

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO NA LIGA AA 3003F APLICADA NO PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO

INFLUENCE OF ANNEALING HEAT TREATMENT ON AA 3003F ALLOY
APPLIED TO THE HYDROFORMING PROCESS

INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE RECOCIDO EN LA ALEACIÓN
AA 3003F APLICADA AL PROCESO DE HIDROCONFORMADO

Anderson Joel Velho¹, Juliano Cantarelli Toniolo², Lisiane Trevisan³, Daniela Lupinacci Villanova⁴

DOI: 10.54899/dcs.v22i83.3420

Recibido: 21/09/2025 | Aceptado: 22/09/2025 | Publicación en línea: 08/10/2025.

RESUMO

Este estudo avaliou a influência do tratamento térmico de recozimento nas propriedades mecânicas da liga de alumínio AA 3003F, previamente submetida ao processo de hidroconformação. A pesquisa justifica-se pela crescente demanda industrial por materiais leves, resistentes e com boa conformabilidade, especialmente nos setores automotivo e aeronáutico. O principal objetivo foi investigar como a interação entre os parâmetros de conformação e os ciclos térmicos pode otimizar o desempenho estrutural da liga. O experimento utilizou amostras hidroconformadas sob pressões de 5, 10, 15 e 18 kgf/cm², posteriormente recozidas em três temperaturas distintas (250 °C, 325 °C e 450 °C), com taxa de aquecimento de 3,3 °C/min e resfriamento controlado. Após o recozimento, as amostras foram novamente conformadas até a ruptura. Realizaram-se ensaios de tração, dureza, rugosidade superficial e análise metalográfica. Os resultados mostraram aumento de até 14% no limite de ruptura, especialmente sob pressões elevadas, e uma melhoria de aproximadamente 60% na altura de conformação após recozimento a 250 °C. A rugosidade média de 0,65 µm foi considerada adequada para aplicações industriais. A análise metalográfica identificou regiões de encruamento nas zonas de ruptura, sem alterações microestruturais significativas. Conclui-se que a sinergia entre hidroconformação e recozimento foi fundamental para aprimorar as propriedades mecânicas da liga AA 3003F, confirmando seu potencial em aplicações que exigem desempenho mecânico superior aliado à conformabilidade.

Palavras-chave: Alumínio. Hidroconformação. Metalografia. Recozimento.

¹ Mestrando em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul (IFRS), Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.

E-mail: andersonjoelvelho@gmail.com

² Doutor em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal do Estado do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: juliano.toniolo@caxias.ifrs.edu.br

³ Doutora em Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Estado do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: lisiane.trevisan@farroupilha.ifrs.edu.br

⁴ Doutora em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal do Estado do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: daniela.villanova@farroupilha.ifrs.edu.br

ABSTRACT

This study evaluated the influence of annealing heat treatment on the mechanical properties of AA 3003F aluminum alloy, previously subjected to the hydroforming process. The research is justified by the growing industrial demand for lightweight, high-strength materials with good formability, especially in the automotive and aerospace sectors. The main objective was to investigate how the interaction between forming parameters and thermal cycles can optimize the structural performance of the alloy. The experiment involved hydroformed samples under controlled pressures of 5, 10, 15, and 18 kgf/cm², which were subsequently annealed at three different temperatures (250 °C, 325 °C, and 450 °C), with a heating rate of 3.3 °C/min and controlled cooling. After annealing, the samples were once again hydroformed until fracture. Tensile, hardness, surface roughness, and metallographic analyses were performed. The results showed an increase of up to 14% in the ultimate tensile strength, especially under higher forming pressures, and an improvement of approximately 60% in forming height after annealing at 250 °C. The average surface roughness of 0.65 µm (Ra) was considered suitable for industrial applications. The metallographic analysis identified typical strain-hardened regions in the fracture zones, without significant microstructural changes due to the different heat treatment temperatures. It is concluded that the synergy between hydroforming and annealing is essential for enhancing the mechanical properties of the AA 3003F alloy, confirming its potential for applications requiring high mechanical performance combined with excellent formability.

Keywords: Aluminum. Hydroforming. Metallography. Annealing.

RESUMEN

Este estudio evaluó la influencia del tratamiento térmico de recocido en las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio AA 3003F, previamente sometida al proceso de hidroconformado. La investigación se justifica por la creciente demanda industrial de materiales ligeros, resistentes y con buena conformabilidad, especialmente en los sectores automotriz y aeroespacial. El objetivo principal fue analizar cómo la interacción entre los parámetros de conformado y los ciclos térmicos puede optimizar el rendimiento estructural de la aleación. El experimento se realizó con muestras hidroconformadas a presiones controladas de 5, 10, 15 y 18 kgf/cm², que luego fueron recocidas a tres temperaturas distintas (250 °C, 325 °C y 450 °C), con una tasa de calentamiento de 3,3 °C/min y enfriamiento controlado. Después del recocido, las muestras fueron nuevamente conformadas hasta la fractura. Se realizaron ensayos de tracción, dureza, rugosidad superficial y análisis metalográfico. Los resultados mostraron un aumento de hasta el 14% en el límite de resistencia a la tracción, especialmente bajo mayores presiones, y una mejora de aproximadamente el 60% en la altura de conformado tras el recocido a 250 °C. La rugosidad media de 0,65 µm (Ra) fue considerada adecuada para aplicaciones industriales. El análisis metalográfico identificó zonas típicas de endurecimiento por deformación, sin cambios microestructurales significativos. Se concluye que la sinergia entre hidroconformado y recocido es esencial para mejorar las propiedades mecánicas de la aleación AA 3003F, confirmando su potencial en aplicaciones que requieren alto rendimiento mecánico y excelente conformabilidad.

