

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA ANISOTROPIA PLÁSTICAS DE CHAPAS METÁLICAS USANDO ENSAIOS SIMPLES

Bruno Leonardo Schuster

Tiago dos Santos

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, Prédio 7, Santa Maria, RS, 97105-900, Brasil.

brunoleonardoschuster@hotmail.com

tiago.santos@ufsm.br

Rodrigo Rossi

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, R. Sarmento Leite, 425, Porto Alegre, RS, Brasil.

rrossi@ufrgs.br

Resumo. A anisotropia plástica é uma característica importante que possui influência significativa em processos de conformação de chapas metálicas. Em casos de chapas metálicas anisotrópicas, o comportamento, em termos de resistência mecânica e fluxo plástico, depende das direções de deformação. O objetivo desse trabalho é analisar os efeitos da anisotropia plástica em chapas metálicas considerando ensaios simples variando a orientação de solicitação e os índices de anisotropia do material. Os ensaios são: tração simples, cisalhamento simples e expansão de um furo circular. Para isso, são realizadas análises de elementos finitos empregando o critério de falha de Hill (1948). A partir dos resultados numéricos, é possível observar que a orientação da aplicação de carga em relação aos eixos anisotrópicos das chapas influencia os campos de deformações e tensões desenvolvidos. Tais diferenças são intensificadas pelo aumento dos índices de anisotropia do material. A partir das observações numéricas, evidencia-se que a orientação dos eixos de anisotropia é de grande importância para a obtenção dos resultados esperados tanto em aplicações estruturais como em processos de fabricação envolvendo materiais anisotrópicos.

Palavras chave: Chapas metálicas. Materiais anisotrópicos. Plasticidade computacional. Elementos finitos.

1. INTRODUÇÃO

A anisotropia plástica de materiais metálicos é uma característica que resulta majoritariamente do processamento da matéria-prima ao produto final. De uma forma geral, a anisotropia plástica observada em chapas metálicas está intrinsecamente relacionada a processos que induzem deformações plásticas significativas como na laminação. Especificamente, a anisotropia plástica gerada é decorrente principalmente da textura cristalográfica produzida durante o processo de fabricação mecânica (Babanic, 2010). A partir de uma inspeção na literatura, nota-se que esse tema é objeto de investigações recentes, nas quais se tem o objetivo de identificar a influência da anisotropia plástica no comportamento mecânico de materiais e estruturas seja por meio de análises experimentais, teóricas e numéricas. Como exemplo, Yanaga, *et. al.*, (2012) realizaram a calibração de ensaios utilizando elementos finitos para chapas de alumínio da série 6000 para variados critérios de falha e realizaram comparações com ensaios experimentais. Além disso, Thomesen, *et. al.*, (2021) também fizeram avaliações experimentais para a série 6000, mostrando que a textura cristalográfica influencia no crescimento de vazios e, conseqüentemente, na região plástica do material. Autores como Ha, *et. al.*, (2020) realizaram ensaios experimentais para verificar o crescimento de furos, também em ligas de alumínio da série 6000 anisotrópicas, e verificaram dependência da anisotropia do material nas características de expansão do furo. Os autores calibraram modelos em elementos finitos utilizando o critério de falha Yld2000-2d e obtiveram resultados bastante próximos dos observados experimentalmente para a análise de expansão dos furos. Yin, *et. al.* (2014) compararam ensaios experimentais utilizando um componente de aço para três diferentes configurações de cisalhamento, obtendo resultados similares entre as configurações. Dessa forma, uma das geometrias foi adotada para o ensaio de cisalhamento no presente trabalho. Com o objetivo de contribuir no entendimento do referido assunto, esse trabalho estuda os efeitos da anisotropia plástica no comportamento mecânico de chapas metálicas considerando análises numéricas simples usando o método dos elementos finitos. São realizadas simulações de ensaios de tração, cisalhamento e expansão de um furo circular.

2. METODOLOGIA

O trabalho foi subdividido em quatro ensaios simples utilizando elementos finitos, para ser possível a visualização da influência da anisotropia em componentes mecânicos carregados. Os ensaios foram de tração simples, cisalhamento

simples e expansão de um furo circular. As análises de elementos finitos foram feitas no programa comercial *Abaqus* utilizando o critério de Hill (1948) apresentado a seguir.

