

MODELAMENTO POR ELEMENTOS FINITOS DO ENSAIO DE EXPANSÃO DE FURO DOS AÇOS BIFÁSICOS DP600 E DP800

Rennan de Souza da Silva, orennan@gmail.com¹

Rafael Oliveira Santos, rafael.oliveira@cefet-rj.br^{2,3}

Luciano Pessanha Moreira, luciano.moreira@metal.eeimvr.uff.br¹

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Avenida dos Trabalhadores, 420, CEP 27255-125, Volta Redonda-RJ, Brasil,

²Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Avenida dos Trabalhadores, 420, CEP 27255-125, Volta Redonda-RJ, Brasil,

³Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Campus Angra dos Reis, Rua do Areal, 522 Angra dos Reis, RJ, CEP 23953-030, Brasil.

Resumo: Neste trabalho foi proposto um modelo axissimétrico em elementos finitos para avaliar o ensaio de expansão de furo em chapas de aços bifásicos DP600 e DP800, em termos de razão de expansão de furo e força exercida pelo punção. Para simular o comportamento mecânico do material foi utilizado um modelo de encruamento isotrópico associado ao modelo Gurson-Tvergaard-Needleman que descreve a degradação do material. Na avaliação da razão de expansão de furo foram comparadas duas metodologias de cálculo. O primeiro método consiste em medir o diâmetro final do furo no instante que a fratura do material ocorre, enquanto o segundo método utiliza como critério a queda da carga necessária para deformar a chapa aplicada pelo punção. Para o aço DP600 foram obtidos valores de razão de expansão de furo de 26,59% utilizando o primeiro método e 26,28% para o segundo método. Já para o DP800 os valores de razão de expansão de furo foram 25,53% e 25,40%, respectivamente. Com a finalidade de avaliar a fratura na borda do furo, foram analisados os níveis de deformação plástica equivalente durante o ensaio. Além disso, também foi analisada a influência do coeficiente de atrito entre o ferramental e o material da chapa furada. Verificou-se que a falha do material ocorre a partir de cerca de 5,80 mm de curso do punção e pode ser atribuída a um aumento da taxa de nucleação de novos vazios que resultam no processo de fratura dúctil na borda do furo.

Palavras-chave: Ensaio de Expansão de Furo, Aços Bifásicos, Conformação de Chapas.

1. INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas a indústria automotiva tem definido diretrizes visando a necessidade de redução de consumo de combustível e emissão de gases poluentes (Keeler *et al.*, 2014; Ministério da Indústria Comércio Exterior e Serviços, 2013). Uma das soluções encontradas foi produzir veículos mais leves por meio da utilização de materiais como aços e polímeros de alta resistência, e metais de baixa densidade. Em resposta a esse cenário, a indústria siderúrgica desenvolveu uma gama de materiais, conhecidos como aços avançados de alta resistência (AHSS – *Advanced high strength steels*), dentre eles destacam-se os aços bifásicos (DP – *Dual phase steels*). Essa classe de aço fornece excelente resistência mecânica e boa ductilidade por meio da sua estrutura bifásica, composta de ferrita e martensita.

O ensaio de expansão de furo foi desenvolvido para avaliar a capacidade de conformação de chapas metálicas. Nesse tipo de ensaio, uma chapa com um furo circular é fixada junto a um suporte enquanto um punção de ponta cônica, concêntrico ao furo, se desloca de forma a penetrar o furo da chapa. O movimento do punção provoca a deformação do furo da chapa. De acordo com a International Organization for Standardization (2009), a razão de expansão de furo (REF) é calculada a partir da relação entre o diâmetro deformado do furo no instante da fratura e o diâmetro do furo inicial.

Nesse trabalho foi desenvolvido um modelo axissimétrico do ensaio de expansão de furo, a partir do programa ABAQUS/Explicit, com a finalidade de obter a REF para os aços DP600 e DP800. Além da REF, foram analisadas variáveis do processo, tais como, a influência do valor do coeficiente de atrito e a força realizada pelo punção durante o ensaio.

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais

Os aços bifásicos DP600 e DP800 possuem como principal característica duas fases microconstituintes, uma ferrítica e outra martensítica, com valores percentuais bem significativos. Além da ferrita e da martensita, há também bainita, no entanto em percentuais muito menores. Na Tabela 1, estão listados os percentuais de fração volumétrica e o tamanho médio de cada um dos microconstituintes desses aços.

