

INFLUÊNCIA DO ATRITO E DAS DIMENSÕES DO PUNÇÃO E CHAPA NO ENSAIO DE EXPANSÃO DE FURO*

Lucas Figueiredo Monteiro¹

Lorena Isabela de Oliveira Ribeiro²

Pedro Henrique Silva³

Pedro Henrique Rodrigues Pereira⁴

Resumo

Os ensaios mecânicos são bastante utilizados na indústria metalúrgica, principalmente para analisar a conformabilidade dos materiais. Dentre estes, tem-se o ensaio de expansão de furo, cujo objetivo é estudar o desempenho em estampagem de chapas metálicas com furos, processo de grande importância para a indústria automobilística. O comportamento do material neste ensaio pode ser detalhadamente estudado por meio de simulação numérica, contornando limitações empíricas. Com base nessa ferramenta, avaliou-se a evolução da distribuição de deformações, bem como a força requerida para deslocamento do punção e o índice de expansão de furo atingido em um aço dual-phase DP600. Variações em três parâmetros (espessura, atrito e diâmetro do furo) foram analisadas utilizando-se duas diferentes geometrias de punção: cônica e cilíndrica. Os resultados demonstraram grande influência da geometria do punção adotada, junto à espessura e diâmetro do furo, sendo o efeito do atrito menos pronunciado em relação aos demais fatores avaliados.

Palavras-chave: Aços Dual-Phase; Deformação; Elementos Finitos; Estampagem.

EFFECT OF FRICTION CONDITIONS AND DIMENSIONS OF THE TOOLING AND STEEL SHEETS IN THE HOLE EXPANSION TEST

Abstract

Mechanical tests are widely used in the metallurgical industry, mainly to analyze the formability of materials. Among these procedures, the hole expansion test permits the assessment of the performance of metal sheets in stretching operations. The flow behavior of the material in this test can be studied in detail through numerical simulations, overcoming empirical limitations. The current investigation was therefore initiated to examine the strain distributions along tangential plane of the sheets subjected to testing through hole expansion. The study also aimed to predict the axial loads required for punch displacement and the hole expansion index in a DP600 dual-phase steel. Variations in three parameters (thickness, friction, and hole diameter) were proposed using two different punch geometries: conical and cylindrical. The results showed a great influence of the punch geometry adopted, together with the thickness and hole diameter, with the effect of friction being less pronounced in all cases.

Keywords: Dual-phase steels; Finite element analysis; Sheet forming; Strain distribution.

¹ Graduação Engenharia Metalúrgica, PRPQ-PROBIC/UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

² Engenharia metalurgista, mestranda, PPGEM/UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro metalurgista, mestre, PPGEM/UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Engenheiro mecânico, doutor, professor adjunto, DEMET/UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A redução da massa e aprimoramento do desempenho dos veículos automotores, aliados à segurança dos condutores, são prioridades na indústria automotiva, na qual há uma crescente demanda por materiais de alta resistência, capazes de proporcionar um equilíbrio entre formabilidade, resistência à fadiga e tenacidade. Como resultado, os materiais conhecidos como aços avançados de alta resistência (AHSS) foram propostos para atender demandas cada vez mais exigentes. Tais materiais têm sido continuamente investigados para permitir sua conformação em formatos mais complexos, utilizando chapas cada vez menos espessas [1, 2].

Nesse contexto, os aços dual-phase (DP), constituídos por uma microestrutura formada por uma matriz ferrítica com ilhas de martensita, são utilizados na indústria automobilística e se destacam por oferecer uma combinação adequada de resistência mecânica e conformabilidade. No entanto, devido à microestrutura bifásica, esses materiais apresentam um comportamento mecânico complexo. Dessa forma, o estudo e a compreensão do comportamento dos aços DP sob deformação é de extrema importância para o avanço na otimização dos projetos de materiais utilizados na indústria automotiva [3].

O ensaio de expansão de furo é um método utilizado na indústria de estampagem para avaliar a capacidade de deformação e resistência de materiais metálicos. Neste ensaio, uma chapa é inicialmente perfurada e, em seguida, suas laterais são fixadas por meio de um par de matrizes com canais internos. Um punção, localizado no canal interno de uma das matrizes é então movido em direção ao furo central da chapa, de modo a gradualmente promover sua expansão até o surgimento de trincas no material deformado plasticamente [1]. O índice de expansão de furo (IE) é amplamente empregado como critério limitante durante a operação de estiramento de borda em chapas metálicas, sendo calculado de acordo com a Equação 1, na qual d_f e d_i são os diâmetros final e inicial do furo inferior da borda, respectivamente [4].

$$IE (\%) = \left(\frac{d_f - d_i}{d_i} \right) * 100 \quad (1)$$

A simulação computacional pelo método dos elementos finitos (MEF) é uma técnica que permite modelar e analisar problemas complexos de engenharia. Por meio do MEF, torna-se possível avaliar o comportamento mecânico de materiais e estruturas sujeitas a diferentes condições de carregamento, bem como prever o desempenho e a vida útil desses componentes [5,6]. Assim, a simulação do ensaio de expansão de furo via MEF torna-se uma alternativa importante para entender a influência do caminho de deformação na evolução do dano em aços DP submetidos à estampagem.

