

Mechanical behavior of 6101 Aluminum alloy

Vinícius A. M. Rodrigues¹, Leonel L. D. Morales², Lucival Malcher¹

¹*Dept. of Mechanical Engineering, University of Brasilia
Asa Norte, 70910-900, Brasilia/Federal District, Brazil
vinciusaquino@gmail.com, malcher@unb.br*

²*Austral University of Chile, Faculty of Engineering Sciences, Institute of Design and Industrial Methods,
General Lagos 2086, Miraflores Campus, Valdivia, Chile
leonelmorales@gmail.com*

Abstract. The paper aims to study the elastoplastic behavior of the aluminum alloy 6101 in different stress states. In order to obtain different levels of stress triaxiality and normalized third invariant, six types of test specimens were carried out: cylindrical, cylindrical with 6 mm and 10 mm notch radius, machined for tensile test, rectangular specimen for pure shear testing, and two rectangular models for combined loading test (tension and shear). The experimental data are evaluated and used for the calibration procedure of the numerical simulations, which are performed in a context where it is assumed that the model based on the von Mises yield criterion with nonlinear isotropic hardening describes the mechanical behavior of the material. The experimentally obtained reaction curves are compared for the observed and calculated data, and it is possible to evaluate the influence of the stress triaxiality, the normalized third invariant and the calibration point, in the level of plastic strain in the fracture and in the proximity of the experimental result with the numerical one. For the cylindrical specimens, the increase of the stress triaxiality results in the discordance between the experimentally observed result and the numerical simulation performed, so that model does not represent satisfactorily the experimentally observed, for these conditions, must being request another calibration for model suitability. For the rectangular specimens, the observed result was that both the stress triaxiality and the third invariant contribute to a distance between the results obtained experimentally with the experimental results. At the end of the work, the equivalent plastic strain in the fracture is analyzed as an indicator so that the correct beginning of the fracture can be observed.

Keywords: von Mises yield criterion, plasticity theory, computational plasticity, elastoplastic behavior, 6101 aluminum alloy.

1 Introdução

Modelar a forma como o material se comporta de maneira numérica, de tal modo que possibilite uma proximidade com o realmente observado experimentalmente, talvez seja um dos objetos de maior interesse da engenharia, de modo que a busca por uma teoria que descreva de maneira precisa este comportamento elastoplástico, a fim de prever o momento da falha, seja relevante para setores da indústria de alto desempenho, bem como para o cenário acadêmico. Ao longo dos últimos anos, a importância e aplicação de modelos elastoplástico, que apresentem uma previsão mais precisa do início da fratura em materiais dúcteis vem crescendo de forma acentuada dentro dos setores competitivos das indústrias aeroespacial, automotiva, bélica, naval, e entre outras [1,2,6,8]. Atualmente, o campo de pesquisa voltado para a tentativa de descrição do histórico elastoplástico do material concentra-se em aprimorar os modelos constitutivos, que representam o modelo teórico que descreva o comportamento do material matematicamente, bem como aplicar a teoria em modelos numéricos, comparando com o observado experimentalmente, para que sejam obtidos dados essenciais para um projeto, como o início da falha e comportamento quando submetido a determinado carregamento, viabilizando-o quanto a confiabilidade. Neste sentido, foi escolhido o alumínio

6101, um material que apresenta como características alta condutibilidade elétrica, uma boa resistência à corrosão, além de mediana resistência mecânica, cujo as principais aplicações encontram-se no campo de transmissão elétrica, sendo amplamente utilizado como cabos de alta tensão, condutores e barramentos elétricos.

