

# Avaliação experimental e numérica de diferentes condições de atrito ( $\mu$ ) na conformação de chapas por estiramento

S. F. Lajarin  
H. J. Lourenço  
P. V. P. Marcondes

[fer.espanhol@gmail.com](mailto:fer.espanhol@gmail.com), [hebert.eng@gmail.com](mailto:hebert.eng@gmail.com), [marcondes@ufpr.br](mailto:marcondes@ufpr.br)

Universidade Federal do Paraná, DEMEC, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210 CEP 81531-990, Curitiba, Pr –Brasil

**Resumo:** Para otimizar um processo de conformação de chapas, diversas variáveis devem ser consideradas, tais como as propriedades mecânicas do material, a geometria da ferramenta, lubrificação na interface punção–chapa metálica e taxa de deformação entre outros. Este trabalho relata um estudo sobre a influência de diferentes condições de lubrificação em um processo de estiramento. Os lubrificantes utilizados variaram de líquido, como o óleo mineral e vegetal com aditivos de extrema pressão e fluidos sintéticos, até os filmes sólidos de PVC (policloreto de vinila) e poliuretano. Neste trabalho, o principal objetivo foi determinar no aplicativo de simulação MEF (métodos de elementos finitos) o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) correspondente a cada condição testada na prática no aço de alta estampabilidade DC 06. As deformações verdadeiras menores ( $\epsilon_2$ ) foram obtidas experimentalmente por meio da medição da deformação de uma malha circular, impressa sobre corpos de prova ensaiados no ferramental de Nakazima. Para a simulação dos ensaios, foram modelados todos os componentes (chapa, punção, matriz e prensa-chapas) e caracterizado o material da chapa por meio das suas propriedades mecânicas em conjunto com a equação de Hollomon adicionada aos dados da curva de tensão x deformação. Dos cinco lubrificantes estudados, os resultados indicaram que o óleo com propriedade de extrema pressão rendeu uma melhora em relação à condição sem lubrificação e aos demais lubrificantes líquidos. Porém, o melhor desempenho foi alcançado com o filme sólido o qual foi simulado com o menor  $\mu$ .

**Palavras-chave:** Simulação numérica, conformação de chapas, lubrificação, coeficiente de atrito.

## 1. INTRODUÇÃO

A estampagem de chapas é um processo muito utilizado industrialmente e faz parte de nichos bastante competitivos como a indústria automobilística e de eletrodoméstico, que estão sempre em busca de otimizações. Porém, para que otimizações sejam feitas há uma necessidade de compreensão da conformabilidade de chapas metálicas e de como parâmetros de processo podem interferir no resultado.

Planejadores de processo e projetistas de ferramentas devem determinar o nível de conformabilidade requerido para cada peça a ser estampada. Porém, a conformabilidade de chapas metálicas é difícil de ser prognosticada, uma vez que não existe um parâmetro único capaz de avaliar cada material.

Segundo Tigrinho (2005), para se obter êxito na estampagem de chapas metálicas, deve-se levar em consideração algumas variáveis, tais como: propriedades do material, coeficientes de encruamento e anisotropia, geometria da ferramenta, lubrificação na interface punção–chapa metálica e velocidade de conformação, entre outras. Sendo que todas estas variáveis estão inter-relacionadas.

Segundo Sampaio et al. (1998), uma boa ferramenta para avaliar o limite de conformação do material, determinado em escala laboratorial, com as deformações em escala industrial é a curva limite de conformação (CLC). Com base em medidas experimentais, o conceito de Diagrama Limite de Conformação (DLC) foi inicialmente introduzido por Keeler (1965) para os valores positivos da menor deformação principal no plano da chapa. Este conceito foi então estendido por Goodwin (1968) e Woodthorpe et al (1969) ao domínio de deformações compreendido entre os estados de tração uniaxial e estiramento biaxial, pois essa relação permite concluir se o material e

o processo estão adequados à manufatura da peça em questão. Desde então inúmeras pesquisas foram dedicadas a determinação experimental e ao modelamento teórico das deformações limite em chapas.