Palabras clave: Aluminio. Hidroconformado. Metalografía. Recocido.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por redução de peso no setor automotivo tem incentivado avanços significativos no aprimoramento da conformabilidade de ligas de alumínio, especialmente em processos de conformação e hidroconformação. Grandes deformações são frequentemente requeridas para a fabricação de geometrias complexas, mas são limitadas por defeitos como enrugamento e rachaduras. Nesse contexto, os tratamentos térmicos de recozimento desempenham um papel fundamental na melhoria das propriedades mecânicas e da conformabilidade. No estudo conduzido por Reddy (2020), foram investigados os impactos de tratamentos térmicos em dois materiais amplamente utilizados na indústria, o aço inoxidável SS 304 e a liga de alumínio AA 1100. Tubos desses materiais foram submetidos a diferentes temperaturas de recozimento (ambiente, 150 °C, 200 °C e 250 °C), seguidas de análises mecânicas detalhadas por meio de ensaios de tração. Os dados obtidos serviram como base para simulações numéricas que exploraram a deformação dos materiais, avaliando parâmetros como altura da conformação, pressão interna e limites de conformabilidade. Os resultados demonstraram que, para o SS-304, o aumento da temperatura até 150 °C reduziu a pressão interna necessária para a conformação, enquanto que para o AA 1100, essa redução foi observada até 250 °C. Essas melhorias evidenciam o papel do tratamento térmico na otimização da conformabilidade e na minimização de defeitos durante a hidroconformação.

Complementando esse panorama, o estudo de Fatemi (2013) destacou a influência de características materiais, como o expoente de endurecimento por deformação, o módulo de elasticidade e o índice de anisotropia, na seleção de ligas metálicas para hidroconformação. Tubos de cobre (ASTM C11000, 99,9% de pureza) e alumínio (ASTM AA 1050, 99,5% de pureza) foram submetidos a diferentes condições de tratamento térmico, resultando em microestruturas homogêneas e grãos refinados que aumentaram a resistência mecânica e a conformabilidade. O tratamento térmico ideal consistiu em aquecimento a 450 °C por 15 minutos, seguido de resfriamento em água para o cobre, e a 350 °C para o alumínio. Tais condições ocasionaram melhorias significativas, como aumento de 16% na altura de conformação em tubos de cobre e otimização das tensões de espessura em até 40%, com maior sensibilidade observada em tubos de espessura reduzida.

Zarini (2016) explorou ainda uma abordagem inovadora para o recozimento, utilizando fibra a *laser* para tratar chapas da liga de alumínio AA 6060. O estudo comparou a eficiência do recozimento a *laser* com o método convencional em forno, evidenciando equivalência nas propriedades mecânicas alcançadas. O processo a *laser* promoveu a recristalização em diferentes condições de sobreposição de trilhas, com maior refinamento de grãos em amostras laminadas a frio com 50% de redução de espessura. Estes ensaios mostraram uma diminuição no limite de escoamento e na resistência à tração, acompanhada por um aumento significativo no alongamento da fratura, reforçando o potencial do recozimento a *laser* para aplicações localizadas.

Iorioa (2014) propôs o recozimento térmico intermediário local como uma solução para reduzir o tempo e o custo de produção em processos de hidroconformação de tubos. Em uma aplicação prática, tubos de alumínio AA 6060 foram tratados termicamente em determinados locais antes da hidroconformação, demonstrando que o recozimento localizado pode melhorar a conformabilidade de áreas específicas do material.

Esses estudos destacam o papel central de tratamentos térmicos otimizados e tecnologias avançadas de recozimento no desenvolvimento de processos industriais mais eficientes e sustentáveis. A integração dessas estratégias pode trazer avanços significativos na produção de componentes automotivos e industriais, atendendo às exigências de conformabilidade, precisão e eficiência energética. Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar os efeitos que o tratamento térmico de recozimento proporciona à hidroconformação da liga de alumínio AA 3003F. Dessa forma, esta proposta reforça a importância deste tratamento como um recurso estratégico para aprimorar a hidroconformação e ampliar a competitividade industrial, unindo desempenho mecânico e inovação tecnológica.

REFERENCIAL TEÓRICO

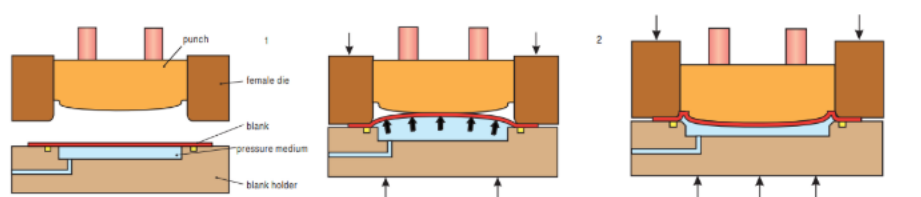
A hidroconformação, também conhecida como conformação por pressão de fluidos, é uma técnica que tem suas origens no início do século XX e foi inicialmente aplicada em áreas como caldeiras a vapor, instrumentos musicais e membros artificiais. Durante o período de 1950 a 1985, o processo evoluiu para a fabricação de conexões em "T" de cobre e juntas ramificadas em estruturas de bicicletas, com ênfase na expansão da tecnologia para a indústria automotiva. Nos anos 1980 e 1990, a hidroformação tubular experimentou avanços substanciais, principalmente através de esforços de empresas como Vari-Form e General Motors, na América do Norte, e em

paralelo por fabricantes e universidades na Alemanha. Este período de intensa competição impulsionou o desenvolvimento de novos métodos e equipamentos, voltados para a crescente demanda por estruturas automotivas leves e de baixo custo. A primeira aplicação em larga escala da hidroformação no setor automotivo ocorreu em 1990, com a introdução do painel de instrumentos da minivan Chrysler, seguido pela aplicação nos berços de motor dos modelos Ford Contour e Mystique em 1994. Desde então, a hidroformação tem se expandido rapidamente, sendo amplamente adotada na fabricação de componentes como chassis, sistemas de escape, e em veículos icônicos como o Chevrolet Corvette e caminhões GMC Sierra e Chevrolet Silverado, com o aumento da popularidade dos SUVs também desempenhando um papel fundamental nesse crescimento (Sing, 2003).