2 Formulação matemática

Segundo o modelo baseado no critério de escoamento Von Mises, o escoamento plástico inicia-se quando o segundo invariante do tensor das tensões desviadoras, J_2 , atinge um valor crítico [3,4,8]. A formulação matemática do modelo segue uma lógica construtiva, iniciando-se com a definição de uma função de escoamento. Feito isso, o próximo passo é determinar o vetor de fluxo plástico (plasticidade associativa), que determina a direção do fluxo de escoamento plástico. Posteriormente é feita a representação tridimensional da lei de fluxo plástico, determinando o tensor de deformação de fluxo plástico e por fim determina-se a evolução da deformação plástica equivalente. De maneira resumida, todos os elementos que compõem o modelo matemático baseado no critério de escoamento de von Mises com endurecimento isotrópico estão disponíveis na Tabela 1.

Tabela 1. Modelo matemático baseado no critério de escoamento de von Mises com endurecimento isotrópico.

Passos	Equações
Decomposição aditiva do tensor de Deformações	$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^p$
Lei de Hooke	$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}^e : \boldsymbol{\varepsilon}^e$
Função de escoamento	$\sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S} - \sigma_{y0} - H^I \bar{\varepsilon}^p}$
Lei de Fluxo Plástico	$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \dot{\gamma} \frac{3}{2q} \mathbf{S}$
Lei de Evolução da Deformação Plástica Equivalente	$\dot{\bar{\varepsilon}}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p} = \dot{\gamma}$
Regras de complementaridade	$\varphi \leq 0, \dot{\gamma} \geq 0, \varphi \dot{\gamma} = 0$

3 Estratégia numérica

Para a solução do conjunto de equações apresentadas no capítulo 2 adota-se a chamada metodologia da decomposição do operador [3,5,6,8], especialmente adequado para a integração numérica do problema de evolução e também tem sido amplamente utilizado na plasticidade computacional. Para esta metodologia o problema foi subdividido em duas partes: a primeira consiste em um preditor elástico, o qual o comportamento mecânico do material foi assumido como completamente elástico, e que são conhecidos no início do intervalo do pseudo-tempo $[t_n, t_{n+1}]$, os valores da deformação elástica, $\boldsymbol{\varepsilon}_n^e$, da deformação plástica, $\boldsymbol{\varepsilon}_n^p$, além do conjunto de variáveis internas de propriedade mecânica do material, e a segunda parte consiste em um corretor plástico onde um sistema de equações residuais, formado pela lei elástica, a função de escoamento e as equações de evolução das variáveis internas é resolvido, tomando os valores obtidos na construção do preditor elástico como valores iniciais do problema [8]. Desta maneira, o sistema de equações residuais abaixo foi resolvido para mapear o algoritmo de retorno:

$$\begin{cases} R_{\boldsymbol{\sigma}_{n+1}} = \boldsymbol{\sigma}_{n+1} - \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^T - \frac{3 G \Delta \gamma}{q_{n+1}} \mathbf{S}_{n+1} \\ R_{\bar{\varepsilon}_{n+1}^p} = \bar{\varepsilon}_{n+1}^p - \bar{\varepsilon}_n^p + \Delta \gamma \\ R_{\Delta \gamma} = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S}_{n+1} : \mathbf{S}_{n+1} - \sigma_{y0} - H^I \bar{\varepsilon}_{n+1}^p} \end{cases} \quad (1)$$