Segundo Moreira et al. (2003), existem na literatura muitos ensaios experimentais destinados a determinação da CLC, porém, Sampaio et al. (1998) mencionam que as duas técnicas mais comuns são os métodos propostos por IRSID e Nakazima, sendo este último mais simples pelo fato de usar apenas uma ferramenta. Richter (2003) destaca que os métodos mais utilizados são os de Marciniak e Nakazima que permitem determinar a CLC com o auxílio de um ferramental simples empregando corpos de prova de diferentes larguras, nos quais a chapa é fixa em sua periferia e deformada por um punção hemisférico (Nakazima) ou de fundo plano (Marciniak). Segundo o autor, a força aplicada no prensa chapas evita qualquer escorregamento do material do flange para a parte central do corpo de prova que é deformado biaxialmente durante o ensaio.

Chemin e Marcondes (2008) estudaram a influência da geometria do punção na conformabilidade de chapas de aço DC 06. O autor concluiu que o punção com o formato hemisférico foi a ferramenta que apresentou os maiores níveis de estampabilidade e uma melhor distribuição das deformações no material, por ser esta a geometria mais uniforme. Tigrinho (2005) estudou experimentalmente a influência de vários lubrificantes no processo de estampagem de chapas de aço DC 06. O autor realizou ensaios de estampagem com ferramental de Nakazima com o propósito de caracterizar o material e analisar a influencia de diferentes condições de lubrificação no comportamento da curva CLC. A CLC foi obtida inicialmente sem lubrificação do punção e posteriormente foram testados diferentes lubrificantes para melhorar a conformabilidade por estiramento. Os lubrificantes utilizados foram desde os líquidos, como óleo mineral e vegetal com aditivos de extrema pressão e fluidos sintéticos, até os filmes sólidos de PVC (policloreto de vinila) e poliuretano. Foi obtido também o perfil de distribuição das deformações e o perfil de redução da espessura, desde o raio da matriz até o pólo do punção, além da análise da posição da fratura, que juntamente com a CLC obtida são indícios que a lubrificação foi eficiente, principalmente no modo de deformação por estiramento onde ela é desejável. O autor comprovou que o filme sólido de poliuretano teve o melhor desempenho, entre os cinco lubrificantes avaliados, pois promoveu um aumento de 37% na deformação máxima menor ( $\epsilon_2$ ) na chapa metálica, além de apresentar um perfil homogêneo da distribuição das deformações.

Atualmente, uma ferramenta que vem sendo bastante utilizada no auxílio dos estudos de conformação de chapas são os métodos de elementos finitos (MEF). Aplicativos de simulação tem sido cada vez mais uma alternativa para redução de custo e tempo com experimentos práticos. O erro gerado por esses programas pode ser definido como a diferença entre a solução analítica exata de uma determinada variável de interesse e a sua solução numérica, Ferziger (2001). Os principais processos para estimar e avaliar os erros em programas de simulação são chamados de verificação e validação. Enquanto a verificação é a avaliação da acurácia da solução computacional em relação ao modelo numérico, a validação visa determinar a proximidade que o modelo matemático está do fenômeno real, através da comparação da solução numérica com os dados experimentais, Oberkampf *et. al* (2004).

O objetivo desse trabalho é determinar por meio de MEF os valores de coeficientes de atrito referentes a diferentes condições de lubrificação. Avaliar-se-á, ainda, a eficiência das condições de modelamento na obtenção das deformações verdadeiras menores ( $\epsilon_2$ ), utilizadas para a determinação da CLC do material, durante o estiramento.

## **2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

### **2.1 Ensaios práticos**

Tigrinho (2005) realizou por meio do ensaio de Nakazima a avaliação de diferentes lubrificantes na conformabilidade de chapas de aço DC 06. O procedimento experimental utilizado se resume nas seguintes etapas. Primeiramente foram levantadas as propriedades mecânicas do

material por meio do ensaio de tração. Na seqüência foram preparados corpos de prova para levantamento da CLC por meio do ensaio de Nakazima. Nakazima (1968) propôs uma metodologia para levantamento da curva CLC por meio da conformação de corpos de prova com diferentes larguras em um punção esférico de raio 50mm. Foram preparados 8 corpos de prova com larguras que variaram de 25mm à 200mm. Em todos os corpos de prova foi impressa por meio de um método desenvolvido por Chemin e Marcondes (2008) uma malha esférica com diâmetro de 4.2mm.

