

ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO CLASSES 3104-H34 E 5052-H32

Willian De Almeida Lamarque

Inácio da Fontoura Limberger

Natália de Freitas Daudt

Tiago dos Santos

Cristiano José Scheuer

Grupo de Tecnologia e Mecânica dos Materiais. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.

willianlmq@gmail.com, oicani@smail.ufsm.br, natalia.daudt@ufsm.br, tiago.santos@ufsm.br, cristiano.scheuer@ufsm.br

Diego Tolotti de Almeida

Bruning Tecnometal Ltda, 98280-000, Panambi, RS, Brasil.

diegot@bruning.com.br

Resumo: Os ensaios de cisalhamento são amplamente utilizados para caracterização do comportamento sob deformação de chapas metálicas submetidas a operações de conformação. A realização desta caracterização visa fundamentalmente alcançar condições de processamento que permitam produzir grandes deformações sem que ocorra instabilidade plástica. Neste sentido, no presente trabalho é realizada uma análise comparativa do comportamento ao cisalhamento simples das ligas de alumínio classe 5052-H32 e 3104-H34, avaliando o efeito da anisotropia produzida pela laminação previa das chapas. Tais ligas, que apresentam resistência mecânica equivalente porém composição química distinta, são submetidas a operações de produção por conformação mecânica realizadas sob condições similares. Para viabilizar a caracterização pretendida, neste estudo foi adotada a configuração do teste de cisalhamento proposta por Miyauchi, baseada no padrão da norma ASTM. Com base nos resultados pode-se afirmar que a liga 5052-H32 irá escoar sob uma menor tensão de escoamento quando carregada sob cisalhamento simples na direção de 45° em relação ao seu sentido de laminação, apresentando uma maior deformação antes da fratura quando deformada sob as direções de 45° e 60° em relação ao sentido de laminação. A ruptura por cisalhamento da liga 5052-H32 irá ocorrer sob valores similares de tensões limite de cisalhamento em todas as direções de carregamento. Já a liga 3104-H34 irá escoar e sofrer fratura, sob condições de carregamento por cisalhamento simples, nesta ordem, ante um mesmo valor de tensão de escoamento e tensão limite de cisalhamento quando deformada em qualquer direção. Porém, a deformação sofrida antes da fratura será maior quando deformada segundo uma direção de 45° em relação ao seu sentido de laminação.

Palavras-chave: Ecoeficiência, Reciclabilidade, Ligas de Alumínio, Resistência ao Cisalhamento.

1. INTRODUÇÃO

Devido a pressão das instituições reguladoras, o setor da mobilidade tem visado o emprego de materiais com melhores propriedades ecológicas (baixa energia incorporada, baixo consumo de recurso hídricos e baixa emissão de carbono) (Chauhan *et al.*, 2022). Neste contexto, ao longo das diversas etapas do ciclo de vida dos materiais de engenharia, tem-se o consumo de energia e de insumos primários; e a emissão de calor de baixo grau, e de resíduos principalmente sólidos e gasosos (Yu *et al.*, 2022). Neste cenário, a busca pela reutilização de materiais ao término da vida útil dos produtos manufaturados a partir deles, buscando aumentar o seu crédito de energia, tem remetido à seleção de materiais com rotas de reciclagem consolidadas (Konietzko *et al.*, 2020).

No caso dos componentes estruturais do setor da mobilidade, as ligas de alumínio da série 3XXX têm sido cada vez mais empregadas em substituição as da série 5XXX, em virtude da primeira possuir uma cadeia de reciclagem melhor consolidada que a segunda, em função de ser intensivamente empregada na produção de embalagens pelo setor alimentício (Bianchi *et al.*, 2019). Como os tratamentos térmicos nestas ligas são inócuos, estas são conformadas a frio para a produção de componentes planos, operação que confere um incremento às suas propriedades mecânicas por efeito do encruamento (Benoit *et al.*, 2020).

Os principais modos de falha destes componentes de estruturas veiculares conformados a frio se processam por cisalhamento. Conforme amplamente sabido, esse fenômeno é gerido por fatores diversos, dentre os quais as alterações que ocorrem na estrutura cristalina do material decorrentes do seu processamento, sendo estas responsáveis por variações no seu comportamento. Tal conjunto de fatores pode ocasionar desempenhos distintos durante fabricação ou em operação, mesmo em materiais com resistência mecânica semelhante (Bianchi *et al.*, 2019).