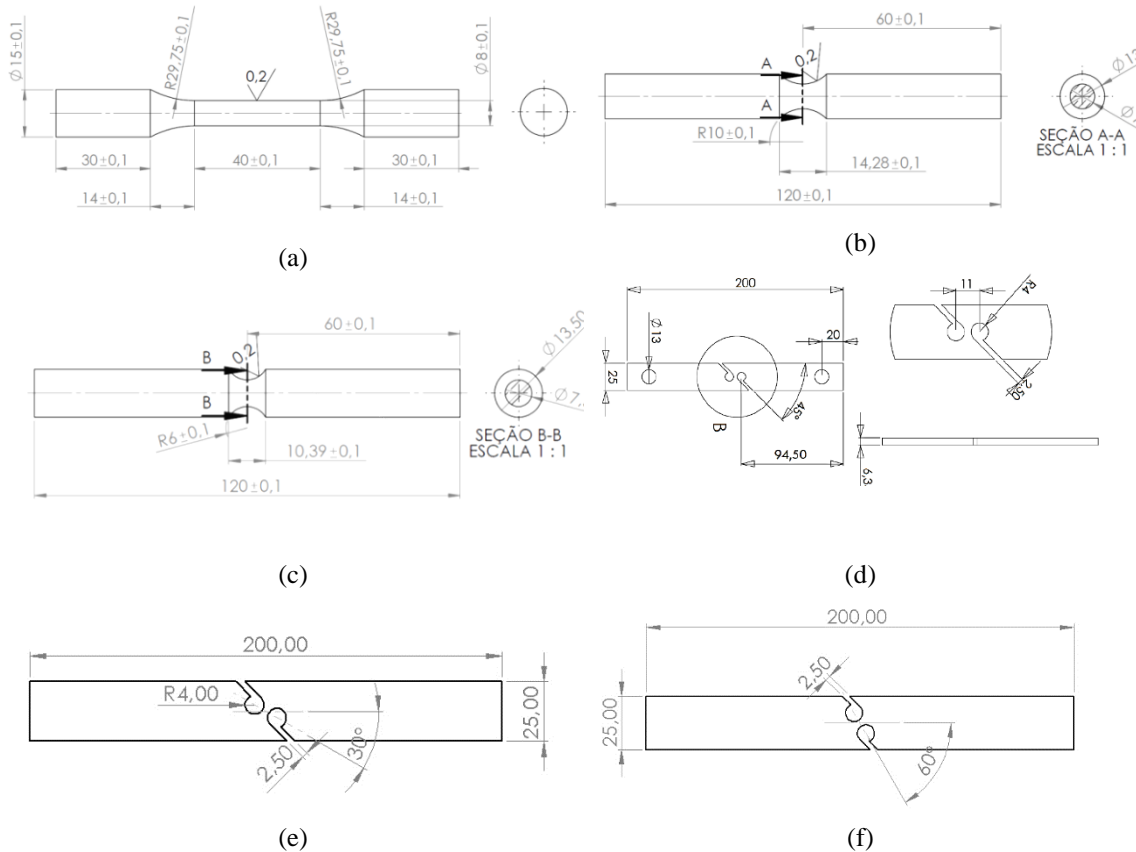
O método de Newton-Raphson é utilizado para se resolver o conjunto de equações não lineares

discretizado, dentro do corretor plástico, especialmente escolhido por atingir uma taxa quadrática de convergência para a solução, o que resulta em um algoritmo de atualização computacionalmente eficiente [3,5,8].

4 Dados experimentais e procedimentos de calibração

4.1 Resultados experimentais

Todos os ensaios foram realizados no laboratório de ensaio de materiais da Universidade de Brasília, utilizando-se a máquina de ensaio uniaxial MTS 810, que dispõe de uma capacidade de carga de 100 kN. A deformação na região de ensaio dos cp's foi verificada com ajuda de um extensômetro uniaxial MTS com faixa que varia de -10% a 20%, sendo o comprimento de medição igual a 25 mm, no caso dos cp's cilíndricos. Os ensaios de tração, foram realizados com controle de deformação, utilizando-se de um extensômetro até a ruptura do cp. A taxa de deformação com o qual a máquina traciona a peça é controlada como sendo de 1 mm/min. Após a realização dos ensaios experimentais dos corpos de prova usinados a partir do Alumínio 6101, foram obtidos os gráficos força-deslocamento. Para os cp's de cisalhamento e carregamento combinado, foi utilizado a geometria com características de entalhe, conforme modelo estudado por Driemeir [7]. A Figura 1 apresenta os desenhos técnicos dos corpos de prova e a Tabela 2 apresenta alguns dos principais resultados observados.