A conformação foi realizada em uma prensa hidráulica e os ensaios foram conduzidos até a ruptura das chapas. Os corpos de prova de menor largura permitiram o levantamento das deformações características do processo de embutimento. Os corpos de prova de largura intermediária foram utilizados para o levantamento dos pontos próximos da deformação plana e os corpos de prova com largura de 200mm foram testados para levantamento da condição de deformação biaxial, típica da condição de estiramento.

A lubrificação exerce um maior efeito nas condições de estiramento, alterando a capacidade de deformação biaxial que ocorre com mais evidência no pólo do punção. Objetivando estender a deformação na condição de estiramento, foram testados corpos de prova com largura de 200mm nas diferentes condições de lubrificação, (i) sem lubrificação, (ii) óleos minerais e vegetais com EP (Extrema Pressão), (iii) fluidos sintéticos emulsionáveis, (iv) fluido sintético “prelube”, (v) filme sólido PVC e (vi) filme sólido de poliuretano.

Para a medição das deformações foi utilizado um gabarito transparente com escala de 0,1mm. Com os resultados das  $\epsilon_2$  foi traçada a curva CLC do material. Os pontos de deformação menor mostrados na Figura 1 só puderam ser alcançados com o uso do filme sólido de poliuretano como lubrificante.

### Diagrama Limite de Conformação

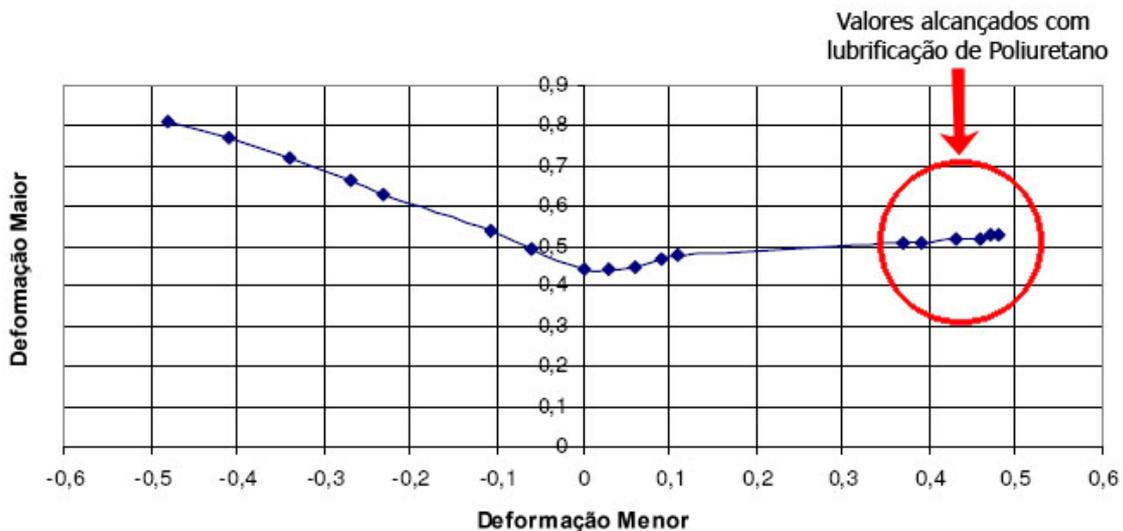


Figura 1 – Digrama com a CLC do aço DC 06, obtida sem lubrificante e com poliuretano, (TIGRINHO, 2005).

## 2.2 Simulação

A simulação do ensaio de Nakazima foi realizada no aplicativo Abaqus versão 6.5, em um computador com processador Semprom 3100 e 1GB de memória RAM.