Para mitigar o problema de falha destes componentes durante a sua etapa de fabricação por estampagem, espera-se uma boa conformabilidade de modo que o material seja facilmente deformado plasticamente sem sofrer rupturas (Almeida *et al.*, 2023). Em função disso, a avaliação prévia do seu desempenho durante condições de carregamento similares à de fabrico, baseada nos modos de falha mais recorrentes durante o seu processamento, deve ser investigada e os fatores de influência entendidos (Anandavel, 2021).

Neste contexto, no presente trabalho é avaliada a resistência ao cisalhamento das ligas de alumínio classes 3104-H34 e 5052-H32, empregando uma configuração do teste de cisalhamento proposta por Merklein; Biasutti (2011), baseada no padrão da norma ASTM B831–05. A caracterização da resistência ao cisalhamento destas ligas será realizada em função da orientação de laminação, de modo a avaliar o efeito da anisotropia produzida por esta etapa previa de fabricação da matéria-prima.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 mostra a composição química das ligas de alumínio classes 3104-H34 e 5052-H32 utilizadas nesta pesquisa, determinada por meio de espectroscopia de emissão óptica. Os teores dos elementos de liga estão dentro dos intervalos estabelecidos pela *Aluminum Association*. Estes materiais foram fornecidos na forma de chapa laminada a frio com espessura de 2,5 mm. A liga AA 5052 possui encruamento H32, ou seja, após o endurecimento o material foi estabilizado a um valor de resistência intermediário entre recozido (O) e ¼ endurecido (H12). Já a liga 3104 tem endurecimento de trabalho H34, ou seja, após o endurecimento o material foi estabilizado a um valor de resistência intermediário entre recozido (O) e totalmente duro (H19).

Tabela 1. Composição química das ligas de alumínio classes 3104-H34 e 5052-H32.

Elemento químico	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Al
AA 5052-H32	2.5	0.23	0.32	0.07	0.07	0.3	0.08	Balanço
AA 3104-H34	1.14	0.1	0.13	0.24	0.93	—	—	Balanço

Os corpos de prova para realização dos ensaios de cisalhamento simples foram usinados a laser a partir das chapas comerciais, de acordo com a geometria e dimensões indicadas na Figura 1a. Essa geometria de corpo de prova foi desenvolvida por Merklein; Biasutti (2011), sendo derivada do padrão da norma ASTM B831–05 (Figura 1b). Essa geometria foi proposta principalmente para investigar o comportamento de produtos finos de alumínio sob carga de cisalhamento usando uma única zona de cisalhamento (Yin *et al.*, 2014). A adaptação da geometria do corpo de prova deu-se para facilitar a inversão da direção da carga, possibilitando avaliar o comportamento do material sob carregamento de cisalhamento cíclico e, assim, descrever o comportamento de encruamento cinemático (Merklein; Biasutti, 2011). Os corpos de prova foram usinados em ângulos de 0, 30, 45, 60 e 90° em relação ao sentido de laminação (Figura 1c). Destaca-se que o ensaio de cisalhamento planar simples, com uma única zona de cisalhamento, é uma técnica muito eficiente para avaliar as propriedades mecânicas de amostras laminadas, visando analisar a sua anisotropia plástica (Rauch, 1998). Por causa da zona de cisalhamento única, a resposta do material anisotrópico pode ser estudada com mais detalhes. Salienta-se que antes da realização dos ensaios de cisalhamento os corpos de prova foram submetidos a uma operação de acabamento por lixamento manual.