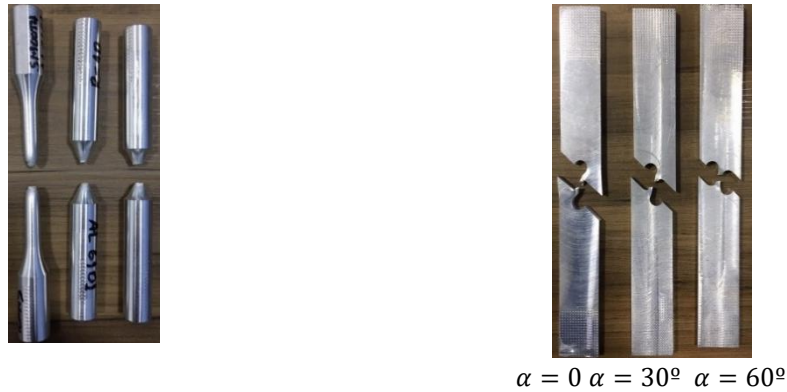


Figura 1. Geometrias dos corpos de prova fabricados. (a) CP cilíndrico liso (b) CP cilíndrico com raio de entalhe de 10 mm (c) CP cilíndrico com raio de entalhe de 6 mm. CP de cisalhamento puro (e) CP de carregamento combinado com entalhe inclinado em 30° e (f) CP de carregamento combinado com entalhe inclinado em 60° e corpos de prova após a fratura.

Tabela 2. Níveis de deslocamento na fratura experimentalmente observados.

Descrição	Tensão de triaxialidade $[\eta]$	Terceiro invariante normalizado $[\xi]$	Deslocamento na fratura [mm]
cp de cisalhamento	0	0	7.00
cp combinado 30°	0.10	0.15	4.50
cp combinado 60°	0.20	0.50	2.70
cp cilíndrico liso	0.33	1	8.90
cp cilíndrico entalhado	0.50	1	3.50
	0.60	1	2.90

4.2 Determinação dos parâmetros do material

A identificação dos parâmetros dos materiais foi realizada por meio do método inverso de identificação paramétrica. Tal método leva em consideração a curva de reação experimentalmente obtida para o corpo de prova cilíndrico liso a modelagem do problema via método dos elementos finitos, um método multivariável baseado no gradiente [6,8,9] e a equação de Kleiner mann, que considera a descrição da curva de endurecimento isotrópico do material através de quatro parâmetros, matematicamente a equação de Kleiner mann é descrita como:

$$\sigma_y = \sigma_{y0} + \xi \bar{\epsilon}^p + (\sigma_\infty - \sigma_y)(1 - \exp(-\delta \bar{\epsilon}^p)) \quad (2)$$

onde σ_y representa o limite de escoamento do material, σ_{y0} é o limite de escoamento inicial, $\bar{\epsilon}^p$ é a deformação plástica equivalente e o conjunto ξ, σ_∞ e δ representa parâmetros de ajustes da curva. As tabelas 3 e 4 mostram os parâmetros mecânicos, tanto elásticos quanto plásticos para o material em estudo.

Tabela 3. Parâmetros elásticos para a liga de alumínio 6101.

Descrição	Símbolo	Valor	
		Tração	Cisalhamento
Módulo de Young	E [MPa]	65554	
Coefficiente de Poisson	ν	0.30	
Limite de escoamento inicial	σ_{y0} [MPa]	96.13	81.66
Alongamento percentual máximo	A [%]	35.60	-

Tabela 4. Parâmetros plásticos para a liga de alumínio 6101.

Descrição	Valor	
	Tração	Cisalhamento
σ_{y0}/τ_{y0} [MPa]	96.13	81.66
ξ [MPa]	63.20	164.70
σ_{∞} [MPa]	220.87	107.24
δ	12.15	45.45
$\bar{\epsilon}^p_{Max}$	1.50	0.56

5 Simulações numéricas e discussões

5.1 Curvas de reação numéricas e experimentais

Para que seja feita uma análise da resposta numérica que apresente o nível de força obtida, dado o nível de deslocamento prescrito, as simulações foram realizadas considerando como condição de parada, o nível de deslocamento experimentalmente observado, bem como as propriedades do material determinadas de acordo com o ensaio de tração no corpo de prova cilíndrico liso. Os resultados são apresentados nos gráficos da Figura 2.