Tabela 1. Frações volumétricas e tamanhos médios de grãos dos aços DP600 e DP800, Santos *et al.* (2017).

Aço	Medida	Ferrita	Martensita	Bainita
DP600	F _v (%)	72,1 ± 4,9	27,3 ± 4,8	0,60 ± 0,32
	d ₀ (μm)	5,1 ± 0,8	1,1 ± 0,3	0,06 ± 0,04
DP800	F _v (%)	69,3 ± 5,8	30,1 ± 2,5	0,60 ± 0,30
	d ₀ (μm)	5,8 ± 2,5	1,3 ± 0,5	0,02 ± 0,01

A partir de ensaio de tração uniaxial, Santos *et al.* (2017), mostram que o comportamento plástico dos aços DP600 e DP800 foram ajustados segundo a equação de encruamento de Swift e inseridos no modelo por meio de tabela contendo os valores tensão de escoamento verdadeira e a deformação plástica verdadeira.

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon^p)^n \quad (1)$$

onde K , ε_0 e n representam respectivamente o coeficiente de resistência, uma pré-deformação do material e o expoente de encruamento.

A Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas de tensão de escoamento (σ_y), tensão limite de escoamento (σ_u), deformação uniforme (ε_u), deformação total (ε_T) e o coeficiente de anisotropia plástica normal ($\bar{r}$) bem como os parâmetros da lei de encruamento de Swift.

Tabela 2. Propriedades mecânicas dos aços DP600 e 800, Santos *et al.* (2017)

Aço	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ε_u (%)	ε_T (%)	K (MPa)	ε_0 (%)	n	$\bar{r}$
DP600	392	749	15,2	22,6	1054,2	0,163	0,201	0,93
DP800	451	867	12,7	18,5	1195,2	0,081	0,176	0,86

Para zona elástica de deformação esses aços apresentam um comportamento elástico linear e isotrópico definido pelo módulo de elasticidade longitudinal, $E = 207$ GPa, e o coeficiente de Poisson, $\nu = 0,29$.

2.2. Modelo de Dano

O modelo de dano Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) foi adotado neste trabalho para descrever o escoamento plástico dos aços bifásicos. Este modelo é amplamente usado para descrever os efeitos micromecânicos em metais dúcteis, sendo definido pela seguinte função de escoamento:

$$\phi = \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{3}{2}q_2 \Sigma\right) - [1 + q_3 f^{*2}] = 0 \quad (2)$$

com,

$$f^* = \begin{cases} f & \text{se } f \leq f_c \\ f_c + \frac{f_F - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c) & \text{se } f_c < f < f_F \end{cases} \quad (3)$$

na qual o parâmetro f_c é o valor crítico da fração volumétrica de vazios, $\bar{f}_F = 1/q_1$, f_F é o valor da fração volumétrica de vazios onde a perda da capacidade do material suportar tensão ocorre.

Na Equação (2) q_1 , q_2 , q_3 são parâmetros do material, onde $\bar{\sigma}$ é a tensão equivalente de Von Mises, f^* é um parâmetro de dano, Σ é o fator de triaxialidade de tensões definido pela razão entre a tensão hidrostática $\sigma_h = \sigma_{kk}/3$ e a tensão de escoamento σ_y . No modelo GTN, o dano evolui como uma combinação entre o crescimento de vazios pré-existent e a

nucleação de novos vazios, seja pelo mecanismo de falha ou pela decoesão de inclusões ou precipitados. A equação de evolução do dano no modelo GTN é escrita em termos de crescimento de vazios (VG) e nucleação de vazios (VN):

$$\dot{f} = \dot{f}_{VG} + \dot{f}_{VN} = (1 - f)\dot{\epsilon}^p : \mathbf{I} + A_N \dot{\epsilon}^p \quad (4)$$

com,

$$A_N = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon^p - \epsilon_N}{S_N} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Na Equação (4), ϵ^p representa o tensor de segunda ordem taxa de deformação plástica enquanto que $\mathbf{I}$ é o tensor de identidade, também de segunda ordem e $\dot{\epsilon}^p$ é a variável que representa a taxa de deformação plástica equivalente. A Equação (5) define o parâmetro A_N como sendo a nucleação por deformação plástica, segundo uma distribuição normal de deformações juntamente com uma deformação plástica média, ϵ_N , e seu respectivo desvio padrão S_N . A variável f_N representa a fração volumétrica da nucleação de vazios.