A aplicação da hidroformação, como ilustra a Figura 1, é eficaz quando materiais com elevado índice de alongamento final são empregados, especialmente quando considerados os componentes hidroconformados. O alongamento final, particularmente na direção transversal ao eixo longitudinal do tubo e chapas, é um fator crítico para garantir a conformabilidade e a integridade estrutural dos componentes. Além disso, a presença de um elevado grau de encruamento contribui positivamente para aumentar a resistência e a estabilidade do material. No entanto, as tensões internas geradas durante os processos de fabricação e pré-conformação, resultantes do efeito de encruamento, podem comprometer a moldabilidade do material. Nesses casos, o recozimento é frequentemente necessário para restaurar as propriedades do material, uma vez que a superação do limite de conformabilidade exige que a conformação seja realizada em etapas progressivas, intercaladas com recozimentos intermediários. É importante observar que o tratamento térmico deve ser considerado uma medida de último recurso, após a análise exaustiva de alternativas como modificações no *design* ou na composição do material, com o intuito de balancear desempenho técnico e viabilidade econômica (Schuler, 1998).

Figura 1

Processo de Hidroconformação.



Fonte: Schuler, 1998.

O recozimento, conforme descrito por Barbosa (2014), é aplicado antes de operações de conformação mecânica a frio para eliminar o encruamento causado por processos anteriores. Ele é utilizado em todos os tipos de ligas de alumínio, endurecíveis ou não, exigindo maior controle de temperatura no primeiro caso para evitar precipitação indesejada. O tratamento varia conforme a história termomecânica da liga e sua microestrutura. Segundo o mesmo autor, para chapas em têmpera de fabricação F, o encruamento pode ser removido por aquecimento em torno de 345 °C, mantendo a temperatura até a homogeneização térmica, preferencialmente com aquecimento rápido para obtenção de grãos finos. Já para ligas e têmperas como W, T3, T4, T6 e T8, é necessário aquecimento entre 355 °C e 410 °C, seguido de resfriamento controlado (25 °C a 40 °C), evitando precipitados grosseiros que dificultam a conformação. Nas ligas da série 7XXX, a precipitação é mais lenta que nas da série 2XXX, exigindo ainda tratamento adicional a 230 °C por 2 a 6 horas para garantir estabilidade. Apesar disso, ligas envelhecidas apresentam menor conformabilidade do que as não envelhecidas. O recozimento em ligas fundidas só é aplicado em casos de necessidade de controle dimensional rigoroso ou quando submetidas a operações especiais de conformação.

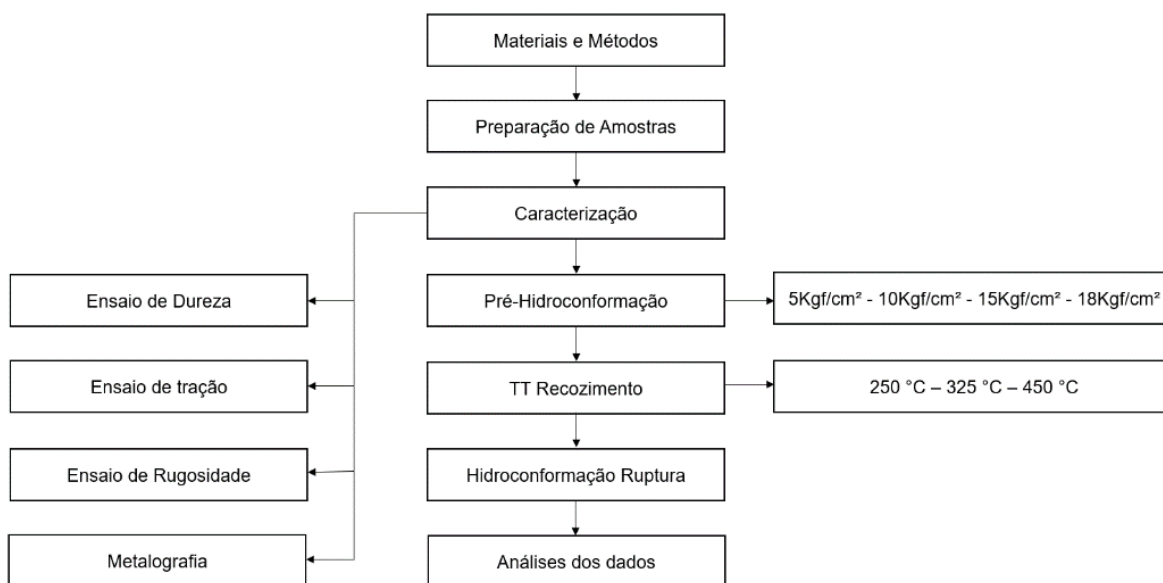
Especificamente, o recozimento para alívio de tensões é uma técnica utilizada para eliminar as tensões residuais internas formadas durante processos como deformação a frio e soldagem. Essas tensões residuais podem comprometer significativamente as propriedades mecânicas do material, como a ductilidade e a resistência. O processo de alívio de tensões envolve aquecer o material a uma temperatura controlada, abaixo do ponto de recristalização, de modo a permitir que os átomos se movam e as tensões sejam dissipadas, sem alterar a microestrutura do material de forma significativa. Após a manutenção térmica, o resfriamento controlado é realizado, o que contribui para melhorar a conformabilidade, reduzir falhas e aumentar a estabilidade dimensional de peças que serão submetidas a cargas cíclicas ou processos subsequentes. Esse tratamento térmico é essencial para garantir a qualidade e a integridade dimensional das peças, bem como para melhorar o desempenho dos componentes em aplicações industriais (Schuler, 1998).

METODOLOGIA

O fluxograma da Figura 2 descreve o passo a passo adotado no desenvolvimento deste trabalho. Em seguida, cada etapa será detalhada, destacando as abordagens e técnicas empregadas, fundamentadas em normas e referências da literatura técnica.

Figura 2

Fluxograma das etapas de desenvolvimento.



O material utilizado neste estudo foi a liga de alumínio AA 3003F, em formato de *blank*, com um diâmetro de 150 mm e uma espessura de 0,4 mm, conforme ilustra a Figura 3. Para avaliar o comportamento mecânico e estrutural desta liga submetida ao processo de conformação hidráulica, foi definido um lote experimental composto por 20 amostras, distribuídas em quatro faixas de pressão, com cinco peças para cada condição. Foram realizados dois ciclos de hidroconformação: o primeiro, preliminar, conforme ilustrado na Figura 4, utilizando pressões de trabalho de 5, 10, 15 e 18 kgf/cm²; e o segundo, aplicado após o tratamento térmico de recozimento, conduzido até a ruptura das amostras. A escolha das faixas de pressão na etapa inicial teve como objetivo investigar a influência da variação do carregamento hidráulico sobre a conformabilidade da liga, bem como os efeitos resultantes na microestrutura e nas propriedades mecânicas do material.