2.1. Modelo constitutivo: Critério de Hill'48

O critério de escoamento de Hill (1948), amplamente utilizado na análise plástica de materiais anisotrópicos, é expresso como:

$$F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (1)$$

onde F , G , H , L , M e N são parâmetros de anisotropia do modelo, σ_{ii} e σ_{ij} denotam as tensões normais e cisalhantes, respectivamente, considerando as direções de ortotropia do material (1, 2, 3). Os parâmetros de anisotropia, F , G , H , podem ser relacionados às tensões de escoamento (X , Y , Z) nas direções (1, 2, 3) usando as seguintes expressões:

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \right), \quad G = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} \right), \quad H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \right) \quad (2)$$

De forma semelhante, é possível relacionar os parâmetros L , M e N com as tensões de escoamento em cisalhamento (R , S , T):

$$L = \frac{1}{2R^2}, \quad M = \frac{1}{2S^2}, \quad N = \frac{1}{2T^2} \quad (3)$$

Nesse trabalho, serão consideradas chapas finas. Dessa forma, adota-se o critério de escoamento para um estado plano de tensões ($\sigma_{33} = \sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$). Assim, a Eq. (1) se torna:

$$F\sigma_{22}^2 + G\sigma_{11}^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (4)$$

Para o problema plano, de forma a facilitar a análise, são definidas as seguintes razões envolvendo as tensões de escoamento:

$$R_{11} = \frac{X}{\sigma^0}, \quad R_{22} = \frac{Y}{\sigma^0}, \quad R_{33} = \frac{Z}{\sigma^0} \quad \text{e} \quad R_{12} = \frac{T}{\tau^0} \quad (5)$$

onde σ^0 e τ^0 são tensões de escoamento iniciais de referência, em tração e cisalhamento, respectivamente. Essas tensões são definidas tal que:

$$\tau^0 = \frac{\sigma^0}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Para representar o encruamento do material, a seguinte regra de Ludwik será adotada:

$$\sigma_y(\varepsilon) = \sigma^0 + K\varepsilon^n \quad (7)$$

onde σ_y é a tensão para determinado nível de deformação ε , K é o coeficiente de endurecimento e n é o expoente de endurecimento.

2.2. Casos particulares de tração e cisalhamento simples

No caso de uma tração simples onde uma tensão uniaxial σ_θ seja aplicada em uma direção definida por um ângulo θ em relação à direção 1, as componentes de tensão em relação aos eixos de ortotropia 1 e 2 são:

$$\sigma_{11} = \sigma_\theta \sin^2(\theta), \quad \sigma_{22} = \sigma_\theta \cos^2(\theta), \quad \sigma_{12} = \sigma_\theta \sin(\theta) \cos(\theta) \quad (8)$$

Dessa forma, usando a Eq. (4), é possível expressar a tensão admissível em função dos parâmetros anisotrópicos e o ângulo de orientação do carregamento:

$$\sigma_\theta(\theta) = \frac{1}{[F\cos^4(\theta) + G\sin^4(\theta) + H(\sin^2(\theta) - \cos^2(\theta))^2 + 2N\sin(\theta)\cos(\theta)]^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

De forma semelhante, para o caso de um cisalhamento simples, onde uma tensão cisalhante τ_θ seja aplicada a uma orientação θ em relação à direção 1, as seguintes componentes de tensões são calculadas nas direções 1 e 2:

$$\sigma_{11} = \tau_{\theta} \sin(2\theta), \quad \sigma_{22} = -\tau_{\theta} \sin(2\theta), \quad \sigma_{12} = \tau_{\theta} [\cos^2(\theta) - \sin^2(\theta)] \quad (10)$$

Usando a Eq. (4) então, a tensão cisalhante admissível é calculada:

$$\tau_{\theta}(\theta) = \frac{1}{[\sin^2(2\theta)(F+G+4H)+2N(\cos^2(\theta)-\sin^2(\theta))^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

2.3. Modelos numéricos

Essa seção apresenta os modelos numéricos e os parâmetros materiais utilizados no estudo realizado. Os parâmetros utilizados nas análises são dados na Tabela 1, onde E é o módulo de Young e ν o coeficiente de Poisson considerados. Embora os valores dos parâmetros adotados não tenham sido calibrados nesse trabalho, eles representam valores comumente encontrados na literatura, como em Thomesen, *et. al.* (2021), para ligas de alumínio da série 6000. Usando os dados da Tabela 1, são calculadas as razões de tensões de escoamento mostradas na Tabela 2.