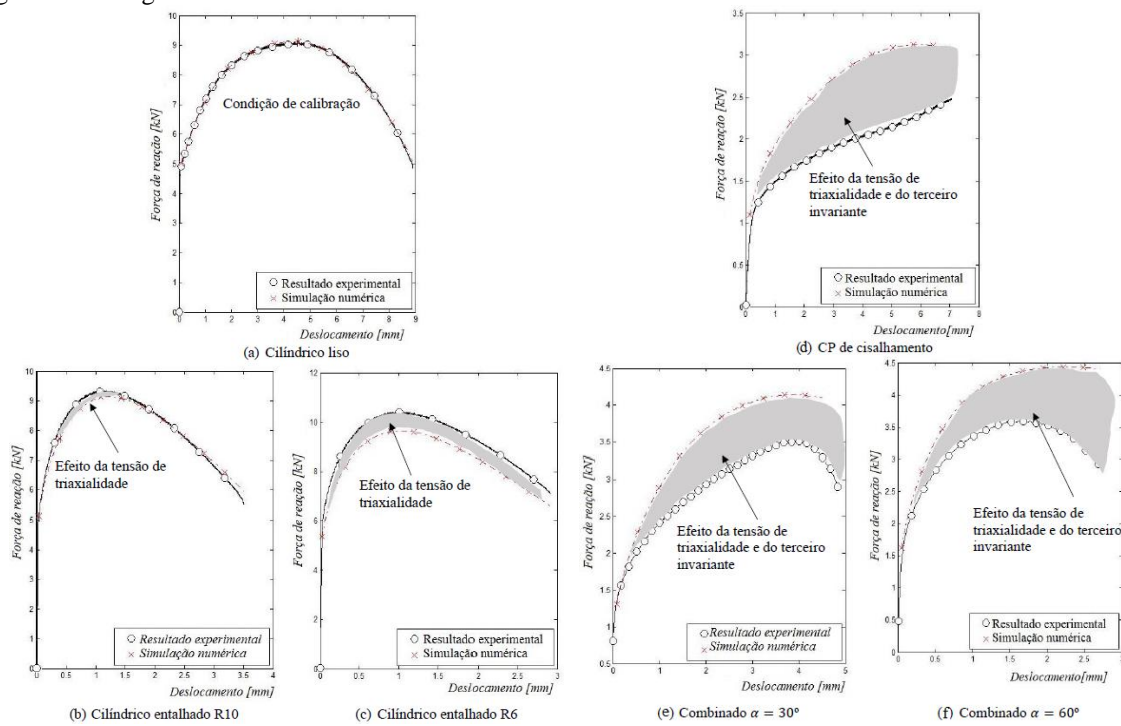


Figura 2. Curvas de reação para os cp's cilíndricos e curvas de reação para os cp's retangulares.

Observando a Figura 2(a) é possível notar que a curva de reação para o cp cilíndrico liso, obtida numericamente, coincide com a curva de reação obtida experimentalmente. Isto deve-se ao fato de que este ponto foi assumido como o ponto de calibração das propriedades do material. O mesmo não é observado nas curvas de reação obtidas numericamente para os cp's entalhados (ver Figura 2(b) e Figura 2(c)). Outra observação relevante é o fato de que com o progressivo aumento da severidade do entalhe, os resultados das simulações numéricas diferenciam-se cada vez mais das curvas experimentais, o que é numericamente representado pelo aumento da tensão de triaxialidade. Contudo, para os cp's de cisalhamento e carregamento combinado (ver Figura 2(d, e, e f)), onde se tem estados de tensão extremamente diferente do estado de tensão utilizado para calibração das propriedades do material (ou em outras palavras, onde a superfície de escoamento é diferente da superfície de escoamento obtida pela calibração em tração), tal

diferença nos estados de tensões pode ser quantitativamente justificada pela diferença tanto nos valores das tensões de triaxialidade quanto nos valores do terceiro invariante normalizado. O comportamento obtido pela simulação numérica é consideravelmente diferente do resultado experimental. Este comportamento é justificado pela falta do efeito da tensão de triaxialidade e do terceiro invariante normalizado na formulação do modelo constitutivo utilizado nas simulações numéricas baseado no critério de escoamento de von Mises [6,8].