No ensaio de Nakazima existem geralmente quatro corpos envolvidos (Figura 2), são eles o punção, matriz, prensa-chapas (considerados como elementos explícitos estruturais sólidos/rígidos) e a chapa (elementos explícitos estruturais do tipo *shell*). Foi utilizado o elemento finito *shell* S4R que possui 4 nós, com 6 graus de liberdade por nó, referentes as translações ( $u_x$ ,  $u_y$  e  $u_z$ ) e as rotações ( $\phi_x$ ,  $\phi_y$  e  $\phi_z$ ) segundo as coordenadas X, Y e Z.

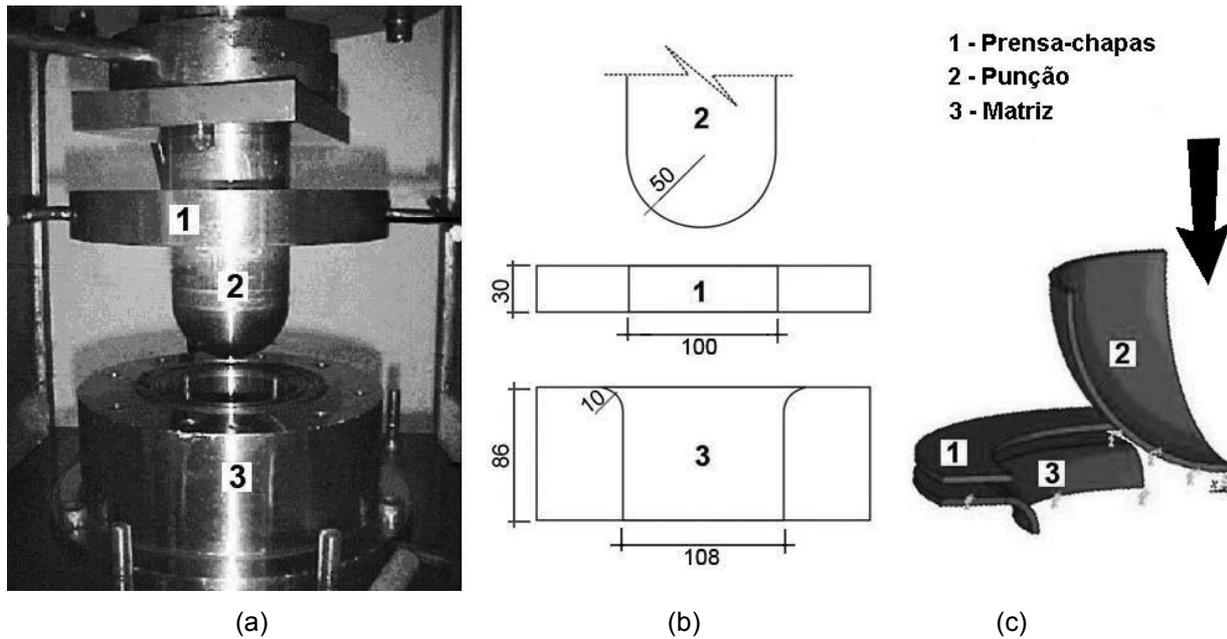


Figura 2 – Ferramental proposto por Nakazima: (a) adaptado de Tigrinho (2005), (b) dimensões da ferramenta em mm e (c) modelo MEF.

### 2.3 Condições de contorno e carregamento

Devido ao problema ser simétrico, apenas um quarto da geometria de cada componente foi modelada, Figura 2c. Inicialmente a rotação e o deslocamento de todos os componentes foram restringidos. As condições de contorno da chapa foram do tipo (*symmetry/antisymmetry/encastre*) sobre os planos X e Z.

A simulação foi dividida em 3 passos, no primeiro o prensa-chapas se desloca e encosta na chapa, no segundo o prensa-chapas aplica sobre ela um carregamento de 10000 N e no terceiro o punção é deslocado 50mm, provocando a deformação na chapa. Esse valor foi especificado devido ser o deslocamento obtido nos ensaios experimentais.