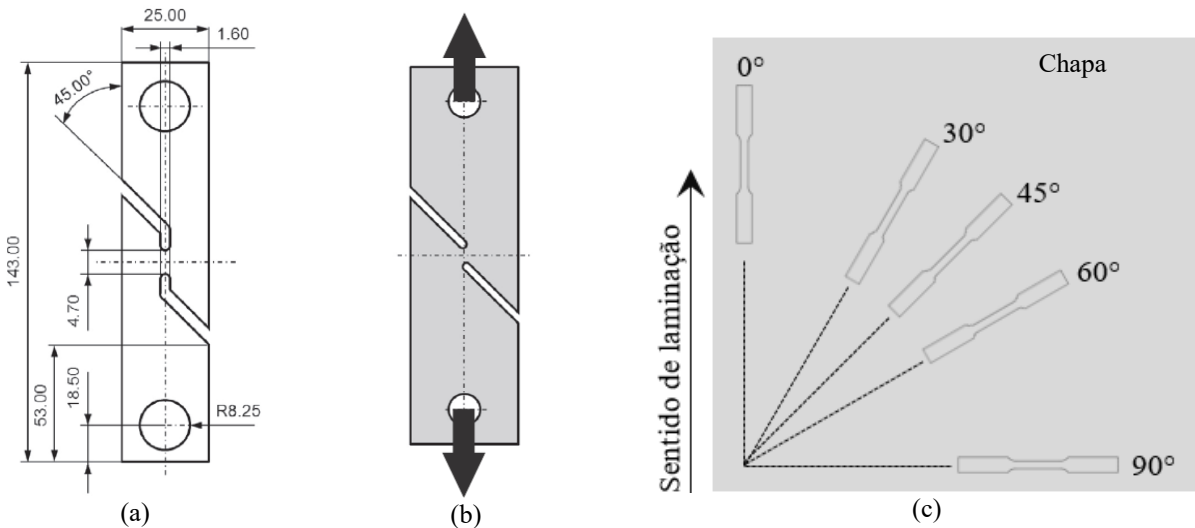


Figura 1. Geometria e dimensões dos corpos de prova (a) propostos por Merklein e Biasutti (2011), e (b) derivada do padrão da norma ASTM B831–05. (c) Orientação dos corpos de prova em relação à direção de laminação.

Os ensaios de cisalhamento simples foram realizados em uma máquina de ensaio universal EMIC® DL2000, sendo executados adotando-se uma velocidade de deformação padrão de 0,5 mm/min (levando a uma taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) de cerca de 0,001 s⁻¹), seguindo recomendação da norma supracitada. Os ensaios foram realizados sob a temperatura de 21,4 °C e 54% de umidade relativa, seguindo a recomendação da norma. A programação da máquina de ensaios e a obtenção dos valores de força e deformação de cisalhamento foram realizadas por meio do software Tesc Emic instalado em um microcomputador interfaceado com a máquina de ensaios universal. Os corpos de prova foram tracionados uniaxialmente até a ruptura para obtenção da curva tensão-deformação de cisalhamento. Para cada condição e material avaliado, foram ensaiadas um número mínimo de cinco amostras. Os valores das tensões de escoamento por cisalhamento (τ_e) e limite de cisalhamento (τ_c), bem como a deformação plástica por cisalhamento (γ), conforme recomendação da norma supracitada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 e Figura 3 são mostradas as curvas de tensão-deformação m cisalhamento simples dos corpos de prova extraídos em (a) 0°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60° e (e) 90° em relação ao sentido de laminação das chapas de alumínio classe 5052-H32 e 3104-H34, respectivamente. Já as Figura 2f e Figura 3f mostra um comparativo entre as curvas para todas as orientações avaliadas¹. Confrontando-se os dados obtidos para cada orientação de corpo de prova em relação ao sentido de laminação em ambos os materiais, é possível observar que a variação entre as curvas é praticamente desprezível, situando-se abaixo dos 15% aceitável para dispersão nos valores das propriedades mecânicas (SOUZA, 1982).

A partir da análise das curvas da Figura 2 também é possível identificar a ocorrência do efeito Portevin-Le Chatelier (PLC) para as amostras da liga AA 5052-H32. O efeito PLC é caracterizado pelo perfil serrilhado da curva tensão-deformação na região do regime de encruamento uniforme, sendo sua ocorrência creditada às deformações não homogêneas que ocorrem neste regime (Tu *et al.*, 2014; Cottrell, 1953). Segundo Krishna *et al.* (2015) e Huskins *et al.* (2010), tais deformações não homogêneas acontecem devido à influência dos intermetálicos sobre a movimentação das discordâncias, durante a deformação plástica. Em função do pequeno espaçamento existente entre tais partículas, as discordâncias ficam retidas junto a eles, vindo a movimentarem-se posteriormente quando a tensão aplicada for suficiente para vencer a barreira energética estabelecida pelos intermetálicos (Tian *et al.*, 2019). As amostras da liga AA 3104-H34, por sua vez, não exibiram tal fenômeno.