Após os ensaios de hidroconformação das amostras, foi possível medir a altura máxima de deformação das calotas até a ruptura; para isso, contou-se com o auxílio de um micrômetro analógico de profundidade, como mostra a Figura 5.

Figura 3

Detalhamento de fabricação de amostras para a hidroconformação.

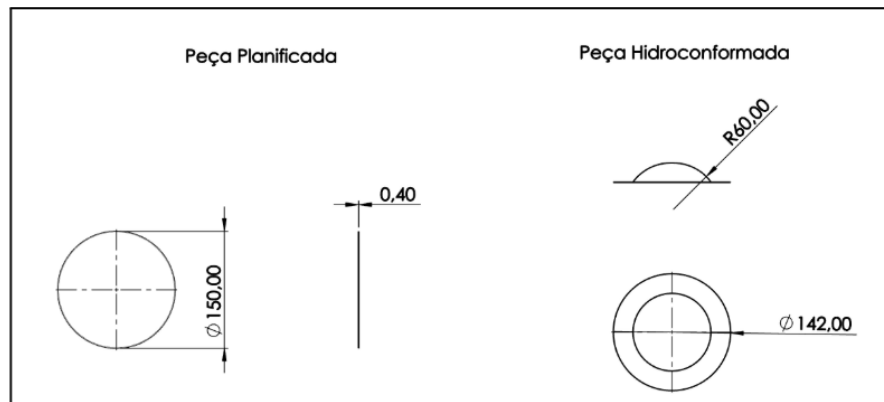


Figura 4

Processo de hidroconformação.

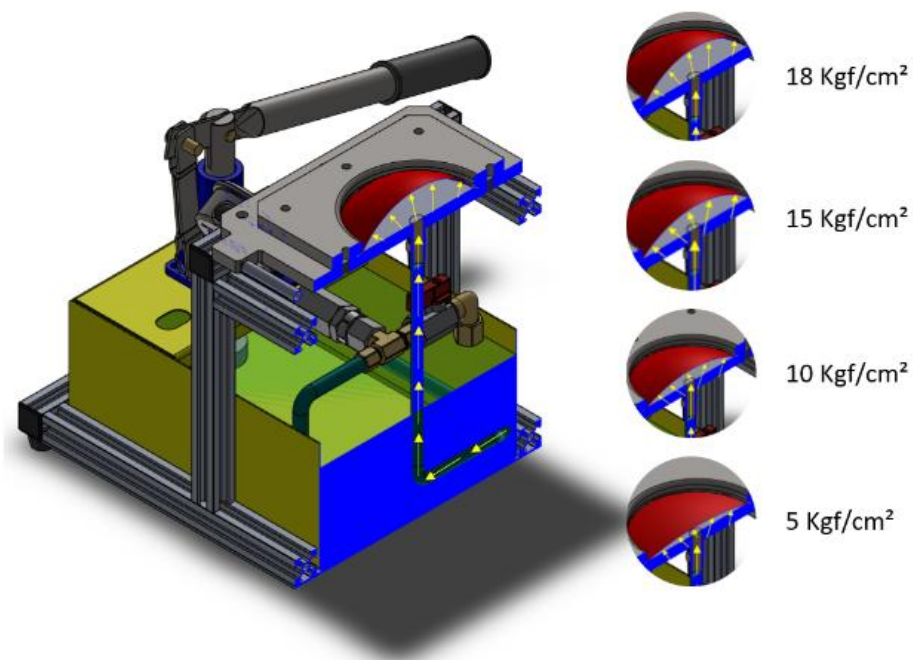
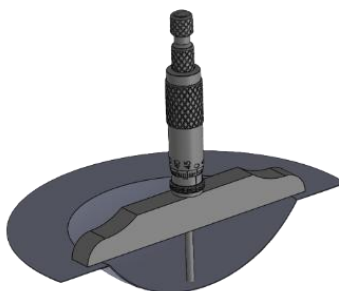


Figura 5

Método de medida da altura da deformação da calota hidroconformada.



O tratamento térmico de recozimento foi realizado em um forno industrial da marca Schaly Fornos e Estufas, modelo TC 65, com controle de aquecimento a uma taxa constante de 3,3 °C/min até atingir a temperatura de encharque. Os tratamentos foram conduzidos em três diferentes temperaturas: 250 °C, 325 °C e 450 °C, seguidos de resfriamento dentro do próprio forno até a temperatura ambiente. O objetivo do tratamento térmico foi promover o alívio de tensões internas e a recristalização parcial ou total da microestrutura, resultando na modificação das propriedades mecânicas da liga e permitindo uma análise mais abrangente dos efeitos combinados entre a deformação e o tratamento térmico na liga AA 3003F.

A escolha das temperaturas de recozimento baseou-se em estudos anteriores que demonstraram melhorias na conformabilidade e resistência mecânica de ligas metálicas. Reddy (2020) evidenciou que temperaturas até 250 °C aumentam a conformabilidade e reduzem a pressão necessária na hidroconformação de alumínio AA 1100 e aço inoxidável SS 304. Fatemi (2013) destacou que o aquecimento a 450 °C otimiza a microestrutura e propriedades mecânicas de tubos de cobre e alumínio, resultando em maior conformabilidade e redução das tensões de espessura, especialmente em tubos mais finos.

Para a análise do trabalho foram realizados ensaios de ensaio de tração, rugosidade superficial, microdureza Vickers e metalografia. O ensaio de tração, realizado na liga de alumínio como fabricada, teve como objetivo determinar as propriedades mecânicas do material, incluindo o limite de resistência à tração, o limite de escoamento e a ductilidade. Para assegurar a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados, os testes foram realizados conforme a norma ABNT NBR ISO 6892-1, Anexo B, que estabelece diretrizes específicas para corpos de prova obtidos a partir de materiais de baixa espessura. O corpo de prova utilizado foi do tipo 1, com as dimensões especificadas na citada norma técnica.

