

INFLUÊNCIA DO ATRITO EM ENSAIO DE ESTIRAMENTO BIAIXIAL ERICHSEN DO AÇO DP600 ANALISADO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Thiago Marques Ivaniski ¹
Juliana Zottis ¹
Alexandre da Silva Rocha ¹
Lirio Schaeffer ¹

Resumo

A redução de recursos operacionais, e.g. tempo e matéria prima, é um dos principais desafios da indústria automotiva. A simulação numérica por elementos finitos atua como uma ferramenta computacional importante para a solução destes problemas, de forma a conferir precisão aos resultados calculados quando comparados aos fenômenos reais, ocorridos, por exemplo, em processos de estampagem. Este trabalho tem como objetivo abordar o efeito das condições de atrito utilizando a simulação numérica computacional, em uma chapa bifásica DP600 pelo ensaio de estiramento Erichsen, em que reproduz as condições biaxiais de deformação visando à ductilidade de chapas para estampagem. Criou-se o modelo a partir da inserção dos dados experimentais deste material no software FORGE[®]. Foi observada a influência do coeficiente de atrito durante a simulação numérica na variação das distribuições de pressão, tensão equivalente, redução de espessura e taxa de deformação.

Palavras-chave: Coeficiente de atrito; Ensaio Erichsen; Simulação numérica.

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF FRICTION INFLUENCE IN BIAIXIAL STRETCHING BY ERICHSEN CUP TEST ON DUAL PHASE STEEL

Abstract

The operational resources, i.e. raw materials and time are the primary challenges in the automotive industry. The finite elements method driving as a solution for those problems, in order to obtain an approach results compare real behaves, for example, in the deep drawing process. The objective of this work was a study of friction coefficient conditions in numerical simulation by finite elements of dual phase steel DP600, using Erichsen cup test which simulates biaxial strain aiming at sheet metal forming ductility. It has been performed these test with an experiment data inserted on the FORGE[®] software. It could be possible to verify the friction coefficient influence during the numerical simulation in pressure distribution, effective stress, local necking and strain rate.

Keywords: Friction coefficient; Erichsen Test; Numerical simulation.

I INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de chapas de aço com melhores propriedades mecânicas e baixo peso foi motivado pela demanda da indústria automotiva, pelo alto consumo de combustíveis como também o aumento da presença de gases nocivos na atmosfera no decorrer das últimas décadas. Os aços avançados de alta resistência (*Advanced High Strength Steels - AHSS*) são atualmente protagonistas na produção de componentes estruturais automotivos, e os aços com microestrutura bifásica, por exemplo, garantem

um alongamento médio (20%) e alta tensão de ruptura, em torno de 1000 Mpa [1].

O processo de estampagem de chapas metálicas é empregado na fabricação de carroceiras automotivas e a previsão dos limites de conformabilidade é o principal fator que determinará a capacidade de estiramento do material sem a presença de falha. A ductilidade da chapa, i.e. a capacidade de deformar plasticamente sem a ocorrência de fratura, pode ser conhecida utilizando o ensaio de

¹Laboratório de Transformação Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: thiago.ivaniski@ufrgs.br



estiramento biaxial Erichsen. De acordo com a norma ASTM E643/15 [2], o ensaio é empregado tanto para avaliação do comportamento de chapas em processos de estiramento em estampagem, como também para avaliar a dependência das condições de lubrificação [2,3].

A implementação deste ensaio utilizando o método de elementos finitos foi realizada por Akrouit et al. [4]. Os autores apresentaram uma análise experimental e numérica, onde foi possível determinar o índice Erichsen e a distribuição de forças para chapas de 1,0; 1,5 e 2,0 mm de espessura. Gavrus et al. [3], contribuíram com a investigação reológica utilizando diferentes equações (Ludwick e Voce) para descrever o encruamento do material DC03 com 1,0 mm de espessura, reproduzindo as curvas de distribuição de força e deslocamento próximas às experimentais.