O presente trabalho tem como objetivo simular via MEF, por meio do software *Abaqus* (Dassault Systèmes) [7], o ensaio de expansão de furo em um aço DP. Deseja-se, avaliar a evolução da distribuição de deformação no material, bem como da força axial exercida pelo punção durante a execução do ensaio e o índice de expansão de furo resultante de cada condição proposta. Serão avaliadas variações em três parâmetros de teste: espessura da chapa, atrito e diâmetro do furo, além de considerar duas diferentes geometrias de punção: cônica e cilíndrica. A análise dos resultados obtidos a partir das simulações pode contribuir para o desenvolvimento

de novos materiais e processos de fabricação, com potencial impacto na eficiência, qualidade e segurança dos produtos finais.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Modelagem da simulação computacional

O processo de modelagem por elementos finitos, envolve, inicialmente a definição das geometrias, condições iniciais e de contorno do modelo. No teste de expansão de furos, inicialmente, a região da borda de uma chapa plana é fixada entre duas matrizes (superior e inferior) como forma de evitar seu embutimento durante o ensaio. Em seguida, um punção de geometria conhecida penetra na chapa e expande o furo circular presente na mesma, até que ocorra o surgimento de trincas de borda.

Neste trabalho, utilizou-se o programa de simulação por elementos finitos *Abaqus* [7] para investigar a influência da espessura da chapa (t), do coeficiente de atrito (μ) e do diâmetro do furo (\emptyset) na distribuição de deformação e forças envolvidas no teste. Além disso, avaliou-se o comportamento do material quando penetrado por duas diferentes geometrias de punção comumente adotadas em ensaios de expansão de furo: cilíndrica e cônica. O material adotado para a chapa é um aço dual-phase (DP600), cujas propriedades constitutivas consideradas neste modelo foram obtidas em estudo recente por meio do ensaio de compressão no estado plano de deformação [6].

A Figura 1 apresenta as dimensões do punção cilíndrico que foram obtidas por meio de medições diretas na prensa Erichsen do Laboratório de Conformação Mecânica do DEMET-UFMG. A Figura 2 ilustra a geometria do punção cônico que foi modelada conforme a norma ISO 16630:2017(EN) [8] para ensaios de expansão de furo em materiais metálicos. Ambas indicam as variações propostas em cada parâmetro considerado: t , μ e \emptyset .

Para otimizar a demanda computacional, empregou-se um modelo 2D axissimétrico. A velocidade de 0,05 m/s foi imposta em ambos os punções na direção do eixo Y, e as geometrias das chapas foram discretizadas em malhas com ~3.000 elementos, após condução de teste de convergência, estando mais refinadas nas regiões mais próximas ao furo e menos refinadas na região de contato com as matrizes, como indicado nas Figuras 1 e 2 para os punções cilíndrico e cônico, respectivamente.

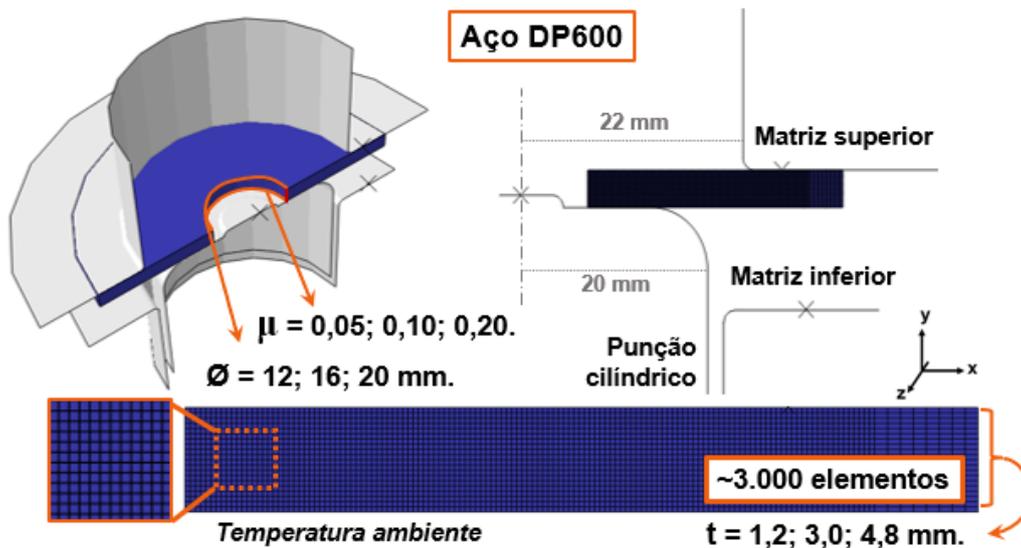


Figura 1. Condições de contorno e dimensões do punção cilíndrico.