Tabela 1. Dados experimentais utilizados para a calibração e desenvolvimento do modelo.

E [GPa]	ν	X [Mpa]	Y [Mpa]	Z [Mpa]	T [Mpa]	σ^0 [Mpa]	K [Mpa]	n
210	0,3	152	166	164	93	152	496	0,29

Os ensaios realizados são descritos nas subseções 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3 e 2.3.4. Para todos os casos, foram empregados elementos quadriláteros de 8 nós para a descrição (Quad-8), devido à sua rápida convergência de malha. Além disso, análises de convergência de malha foram realizadas para a obtenção de resultados.

Tabela 2. Coeficientes para o ajuste do modelo.

R_{11}	R_{22}	R_{33}	R_{12}
1	1,09	1,08	1,06

2.3.1 Tração simples

Para o ensaio de tração simples, foi considerado o corpo de prova mostrado na Fig. 1 (esquerda). Foi feita uma análise do caso utilizando as propriedades das Tabelas 1 e 2. Nesse caso, para evidenciar os efeitos anisotrópicos, foi feita uma análise paramétrica variando a razão R_{22} , para $R_{22} = 1$, $R_{22} = 1,25$ e $R_{22} = 1,5$. Para cada caso, foi analisada a resposta numérica para diferentes orientações do corpo de prova em relação à direção de laminação (direção 1), isto é, os valores para o ângulo variam entre 0° e 90° , com um passo de 15° . O componente foi engastado na superfície inferior e foi imposto um deslocamento de 5 mm na extremidade superior, como mostrado na Fig. 1 (centro). A malha foi gerada com elementos de aproximadamente 1 mm, totalizando 2932 elementos. A malha gerada pode ser observada na Fig. 1 (direita). Como resultados das análises numéricas, foram obtidas as curvas de tensão *versus* deformação, ambas medidas na direção longitudinal do corpo de prova. Os resultados são apresentados na seção 3.1.

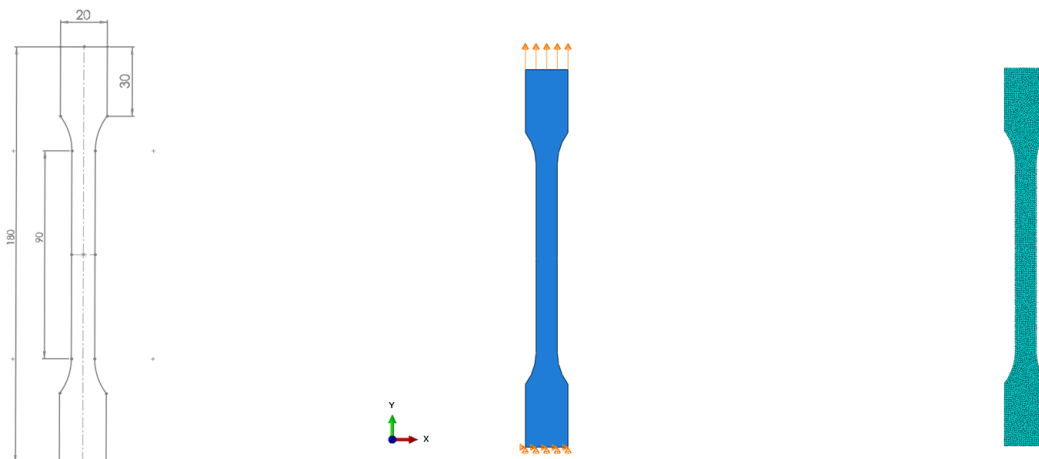


Figura 1. CAD do componente em mm (esquerda), condições de contorno (centro) e malha gerada (direita).

2.3.2 Cisalhamento simples

O ensaio de cisalhamento considera o corpo de prova mostrado na Fig. 2 (esquerda). As propriedades mecânicas do material foram definidas de acordo com as Tabelas 1 e 2. As condições de contorno da simulação foram as mesmas definidas para o ensaio de tração, com um deslocamento de 5 mm na superfície superior e um engaste na porção inferior e podem ser observadas na Fig. 2 (centro). A malha foi gerada com 1573 elementos, como mostrado na Fig. 2 (direita). Como resultados das análises numéricas, foram obtidas as curvas de tensão *versus* deformação cisalhantes obtidas na região central do corpo de prova. As simulações foram realizadas usando os mesmos ângulos do ensaio de tração. Os resultados são apresentados na seção 3.2.