Ensaos experimentais de tração podem ser utilizados para validar as tensões equivalentes de Von Mises obtidas através da simulação numérica do ensaio Erichsen, como também a variação de espessura durante a deformação plástica. O método de elementos finitos permite analisar condições de tensão biaxial e também observar as distribuições não uniformes de deformação nas chapas, devido aos efeitos da lubrificação atuante no ensaio [5,6]. Giuliano e Samani [7] analisaram experimentalmente a influência das condições de lubrificação nos resultados de força, deslocamento e também a distribuição da espessura até o momento da fratura da chapa. Os autores mostram ainda que a lubrificação exerce considerável influência na distribuição de tensão do punção sobre o material, o que, por conseguinte, aumenta o índice Erichsen e reduz força de carregamento.

A lei física de atrito apresentada por Coulomb pode ser descrita como a tensão de cisalhamento entre as superfícies de contato em função da pressão e do coeficiente de atrito.

O coeficiente (μ) é definido como quociente da força tangencial necessária para realizar o movimento entre duas superfícies em função de sua força normal. Uma adaptação da lei proposta por Coulomb em 1798, foi a relação de Amontón-Coulomb, a qual relaciona a mecânica de contato entre os corpos atribuindo a dependência da área real e aparente de contato, sendo proporcional a força aplicada [8].

Gavrus et al. [3], demonstraram que utilizando o método de elementos finitos é possível obter boa aproximação dos resultados de deformação da chapa pelo ensaio Erichsen. Porém, não foram considerados os efeitos do atrito e a anisotropia do material nas distribuições de força do punção durante o processo.

Levando em consideração a abordagem sobre a influência nas condições de atrito do ensaio de punção esférico Erichsen, este trabalho tem como objetivo identificar os efeitos nas condições de atrito em modelo computacional de uma chapa de alta resistência DP600, quando submetidas ao estiramento biaxial. Foram observados os efeitos na distribuição de pressão (P), tensões de Von Mises (σ) e velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$), devido à influência do coeficiente de atrito, como também validar o modelo numérico através da inserção dos parâmetros reológicos e propriedades do material no software Forge NTx 1.0.

2 METODOLOGIA

2.1 Propriedades Mecânicas do DP600 e Modelagem Matemática para Implementação no Software

Para a validação do modelo numérico, uma série de ensaios experimentais de tração foi realizada. As propriedades mecânicas uniaxiais como limite de resistência (σ_e), tensão máxima (σ_{\max}), deformação verdadeira (ϕ) e os parâmetros de estampagem como anisotropia planar da chapa e coeficiente de encruamento (η) foram testados, e encontram-se respectivamente na Tabela 1 e Tabela 2, em comparativo com análises de outros autores sobre o DP600.

Baseando-se nos resultados experimentais de tração, a curva de escoamento foi calculada para as leis de potência de Ludwick- Hollomon Equação 1 e adaptada pela relação reológica de Hensel Spittel Equação 2, que considerou a temperatura T (m_1) e a velocidade de deformação (m_3) sendo possível ajustar a curva de escoamento.

Tabela 1. Propriedades Mecânicas do DP600 utilizado no ensaio Erichsen

Propriedades Mecânicas do DP 600			
Propriedades	σ_e (MPa)	σ_{\max} (MPa)	ε (%)
Ensaio de Tração NBR8164	353	607	20
Norma DIN10338	340-420	≥ 600	≥ 20
DP600 (Tigrinho, 2012)[12]	385	602	23

Tabela 2. Parâmetros de estampagem anisotropia média (\bar{R}), anisotropia planar (ΔR), para o DP600 previsto pela norma [9]

Parâmetros de estampabilidade a Temperatura ambiente DP600						
Parâmetros	\bar{R}	R_{0°	R_{45°	R_{90°	ΔR	$n_{\text{médio}}$
Ensaio de Tração	1	0,96	1,08	0,87	-0,17	0,20
DP600 [9]	0,94	0,68	1,04	0,70	0,20	0,19

$$k_f = k_{fo} \cdot \varphi^n \quad (1)$$

$$k_f = A \cdot e^{m_1 T} \cdot T \cdot \varphi^{m_2} \cdot e^{\frac{m_4}{\varphi}} \cdot \dot{\varphi}^{m_3} \quad (2)$$

Os parâmetros de Lankford (R_0 , R_{45} e R_{90}), que definem as propriedades anisotrópicas do DP600 em estudo, foram inseridos no banco de dados do software com as respectivas leis de Von Mises e uma adaptação de Hill 1948 nos critérios de deformação plástica dos materiais quando encruados em casos de laminação a frio [5,9-11].