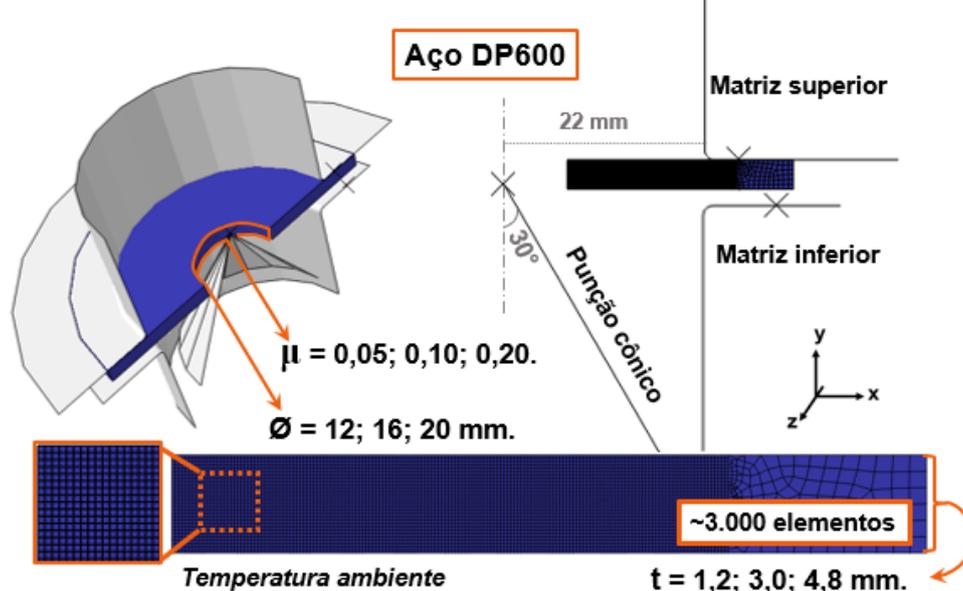


Figura 2. Condições de contorno e dimensões do punção cônico.

2.2 Resultados

2.2.1 Curva tensão máxima principal x deformação efetiva

A Figura 3 apresenta a relação entre a tensão máxima principal (σ_1) e a deformação plástica efetiva (ϵ_{ef}) em posição localizada no canto inferior do furo de chapas com diferentes espessuras, para condições fixas de atrito ($\mu = 0,05$) e diâmetro do furo de 12 mm, para as duas geometrias de punção avaliadas. Nota-se que para o punção cilíndrico, o comportamento das três curvas foi idêntico, de modo que a relação entre σ_1 e ϵ_{ef} é coincidente à relação entre a tensão efetiva e a deformação plástica efetiva utilizada como parâmetro de entrada do modelo computacional [6].

Já para o punção cônico, houve uma pequena variação nas curvas, indicando que chapas com menor espessura exibiram uma maior tensão máxima principal para determinados níveis de deformação efetiva. Também é importante apontar que σ_1 atua na direção tangencial à borda de cada furo. As tendências observadas

independem dos valores de \emptyset e permitem a afirmação de que o ensaio de expansão de furos possibilita a imposição de um estado de tensão essencialmente uniaxial, sem levar ao aparecimento de estricção na chapa.

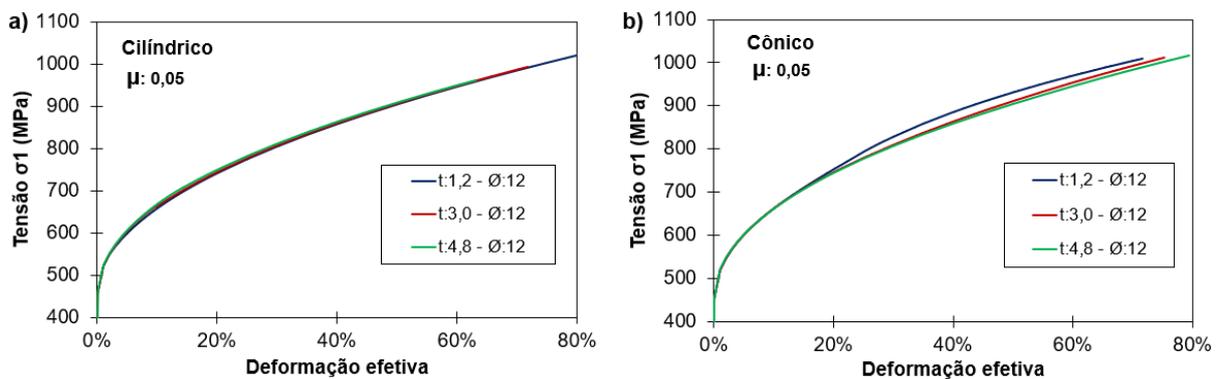


Figura 3. Curvas tensão (σ_1) x deformação efetiva (ϵ_{ef}) para os punções cilíndrico (a) e cônico (b).

2.2.2 Curva força axial x deslocamento do punção

A Figura 4 mostra as curvas força axial x deslocamento do punção cilíndrico para diferentes espessuras de chapa e diâmetros do furo em condições de baixo (a) e alto atrito (b). É evidente que, para todas as condições avaliadas com punção cilíndrico, ocorre um aumento praticamente instantâneo da força nos estágios iniciais do ensaio. A força axial exercida pela ferramental passa então a crescer em taxas decrescentes até ser atingido um ponto de máximo, a partir do qual ela decresce com o aumento do deslocamento do punção. Observa-se que a espessura da chapa e o diâmetro do furo têm grande influência na força necessária para promover o deslocamento do punção, visto que quanto maior a espessura e menor o diâmetro do furo, maior a força aplicada no punção. Por outro lado, o aumento do atrito do teste oferece um menor incremento à força requerida quando comparado ao incremento resultante das alterações na espessura e diâmetro.

Analogamente, a relação entre a força axial e o deslocamento do punção cônico para diferentes espessuras de chapa e diâmetros do furo, em condições de baixo (a) e alto atrito (b), são apresentadas na Figura 5. Novamente, nota-se um rápido aumento da força nos estágios iniciais do ensaio. Entretanto, o aumento do deslocamento resulta em cargas axiais aproximadamente constantes até ser atingida uma condição crítica a partir da qual, a carga volta a apresentar aumento significativo com deslocamentos incrementais do punção. Percebe-se também uma pequena influência do atrito comparado aos efeitos pronunciados de t e \emptyset . Porém, para punções cônicos, os maiores níveis de força ocorrem para maiores espessuras e maiores diâmetros de chapa.