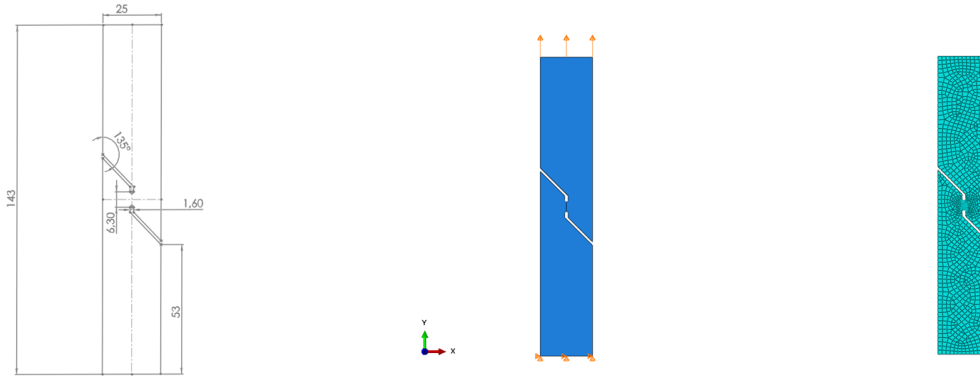


Figura 2. CAD do componente em mm (esquerda), condições de contorno (centro) e malha gerada (direita).

2.3.3 Placa perfurada sob carregamento radial

Para evidenciar a influência da anisotropia na geometria deformada, uma placa circular perfurada foi avaliada, ver Fig. 3 (esquerda) onde são dadas as dimensões em mm. As propriedades do material foram definidas com bases nas Tabelas 1 e 2, com exceção do coeficiente R_{22} . Esse último teve o seu valor variado entre 1,0 e 1,5, com um passo de 0,1. Um deslocamento radial de 5 mm foi aplicado. Dada a simetria da geometria e do carregamento, apenas $\frac{1}{4}$ da geometria foi analisada, como mostrado na Fig. 3 (centro). Uma malha estruturada com 8000 elementos foi adotada. Elementos menores foram utilizados na região central, enquanto elementos maiores foram definidos na parte externa, ver Fig. 3 (direita).

A deformação do furo central foi avaliada considerando a razão entre as dimensões nas direções 1 e 2:

$$\omega = \frac{r_i + u_{11}}{r_i + u_{22}} \quad (12)$$

onde r_i é o raio interno, u_{11} é o deslocamento no eixo x e u_{22} é o deslocamento no eixo y . Os resultados são apresentados na seção 3.3.

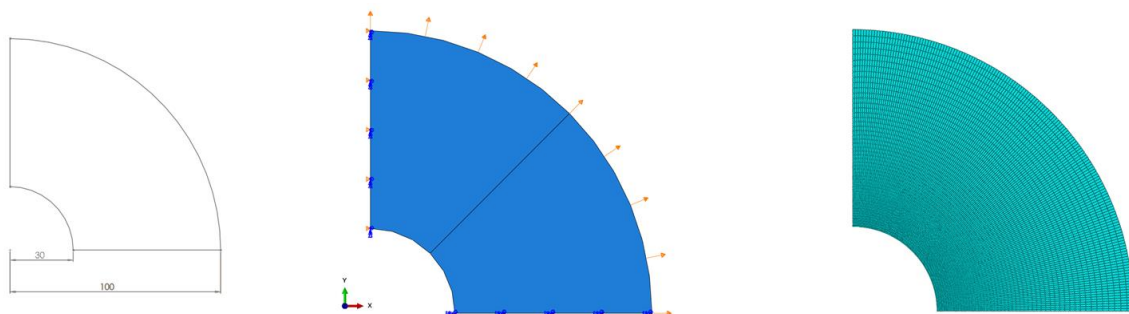


Figura 3. CAD do componente em mm (esquerda), condições de contorno (centro) e malha gerada (direita).