O comportamento do dano do material segundo o modelo GTN é completamente definido por três parâmetros do material (q_1, q_2, q_3), três parâmetros de nucleação (ϵ_N, S_N, f_N), e dois parâmetros de falha (f_c, f_F) juntamente com a porosidade inicial r_0 . Os parâmetros do modelo GTN para os aços DP600 e 800, listados na Tab. 3, foram determinados no estudo proposto por Santos *et al.*, (2017).

Tabela 3. Parâmetros do modelo GTN para os aços bifásicos, Santos *et al.* (2017).

Aço	r_0	q_1	q_2	q_3	ϵ_N	S_N	f_N	f_c	f_F
DP600	0,995	1,86	0,80	3,46	0,090	0,030	0,0104	0,01684	0,018
DP800	0,993	1,76	0,83	3,09	0,085	0,200	0,0445	0,02390	0,026

3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

É proposto um modelo, de simetria axial composto de um esboço, uma matriz inferior, uma matriz superior e um punção cônico, conforme esquema apresentado na Fig. 1. O que só foi possível devido aos valores de anisotropia plástica normal, $\bar{r}$, serem próximos de 1, permitindo que o comportamento do esboço possa ser considerado simétrico ao longo de um eixo de simetria. O modelo foi construído de modo que o esboço é fixado entre a matriz inferior e a matriz superior a partir da aplicação de uma força de 50 kN sobre a chapa, de modo que o punção avança sobre o furo do esboço deformando-o plasticamente até que ocorra a fratura nas bordas do furo.

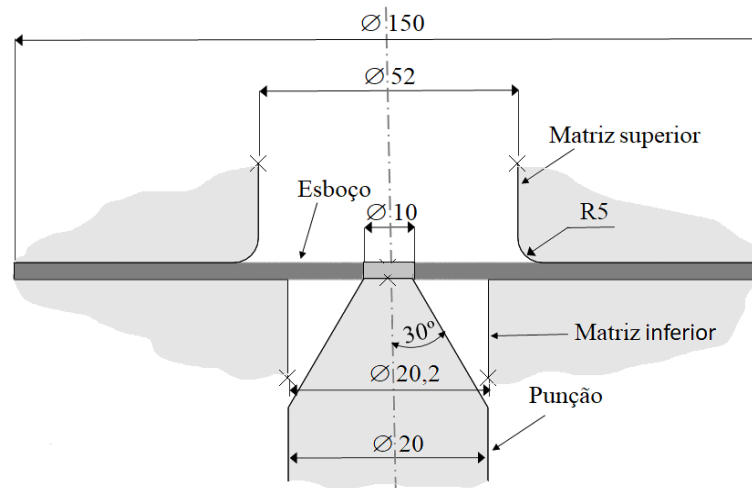


Figura 1. Esquema do ferramental do ensaio de expansão de furo com dimensões em [mm].

Os parâmetros do modelo são apresentados na Tab. 4, em que são listados o tipo de elemento, o tempo total de ensaio, o número de elementos da malha em cada região do esboço e o valor do coeficiente de atrito. Hu, Sun e Golovashchenko (2016). Adicionalmente, para avaliar a influência do valor do coeficiente de atrito no ensaio também foram feitas simulações para os valores de coeficiente de atrito de 0,05, 0,15 e 0,20.

Tabela 4. Parâmetros do modelo por elementos finitos.

Tipo de elemento	Tempo de ensaio (segundos)	Espessura do Esboço (mm)	Malha (elementos)		Atrito
			Zona de deformação	Zona não afetada pela deformação	
			(mm) $0 < d \leq 8$	(mm) $8 < d < 75$	
CAX4R	9,5	1,2	1772	896	0,10

As condições de contorno do modelo são apresentadas na Tab. 5, na qual são listadas as restrições de cada uma das partes do modelo, bem como o valor de força que a matriz superior exerce sobre o esboço para mantê-la fixa conforme a norma ISO 16630:2009(E), International Organization for Standardization (2009), além de apresentar a velocidade de avanço do punção durante o ensaio SMDI (2017).