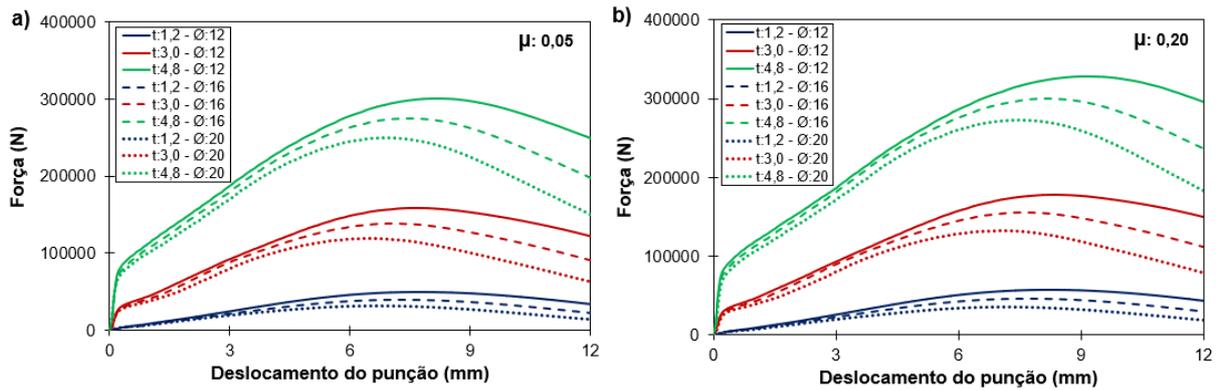


Figura 4. Curvas força x deslocamento do punção cilíndrico para μ igual a 0,05 (a) e 0,20 (b).

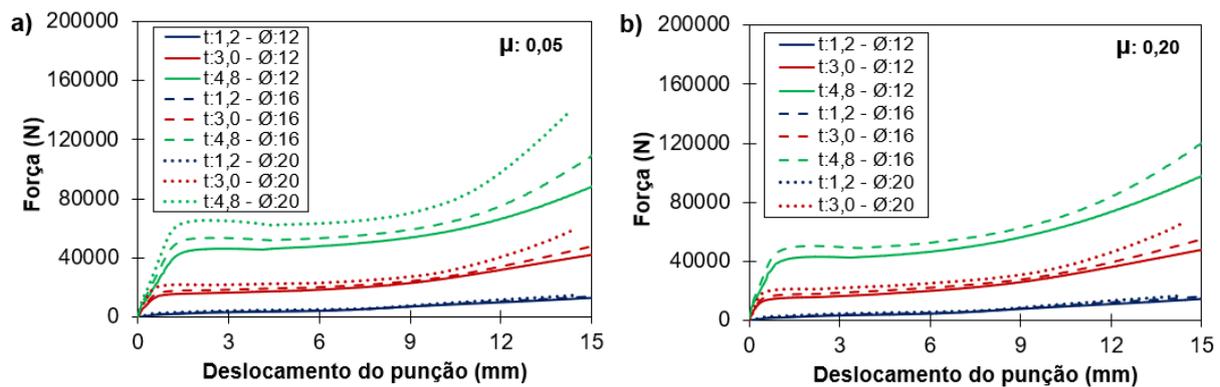


Figura 5. Curvas força x deslocamento do punção cônico para μ igual a 0,05 (a) e 0,20 (b).

2.2.3 Distribuição de deformação efetiva

A Figura 6 apresenta a distribuição de deformação efetiva para a condição de atrito baixo ($\mu=0,05$) e deslocamento axial de punção (ΔL) cilíndrico de 9 mm, no qual todas as condições avaliadas já teriam atingido o ponto de máxima força, como indicado na Figura 4, estando no início da queda contínua desse parâmetro. Verifica-se que, para ambos os diâmetros de furo, o aumento da espessura da chapa favorece a ocorrência de deformação por cisalhamento do material na região próxima ao contato com as matrizes, representado por regiões em vermelho que concentram alta deformação. Além disso, nota-se que para diâmetro do furo menores, observa-se maior nível de deformação na região da borda dos furos, considerando condições idênticas de atrito e espessura. Ademais, à medida que a espessura aumenta, ocorre uma menor deformação na região de contato da chapa com a superfície do punção. Por fim, constatou-se que a deformação efetiva máxima atingida para $\Delta L = 9$ mm diminui gradualmente com o aumento da espessura para o diâmetro de 12 mm. Entretanto, para o diâmetro de 20 mm, esta manteve-se praticamente constante.

Verifica-se também que a condição de menor espessura e diâmetro (Figura 6a) resultou no maior valor de deformação máxima ($\epsilon_{ef} = 54\%$). A Figura 7 mostra a distribuição de deformação para a condição de atrito baixo ($\mu=0,05$) e ΔL cônico igual a 14 mm, condição na qual a condição de menor espessura, diâmetro e atrito utilizada com punção cônico atinge um valor de deformação máxima compatível com o encontrado para o punção cilíndrico.