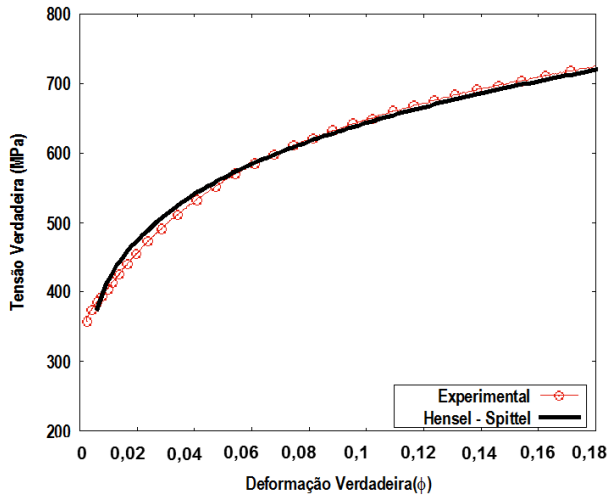


Figura 1. Curva de escoamento verdadeira experimental do DP600 e ajustamento da curva usando Hensel - Spittel para a validação do modelo numérico no software.

A equação utilizada para a modelagem computacional foi baseada nos resultados experimentais, conforme demonstrado na Figura 1 e as equações descritas na Tabela 3.

Através da relação de Hensel-Spittel, foi possível considerar durante a construção da curva de escoamento do material os coeficientes de sensibilidade à velocidade de deformação (m_3) e também à temperatura (m_4) [12-14]. Estes parâmetros definem o comportamento do material quando trabalhado em temperaturas elevadas, sendo relevantes para as análises posteriores ao ensaio Erichsen [12-14].

2.2 O Ensaio Experimental Erichsen

O ensaio experimental de Erichsen foi conduzido na Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, no Laboratório de Transformação Mecânica LdTM. O equipamento utilizado foi uma prensa de ensaio universal EMIC com capacidade de 600kN, a qual possui um dispositivo Erichsen projetado conforme a Norma ASTM E643/95 [2].

O ensaio considerou uma condição elevada de atrito, sendo realizado sem lubrificação e com três testes utilizando amostras do mesmo lote de chapas analisados no ensaio uniaxial de tração. A Figura 2 apresenta o equipamento utilizado para o ensaio, assim como o posicionamento da retirada das amostras para a realização dos experimentos.

A velocidade de penetração aplicada foi constante com um valor de $V=0,083$ mm/s, sendo controlada através de uma adaptação na célula de carga, capaz de detectar a força gerada no sistema e que contém ainda sensores de deslocamento para controle da profundidade. Os sinais foram coletados por um cabo serial acoplado ao computador,

Tabela 3. Equação de Hensel-Spittel, comparando ao resultado do ensaio uniaxial de tração a 20°C e amostras perpendiculares a direção de laminação (R_{90})

Temp (°C)	Equação	
	Hensel - Spittel	Hollomon (Experimental)
20	$k_f = 800e^{-0,0009 \cdot T} \cdot \varphi^{0,1902} \cdot 1,51e^{-9} \cdot \dot{\varphi}^{-0,1}$	$k_f = 996,03\varphi^{0,1902}$