5.2 Evolução da deformação plástica acumulada

O comportamento da deformação plástica equivalente versus o nível de tensão de triaxialidade pode ser observado através de uma curva de tendência, como apresentado na Figura 3.

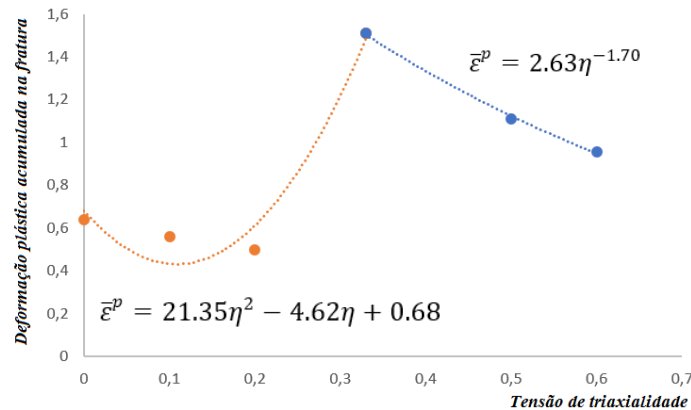


Figura 3. Curva de deformação plástica acumulada na fratura versus tensão de triaxialidade inicial.

Com os resultados obtidos, pode-se definir equações que representem o nível esperado de deformação plástica acumulada na fratura, de acordo com o nível inicial de tensão de triaxialidade do corpo de prova, como foi demonstrado na curva de tendência da Figura 3. As equações (3) e (4) representam matematicamente o comportamento esperado na fratura, a primeira com 99% de correlação e aproximada por uma equação exponencial e a segunda com 95% de correlação e aproximada por uma equação polinomial de segunda ordem [6,8].

$$\bar{\epsilon}^p = 2.63\eta^{-1.70} \quad (3)$$

$$\bar{\epsilon}^p = 21.35\eta^2 - 4.62\eta + 0.68 \quad (4)$$

5.3 Avaliação da influência do ponto de calibração no comportamento do material

Nesta etapa do trabalho, busca-se avaliar a influência do ponto de calibração na determinação das curvas de reação, bem como na evolução da deformação plástica acumulada. Para isto, utilizou-se os parâmetros do material calibrados de acordo com o ensaio de cisalhamento realizado, que foi adotado aqui, como o segundo estado de tensão para calibração. Para esta análise, assumiu-se somente os resultados para os cp's de cisalhamento e carregamento combinado, dado que tanto os valores da tensão de triaxialidade quanto do terceiro invariante normalizado são alterados. A Figura 4(a) apresenta resultados obtidos para as simulações do cp de cisalhamento, utilizando com entrada, os parâmetros do material identificados de acordo com o primeiro e segundo pontos de calibração. Para o primeiro ponto de calibração foi considerado $\eta=0.33$ e $\xi=1$, o que representa os parâmetros elastoplásticos obtidos para o cp cilíndrico liso sob tração, e o segundo ponto de calibração apresenta $\eta=0$ e $\xi=0$, correspondentes aos parâmetros obtidos mediante o ensaio do cp de cisalhamento. Pode-se observar que a curva de reação obtida de acordo com o primeiro ponto de calibração, distingue-se da curva de reação experimentalmente observada, visto que o modelo baseado no critério de escoamento de von Mises não contempla o efeito da tensão de triaxialidade e do terceiro invariante normalizado. Contudo, os resultados numéricos obtidos de acordo com o segundo ponto

de calibração, representam com exatidão o comportamento mecânico do material, justificado por ser exatamente o estado de tensão adotado como condição de calibração [6,8].