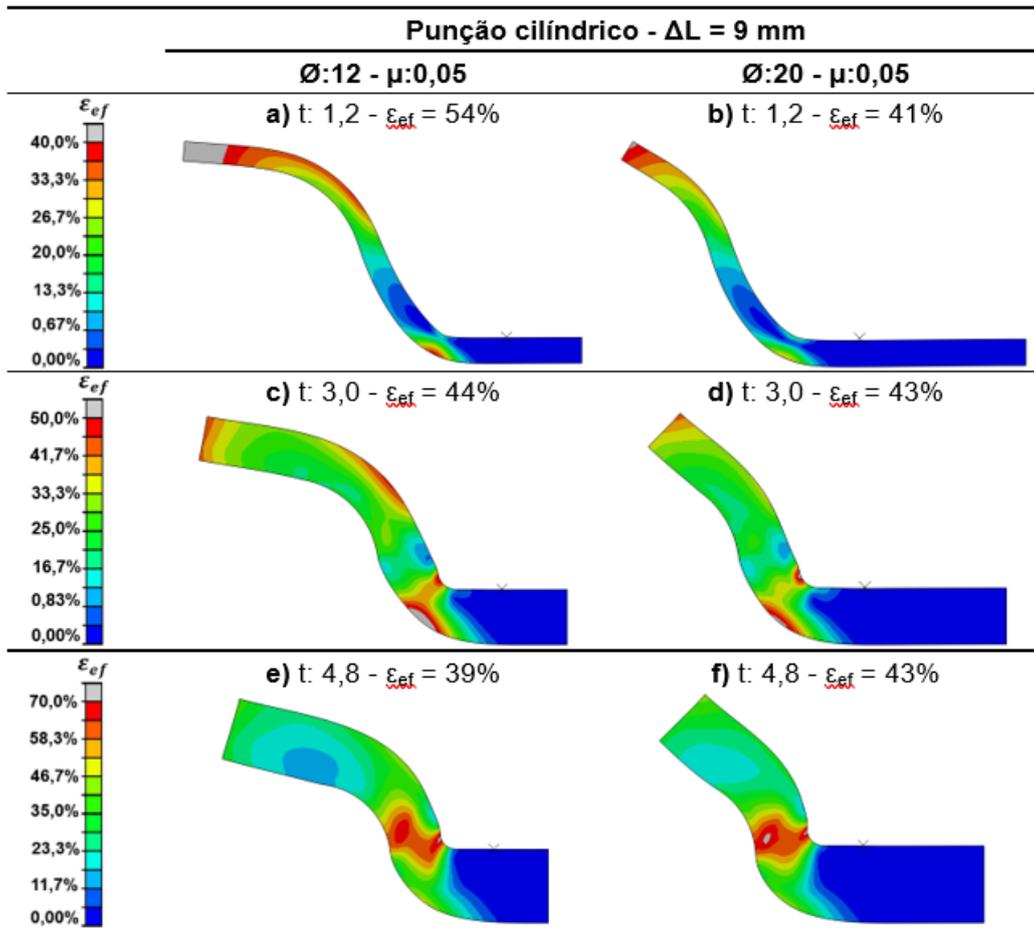


Figura 6. Distribuição de ϵ_{ef} para ΔL cilíndrico igual a 9 mm.

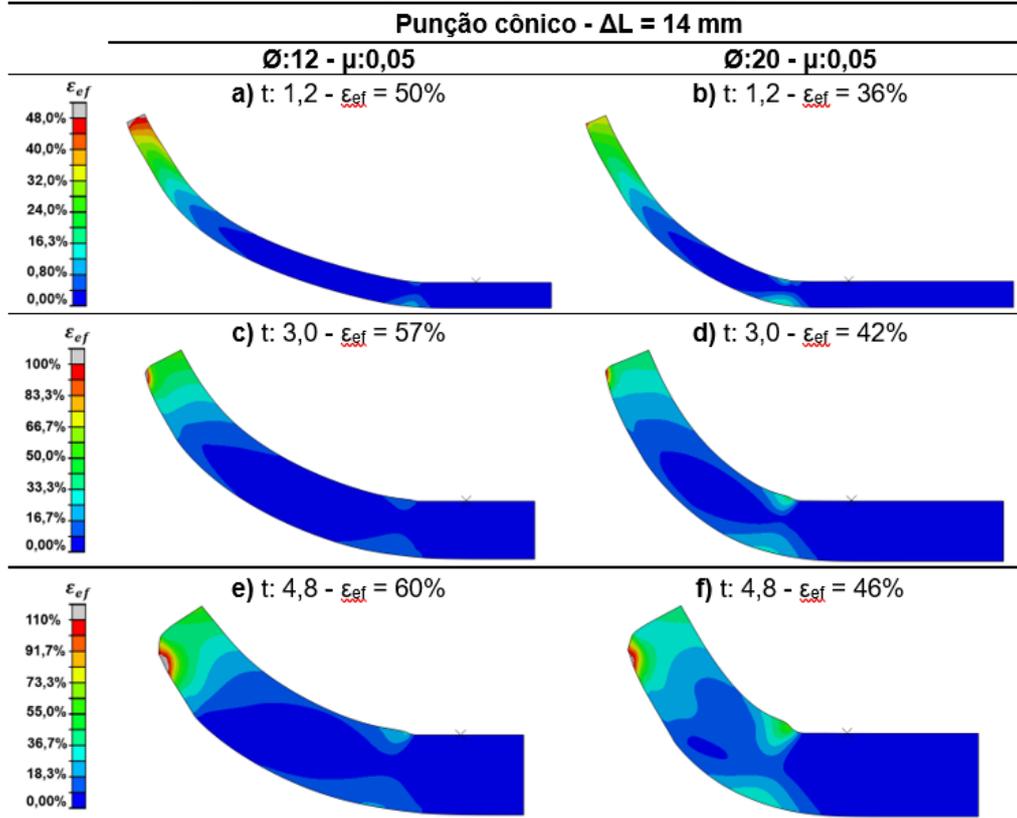


Figura 7. Distribuição de ϵ_{ef} para ΔL cônico igual a 14 mm.