### 2.4 Coeficiente de atrito

Nas propriedade de interação entre os componentes, foi definido um contato do tipo mecânico, de comportamento tangencial, investigado com variados coeficientes de atrito, objetivando determinar o correspondente a cada uma das seis condições testadas experimentalmente e mencionadas na seção 2.1.

### 2.5 Especificação do material

Nos experimentos realizados por Tigrinho (2005) para levantamento da CLC foram utilizadas chapas de aço acalmado laminado a frio produzido pela Thyssen Krupp segundo a especificação DC 06, de acordo com a norma DIN EN 10152, com espessura de 0,7 mm.

As propriedades mecânicas do material são apresentadas na Tabela 1. Essas propriedades em conjunto com a equação de Hollomon (eq. 1) foram utilizadas em adição aos dados da curva de tensão x deformação para uma caracterização completa do material no aplicativo de simulação.

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1)$$

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do material (TIGRINHO, 2005).

Propriedades	Valor	Unidade
Densidade ( $\rho$ )	7.850	g/cm <sup>3</sup>
Módulo de Elasticidade (E)	210000	MPa
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0.3	(adimensional)
Constante de resistência Plástica (K)	626.8	MPa
Coefficiente de encruamento (n)	0.235	(adimensional)

### 3. RESULTADOS

Na Tabela 2 são ilustrados os resultados do coeficiente de atrito definido no aplicativo de simulação que correspondem aos resultados experimentais de  $\varepsilon_2$  obtidos sob diferentes condições de lubrificação. Conforme pode ser observado, para simular ( $\varepsilon_2 = 0,48$ ) que foi a melhor condição de lubrificação com filme sólido de poliuretano o  $\mu$  foi de 0.025 (Figura 3a), enquanto a condição sem lubrificação ( $\varepsilon_2 = 0,11$ ) foi alcançada com  $\mu$  de 1.3. O resultado da condição de lubrificação com óleos minerais e vegetais com EP foi de ( $\varepsilon_2 = 0,15$ ) com  $\mu$  de 0.8. É possível observar que os demais lubrificantes não representaram nenhuma melhora na condição de lubrificação, em um caso até piorou o resultado da condição sem lubrificação. O melhor resultado dos óleos minerais e vegetais com EP para os demais fluidos pode ser atribuído as propriedades EP. Essa propriedade tem como princípio prevenir o rompimento do filme lubrificante, garantindo dessa forma menor atrito entre o punção e a chapa.

Tabela 2 – Deformação menor ( $\varepsilon_2$ ) e respectivos coeficientes de atrito ( $\mu$ ) definidos no Abaqus.

Condições testadas	$\varepsilon_2$ experimental (Tigrinho, 2005)	$\mu$ (simulado)
Sem lubrificante	0.11	1.3
Óleos minerais e vegetal com EP	0.15	0.8
Fluidos sintéticos emulsionáveis	0.11	1.3
Fluido sintético "prelube"	0.04	**
Filme sólido PVC	*	**
Filme sólido de poliuretano	0.45	0.025

\* O filme sólido PVC resultou em pontos à direita da CLC, lado do embutimento.

\*\* Condição não simulada devido a não relevância dos resultados.

Na Figura 3a é ilustrado o resultado da condição sem lubrificação, é possível observar a distribuição da deformação simulada sobre o perfil da chapa. A região que sofreu maior deformação e que indica a região de fratura se localizou longe do pólo e mais próximo da lateral do punção. Isso significa que a região próxima ao pólo onde aconteceria com mais evidência a deformação biaxial está sendo limitada pelo atrito entre punção e chapa, resultando em um baixo valor de  $\varepsilon_2 = 0.116$ . Na condição ilustrada na Figura 3b é possível observar a distribuição das deformações de forma mais homogênia e com a região de maior deformação próxima ao pólo do punção, indicando uma boa condição de estiramento, confirmada pelo resultado de  $\varepsilon_2 = 0.481$ .

Na Figura 3c pode ser observado o resultado da condição com lubrificação de óleo com EP. Nessa condição a  $\varepsilon_2$  aumentou de 0.116 (sem lubrificação) para 0.155. Apesar de o aumento ter sido relativamente pequeno, foi a única opção entre os lubrificantes líquidos testados que melhorou a conformabilidade. Nessa condição a distribuição das deformações ainda ficou distante do pólo do punção e bem diferente da melhor condição ilustrada na Figura 3b.