Ainda analisando as Figura 2 e Figura 3 nota-se que não ocorre uma alteração visível no perfil da curva tensão-deformação em cisalhamento na região de transição do regime de deformação elástica para plástica. Conforme mostrado na literatura (Callister; Rethwisch, 2012), para o caso de metais ferrosos como os aços de baixo e médio carbono, a transição elastoplástica é bem definida ocorrendo de maneira abrupta. Nestes casos, é possível distinguir claramente a tensão limite de escoamento. O alumínio e suas ligas, por outro lado, demonstram uma tênue transição do regime elástico para o plástico, tal qual mostrada nas Figura 2 e Figura 3. Esta afirmação pode ser confirmada analisando os resultados apresentados em outras obras publicadas na literatura (Tian *et al.*, 2019; Krishna *et al.*, 2015; Huskins *et al.*, 2010).

Concentrando-se a análise no comparativo entre as curvas tensão-deformação mostradas nas Figura 2f e Figura 3f é possível identificar a existência de pequenas variações no comportamento observado entre as condições avaliadas. Segundo Askeland e Wright (2015), em cristais únicos as propriedades mecânicas dependem das direções cristalográficas. Assim, considerando que a resistência mecânica de um monocristal é grandemente anisotrópica, uma deformação plástica intensa que produza uma forte orientação preferencial causará a um material policristalino uma anisotropia aproximadamente igual a de um monocristal (Dieter, 1981).

Na Figura 4 são apresentados os valores da tensão de escoamento por cisalhamento (τ_e), da tensão limite de cisalhamento (τ_c), e da deformação plástica por cisalhamento (γ) para as ligas de alumínio (a) 5052-H32 e (b) 3104-H34. Observa-se que a τ_e tem um valor mínimo para a orientação de 45° do corpo de prova em relação ao sentido de laminação da chapa para a liga AA 5052-H32, apresentando comportamento crescente para as orientações de 0° e 90°; ao passo que não sofre efeito da orientação de laminação para a liga AA 3104-H34. A τ_c , por sua vez, embora os valores médios das leituras mostrem um comportamento crescente para a orientação de 45° para ambas as ligas, o desvio padrão das leituras mostra que o comportamento desta independente da orientação do corpo de prova em relação ao sentido de laminação. Adicionalmente, verifica-se que γ tem seu valor máximo para a orientação de 60° no caso da liga AA 5052-H32 e de 45° para a liga AA 3104-H34, decrescendo em ambos os casos a medida em que os ângulos de aproximam de 0° e 90°.

Baseando-se na Figura 4a pode-se afirmar que a liga AA 5052-H32 irá escoar sob uma menor tensão de escoamento quando carregada sob cisalhamento simples na direção de 45° em relação ao seu sentido de laminação, apresentando uma maior deformação antes da fratura quando deformada sob as direções de 45° e 60° em relação ao sentido de laminação. A ruptura por cisalhamento irá ocorrer sob valores similares de tensões limite de cisalhamento em todas as direções de carregamento.

Já com base na Figura 4b pode-se afirmar que a liga AA 3104-H34 irá escoar e sofrer fratura, sob condições de carregamento por cisalhamento simples, nesta ordem, ante um mesmo valor de tensão de escoamento e tensão limite de

¹ Nas Figura 2f e Figura 3f foram agrupadas, para cada orientação, as curvas que apresentaram maior deformação de cisalhamento.

cisalhamento quando deformada em qualquer direção. Porém, a deformação sofrida antes da fratura será maior quando deformada segundo uma direção de 45° em relação ao seu sentido de laminação.