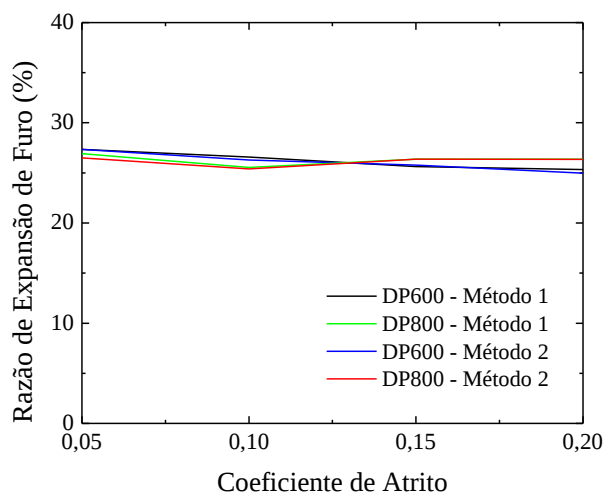
Tabela 5. Condições de contorno.

Matriz inferior	Engastado
Matriz Superior	Restrição à translação na direção x e rotação em torno do eixo z Força de $-50kN$ na direção y
Punção	Restrição à translação na direção x e rotação em torno do eixo z Velocidade (mm/s) 1

São propostos neste trabalho, para o cálculo do diâmetro do furo expandido, dois critérios de parada. Para o primeiro critério (Método 1) foi adotado o que a norma ISO 16630:2009(E), International Organization for Standardization (2009) define, ou seja, o ensaio é interrompido somente quando visualizada a fratura ao longo de toda a borda do esboço, enquanto que o segundo critério (Método 2) o ensaio é interrompido no momento em que ocorre uma queda brusca da força exercida pelo punção.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação aos efeitos do coeficiente de atrito no diâmetro do furo expandido, e consequentemente nos valores da razão de expansão de furo, verificou-se que a REF decresce com o aumento do coeficiente de atrito. Na Figura 4, a variação percentual dos valores de REF, para o Método 1, foi de 2,01% e 0,56% para os aços DP600 e DP800, enquanto que para o Método 2, foi encontrada uma variação de 2,37% e 0,14% nos resultados. Desse modo para as análises subsequentes foi utilizado um coeficiente de atrito igual a 0,1, pois os efeitos de atrito não exerceram uma grande influência nos resultados obtidos pelo modelo proposto.

**Figura 4. Previsões da razão de expansão de furo em função do coeficiente de atrito.**

Os valores obtidos para a razão de expansão pelo método 2, foram inferiores em menos de 0,5% aos obtidos para o método 1, 26,28% e 26,59% para o DP600 e 25,40% e 25,53% para o DP800, isso se deve ao critério de parada, que é a primeira redução de carga observada no ensaio, nesse instante a trinca pode não ter se propagado ao longo de toda a borda do esboço e, por conseguinte o diâmetro do furo pode ser menor. O método 2 apresenta uma vantagem essencial em relação ao método 1, ao se utilizar a queda da curva de carga do ensaio como critério de parada torna-se possível a

automatização do ensaio, eliminando possíveis distorções dos resultados, decorrentes de erros da interface homem-máquina, uma vez que o método 1 e a norma ISO são fortemente dependentes da perícia do profissional que realiza o ensaio de expansão de furo.

Ao comparar os resultados do modelo com outros trabalhos (Chen *et al.*, 2014; CHUFAN, 2015; Krempaszky *et al.*, 2014; SMDI, 2017; Tepedino, 2014; Tsoupis e Merklein, 2016) na Fig. 5, observa-se, que os dois critérios fornecem resultados dentro da faixa de valores já determinados em outros trabalhos. O método 1 segue o procedimento definido na norma ISO, para sua aplicação experimental são necessários aparatos especiais como, por exemplo, câmeras de alta definição, que além do custo do equipamento, demanda um treinamento adequado, o que eleva os custos do ensaio, por outro lado o método 2, exige tão somente o ferramental padrão para o ensaio (matrizes e punção), o que torna sua implementação mais simples e menos custosa.