2.3.4 Placa perfurada sob tração simples

Além do caso radial, um corpo sob tração com um furo central foi avaliado, como pode ser observado na Fig. 4 (esquerda). As propriedades do material foram definidas de acordo com as Tabelas 1 e 2. As condições de contorno foram definidas da mesma forma que no caso de tração e cisalhamento, com um engaste inferior e um deslocamento superior, ver Fig. 4 (centro). A malha foi gerada com 9200 elementos, como representado na Fig. 4 (direita). Para esse caso, foi avaliada a evolução da razão a/b , onde a é o semi-eixo horizontal da elipse e b vertical, e o ângulo ψ de rotação dos pontos extremos verticais da elipse formada. O ensaio foi realizado para os mesmos ângulos do ensaio de tração e cisalhamento, e foi avaliado para um deslocamento superior de 5 mm e 2,5 mm. Os resultados são apresentados na seção 3.4.

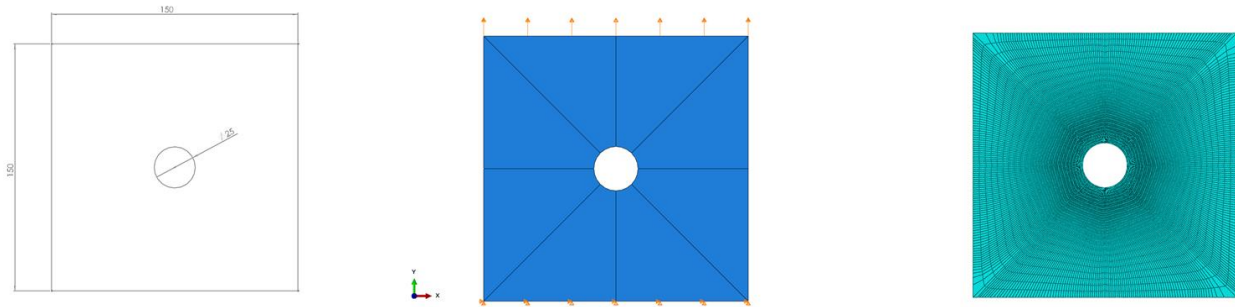


Figura 4. CAD do componente em mm (esquerda), condições de contorno (centro) e malha gerada (direita).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Essa seção apresenta os resultados numéricos obtidos a partir dos modelos numéricos descritos anteriormente. Os resultados numéricos são comparados com as soluções analíticas descritas na seção 2.2.

3.1. Tração simples

Na Fig. 5 são mostrados os resultados obtidos para o ensaio de tração descrito na seção 2.3.1. Nessa figura, avalia-se a razão entre a tensão longitudinal σ_θ e a tensão de referência X para diferentes valores de R_{22} : $R_{22} = 1$, $R_{22} = 1,25$ e $R_{22} = 1,5$. São comparados resultados numéricos e analíticos (Eq. (9)). Os resultados numéricos foram obtidos para dois níveis de deformação plástica acumulada: $\epsilon = 1 \times 10^{-3}$ e $\epsilon = 3 \times 10^{-3}$. Como esperado, a curva para $R_{22} = 1$ tem ponto inicial e final unitários, devido à coincidência dos eixos anisotrópicos nesses pontos. Observa-se uma boa coincidência entre dados numéricos e analíticos. Além disso, nota-se que quanto maior a diferença entre os coeficientes anisotrópicos, maior é a anisotropia que pode ser observada nas curvas de tração. Ressalta-se que tal diferença influencia diretamente nas curvas de endurecimento do material.

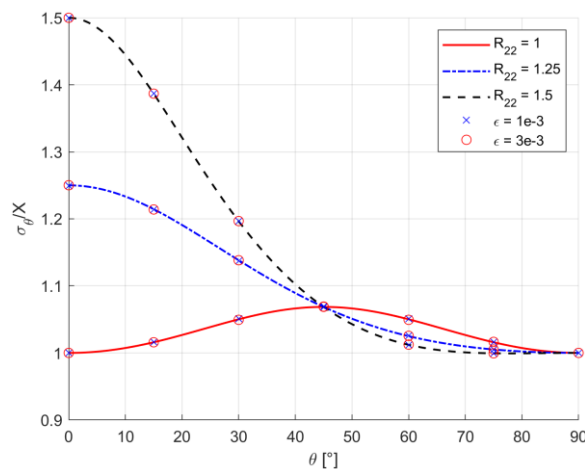


Figura 5. Variação da tensão longitudinal normalizada em função do ângulo de orientação do corpo de prova em relação ao sentido de laminação. Comparação entre os resultados numéricos (para dois níveis de deformação) e analíticos (Eq. (9)) para diferentes valores de R_{22} : 1; 1,25; 1,5.