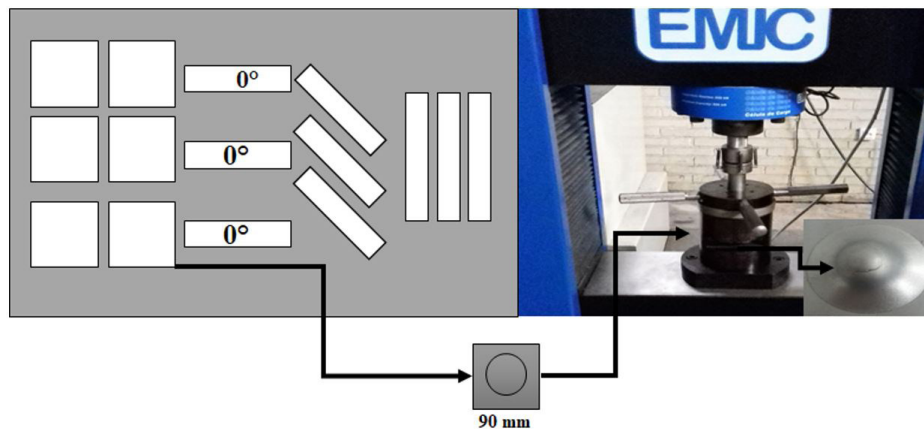


Figura 2. Representação da coleta das amostras na chapa DP600 e equipamento de ensaio universal com o dispositivo de adaptação de punção hemisférico Erichsen.

transformando os sinais elétricos na respectiva carga necessária para a deformação das chapas.

2.3 O Modelo Numérico

A análise pelo método de elementos finitos foi realizada para fins de comparação com os resultados experimentais, avaliando o comportamento da chapa durante o ensaio Erichen e buscando validar o modelo numérico. Os parâmetros experimentais foram utilizados como base para construção do modelo tridimensional (3D) no software.

O Forge[®] NTx é um software da *Transvalor solution*, utilizado para a simulação de diversos processos metalúrgicos de conformação mecânica. Uma das possibilidades que software apresenta é a avaliação do comportamento de chapas quando submetidas a processos de estampagem. Ainda permite avaliar diferentes propriedades mecânicas, a forma final da geometria estampada, defeitos causados pela estrição, tensões residuais, forças e alterações metalúrgicas. O software disponibiliza também uma série de discretizações, os quais possibilitam a interpretação de modelos reológicos viscoplásticos, elasto-plásticos, elasto-viscoplásticos, fricção e transferência de calor [15].

Para construção da malha, elementos volumétricos tetraédricos foram aplicados sobre a chapa, considerada elástica, e elementos superficiais triangulares sobre o ferramental, considerado rígido (Figura 3b).

O material em análise possui as mesmas dimensões do experimental, ou seja, diâmetro de 90 mm e espessura de 1 mm, conforme representação apresentada na Figura 3. A função de reconstrução automática de malha “*automatic remeshing*” foi ativada. De acordo com Gavrus et al. [3] e Chenot et al. [13], esta função elimina problemas numéricos que podem ocorrer durante a discretização de tempo e espaço na simulação computacional. O punção, matriz inferior e matriz superior, são considerados como sólidos rígidos na análise, enquanto a chapa é considerada como

corpo plástico dentro do modelo Elasto-plástico adaptado de Hansel-Spittel, de acordo com o banco de dados do software.

O atrito para este modelo foi definido pela condição de lubrificação entre a interface do punção em contato com a chapa, conforme a lei de *Coulomb* para dois casos de fricção, i.e de baixo atrito com coeficiente de fricção $\mu = 0,12$ quando utilizado lubrificante e alto atrito $\mu = 0,3$, conforme Kim et al. [16], simula revestimento galvanizado a zinco sem a presença de lubrificante.

Para o prensa chapas e a matriz inferior, por tratar-se de um teste de estrição, foi selecionada a opção descrita como contato fixo bilateral “*Bilateral Sticking*”, o mesmo utilizado por García et al. [6], no qual os nós em contato entre as interfaces não deslizam, apenas estriccionando a chapa.

2.4 Discretização pelo Tempo e Espaço por Elementos Finitos

A opção de construção da malha é descrita pelo conjunto de fórmulas utilizadas em função do deslocamento Δu , velocidade v_a e v_b e pressão.

De acordo com Chenot et al. [13], se negligenciada a dependência da força de inércia de um material elasto-plástico por um deslocamento virtual Δu^* e pressão p^* temos a resolução:

$$\int_{\Omega} (\sigma' + \Delta \sigma') : \Delta \varepsilon^* dV - \int_{\Omega} (p \operatorname{div}(\Delta u^*)) dV + \int_{\partial \Omega_c} \tau f(\Delta u^*) dS = 0 \quad (3)$$

$$\int_{\Omega} \left(-\operatorname{div}(\Delta u) - \frac{\Delta p}{\kappa} + 3\alpha \Delta T \right) p \cdot dV = 0 \quad (4)$$

em que κ é o coeficiente de compressibilidade do material e α é o coeficiente de dilatação linear, e são dependentes da temperatura (T) e pressão (p).