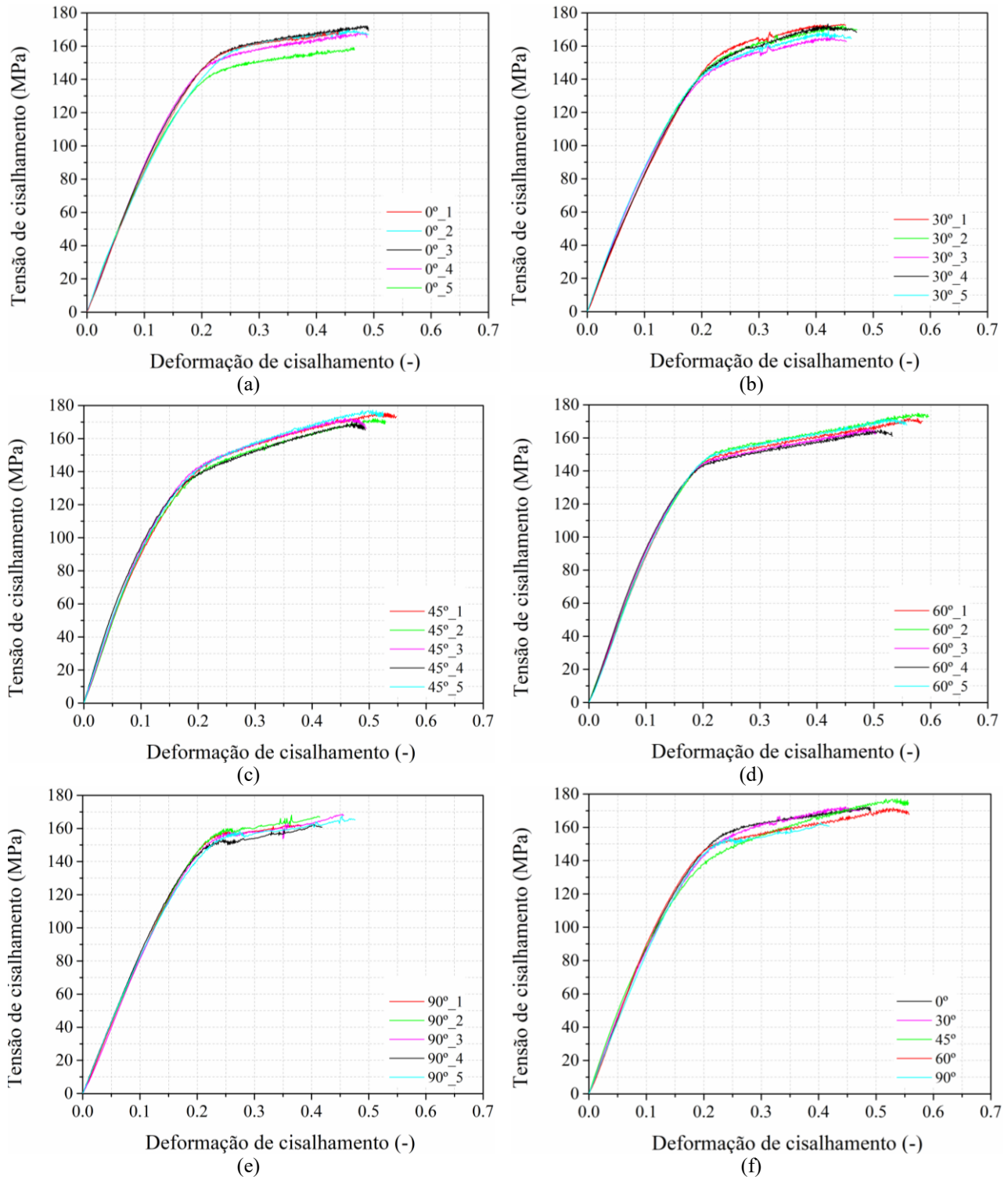


Figura 2. Curva tensão-deformação em cisalhamento simples para as amostras usinadas em (a) 0°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60° e (e) 90° em relação à direção de laminação da liga 5052-H32. Em (f) é apresentada a comparação entre as curvas.