3.2. Cisalhamento Simples

Na Fig. 6, os resultados normalizados para dois pontos de deformação plástica acumulada foram analisados e comparados com a razão entre τ_θ e a tensão de referência T . Os níveis de deformação adotados foram $\varepsilon = 2,5 \times 10^{-3}$ e $\varepsilon = 5 \times 10^{-3}$. Observa-se que nas duas extremidades o valor é unitário devido à coincidência dos eixos anisotrópicos com a aplicação de carga cisalhante. Os resultados tiveram, assim como no caso de tração simples, boa coincidência com o modelo teórico descrito, com pequenas discrepâncias para os valores de $\theta = 30^\circ$ e $\theta = 45^\circ$, devido à erros numéricos. Observa-se que a menor tensão de escoamento deu-se para o ângulo de $\theta = 45^\circ$.

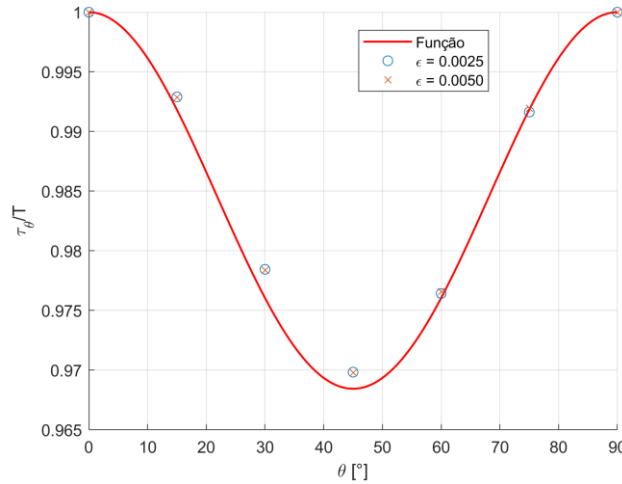


Figura 6. Variação da tensão cisalhante normalizada em função do ângulo de orientação do corpo de prova em relação ao sentido de laminação. Comparação entre os resultados numéricos (para dois níveis de deformação) e analíticos (Eq. (11)) para $R_{22} = 1,09$.

3.3. Placa perfurada com carregamento radial

Na Fig. 7, considerando o caso mostrado na Fig. 3, é mostrada a variação do parâmetro ω definido pela Eq. (12), em termos do coeficiente anisotrópico R_{22} . O gráfico foi gerado para os deslocamentos de 2,5 e 5 mm. Observa-se que a elipsicidade do furo aumenta à medida em que R_{22} aumenta. Esse é um efeito claro que demonstra a influência da anisotropia da distorção geométrica do componente. Comparando as curvas para $d = 2,5$ e $d = 5$ mm, nota-se que, como esperado, a distorção aumenta com o nível do deslocamento imposto.

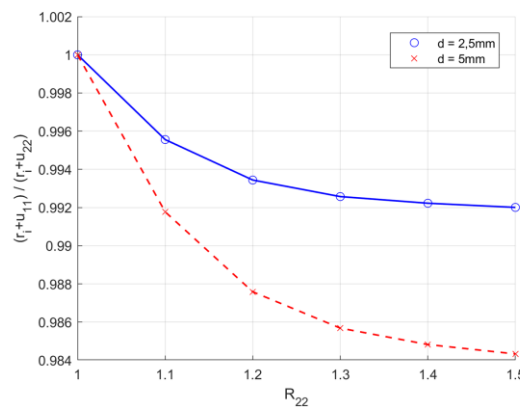


Figura 7. Variação do parâmetro ω em função do coeficiente anisotrópico R_{22} para o caso de placa furada com carregamento radial.

3.4. Placa perfurada com tração simples

Na Fig. 8 os resultados do caso da placa furada sob tração simples da Fig. 4 podem ser observados. Observa-se que a razão a/b para ambos os níveis de deslocamento impostos tiveram um comportamento semelhante, formando elipses excêntricas dependendo do ângulo de imposição de carga em relação aos eixos de fabricação do material. Destaca-se,

com base na Fig. 10 (direita), que o furo foi rotacionado em decorrência da anisotropia do material. Quando alinhado com os eixos anisotrópicos ($\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$) não há rotação. A maior rotação ocorreu para um ângulo de $\theta = 60^\circ$, assumindo valor aproximadamente igual a $\psi = 0,4^\circ$.