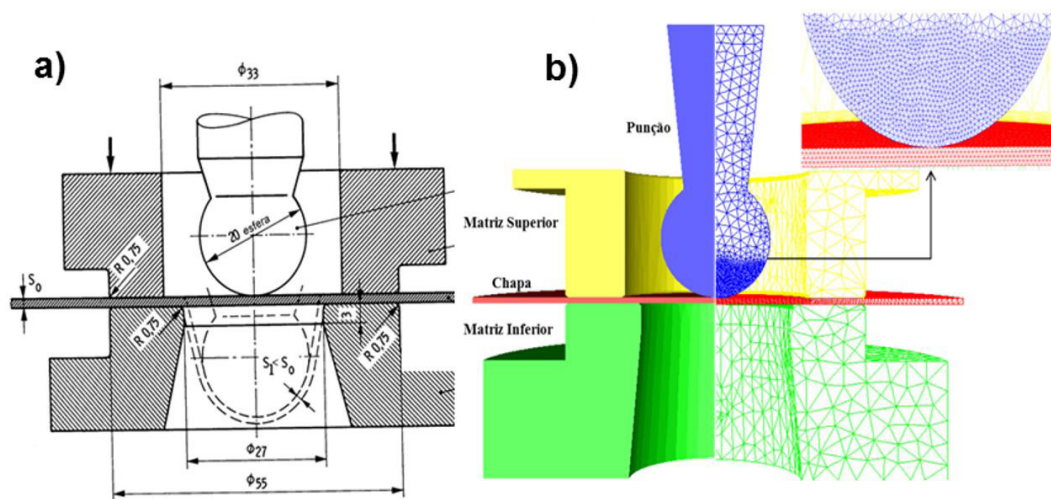


Figura 3. Geometria utilizada no modelamento numérico do ensaio Erichen (a) Geometria (b) Modelo computacional.

2.5 Contato e Fricção

O contato do sistema possui uma dependência na diferença entre as velocidades v_a e v_b e na condição de não intersecção entre os nós, que dados pelo deslizamento do punção sobre a chapa, resultam na tensão de cisalhamento (τ_i) entre as interfaces ($\partial\Omega_c$). A Equação 5 mostra como exemplo o modelo de Coulomb.

$$\bar{\tau} = -\mu \cdot \sigma n \cdot \frac{\bar{V}_g}{\sqrt{V_a^2 + V_b^2}} \quad (5)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Validação do Modelo Numérico Usando Resultados Experimentais

Os resultados experimentais de força (N) e deslocamento do punção (mm) são apresentados na Tabela 4. Já a Figura 4 representa a distribuição das forças em comparação com a simulação numérica em diferentes condições de atrito. Usando as relações matemáticas de Hensel-Spittel, com os respectivos coeficientes de atrito, obteve-se uma aproximação com os resultados experimentais das distribuições de carga. Assim, sendo possível verificar numericamente as aproximações das tensões equivalentes de Von Mises e distribuições de carga e velocidade de deformação.

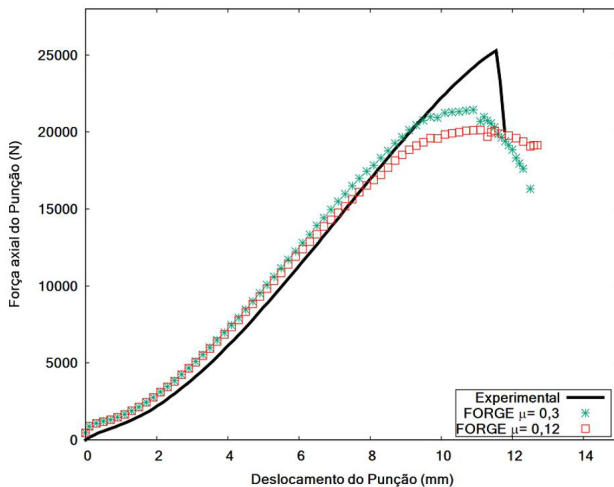


Figura 4. Distribuição da força gerada pelo punção (N) em função do deslocamento (mm) em comparativo com a simulação numérica do DP600.