A rugosidade foi verificada em todo o lote de 20 amostras, por meio de um rugosímetro de contato SJ-301 Mitutoyo. O intuito de sua realização foi verificar a uniformidade da topografia da superfície dos *blanks* de alumínio, sendo verificada apenas na liga de alumínio como fabricada.

A dureza da liga foi avaliada para investigar a influência das diferentes condições de processamento termomecânico sobre a resistência do material à deformação plástica localizada. O ensaio foi conduzido no equipamento MV2000A PANTEC, considerando cinco condições experimentais distintas: liga de alumínio como fabricada, após hidroconformação até a ruptura, e após hidroconformação seguida de recozimento a 250 °C, 325 °C e 450 °C. As medições de dureza foram feitas nas proximidades da zona de ruptura dos corpos de prova, uma região crítica que concentra os efeitos da deformação plástica máxima.

O ensaio de metalografia foi realizado conforme a norma NBR 13284:1995, que estabelece os procedimentos para a preparação de corpos de prova destinados a análises metalográficas. As amostras foram retiradas da zona de ruptura, sendo avaliada a seção transversal nas condições após hidroconformação até a ruptura, e nas amostras recozidas e hidroconformadas até a ruptura, nas temperaturas anteriormente indicadas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do ensaio de rugosidade estão apresentados na Figura 6. A rugosidade média (R_a) obtida foi de 0,65 μm , indicando baixa visibilidade de riscos decorrentes do processo de fabricação ou das ferramentas utilizadas, o que reflete um bom padrão de acabamento superficial. O resultado também mostrou uma baixa variação de rugosidade entre as amostras analisadas e sugere que o estado superficial não é o principal parâmetro responsável pelas propriedades mecânicas obtidas. O desvio padrão das 20 amostras analisadas foi de 0,05 μm .

A Figura 7 apresenta os resultados do ensaio de tração, que mostraram variações significativas entre as amostras. Tais discrepâncias podem estar relacionadas à ausência de controle da orientação anisotrópica durante a preparação.

Figura 6

Ensaio de Rugosidade.

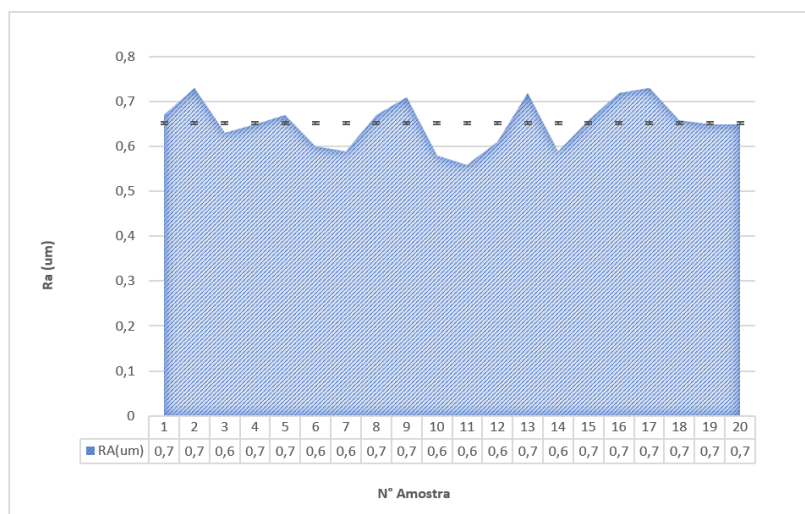
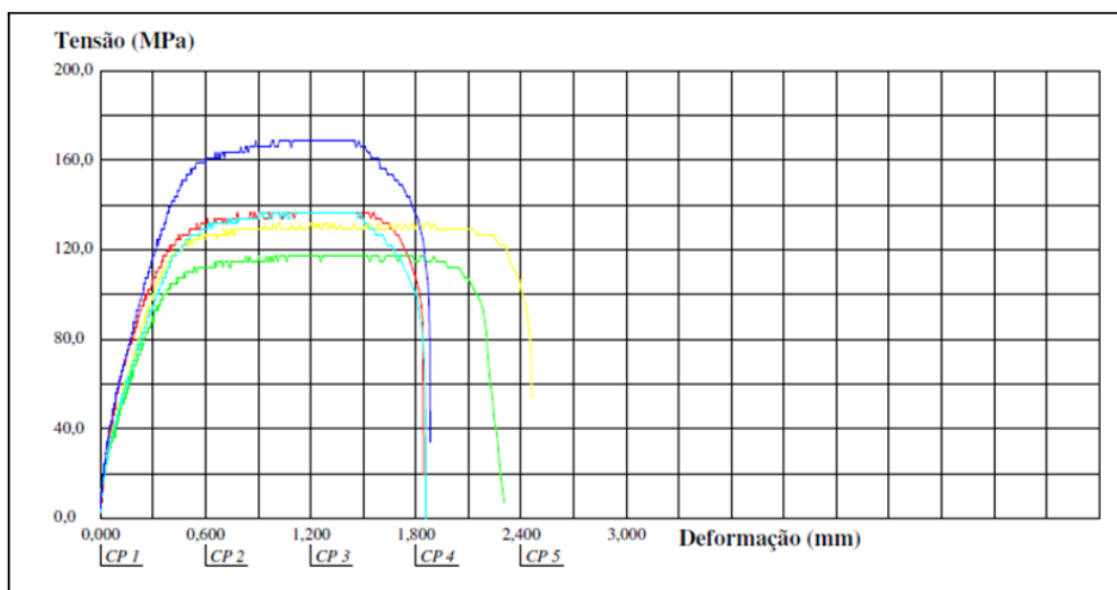


Figura 7

Ensaio de Tração na liga de alumínio AA 3003F.