Observa-se que, diferentemente do observado para o punção cilíndrico, a deformação efetiva global atingida em ensaios com punção cônica aumenta gradualmente com o aumento da espessura para os dois diâmetros de furo considerados. Além disso, os máximos gradientes de deformação sempre estão concentrados próximo à borda dos furos, especialmente na região inferior da chapa. Nota-se também que o aumento do diâmetro do furo leva ao aparecimento de maiores deformações próximo à região de contato entre chapa e matrizes e seus valores crescem com o aumento da espessura.

2.2.4 Índice de expansão de furo

A Figura 8 apresenta o índice de expansão de furo, calculado conforme Equação 1, em função da espessura para três diferentes diâmetros e duas condições de atrito para as geometrias de punção cilíndrica (a) e cônica (b). Vale ressaltar que as simulações não levaram em conta a aplicação de modelos de dano; logo, para fornecer uma ideia da magnitude da abertura dos furos, o cálculo do IE, para o punção cilíndrico, considerou o diâmetro interno atingido para $\Delta L = 9$ mm, enquanto para o punção cônico avaliou-se o diâmetro interno atingido para $\Delta L = 14$ mm. Em geral, para as simulações com punção cilíndrico, observa-se influência da espessura da chapa no valor de IE calculado. É evidente a diminuição do IE atingido em todas as condições à medida que a espessura da chapa aumenta. Em contrapartida, o valores de IE dos ensaios com punção cônica variam menos, em todas as espessuras, quando o mesmo diâmetro de furo é considerado sendo que, quanto menor o diâmetro do furo inicial, maior o valor de IE. Novamente, para ambos os punções, observa-se menor influência do atrito no IE calculado.

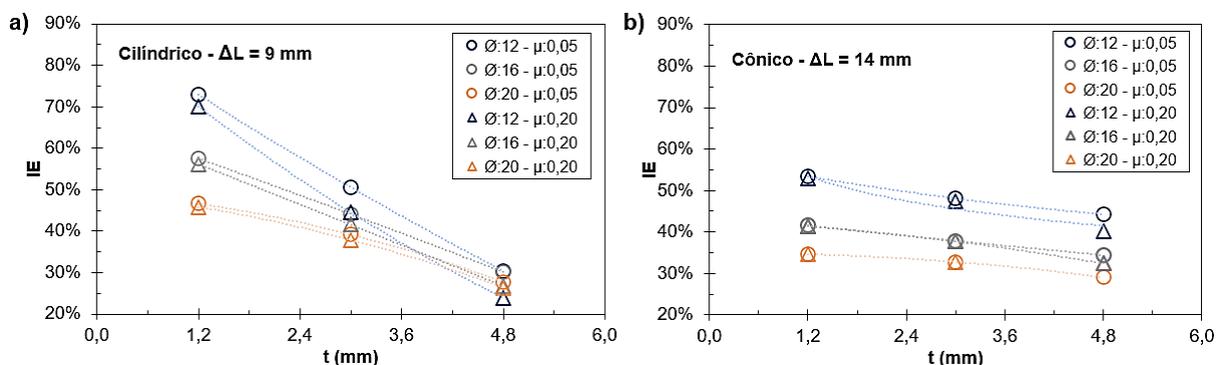


Figura 8. Índice de expansão de furo para o punção cilíndrico (a) e cônico (b).

2.3 Discussão

2.3.1 Desvios das curvas tensão máxima principal x deformação efetiva

O estado uniaxial de tensões apresentado na Figura 3, em que se verifica apenas a atuação de σ_1 quando σ_2 e σ_3 são iguais, ou muito próximos, de zero é consonante com os resultados encontrados em uma investigação recente [9] para ensaios de expansão de furo em metais. Além disso, a análise do perfil dessas curvas indica que as variações de diâmetro do furo, geometria do punção e atrito não afetaram significativamente a curva de tensão σ_1 x ϵ_{ef} , uma vez que os valores de tensão

atingidos foram muito similares quando o mesmo intervalo de deformação é considerado para todas as condições.

Entretanto, quando a influência da variação na espessura da chapa é avaliada, nota-se alteração da curva para o ensaio simulado com punção cônica. No caso, para a menor espessura investigada ($t = 1,2$ mm), houve uma maior tensão aplicada a partir de ~20% de deformação efetiva. Tal alteração origina-se do efeito do surgimento de tensões longitudinais, na direção X, em virtude da flexão sofrida pela chapa engastada na região entre as matrizes. Quanto maior a espessura das chapas, maior seu momento de inércia, o que reduz as tensões longitudinais na região das fibras inferior da chapa, onde ocorre estiramento.