Tabela 4. Força máxima do Punção (N) e Índice IE máximo (mm), para o DP600 experimental e simulado

DP600	Experimental	Simulado $\mu = 0,12$	Simulado $\mu = 0,3$.
Força do Punção (N)	25000	20686	21434
Índice Erichsen IE (mm)	11,4	11,5	10,9

Pode ser observada uma diferença de 11,5% na força máxima do punção na simulação numérica quando comparada ao resultado experimental sem lubrificação. Esta diferença dos picos de força pode estar relacionada ao revestimento galvanizado a zinco da chapa, a qual gera resistência mecânica extra em sua membrana, à própria condição de atrito e rugosidade superficial da chapa e da ferramenta, condizendo com os resultados apresentados por Akrouf et al. [4]. A complexidade da microestrutura do aço DP600 também pode ser um fator de influência nos resultados experimentais, pois o modelo considera apenas suas propriedades reológicas. Demonstrando, portanto, uma boa aproximação com o comportamento mecânico realizado em ensaio experimental.

3.2 Distribuição de Tensões e Espessura

A Figura 5 apresenta a distribuição de pressão hidrostática ao longo da chapa em contato com o punção e as tensões equivalentes resultantes da análise numérica para ambos os casos estudados. A pressão hidrostática indica valores positivos e negativos, onde a chapa sofreu tensão e compressão respectivamente.

Pode ser observado que a pressão, neste resultado mostrando o campo de tensões nas três direções está mais bem distribuída utilizando o coeficiente de atrito de $\mu = 0,12$, quando comparado ao atrito de $\mu = 0,3$. Como consequência, a distribuição das tensões de Von Mises também resultaram em melhor distribuição, porém com valores máximos muito semelhantes, em torno de 780 MPa no domo.

Além disso, percebeu-se maior área de contato do punção com a chapa, conseqüentemente, reduzindo a força máxima e aumentando a distribuição da espessura ao longo do punção na região estirada. A distribuição máxima de tensão equivalente de Von Mises é maior ao centro do punção quando o atrito é considerado $\mu = 0,12$, este resultado indica que o baixo coeficiente aumenta as distribuições de deformação no campo de tensões, exercido pelo punção esférico. Supõe-se que a área de contato do punção seja maior, devido ao efeito de baixo atrito na chapa, segundo Akrouf et al. [4], em torno de 30° a partir do centro do domo.

Quando utilizado em extrapolação um alto coeficiente de atrito ($\mu = 0,3$), as tensões foram menores no centro do domo, devido a maior tensão de contato, o que evidencia uma alta fricção localizada na região tangencial do punção e por consequência menor redução de espessura no local e.g. Figura 6.

Observando o gráfico da Figura 6, é possível analisar que a redução de espessura na condição de $\mu = 0,3$ tende a ser menos homogêneo em torno do punção quando

comparado a $\mu = 0,12$. Essa mesma variação incidiu também a tensão equivalente (σ_e) de Von Mises, e foram observadas por Darendeliler et al. [17], porém a redução da espessura é localizada e não distribuída como visto em baixo coeficiente de atrito, pois a espessura no domo atingiu 0,69 mm.

Foi evidenciado a redução na força e o aumento no deslocamento do punção consequentemente, e.g. Figura 3. Essa queda acentuada a partir da força máxima, também é observada na indicação da Figura 6, que mostrou tensão equivalente tende a ser menor ao centro do domo.

3.3 Velocidade de Deformação

A velocidade de deformação variou consideravelmente para a condição de $\mu = 0,3$, não apenas o valor, como também um aumento na distância (dB) entre o domo e o prensa chapas. Esta afirmação pode ser verificada no gráfico da Figura 7, onde é observado que o efeito causado pelo baixo atrito ($\mu = 0,12$), que gera uma redução da velocidade de deformação até o centro do domo. Também a distância entre o centro do domo e a região de estrição é menor como é observado em (dA).

O ponto radial de maior contato com o punção e a chapa, mostra a influência que o excesso de atrito pode causar gerando maiores tensões e propensão a falha localizada na região de menor espessura. Como também o que a atribuição no atrito que revestimentos galvanizados a zinco de acordo com Kim et al. [16].