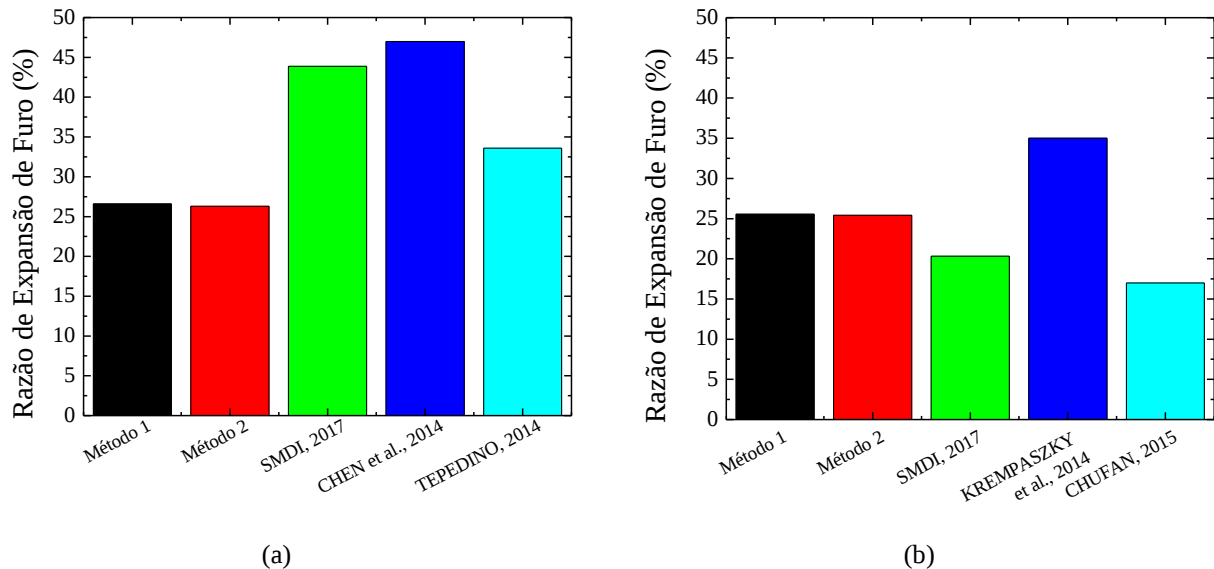


Figura 5. Razão de expansão de furo (a) DP600; (b) DP800.

As deformações plásticas equivalentes obtidas, no instante de parada do ensaio de expansão de furo, mostram que para o aço DP600, os valores de deformação máxima encontrados foram superiores segundo o método 2, o que do ponto de vista físico está correto, uma vez que a parada do ensaio pelo método 2 ocorre em um instante posterior ao método 1, os valores máximos de deformação do esboço foram de 0,8214 para o método 1 e 0,8220 para o método 2, adicionalmente é possível observar, nas Fig. 6(a) e (b), que os níveis de deformação são maiores em todas as regiões do esboço do método 2 quando comparado ao método 1.

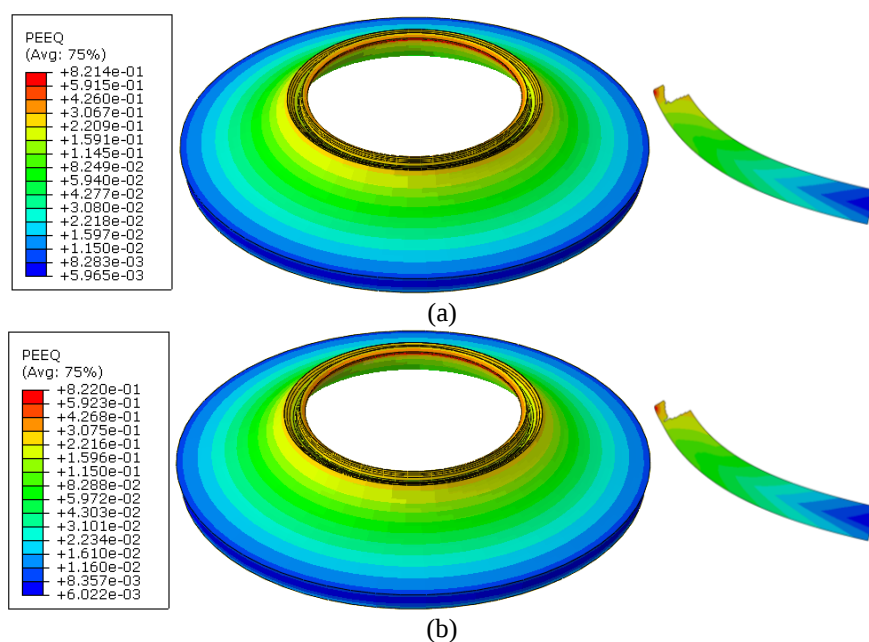


Figura 6. Deformação plástica equivalente – DP600. (a) Método 1; (b) Método 2.