2.3.2 Magnitude das cargas e sua relação com os modos de deformação

A análise da Figura 4 mostra que o ensaio de expansão de furo ocorre em regime elastoplástico. Para a geometria cilíndrica, observa-se um aumento acentuado de força para pequeno deslocamento de punção, caracterizando o regime elástico do material. Em seguida, há uma mudança na inclinação da curva indicando o intervalo de deformação plástica. Neste intervalo, nota-se que há um aumento crescente de força até um ponto de máximo, seguido de uma queda contínua desse parâmetro. Tal comportamento é associado ao efeito combinado do encruamento do material que tende a elevar as cargas ao longo do ensaio, contraposto à redução da área de contato entre a chapa e punção que apresenta efeito oposto no tocante à força axial. Como o modelo adotado não leva em consideração o aparecimento de trincas pelo alcance de um valor crítico de dano, a queda da força não se deve à ruptura do material, a qual, poderia possivelmente ter ocorrido para deslocamentos do punção inferiores aos atingidos nas presentes simulações.

Nesse contexto, a força requerida pelo punção cilíndrico para execução do ensaio tem significativa influência do diâmetro inicial do furo e da espessura da chapa. Nota-se que a diminuição do diâmetro inicial do furo aumenta a força necessária para a execução do ensaio ao proporcionar maior área de contato chapa-punção. Somado a isso, tem-se que o aumento na espessura também contribui com o aumento da força demandada ao aumentar a rigidez do sistema o que, conseqüentemente, dificulta a deformação inerente ao ensaio.

Ao comparar os níveis de força em função do deslocamento de punção cilíndrico com o cônico, apresentado na Figura 5, é evidente a influência da geometria do punção nas cargas necessárias para a execução do ensaio. Devido à menor área de contato entre a chapa e o punção cônico, observa-se que a expansão do furo ocorre com cargas significativamente menores. Além disso, o perfil da curva também sugere comportamento elastoplástico do ensaio, o qual se inicia com deformação elástica e é seguido por regime plástico. Porém, para punções cônicos, nota-se que a força ao longo do ensaio não aumenta gradualmente até um ponto de máximo, mas se mantém quase constante até atingir certo nível de expansão do furo da chapa aumentando em taxas maiores ao final. Assim, verifica-se que a expansão de furo com punções cilíndricos leva à necessidade de equipamentos com maior capacidade de carga em comparação aos punções com geometria cônica, em virtude, principalmente, da maior área de contato efetiva durante o teste [10].

Quanto à influência da espessura da chapa e do diâmetro do furo inicial para ensaios com punção cônica, observa-se que, assim como para punções cilíndricas, à medida que a espessura da chapa aumenta, maior carga é necessária para a expansão do furo devido à maior rigidez do sistema. Porém, para essa geometria de punção, maiores diâmetros de furo implicam em maiores forças de teste, sendo essa diferença mais acentuada quanto maior a espessura da chapa considerada. Tal comportamento também se relaciona aos esforços de flexão sofridos pelas chapas. Quanto maior o diâmetro dos furos, menor será o raio de curvatura formado pela chapa durante o seu dobramento em direção à matriz superior. Logo, serão necessários maiores esforços para promovê-lo nesse modo de deformação particular associado ao teste de expansão de furos com punções cônicas.

Por fim, em ambos os casos, verifica-se que aumentar o coeficiente de atrito no contato entre chapa e punção, isto é, torná-las mais aderentes uma à outra, aumenta a carga axial realizada pelo punção. Entretanto, de modo geral, observa-se que o aumento de força relativo ao atrito tem menor impacto quando comparado ao aumento de espessura, seguido das variações de diâmetro inicial de furo.

A distribuição de deformação para chapas submetidas ao ensaio de expansão de furo com punção cilíndrico (Figura 6) mostra que, para as duas condições de diâmetro, o aumento da espessura da chapa intensifica a ocorrência de cisalhamento na região de contato entre matriz e punção. O cisalhamento da chapa é caracterizado por uma região de alta concentração de deformações e foi identificado em estudo anterior [10] para ensaio de expansão de furo com punção cilíndrico. Em condições de ensaios, nas quais, as deformação na região de cisalhamento superam aquelas encontradas na borda do furo, o material tende a não falhar por trincamento de borda, mas apresentam uma espécie de falha por rasgamento. Tal falha ocorre em regiões da chapa próximas às matrizes, descaracterizando o ensaio de seu objetivo primordial.

Considerando a influência do aumento no diâmetro do furo, verifica-se que o menor diâmetro implica em um maior nível de deformação na região de contato entre a ponta da chapa e a superfície do punção. Esse fato está associado aos maiores valores de IE em chapas com furos de menor diâmetro que, portanto, exibem maiores deformações circunferenciais para valores similares de deslocamento do punção.

Para ensaios de expansão de furo com punções cônicas, a Figura 7 sugere, de modo geral, que o aumento da espessura da chapa está relacionado a um aumento na deformação efetiva global atingida, enquanto o aumento do diâmetro do furo está associado a uma diminuição da deformação efetiva global. É observado também que o aumento no diâmetro do furo intensifica o dobramento da chapa próximo à matriz, caracterizado por maior índice de deformação da chapa nessa região de flexão. Na ponta superior da chapa, verifica-se que o aumento do diâmetro suaviza a concentração de deformação, o que corrobora a menor deformação global atingida.