4 CONCLUSÕES

O presente estudo abordou o efeito das condições de atrito na distribuição de tensão e espessura em uma chapa de alta resistência DP600 pelo ensaio de estiramento Erichsen, utilizando simulação computacional, onde foram feitas as seguintes considerações:

Comparando os resultados experimentais da força axial do punção, com o perfil resultante da simulação numérica, obteve-se uma aproximação numérica aceitável. Contudo, houve uma variação de aproximadamente 11,5% na força máxima do punção, pois o modelo não considera a influência do revestimento galvanizado, mesmo utilizando um coeficiente de atrito ($\mu = 0,3$) similar ao já estudado por Kim et al. [16]. Para a melhoria no modelamento, será adicionada uma malha superficial de material similar ao galvanizado, a fim de buscar uma correlação entre as propriedades mecânicas adicionais que os revestimentos exercem na chapa, associados com as condições de lubrificação.

A variação de força em função do deslocamento do punção, pressão hidrostática, tensões equivalentes e velocidade de deformação, foram observadas com a alteração no coeficiente de atrito, mostrando sua relevância para atingir maiores profundidades de deformação em processos de estampagem que exijam estiramento biaxial, como também, a distribuição da espessura da chapa e o campo de tensões. Evidenciou-se na simulação computacional, sem a influência do revestimento, a redução das cargas exercidas

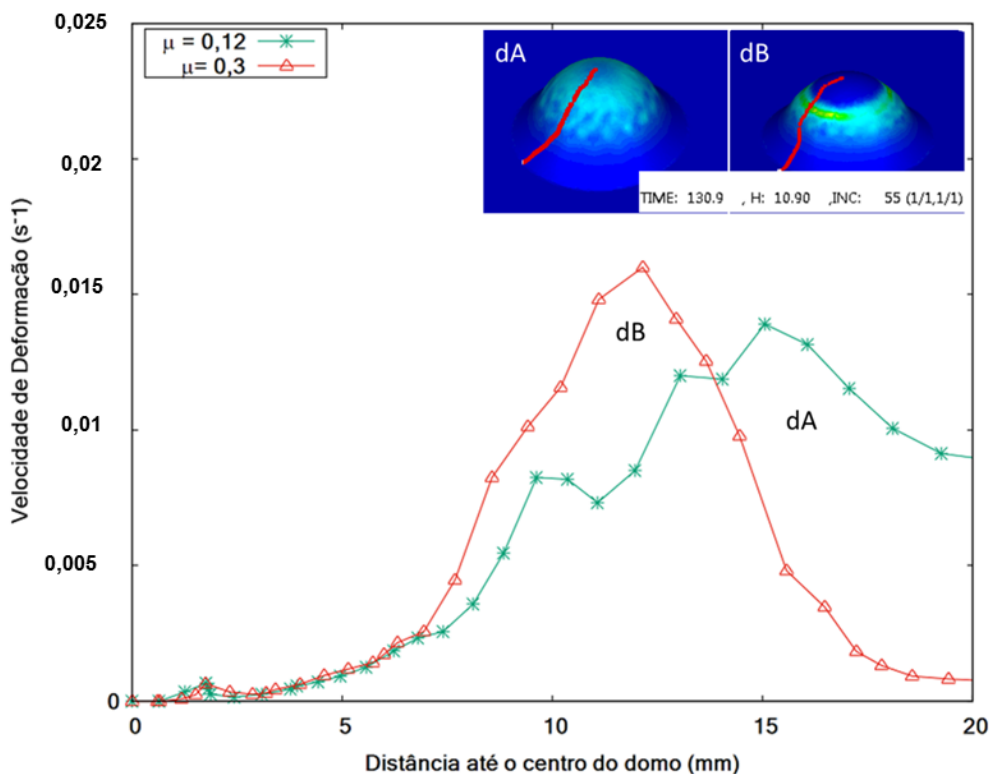


Figura 7. Distribuição da velocidade de deformação até o centro do domo com variados coeficientes de atrito; (dA) $\mu = 0,12$; (dB) $\mu = 0,3$ e ilustração destacando as regiões medidas até o centro do domo.

no processo, devido ao baixo atrito e a melhor distribuição da pressão hidrostática.