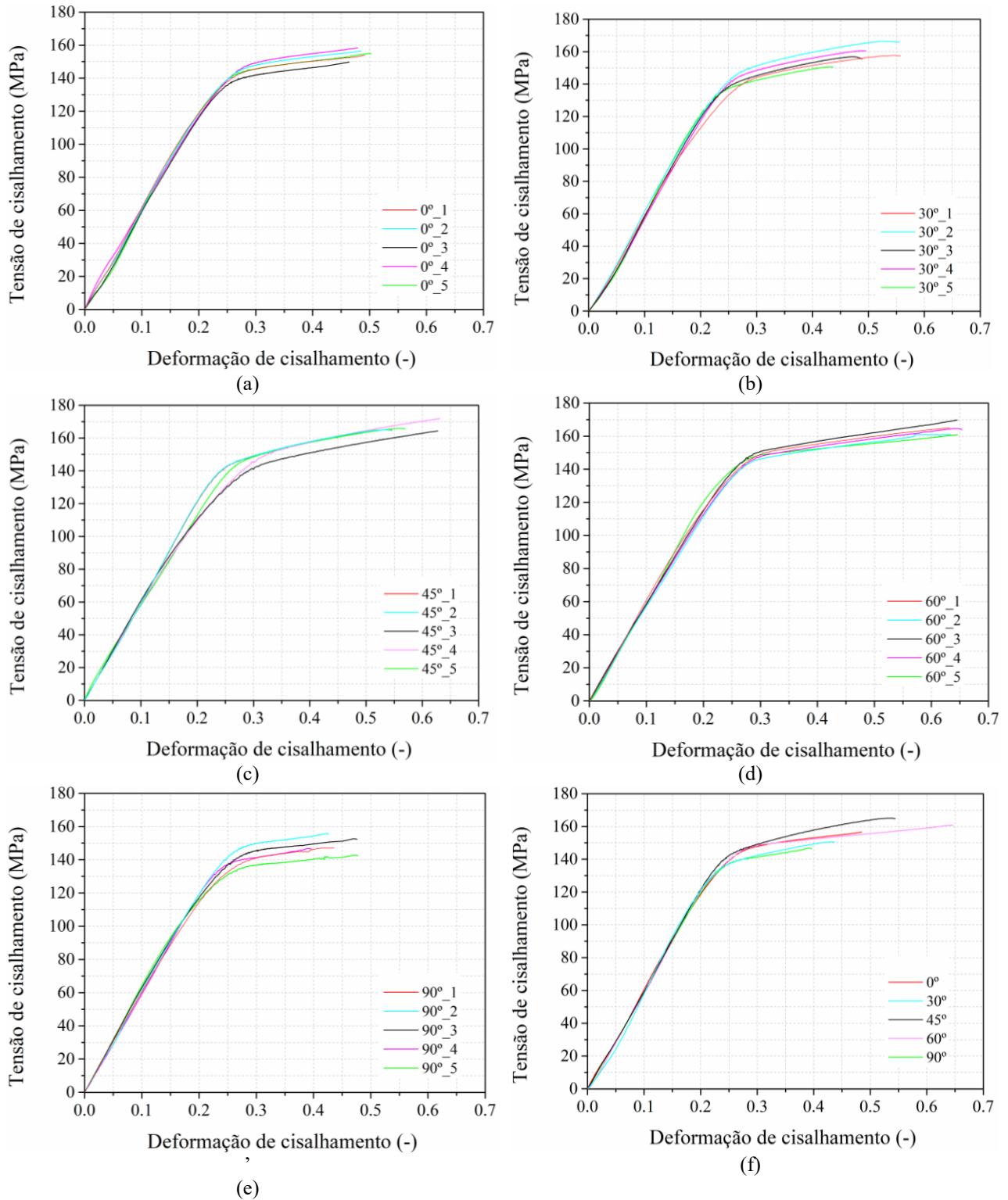


Figura 3. Curva tensão-deformação em cisalhamento simples para as amostras usinadas em (a) 0°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60° e (e) 90° em relação à direção de laminação da liga 3104-H34. Em (f) é apresentada a comparação entre as curvas.