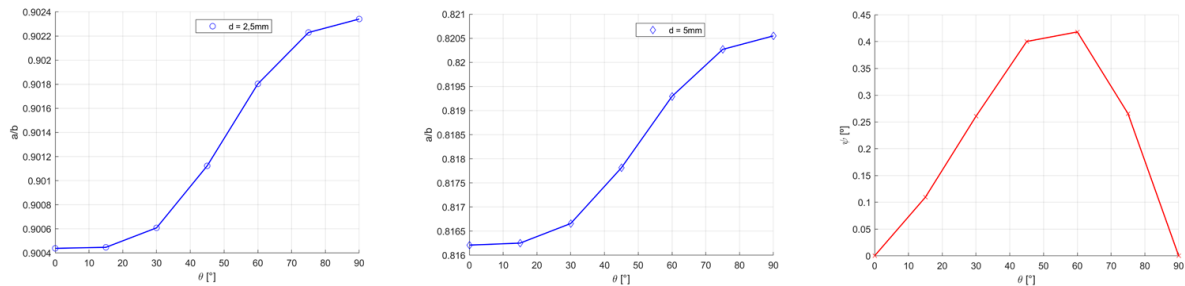


Figura 8. Razão a/b em função do ângulo θ para deslocamentos de 2,5 mm (esquerda) e 5 mm (centro). Variação do ângulo ψ de rotação do furo em função do ângulo θ para um deslocamento de 5 mm (direita).

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi avaliada a influência da anisotropia plástica na resposta mecânica de chapas metálicas finas utilizando por meio de simulações usando o método dos elementos finitos, empregando o critério de Hill (1948). Foram considerados diferentes ensaios, tração simples, cisalhamento simples e expansão de um furo variando os parâmetros anisotrópicos e/ou a direção de carregamento. A partir dos resultados obtidos, foi possível destacar a influência da anisotropia do material tanto na resposta em termos de tensão quanto na geometria deformada dos componentes. Com isso é possível evidenciar a importância da correta caracterização do material para simulações envolvendo o processamento e o comportamento em serviço de materiais anisotrópicos. Sendo esse um estudo inicial, trabalhos futuros envolvendo a simulação de processos de conformação mecânica de componentes com geometrias mais complexas serão desenvolvidos. Tais análises serão realizadas utilizando parâmetros ajustados a partir de experimentos desenvolvidos pelo próprio grupo de pesquisa. Além disso, havendo a necessidade, critérios de falha mais complexos poderão ser adotados para a representação adequada do comportamento de materiais reais.

5. AGRADECIMENTOS

O autor Bruno L. Schuster agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro recebido por meio do Programa Institucional de Iniciação Científica (PIBIC/2020).

6. REFERÊNCIAS

- Abaqus, A. “6.13 analysis user’s manual”. SIMULIA, Providence, IR, v. 149.
- Babanic, D., 2010. “Sheet Metal Forming Processes”. Springer, 1ª edição.
- Ha, J., Coppieters, S., Korkolis, Y. P., 2020. “On the expansion of a circular hole in an orthotropic elastoplastic thin sheet”. International Journal of Mechanical Sciences, v. 182, 105706.
- Hill, R., 1948. “A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals”. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences 193, p. 281-297.
- Thomesen, S., Hopperstad, O.S., Børvik, T., 2021. “Anisotropic Plasticity and Fracture of Three 6000-Series Aluminum Alloys”. Metals, v. 11, n. 4, p. 557, 2021.
- Yanaga, D., Kuwabara, T., Uema, N., Asano, M., 2012. “Material modeling of 6000 series aluminum alloy sheets with different density cube textures and effect on the accuracy of finite element simulation”. International Journal of Solid and Structures, v. 49, p. 3488-3495.
- Yin, Q., Zillmann, B., Suttner, S., Gerstein, G., Biasutti, M., Tekkaya, A. E., Wagner, M. F. -X., Merklein, M., Schaper, M., Halle, T., Brosius, A., 2014. “An experimental and numerical investigation of different shear test configurations for sheet metal characterization”. International Journal of Solids and Structures, v. 51, Issue 5, p. 1066-1074.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.