O mesmo padrão de resultado para a deformação plástica equivalente foi encontrado para o DP800, os resultados apresentados nas Fig. 7(a) e (b), mostram que para o método 1 o valor máximo de deformação plástica equivalente alcançado foi de 0,8337, enquanto que para o método 2 foi encontrado um valor de deformação de 0,8327.

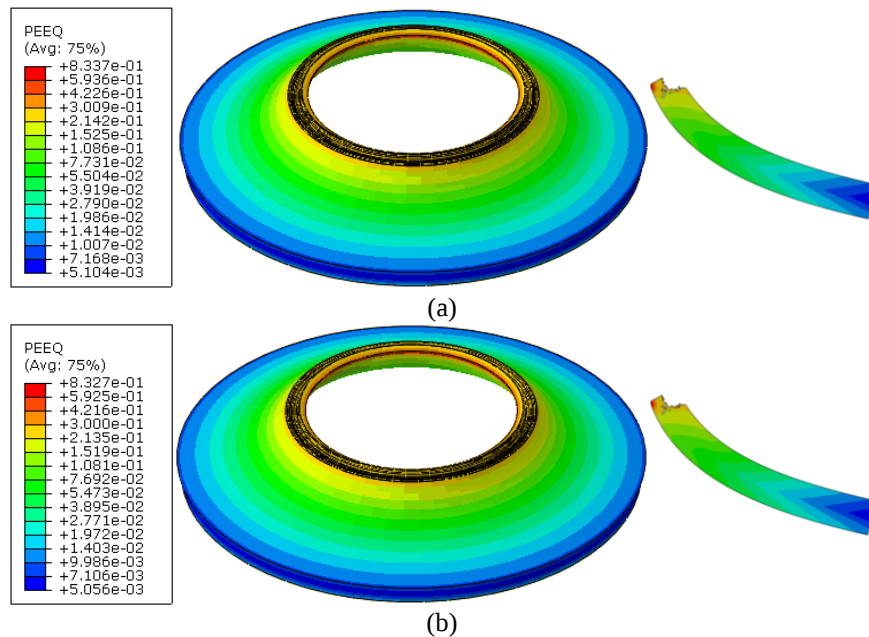


Figura 7. Deformação plástica equivalente – DP800. (a) Método 1; (b) Método 2.

Os aços bifásicos DP600 e DP800 apresentam uma maior contribuição da nucleação de novos vazios (VVFN) para a falha segundo o modelo GTN. As Figuras 8(a) e (b) mostram que quando o curso do punção é igual a 5,79 mm e 5,76 mm para os aços DP600 e DP800, o primeiro elemento a fraturar atinge o número crítico de vazios, equivalente aos limites de cada um dos materiais.

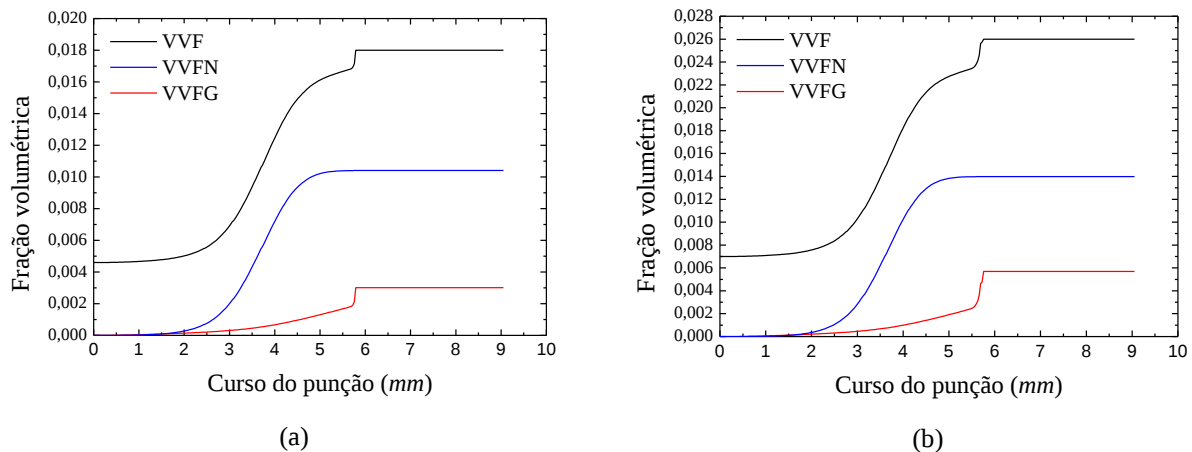


Figura 8. Crescimento de vazios em função da deformação plástica equivalente. (a) DP600; (b) DP800.