A aplicação deste modelo em simulação numérica permite a abertura de possibilidades para a avaliação em diferentes condições de atrito nas chapas de alta resistência. Observa-se ainda a importância da avaliação na superfície do punção, o qual será estudado futuramente, permitindo avaliar o quanto o atrito influencia em aplicação de revestimentos superficiais, para ferramentas de estampagem na simulação numérica, uma vez consideradas neste presente estudo como corpo rígido.

Portanto, os resultados obtidos neste estudo serão utilizados para a avaliação de processos de estampagem de

chapas do DP600, como o aperfeiçoamento das curvas de escoamento, utilizando relações reológicas disponíveis no software Transvalor FORGE®.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a CAPES por fomentar a pesquisa brasileira, concedendo bolsas de estudos e o projeto BRAGECRIM n° (026/14) em parceria com o Instituto de Conformação Mecânica (IBF – Institut für Bildsame Formgebung) da RWTH Aachen University.

REFERÊNCIAS

- 1 Keeler S, Kimchi M. Advanced high-strength steels application guidelines version 6. Brussels: WorldAutoSteel; 2016.
- 2 American Society for Testing and Materials. ASTM E643/15: ball punch deformation of metallic sheet material. West Conshohocken: ASTM; 2015.
- 3 Gavrus A, Banu M, Ragneau E, Maier C. An inverse analysis of the Erichsen Test applied for the automatic identification of sheet materials behavior. *Engineering*. 2010;2(7):471-476. <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2010.27062>.
- 4 Akrouf M, Amar MB, Chaker C, Dammak F. Numerical and experimental study of the Erichsen test for metal stamping. *Advances in Production Engineering & Management*. 2008;3(2):81-92.
- 5 Dizaji S. An investigation of ductile fracture criteria for sheet metal forming [thesis]. Ankara: Middle East Technical University; 2014.
- 6 García C, Celentano D, Flores F, Ponthot J-P, Oliva O. Numerical modelling and experimental validation of steel deep drawing processes. Part II: applications. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006;172(3):461-471. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.11.016>.
- 7 Giuliano G, Samani F. Effect of lubrication on the Erichsen test. *Applied Mechanics and Materials*. 2013;365-366:425-428.
- 8 Ferrarini JL. Análise e determinação do coeficiente de atrito no processo de estampagem profunda [tese]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2014.
- 9 American Society for Testing and Materials. ASTM E517/00: standard test method for plastic strain ratio r for sheet metal. West Conshohocken: ASTM; 2000.
- 10 Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1948;193(1033):281-297. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1948.0045>.
- 11 Hu J, Marciniak Z, Duncan J. *Mechanics of sheet metal forming*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2002.
- 12 Tigrinho LMV. Análise da fratura de chapas de aço avançado de alta resistência DP600 quando submetido a diferentes estados de tensões [tese]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2011.
- 13 Chenot J-L, Bernacki M, Bouchard P-O, Fourment L, Hachem E, Perchat E. Recent and future developments in finite element metal forming simulation. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Technology of Plasticity*, 2014; Nagoya, Japan. Nagoya: The Japan Society for Technology of Plasticity; 2014.
- 14 Batalha MHF. Estudo da estampabilidade a quente de aço ao boro em conformação com redução de espessura controlada [dissertação]. Campinas: Universidade de Campinas; 2015.
- 15 Lee M, Kim C, Pavlina E, Barlat F. Advances in sheet forming: materials modeling, numerical simulation, and press technologies. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2011;133(6):061001. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4005117>.
- 16 Kim H, Han S, Yan Q, Altan T. Evaluation of tool materials, coatings and lubricants in forming galvanized advanced high strength steels (AHSS). *CIRP Annals*. 2008;57(1):299-304. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.029>.

17 Darendeliler H, Akkök M, Yücesoy CA. Effect of variable friction coefficient on sheet metal drawing. *Tribology International*. 2002;35(2):97-104. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X\(01\)00099-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X(01)00099-8).

Recebido em: 25 Jul. 2017

Aceito em: 17 Abr. 2018