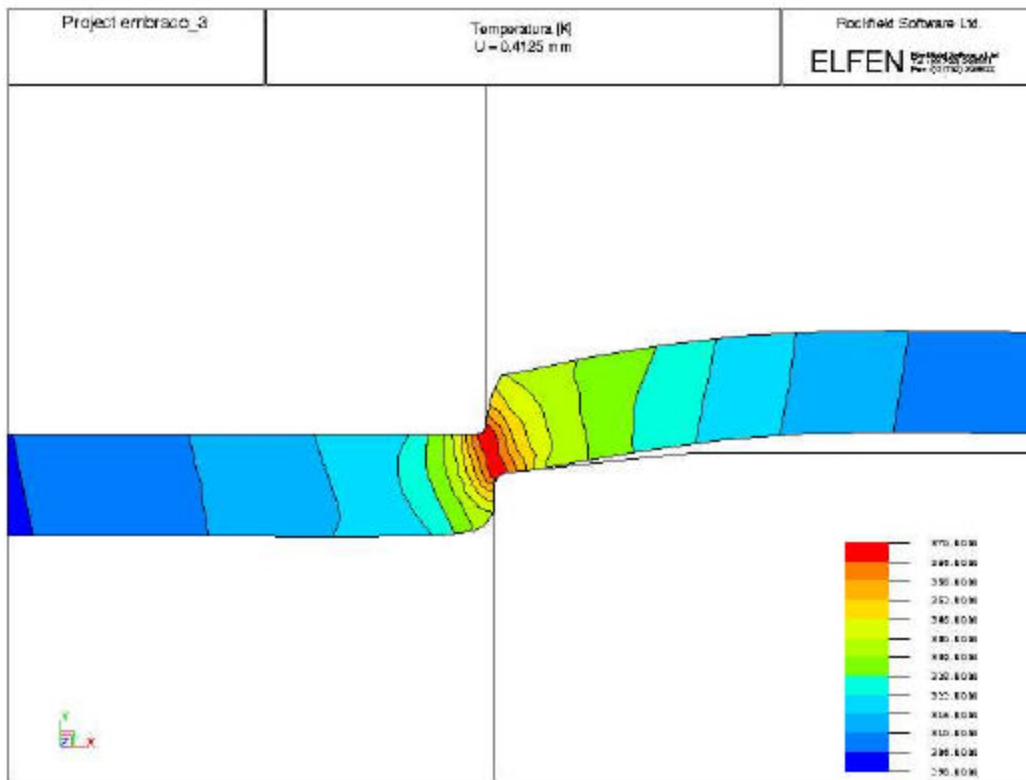


Figura 5. Distribuição da temperatura durante o corte da chapa de aço. Temperatura Máxima de 97°C na região de cisalhamento.

a evolução do dano interno no material que produzirá a ruptura final com a deformação plástica como o atrito, o remalhamento automático em cada passo do corte e a velocidade de corte. Para velocidades de corte de 0.75m/s ou 300 golpes por minuto, o processo pode ser considerado à frio, tendo em vista as temperaturas máximas de 97<sup>o</sup>C atingidas na região de cisalhamento, conforme simulação numérica.

### ***Agradecimentos***

Os autores gostariam de agradecer à EMBRACO de Joinville/SC, à UDESC e ao CNPq pelo apoio financeiro recebido.

### **REFERÊNCIAS**

- Brokken, D.; Goijaerts, A.M.; Brekelmans, W.A.M., & Oomens, C.W.J., Modelling of the Blanking Process. pp.1417-1424, ed. Owen, D.R.J., Oñate, E., & Hinton, E., Congresso: Computational Plasticity: Theory and Applications - CIMNE, vol.2, Barcelona, 1997.
- Gurson, A.L., Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth – Part I Yield Criteria and Flow Rule for Porous Media. J. Engng. Mat. Tech., 99, pp.2-15, 1977
- Hambli, R.; Potiron, A.; Boude, S.; & Reszka, M., Fracture Prediction of Sheet Metal Blanking Process. Advanced Methods in Materials Processing Defects. Editores M. Predeleanu e P. Gilormini, pp.125 – 134, Elsevier, 1997.
- Lemaitre, J. & Chaboche, J.L., Mécanique des Matériaux Solides. Ed. Dunod, 1988.
- Morançay, L.; Homsí, H. & Roelandt, J.M., Application of Remeshing Techniques to the Simulation of Metal Cutting by Punching. pp. 611-618, Ed. Owen, D.R.J., Oñate, E., & Hinton, E., Congresso: Computational Plasticity - CIMNE, vol.1, Barcelona, 1997.
- Owen, D.R.J.; Vaz Jr., M. & PERIC, D., On Adaptive Strategies for Large Deformations of Elasto-Plastic Solids at Finite Strains: Computational Issues and Industrial Applications. Comp. Meth. Appl. Mech. Engng., 176, pp. 279 – 312, 1999.
- Rice, J.R. & Tracey, D.M., On the Ductile Enlargement of Voids in Triaxial Stress Fields. Journal of Mech. Phys. Solids, 17, pp. 201-217, 1969.
- Schey, J.A., Introduction to Manufacturing Processes. Ed. MacGraw-Hill, New York, 1987.
- Yukawa, N.; Inukai, Y.; Yoshida, Y.; Ishikawa, T. & Jimma, T., Finite Element Analysis for Blanking Problems. pp. 479 - 487, Ed. Basri, S., Samad, A.A.A. & Hamouda, A.M, Application of Numerical Method in Engineering. Serdang/Malaysia, UPM Press, 1997.

### **NUMERICAL SIMULATIONS OF SHEET METALS BLANKING AND PIERCING**

**Abstract.** *A numerical simulation of the blanking and piercing process of metallic sheet is performed in the present work. Experimental observations show that the shear process occurs in three distinct steps: plastic deformation, penetration and rupture. In the first stage the sheet is bent and in the second stage the material is sheared at the clearance and along a plane parallel to the punch axis. In the third stage, at 15% to 60% of the sheet thickness penetration, the material in the shear zone suffer a catastrophic rupture, leading to the formation of a burr that depend on the clearance and tool wear. In the last years, the numerical analysis of the blanking and piercing processes have received much attention due to the constant developments of commercial codes, the algorithms for large deformations and displacements and the procedure of automatic remeshing. The mathematical modelling and deformation path was performed using the software ELFEN which has the capability of automatic remeshing. Steel sheet of 0.5mm in thickness, clearance of 8% , punch velocity of 0.75m/s and coefficient of friction 0.1 were used. The simulation result shows a maximum*



*shear stress of 476 MPa, normal stress of 355 MPa and maximum temperature 97°C at the shear region for steel sheet.*

**Keywords :** *Numerical Simulation, Blanking, Finite Elements.*