A Figura 9 registra o incremento da força que o punção exerce sobre o esboço durante o ensaio. Para o aço DP600 a falha do material ocorre quando o curso do punção atinge entre 8,60 mm e 8,82 mm, para os dois critérios de parada e para todos os coeficientes de atrito avaliados, com uma força máxima de 5,20 kN. A fratura do aço DP800 também ocorre quando o curso do punção atinge entre 8,60 mm e 8,86 mm, entretanto isso ocorre a valores ligeiramente inferiores aos encontrados para o aço DP600, porém com uma carga requerida maior, com uma máxima de 6,68 kN. Adicionalmente, é possível verificar que a partir de 5,80 mm, que é o curso aproximado em que ocorre falha do primeiro elemento e, por conseguinte a iniciação da fratura, ocorre uma leve, porém perceptível, inversão da curva de carga, até esse ponto a curva cresce num padrão levemente côncavo, e a partir deste ponto ocorre uma inversão, para um padrão de crescimento convexo que está associado a um maior incremento de carga em função do curso do punção.

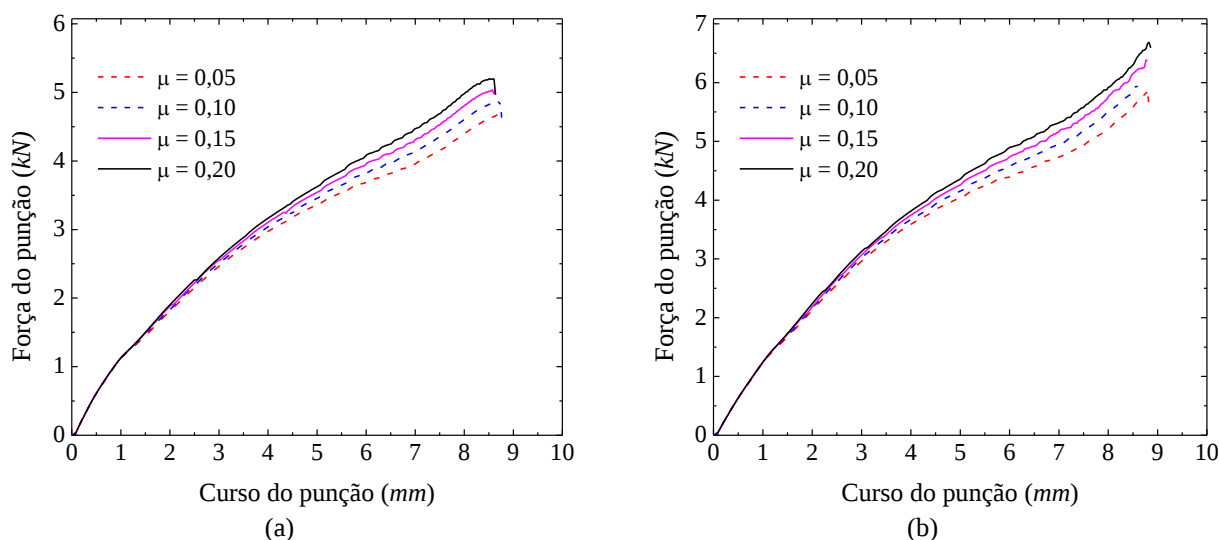


Figura 9. Variação de força em função do curso do punção. (a) DP600; (b) DP800.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi construído um modelo por elementos finitos do ensaio de expansão de furo, com o objetivo de analisar a capacidade de conformação de aços bifásicos DP600 e DP800, considerando um modelo de encruamento isotrópico, associado ao modelo de Gurson-Tvergaard-Needleman. O comportamento mecânico dos aços DP600 e DP800 foram avaliados a partir dos resultados do ensaio de expansão de furo obtidos pelo modelo. Foram obtidos como valores de Razão de Expansão de Furo, 26,59%, segundo o método 1, e 26,28%, conforme o método 2 para o aço DP600, enquanto que para o DP800 os valores obtidos foram de 25,53% e 25,40%, esses valores, quando comparados a resultados obtidos em outros trabalhos corroboram para a validação do modelo proposto neste trabalho. Os valores máximos de deformação plástica equivalente foram de 0,8220 e 0,8337 para os aços DP600 e DP800. Há uma correlação entre o curso do punção e a fração volumétrica de vazios, ao atingir um curso da ordem de 5,7 mm, tem-se início a fratura do material, entretanto, ao avaliar a curva de carga do punção, o ensaio só pôde ser interrompido com um curso de 8,60 a 8,86 mm, pelo critério de parada do método 2, para o método 1, a interrupção do ensaio só ocorre ao ser observada a fratura ao longo de toda a borda do furo, o que por ser dependente da perícia do profissional que realiza o ensaio, podendo gerar distorções nos resultados, por esse motivo, o método 2, que pode ser automatizado, permite obter resultados com uma maior segurança, pois a máxima diferença encontrada foi de 0,43%.