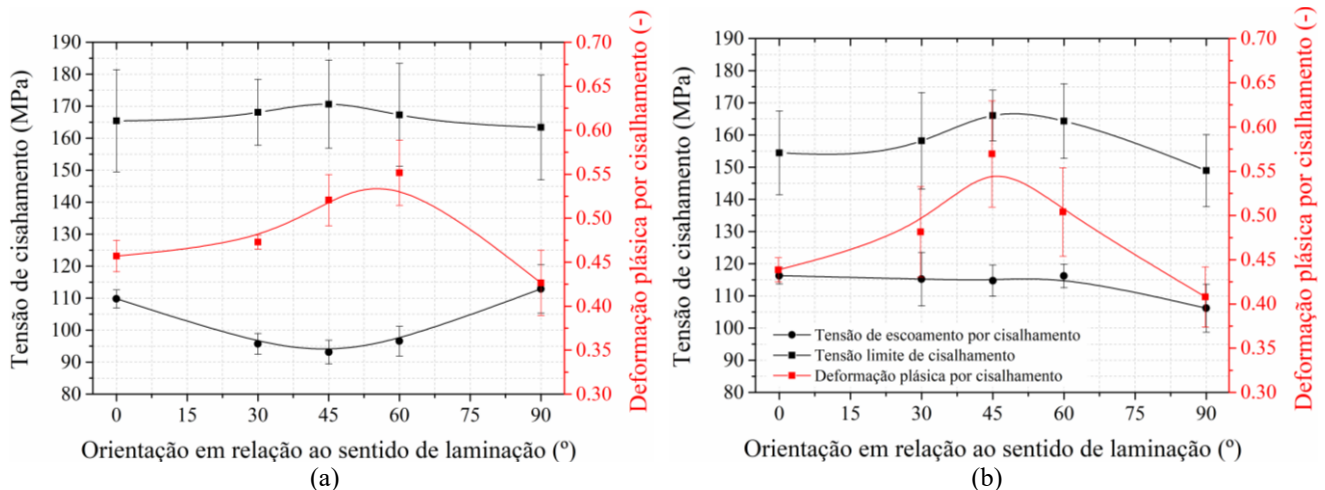


Figura 4. Valores da tensão de escoamento por cisalhamento (τ_e), da tensão limite de cisalhamento (τ_c), e da deformação plástica por cisalhamento (γ) para as ligas de alumínio (a) 5052-H32 e (b) 3104-H34.

4. CONCLUSÕES

Da análise e discussão dos resultados apresentados é possível elencar as seguintes conclusões:

- A liga 5052-H32 irá escoar sob uma menor tensão de escoamento quando carregada sob cisalhamento simples na direção de 45° em relação ao seu sentido de laminação;
- A liga 5052-H32 apresenta uma maior deformação antes da fratura quando deformada sob as direções de 45° e 60° em relação ao sentido de laminação.
- A ruptura por cisalhamento da liga 5052-H32 irá ocorrer sob valores similares de tensões limite de cisalhamento em todas as direções de carregamento.
- A liga 3104-H34 irá escoar e sofrer fratura, sob condições de carregamento por cisalhamento simples, ante um mesmo valor de tensão de escoamento e tensão limite de cisalhamento quando deformada em qualquer direção; e,
- A deformação sofrida pela liga 3104-H34 antes da fratura será maior quando deformada segundo uma direção de 45° em relação ao seu sentido de laminação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Bruning Tecnometal Ltda pelo incentivo à realização deste trabalho, e por dispor a infraestrutura e os materiais necessários para a preparação dos corpos de prova. Os autores estendem os agradecimentos ao Laboratório de Apoio ao Desenvolvimento e a Inovação de Produtos e Processos da UFSM, por disponibilizar o equipamento utilizado para realização dos ensaios de cisalhamento.

6. REFERÊNCIAS

- Almeida, I.L.S., da Silva, G.C., de Almeida, T.J., Pires, B.P., 2023. Numerical and experimental analysis of SAE 1010 thin steel sheets formability with and without galvanizing (GI-85). *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 45, p. 101. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03977-y>
- Anandavel, S.V. 2021. Analysis of manufacturing processes according to FMEA techniques and Implementation of IoT systems to prevent process failures. Master of Science in Automotive Engineering. Politecnico di Torino.
- Askeland, D.R., Wright, W.J. 2015. *Ciência e Engenharia dos Materiais*. 2ª ed. São Paulo: Cengage Learning.
- Benoit, M.J., Jin, H., Shalchi-Amirkhiz, B., Kurukuri, S., Winkler, S., Worswick, M.J., Wells, M.A., 2020. Microstructure evolution of warm deformed multilayered Al alloy sheet during brazing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 281, p. 116639. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116639>.
- Bianchi, K.E., Almeida, D.T., Limberger, R., Bertol, D., Souza, J.H.C. 2019. Avaliação do desempenho em fadiga das ligas de alumínio 5052H32 e 3104H34. 39th SENAFOR. Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- Callister, W.D., Rethwisch, D.G., 2012. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução (in Portuguese)*. 8th ed. Editora LTC, São Paulo.
- Chauhan V, Kärki T, Varis J. 2022. Review of natural fiber-reinforced engineering plastic composites, their applications in the transportation sector and processing techniques. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. Vol. 35(8), p.1169-1209. Doi:10.1177/0892705719889095
- Cottrell, A. 1953. LXXXVI: A note on the Portevin-Le Chatelier effect. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. Vol. 44, p. 829–832.