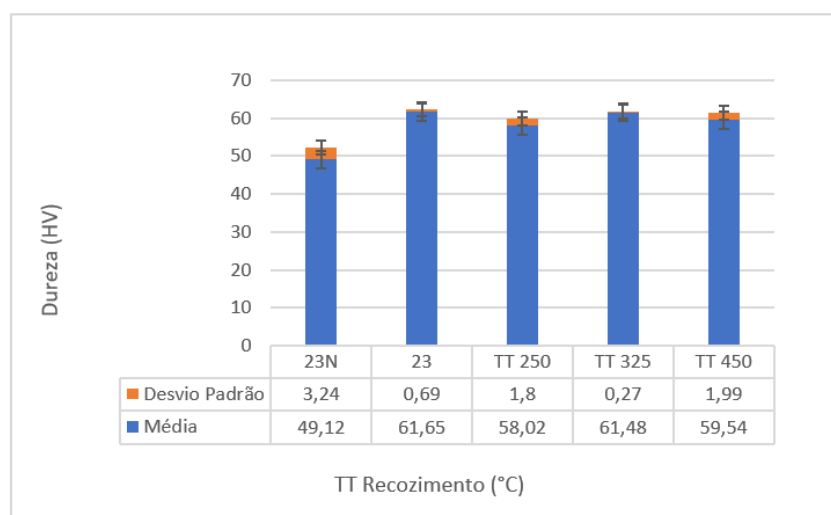


De acordo com os dados apresentados na Figura 8, o ensaio de dureza indicou que a hidroconformação resultou no aumento da dureza do material. Esse comportamento está relacionado ao encruamento, que eleva a densidade de discordâncias na rede cristalina, dificultando a mobilidade dos planos de deslizamento e, consequentemente, aumentando a resistência ao escoamento, efeito também observado por Bdulrehman (2020). Ainda de acordo

com o autor, essa elevação nas discordâncias é um fator determinante para o endurecimento do material. Em contrapartida, as amostras recozidas apresentaram tendência à redução da dureza, comportamento atribuído aos processos de recuperação e recristalização, que aliviam as tensões internas e restauram parcialmente a microestrutura original.

Figura 8

Ensaio de Dureza.



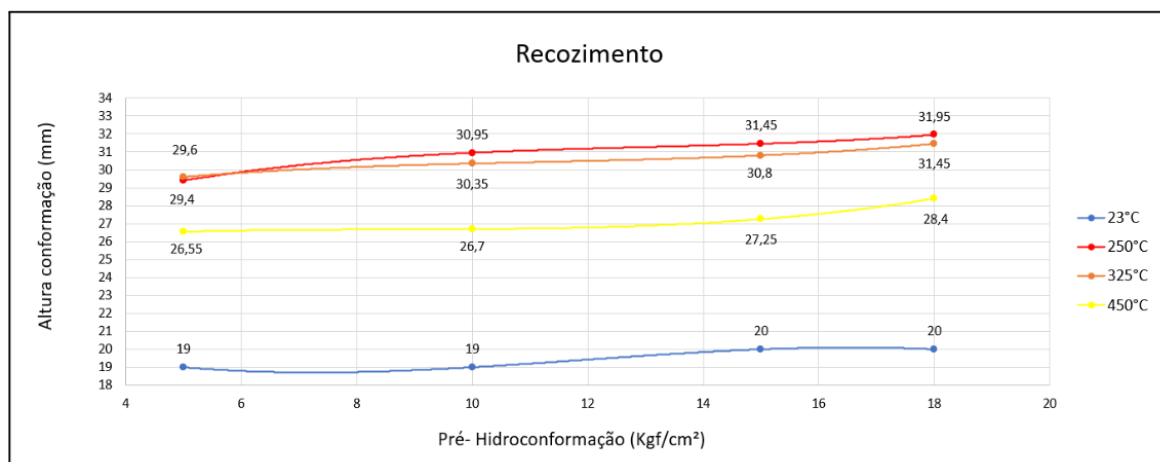
Embora as diferenças entre as condições encruada e recozida não tenham sido estatisticamente significativas como mostra a Figura 8, os resultados obtidos estão de acordo com o comportamento típico das ligas da série 3xxx quando submetidas à deformação a frio seguida de tratamentos térmicos de alívio (Bdulrehman, 2020).

O parâmetro de altura de deformação na hidroconformação foi adotado como indicador direto da ductilidade do alumínio AA 3003F e de sua capacidade de deformar plasticamente antes da fratura. A Figura 9 ilustra essa correlação, destacando a influência das condições de recozimento e da pressão na capacidade de deformação. No estado sem recozimento, o material apresentou ruptura com deformação limitada a 20 mm. Em contraste, após pré-hidroconformação a 18 kgf/cm² seguida de recozimento a 250 °C, a altura máxima de deformação atingiu 31,95 mm, representando um aumento de aproximadamente 60%. Esse ganho de conformabilidade é atribuído aos efeitos do tratamento térmico, como recuperação e possível recristalização parcial, que aliviam tensões internas, reduzem a densidade de discordâncias e restauram a estrutura cristalina, resultando em maior maleabilidade conforme observado por Li, 2022.

Segundo o autor, o material recozido apresenta menor resistência ao escoamento inicial e maior capacidade de adaptação à conformação sem falhas prematuras. A variação na altura de deformação ressalta a importância do histórico termomecânico no desempenho do material, especialmente em processos em que a profundidade de conformação é crítica, como na hidroconformação (Li, 2022).

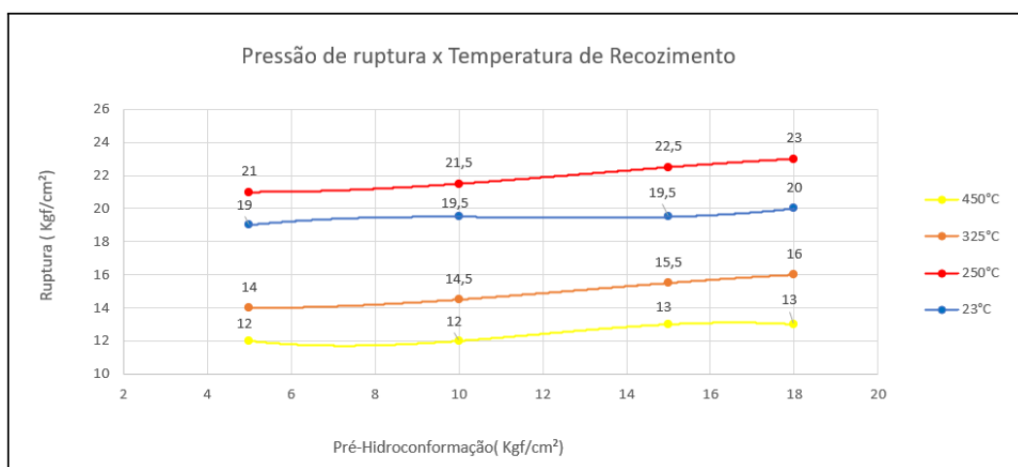
Figura 9

Altura de hidroconformação para o alumínio com e sem recozimento.