6. REFERÊNCIAS

- CHEN, X. et al. Hole expansion characteristics of ultra high strength steels. *Procedia Engineering*, v. 81, n. October, p. 718–723, 2014.
- CHUFAN, S. Shuai Chufan Feasibility of Estimation Programs for Hole Expansion Test on Sheet Steel. [s.l.] TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2015.
- HU, X. H.; SUN, X.; GOLOVASHCHENKO, S. F. An integrated finite element-based simulation framework: From hole piercing to hole expansion. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 109, n. February, p. 1–13, 2016.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 16630:2009(E) - Metallic materials — Sheet and strip — Hole expanding test, 2009.
- KEELER, S. et al. Advanced high strength steels for automotive industry. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, v. 8, n. 2, p. 511, 2014.
- KREMPASZKY, C. et al. Towards More Efficient Hole Expansion Testing. *IDDRG 2014 Conference*, p. 204–209, 2014.
- MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. Inovar-Auto. Disponível em: <http://inovarauto.mdic.gov.br/InovarAuto/public/login.jspx?_adf.ctrl-state=l3e9sbp1g_14>. Acesso em: 20 out. 2017.
- SANTOS, R. O. et al. Damage identification parameters of dual-phase 600-800 steels based on experimental void analysis and finite element simulations. *submetido para publicação*, p. 50, 2017.
- SMDI. Steel Market Development Institute - Autosteel | Resources On Steel's Role In Automotive Design & Engineering. Disponível em: <<http://www.autosteel.org/>>. Acesso em: 10 out. 2017.
- TEPEDINO, J. O. A. Aplicação de Curvas Limite de Conformação na previsão de rupturas em bordas de peças estampadas. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2014.
- TSOUPIS, I.; MERKLEIN, M. Edge crack sensitivity of lightweight materials under different load conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 159, p. 12017, 2016.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

FINITE ELEMENT MODELING OF HOLE EXPANSION TEST OF DUAL-PHASE STEELS DP600 AND DP800

Rennan de Souza da Silva, orennan@gmail.com¹

Rafael Oliveira Santos, rafael.oliveira@cefet-rj.br^{2,3}

Luciano Pessanha Moreira, luciano.moreira@metal.eeimvr.uff.br¹

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Avenida dos Trabalhadores, 420, CEP 27255-125, Volta Redonda-RJ, Brasil,

²Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Avenida dos Trabalhadores, 420, CEP 27255-125, Volta Redonda-RJ, Brasil,

³Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Campus Angra dos Reis, Rua do Areal, 522 Angra dos Reis, RJ, CEP 23953-030, Brasil.

Abstract. In this work was proposed an axisymmetric model in finite element analysis to evaluate the hole expansion test in dual-phase steel's sheets of DP600 and DP800, in terms of hole expansion ratio and the force made by punch. To predict the mechanical behavior of material were utilized an isotropic hardening model associated with the Gurson-Tvergaard-Needleman model, which describes the material degradation. In the evaluation of the hole expansion ratio were considered two methodologies of calculation. The first one consist in measure the final hole diameter at the moment in which the fracture occurs, whereas the second method utilizes as criterion the force drop necessities to deform the sheet performed by the punch. For DP600 steel were obtained the values of hole expansion ratio of 26.59% for the first method and 26.28% for the second method. While for DP800 steel the hole expansion ratios found were 25.53% and 25.40%, respectively. For a purpose of evaluate the fracture in the holes edges, were analyzed the levels of equivalent plastic strain during the test. Additionally, were also evaluated the influence of friction factor between the tools and the metal sheet. Were found that the material failure occurs from 5.80 mm of punch's advance and can be attributed by an increase in the nucleation of new voids, which results in a fragile fracture at the sheets edges.

Keywords: Hole Expansion Test, Dual-Phase steel, Sheet Forming.