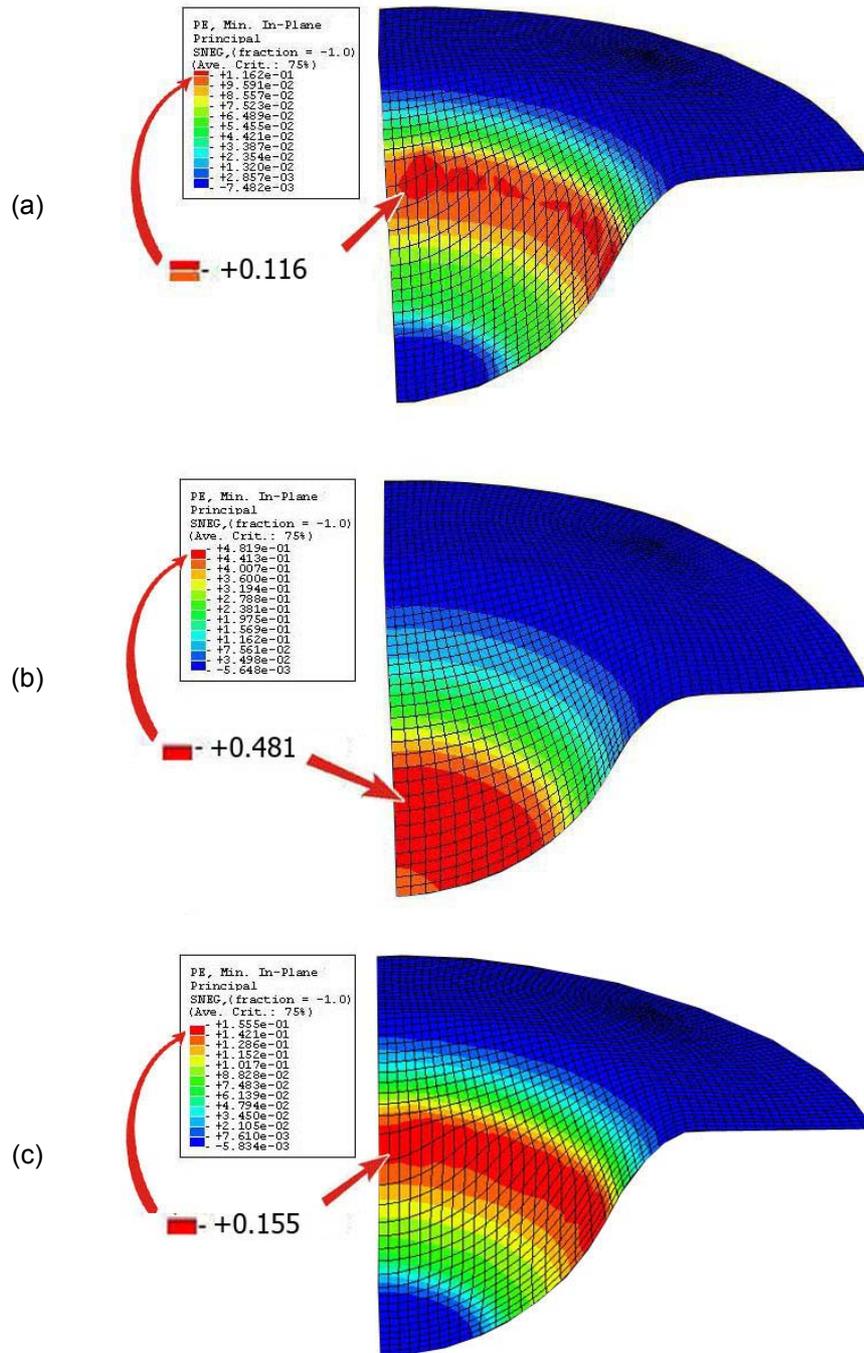


Figura 3 – Valor de  $\epsilon_2$  obtidos por meio das simulações da condição com lubrificante de poliuretano em (a), sem lubrificante em (b) e com óleos com EP em (c).