A análise do limite de ruptura das ligas AA 3003F submetidas a diferentes tratamentos térmicos, conforme ilustrado na Figura 10, que apresenta o gráfico de pressão de ruptura em função das temperaturas de recozimento, revelou variações significativas. A amostra recozida a 250 °C apresentou um incremento de aproximadamente 3 kgf/cm² na resistência à ruptura em comparação ao estado sem tratamento térmico, cujo limite foi próximo de 20 kgf/cm². Esse aumento é provavelmente decorrente do alívio de tensões internas e da reorganização de discordâncias promovidos pela temperatura moderada, sem que ocorra a completa recristalização.

Por outro lado, as amostras recozidas a 325 °C e 450 °C exibiram reduções acentuadas no limite de ruptura, comportamento possivelmente atribuído à recristalização completa e ao possível crescimento de grão. Dessa forma, o recozimento a 250 °C se destaca como a condição mais favorável para equilibrar resistência mecânica e conformabilidade. O controle adequado desse histórico termomecânico é fundamental em processos como a hidroconformação, que demandam boa maleabilidade sem comprometer a integridade estrutural (Titenko, 2016).

Figura 10*Pressão de ruptura versus Recozimento*

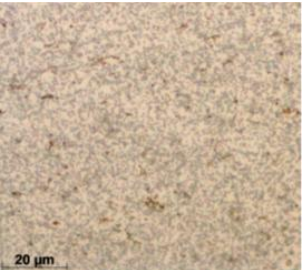
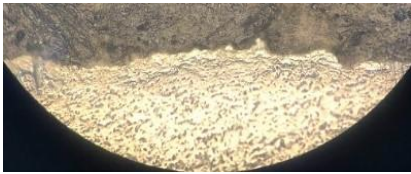
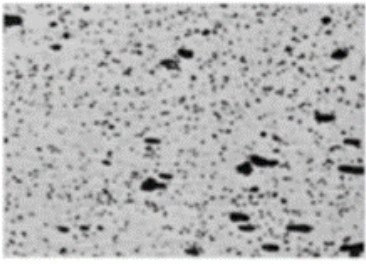
De acordo com Barbosa (2014), as ligas da série 3XXX, do sistema Al-Mn, não são tratáveis termicamente por precipitação, obtendo resistência mecânica principalmente por encruamento. Microestruturalmente, apresentam matriz de alumínio com manganês parcialmente dissolvido e fases intermetálicas formadas na solidificação. O manganês também precipita na forma de dispersoides, e estes podem dificultar a recristalização durante o recozimento. A liga AA 3003F é um exemplo típico de endurecimento por dispersão.

Na Tabela 1 estão organizadas as micrografias da liga de alumínio AA 3003F como fabricado e do metal hidroconformado, com destaque para a região de ruptura. Comparativamente, é apresentada a micrografia da liga AA 3003O (LACOMBE, P.; MOUFLARD, M., 1953). A condição com fabricado permite observar diretamente a microestrutura industrial, incluindo a morfologia das fases intermetálicas, a distribuição dos dispersoides e o grau de deformação residual. Comparando-se a liga estudada com a liga dos autores citados, pode-se observar uma microestrutura bastante semelhante entre os dois aluminios, embora a primeira mostre uma distribuição mais homogênea da segunda fase, se comparada à liga AA 3003O. Segundo os autores, a micrografia da liga AA 3003O evidencia alta estabilidade térmica das partículas intermediárias, que mantém sua morfologia e composição mesmo após o recozimento, agindo como barreiras à movimentação de discordâncias. Quanto ao material hidroconformado, percebe-se, próximo à interface com a baquelite, uma região bastante deformada, uma vez que se trata da vizinhança da ruptura do metal. Isso confirma o encruamento

intenso e o consequente aumento da resistência mecânica, típico de ligas não tratáveis por precipitação.

Tabela 1

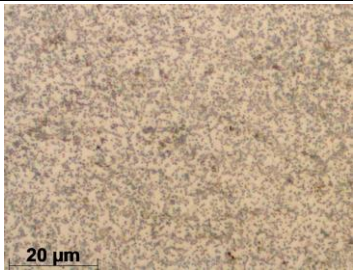
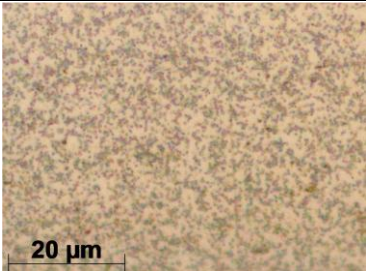
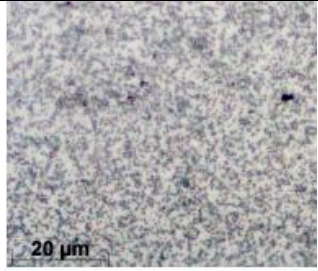
Metalografias da liga AA 3003F - para comparação, a micrografia de uma liga AA 3003O.

		
Alumínio AA 3003F como fabricado (500x)	Alumínio AA 3003F hidroconformado	Alumínio AA 3003O (750x)

Na Tabela 2 estão apresentadas as micrografias da liga estudada recozidas e hidroconformadas até à ruptura. Esta análise não evidenciou qualquer variação significativa entre as temperaturas de recozimento e também entre o material na condição de como fabricado. Provavelmente, variações decorrentes das diferentes temperaturas de recozimento não sejam perceptíveis pois as amostras foram novamente conformadas até a ruptura, e as amostras se mostraram muito similares.

Tabela 2

Metalografias da liga AA 3003F recozidas nas temperaturas de 250 °C, 325 °C e 450 °C, seguidas de hidroconformação até a ruptura.