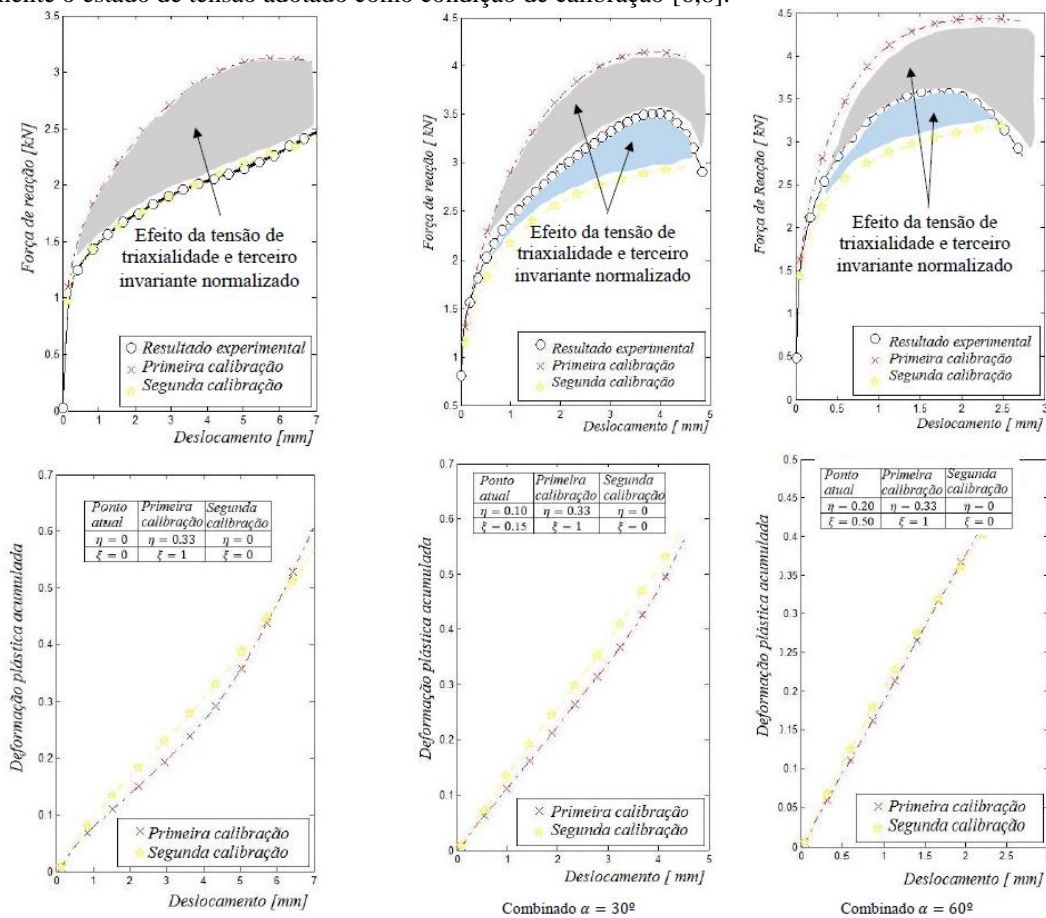


Figura 4. (a) Força de reação e deformação plástica acumulada para corpo de prova de cisalhamento em diferentes pontos de calibração (b) força de reação e deformação plástica acumulada para cp's de carregamento combinado.