- Dieter, G.E., 1981. *Metallurgia Mecânica (in Portuguese)*. 2th ed. Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro.
- Huskins, E., Cao, B., Ramesh, K. 2010. Strengthening mechanisms in an Al–Mg alloy. *Materials Science Engineering A*, Vol. 527, p. 1292–1298.
- Konietzko, J., Bocken, N., Hultink, E.J., 2020. Circular ecosystem innovation: An initial set of principles, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 253, p. 119942. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119942>.
- Krishna, K., Sekhar, K.C., Tejas, R., Krishna, N.N., Sivaprasad, K., Narayanasamy, R., Venkateswarlu, K. 2015. Effect of cryorolling on the mechanical properties of AA5083 alloy and the Portevin–Le Chatelier phenomenon. *Materials Design*, Vol. 67, p. 107–117.
- Merklein, M., Biasutti, M., 2011. Forward and reverse simple shear test experiments for material modeling in forming simulations. In: Hirt, G., Tekkaya, A.E. (Eds.), *International Conference on Technology of Plasticity*, Aachen. pp. 702–707.
- Rauch, E.F., 1998. Plastic anisotropy of sheet metals determined by simple shear tests. *Materials Science and Engineering: A*. Vol. 241, p. 179–183.
- Souza, S.A. 1982. *Ensaio de Materiais Metálicos*. 5.ed. São Paulo: Editora Blucher.
- Tian, N., Yuan, F., Duan, C., Liu, K., Wang, G., Zhao, G., Zuo, L. 2019. Prediction of the Work-Hardening Exponent for 3104 Aluminum Sheets with Different Grain Sizes. *Materials*, vol. 12, p. 2368.
- Tu, Y.Y., Qian, H., Zhou, X.F., Jiang, J.Q. 2014. Effect of Scandium on the Interaction of Concurrent Precipitation and Recrystallization in Commercial AA3003 Aluminum Alloy. *Journal of Metallurgical and Materials Transactions. A* Vol. 45, p. 1883–1891.
- 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*. Vol. 51, p. 1066-1074.
- Yu, M., Liu, X., Liu, Z., Yang, S., 2022. Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of a novel power/refrigeration cascade system to recover low-grade waste heat at 90–150 °C. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 363, p. 132353. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132353>.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE SHEARING STRENGTH OF 3104-H34 AND 5052-H32 ALUMINUM ALLOYS

Willian De Almeida Lamarque

Inácio da Fontoura Limberger

Natália de Freitas Daudt

Tiago dos Santos

Cristiano José Scheuer

Materials Technology and Mechanics Group. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brazil.
janaina.liesenfeld@acad.ufsm.br, alexandre.buenos@ufsm.br, cristiano.scheuer@ufsm.br

Diego Tolotti de Almeida

Bruning Tecnometal Ltd., 98280-000, Panambi, RS, Brazil.
diegot@bruning.com.br

Shear tests are widely used to characterize the behavior under deformation of sheet metal subjected to forming operations. Performing this characterization fundamentally aims to achieve processing conditions that allow producing large deformations without plastic instability occurring. In present study, a comparative analysis of the behavior to simple shear of 5052-H32 and 3104-H34 aluminum alloys is carried out, evaluating the role of the anisotropy produced by the previous rolling processing of the plates. Such alloys, which have equivalent mechanical resistance but different chemical composition, are subjected to production operations by mechanical forming carried out under similar conditions. To enable the intended characterization, in this study the shear test configuration proposed by Miyauchi was adopted, based on the ASTM standard. Based on the results, it can be stated that 5052-H32 alloy will plastically deform under lower yield stress when loaded under simple shear in the direction of 45° regarding its rolling direction, showing greater deformation rather fracture when deformed under the 45° and 60° directions relation. Alloy 5052-H32 shear failure will occur under similar shear limit stress values in all loading directions. Alloy 3104-H34 will yield and fracture under simple shear loading conditions, in that order, given the same value of yield stress and shear limit stress when deformed in any angle regarding rolling direction. However, the deformation suffered before fracture will be greater when deformed in 45° direction.

Keywords: *Eco-efficiency, Recyclability, Aluminum Alloys, Shear Strength.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.