#### **4. CONCLUSÃO**

Foi possível por meio do modelamento numérico do ensaio de Nakazima, simular diferentes condições de lubrificação e obter os valores de  $\epsilon_2$  (validação). Esses valores são importantes para expressar a capacidade de estiramento (deformação biaxial) da chapa metálica. Nos experimentos práticos se comprovou que a grande melhora na conformabilidade por estiramento foi alcançada com o uso do filme sólido de poliuretano. Dentre os demais lubrificantes usados, a única opção que melhorou a conformabilidade foi alcançada com óleos com propriedades EP. Os valores obtidos experimentalmente por Tigrinho (2005) foram simulados para a determinação do coeficiente de atrito das diferentes condições de lubrificação testadas.

Devido à consistência dos resultados encontrados na simulação numérica, pode-se concluir que o modelamento computacional é uma ferramenta útil para diminuir tempo e custos com experimentos práticos, permitindo de forma eficiente simular diferentes condições de lubrificação.

#### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a Capes pela bolsa de Doutorado, a fundação Araucária pela bolsa de IC e a Universidade de Deakin (Austrália) pela colaboração na simulação com o aplicativo Abaqus.

## REFERÊNCIAS

1. Chemin Filho, R. A., Marcondes, P. V. P, True Strain Distribution Profile on Sheet Metal Using Different Punch Geometries, J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng, January-March 2008, Vol. XXX, No. 1 / 1.
2. Ferziger, J. H.; Peric, M; "Computational Methods for Fluid Dynamics", 3 rd Edition, Springer, Berlin, 2001.
3. Godwin, D. Lubricant Selection e Aplication. Magazine Metal Forming, p. 32-34, January 2004.
4. Keeler, S. P. Understanding Sheet Metal Formability. Machinery, 1968.
5. Moreira, L. P.; Sampaio, A. P.; Ferron, G.; Lacerda, A. C. Análise numérica e experimentação da influência da espessura inicial das deformações limites em chapas. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: UFRGS – Centro de Tecnologia, 2003. p. 39-49.
6. Oberkampf, W. L.; Trucano T. G., Hirsch, C.; "Verification, validation and predictive capability in computational engineering and physics". *Applied Mechanics Reviews*, v. 57, pg. 345-384, ASME, New York, 2004.
7. Richter, A. Comparação dos Resultados de Diferentes Testes para a Determinação da Curva Limite de Conformação. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, 2003, Porto Alegre: UFRGS – Centro de Tecnologia, 2003. p. 24-29.
8. Sampaio, A. P.; Martins, C. A.; Souza, P. C. Caracterização da Conformabilidade de Aço Livre de Intersticiais – IF – Produzido Via Recozimento em Caixa na Companhia Siderúrgica Nacional. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, Porto Alegre: UFRGS – Centro de Tecnologia, 1998. p. 89-100.
9. Tigrinho, L. M. V., Influencia da lubrificação na estampagem via análise das deformações obtidas em uma chapa de aço de alta estampabilidade, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2005.

**Sérgio Fernando Lajarin** – É doutorando do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná.

**Hebert José Lourenço** – É aluno de iniciação científica do curso de graduação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná.

**Paulo Victor Prestes Marcondes** - Possui pós-doutorado pela Universidade de Deakin, em Geelong, na Australia (2007) e Universidades da California em San Diego (1996) e Pennsylvania (1996) nos EUA. Obteve seu doutoramento em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina e Universidade de Birmingham na Inglaterra (1995). Obteve o mestrado em Engenharia Mecânica (1991) e a graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1989). Atualmente é professor associado I da Universidade Federal do Paraná atuando na graduação e pós-graduação (mestrado e doutorado) do Departamento de Engenharia Mecânica. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Conformação Mecânica, atuando principalmente nas áreas de conformação de chapas, ferramentas de conformação (matrizes e moldes) e simulação computacional.