Os resultados obtidos com as simulações dos corpos de prova sob carregamento combinado, em ambos os casos, apresentam curvas de reação numericamente calculadas, em discordância com os resultados experimentalmente observados. Este comportamento é justificado pelo fato de que em ambos os cp's com carregamento combinado, os parâmetros elastoplásticos se distinguem dos parâmetros elastoplásticos dos dois pontos de calibração adotados. Nestes casos, o modelo baseado no critério de escoamento de von Mises, não consegue corrigir o comportamento, visto que não leva em consideração o efeito da tensão de triaxialidade e do terceiro invariante normalizado. A Figura 4 (b) apresenta as curvas de reação e deformações plásticas acumuladas para os cp's de carregamento combinado.

6 Conclusões

Foi possível observar o comportamento mecânico da liga de alumínio 6101 através de dois pontos de calibração e modela-lo por meio do critério de escoamento de von Mises, onde fica claro que a falta da tensão de triaxialidade e do terceiro invariante corroboram para uma previsão conservadora em relação a curva de reação, bem como no nível de deformação plástica na fratura [6,8]. Foi possível observar também que quanto mais distante o estado de tensão do ponto de calibração, menos assertiva se torna a teoria baseada no critério de escoamento de von Mises para a descrição do comportamento do material, justamente pela falta da incorporação dos dois parâmetros elastoplásticos citados, fundamentais para o incremento da regra de fluxo plástico. A mudança na geometria da amostra, causada pela deformação permanente do

material, também é um fator importante no processo de descrição do seu comportamento, dado que os valores da tensão de triaxialidade e terceiro invariante normalizado são muito diferente de seus valores iniciais, para materiais com alta ductilidade [6,8], esta diferença pode, por exemplo, levar a uma previsão incorreta do local correto para o início da fratura dúctil. Considerando os corpos de prova entalhados, a inclusão da tensão de triaxialidade na lei de fluxo plástico do material é essencial para uma boa descrição do comportamento do material. Quando considerando o efeito cisalhamento, o terceiro normalizado invariante exerce maior influência na descrição do comportamento do material até a fratura. De todo o modo, o uso do critério de escoamento que considere a influência de importantes parâmetros elastoplásticos é fundamental para descrever o comportamento dos materiais dúcteis até o momento da fratura. [6,8]

Authorship statement. The authors hereby confirm that they are the sole liable persons responsible for the authorship of this work, and that all material that has been herein included as part of the present paper is either the property (and authorship) of the authors, or has the permission of the owners to be included here.

References

- [1] Andrade Pires, F. M. (2005). *Issues on the Finite Element Modelling of Degradation and Prediction of Failure in Finitely Straining Ductile Materials*. Swansea, School of Engineering, University of Wales. Ph.D.
- [2] Bai, Y. (2008). *Effect of Loading History on Necking and Fracture*. Ph.D Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [3] De Souza Neto, E.A., Peric, Owen, D.R.J. (2008). *Computational methods for plasticity: theory and applications*. John Wiley & Sons Ltd.
- [4] Hill, R., (1950). *The Mathematical Theory of Plasticity*. Oxford Classic Texts.
- [5] Simo, J.C., & Hughes, T.J.R. (1998). *Computational Inelasticity*. New York: Springer- Verlag.
- [6] Malcher, L.; Morales, L. L. D.; Rodrigues, V. A. M.; Silva, V. R. M. ; Araujo, L. M. ; Ferreira, G. V. ; Neves, R. S. . *Experimental program and numerical assessment for determination of stress triaxiality and J effects on AA6101-T4*. Theoretical and applied fracture mechanics, , v. 1, p. 102476, 2020.
- [7] Driemeier, L., Brüning, M., Micheli, G., Alves, M., (2010), *Experiments on stress triaxiality dependence of material behavior of aluminum alloys*, Mechanics of Materials.
- [8] Rodrigues, V. A. M. ESTUDO DO COMPORTAMENTO ELASTOPLÁSTICO DE MATERIAIS DÚCTEIS: EXPERIMENTAÇÃO E MODELAGEM. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade de Brasília.
- [9] Morales, L. L. D. Estudo experimental e numérico do comportamento mecânico na fratura da liga AISI 4340.. 2020. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) - Universidade de Brasília.