2.3.3 Índice de expansão de furo e recomendações técnicas

É evidente a influência da geometria do punção no índice de expansão de furo calculado para cada condição, conforme apresentado na Figura 8. Para ensaios com

punção cilíndrico (Figura 8a), observa-se que à medida que a espessura da chapa aumenta, o IE medido, para um dado deslocamento ΔL , diminui gradualmente e sofre menor influência do diâmetro, apresentando uma variação de ~10% entre o menor e o maior diâmetro de furo inicial e espessura fixa de 4,8 mm. Esse fato pode estar associado ao cisalhamento que se intensifica em maiores espessuras na região entre a matriz e o punção, alterando o andamento do ensaio e posterior análise de resultados. Nesse contexto, para menores espessuras e menor influência do cisalhamento, nota-se que diâmetros de furo menores conferem uma maior medida de IE, assim como o observado para punções cônicos, com valores variando cerca de 30% entre o menor e o maior diâmetro e espessura fixa de 1,2 mm.

Ao avaliar os ensaios com punção cônico (Figura 8b) quanto à influência da espessura da chapa, nota-se que o IE medido concentra valores próximos para todas as condições propostas, apresentando um comportamento levemente decrescente à medida que a espessura aumenta. Nessa geometria, observa-se que diâmetros menores resultam em maior medida de IE para todas as espessuras, apresentando uma variação de cerca de 20% entre a menor e a maior condição em todos os casos. Tal tendência mostra que adotar uma geometria cônica para a execução do ensaio em estudo fornece um comportamento de maior estabilidade e previsibilidade quando comparado à adoção de geometria cilíndrica.

Por fim, ao considerar o efeito do atrito, a análise da Figura 8 revela menor impacto deste parâmetro no cálculo de IE comparado aos efeitos obtidos por variações na espessura e no diâmetro de furo inicial. Para ensaios com punção cilíndrico, nota-se que o efeito do atrito é mais pronunciado para os casos de menor diâmetro, se intensificando com o aumento de espessura. Em contrapartida, para os casos de punção cônico, o efeito do atrito se torna mais considerável com o aumento de espessura em proporções similares em todos os diâmetros iniciais.

3 CONCLUSÃO

A influência do atrito e da geometria do punção e chapa no ensaio de expansão de furos foi cuidadosamente investigada por meio de simulações por elementos finitos.

- As curvas tensão máxima principal x deformação efetiva são praticamente idênticas às curvas tensão efetiva x deformação efetiva, tornando evidente a predominância de um estado uniaxial de tensões. Há uma maior variação do comportamento ideal quanto menor a espessura de chapa no ensaio com o punção cônico, em virtude de tensões oriundas do dobramento da borda das chapas.
- Para espessuras maiores, foi observada uma maior demanda de força do punção para a realização do ensaio. Entretanto, enquanto para punções cilíndricos maiores diâmetros implicam em menor força, para punções cônicos maiores diâmetros demandam maior força para a execução do ensaio.
- O punção cônico demonstrou requerer menores forças para a realização do ensaio em comparação ao cilíndrico, fato atribuído à menor área de contato com a chapa.
- A distribuição de deformação revela o surgimento e intensificação de cisalhamento na região entre a matriz e o punção cilíndrico, sendo a deformação nessa região intensificada à medida que a espessura da chapa aumenta. Para

punções cônicos, observa-se dobramento na região próxima à matriz, que se intensifica com o aumento não somente da espessura, mas também do diâmetro.

- O índice de expansão (IE) de furo calculado para os ensaios com punção cônico apresentou resultados mais estáveis e previsíveis quando comparado à adoção de geometria cilíndrica. Para punção cônico, o diâmetro é o fator de maior impacto, sendo que o valor de IE quase não depende da espessura. Em ambos os casos, variações no atrito não afetam significativamente os resultados do teste.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à FAPEMIG pelos Projetos 443736/2018-9 e APQ-01342-21, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- 1 Park S, Cho W, Jeong BS, Jung J, Sung S, Na H, et al. A dual-scale FE simulation of hole expansion test considering pre-damage from punching process. *International Journal of Solids and Structures*. 2022; 236–237(111312).
- 2 Haldar A, Suwas S, Bhattacharjee D, Tata Iron Steel Company, Indian Institute of Metals, International Conference on Microstructure Texture in Steels. *Microstructure and Texture in Steels and Other Materials*. 1st ed. 2009. London: Springer London: Imprint: Springer; 2009.
- 3 Gollin S, Frómota D, Casellas D, Pär J. Influence of microstructure on the fracture toughness of hot stamped boron steel. *Mater. Sci. Eng. A*. 2019;743.
- 4 Paul SK. A critical review on hole expansion ratio. *Materialia*. 2020;9(100566).
- 5 Dieter GE. *Mechanical Metallurgy*. 3rd ed. London: McGraw-Hill, 1986.
- 6 Silva PH, Santos DB, Cetlin PR, Pereira PHR. Strain partitioning in a dual-phase steel under plane strain compression. *Mater. Sci. Eng. A*. 2023;862(144471).
- 7 Abaqus, Abaqus 6.11 User Manual, IV, 2013.
- 8 ISO 16630:2017 (EN). "Metallic materials — Sheet and strip — Hole expanding test". International Organization for Standardization, 2017.
- 9 Paul SK. Effect of punch geometry on hole expansion ratio, *Proc. Inst. Mech. Eng. B: J. Eng. Manuf.* 2019;234(199179612).
- 10 Neuhauser FM, Terrazas OR, Manopulo N, Hora P, Van Tyne CJ. Stretch bending – the plane within the sheet where strains reach the forming limit curve. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2016;159(012011).]