		
Alumínio AA 3003F recozido a 250 °C (500x)	Alumínio AA 3003F recozido a 325 °C (500x)	Alumínio AA 3003F recozido a 450 °C (500x)

CONCLUSÃO

Este estudo evidenciou a relevância do tratamento térmico de recozimento na melhoria da hidroconformação da liga de alumínio AA 3003F. Verificou-se que, embora a hidroconformação aumente a dureza e a resistência mecânica por efeito de encruamento, essa elevação compromete a ductilidade, limitando a conformabilidade do material. O recozimento, especialmente na temperatura de 250 °C, mostrou-se eficaz na restauração da capacidade de deformação, resultando em um aumento de aproximadamente 60% na altura de conformação e em melhorias no limite de ruptura.

Conclui-se que a combinação adequada entre os parâmetros de conformação e os ciclos térmicos de recozimento pode otimizar significativamente o desempenho mecânico e estrutural da liga, representando uma alternativa viável e sustentável para aplicações industriais que demandam estruturas leves e de alta eficiência, como no setor automotivo.

Para trabalhos futuros, recomenda-se expandir a investigação para outras ligas metálicas, como aço inoxidável, aço carbono e latão, bem como a análise de diferentes condições de recozimento no processo de hidroconformação. No campo da caracterização microestrutural, a avaliação do tamanho de grão pode oferecer informações valiosas, enquanto, nos ensaios mecânicos, ensaio de tração e a análise da anisotropia das amostras que se mostra relevante para compreender o comportamento direcional do material conformado.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão aos laboratórios LABEM do IFRS – Campus Caxias do Sul e Farroupilha, bem como ao LAMEC da UCS – Campus Caxias do Sul, pelo suporte técnico e pela infraestrutura disponibilizada durante a realização deste trabalho. Agradeço, também, aos Doutores Juliano Cantarelli Toniolo e Lisiane Trevisan pela valiosa contribuição, fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa. Em especial, manifesto meu profundo agradecimento à orientadora principal, Doutora Daniela Lupinacci Villanova, pelo apoio contínuo, orientação criteriosa e incentivo constante ao longo de todo o processo.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR ISO 6892-1: *Materiais metálicos — ensaio de tração á temperatura ambiente*. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

- BARBOSA, C. *Metais não ferrosos e suas ligas: Microestrutura, propriedades e aplicações*. 1. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2014
- BDULREHMAN, M. A. et al. *Investigation of mechanical and numerical properties of friction stir welding (fs) for 3003-h14 aluminum alloys*. Defect and Diffusion Forum, v. 398, p. 106–116, 2020.
- CHEN, Y.; LIU, W.; YUAN, S. *Strength and formability improvement of al-cu-mn aluminum alloy complex parts by thermomechanical treatment with sheet hydroforming*. The Minerals, Metals & Materials Society, 30 January, 2015.
- ENGLER, O.; HIRSCH, J. *Texture control by thermomechanical processing of aluminum sheet alloys*. Mater. Sci. Eng. A, 336, 249-262 (2002)
- FATEMI, A.; MOROVVATI, M.; BIGLARI, F. *The effect of tube material, microstructure, and heat treatment on process responses of tube hydroforming without axial force*. Springer-Verlag London, 02 January, 2013.
- HIRSCH, J.; AL-SAMMAN, T. *Superior light metals by texture engineering*. Acta Mater. 61, 818-843 (2013).
- HUANG, T. L. ET AL. *Recrystallization-induced goss texture after annealing at 200 °c in al–0.3 %cu*. J. Alloys Compd. 768, 71-80 (2018).
- IORIO, L.; MASPERO, E.; STRANO, M. *Hydroforming of locally heat treated tubes*. Journal of Manufacturing Processes. 02 January, 2014.
- KUMAR, R. ET AL. *Microstructure and texture development in aa3003 aluminium alloy*. Materials Today Communications 24, 100965 (2020).
- LACOMBE, P.; MOUFLARD, M. *Les applications de la micrographie en couleurs par formation des pellicules minces epitaxiales à teintes d'interférence à l'étude de l'aluminium, du fer et du cuivre*. Saint Germain en Laye: Éditions Métaux, 1953. Extraído de: MÉTAUX (CORROSION INDUSTRIELLE), v. 28, n. 340, p. 471-488, dez. 1953.
- LEE, JIN HYUK; KIM, IN SOO. *Formability changes of asymmetrically rolled aa 3003 al alloy sheets*. Materials Science Forum, v. 702-703, p. 287-290, dez. 2011. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.702-703.287.
- LI, X.; WANG, Y.; ZHANG, H.; CHEN, L. *Evaluation of mechanical characteristics of 3003 aluminum alloy plated sheets*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, [S.l.], v. 1262, p. 012022, 2022.
- LINDELL, D. *Revisiting plastic strain ratio determination in aluminium using crystal plasticity*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1249 (2022) 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/1249/1/012025.

- MA, Y.; XU, Y.; ZHANG, S.; CHEN. *The effect of tube bending, heat treatment and loading paths on process responses of hydroforming for automobile intercooler pipe: Numerical and experimental investigations*. Springer-Verlag London, 04 january ,2017.
- REDDY, P.; REDDY, B.; RAMULU, P. *Effect of heat treatment temperatures on formability of ss 304 during tube hydroforming process*. Springer Nature Switzerland, 13 January 2020.
- SCHULER. *Metal forming handbook*. Springer. New York, 1998.
- SINGH, H. et al. *Fundamentals of hydroforming*. Society of Manufacturing Engineers, 2003.
- THANAKIJKASEM, P.; UTHAISANGSUK, V.; PATTARANGKUN, A.; MAHABUNPHACHAI, S. *Effect of bright annealing on stainless steel 304 formability in tube hydroforming*. Springer-Verlag London, 20 may 2014.
- TITENKO, A., DEMCHENKO, L. *Effect of annealing in magnetic field on ferromagnetic nanoparticle formation in cu-al-mn alloy with induced martensite transformation*. Nanoscale Res Lett 11, 237 (2016).
- VELHO, J. ANDERSON. *Análise do comportamento mecânico em materiais hidroconformados submetidos a fluido aquecido*. Repositório Cruzeiro do Sul, 13 jul. 2021.
- ZARINI, S.; MOSTAED, E.; VEDANI, E.; PREVITALI, B. *Formability enhancement of al 6060 sheets through fiber laser heat treatment*. Springer-Verlag France, 10 nov. 2016.