

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

ANDERSON JOEL VELHO

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO
NA LIGA AA 3003F APLICADO AO PROCESSO DE
HIDROCONFORMAÇÃO**

ANDERSON JOEL VELHO

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO
NA LIGA AA 3003F APLICADO AO PROCESSO DE
HIDROCONFORMAÇÃO**

Trabalho Final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Orientador: Daniela Lupinacci Villanova

Velho, Anderson Joel
INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO NA
LIGA AA 3003F APLICADO AO PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO
/ Anderson Joel Velho. -- 2026.
63 f.
Orientadora: Daniela Lupinacci Villanova.

Dissertação (Mestrado) -- Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul,
Campus Farroupilha, Mestrado Profissional em Tecnologia
e Engenharia de Materiais - PPGTEM, Farroupilha, BR-RS,
2026.

1. Hidroconformação. 2. Tratamento Térmico. 3.
Recozimento. 4. Alumínio. I. Villanova, Daniela
Lupinacci. II. Título.

ANDERSON JOEL VELHO

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO
NA LIGA AA 3003F APLICADO AO PROCESSO DE
HIDROCONFORMAÇÃO**

Trabalho Final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

▪

Profa. Dra. Luciane Calabria - Externo

▪

Prof. Dr. Juliano Cantarelli Toniolo – IFRS

▪

Profa. Dra. Lisiane Trevisan - IFRS

▪

Orientador: Profa. Dra. Daniela Lupinacci Villanova - IFRS

Apresentado e aprovado em: 10 de dezembro de 2025.

Local da defesa: Plataforma Google Meet

RESUMO

O estudo apresenta uma análise do comportamento e a otimização da liga de alumínio AA 3003F em processos industriais, com foco na hidroconformação e nos efeitos do tratamento térmico de recozimento. O processo de hidroconformação destaca-se pela redução de peso e aumento da resistência mecânica das peças produzidas, além da economia de material e sustentabilidade do processo. Inicialmente, foi elaborado um diagrama gráfico, no qual buscou-se relacionar a pressão aplicada à força de trabalho durante a conformação, a fim de prever o comportamento do material e otimizar projetos. Esse diagrama de hidroconformação é uma ferramenta importante para conformação de metais, no entanto, está disponível apenas para poucas ligas na literatura, muito em função das suas especificidades, como espessura de chapa. Para tanto, utilizou-se a liga AA 3003F, pois esta liga é de fácil aquisição tanto comercial quanto financeira. O objetivo foi criar um diagrama gráfico relacionando a pressão aplicada à força de trabalho durante a conformação, a fim de prever o comportamento do material e otimizar projetos. Utilizou-se a liga AA 3003F com espessura de 0,4 mm e matriz livre para obtenção de uma semiesfera. As amostras foram submetidas a pressões progressivas (de 5 a 20 kgf/cm²), sendo analisadas por microscopia óptica para identificação de parâmetros e defeitos, resultando no diagrama de hidroconformação da liga. Seguidamente, o estudo aprofunda a análise avaliando a influência do recozimento térmico nas propriedades mecânicas da mesma liga. As amostras foram tratadas termicamente em três temperaturas (250 °C, 325 °C e 450 °C), com posterior conformação até a ruptura. Foram realizados ensaios de tração, dureza, rugosidade e análise microestrutural. Os resultados indicaram melhorias significativas: até 14% de aumento no limite de ruptura, 60% na altura de conformação (principalmente a 250 °C) e rugosidade média de 0,65 µm para aplicação industrial. A análise metalográfica confirmou encruamento nas zonas críticas, sem alterações estruturais relevantes. Em conjunto, os estudos mostram que a combinação entre hidroconformação e recozimento térmico potencializa o desempenho da liga AA 3003F, tornando-a altamente viável para aplicações industriais que exigem resistência, leveza e boa conformabilidade.

Palavras-chave: Hidroconformação. Tratamento Térmico. Recozimento. Alumínio

ABSTRACT

The study presents an analysis of the behavior and optimization of the AA 3003F aluminum alloy in industrial processes, with a focus on hydroforming and the effects of annealing heat treatment. The hydroforming process stands out due to its ability to reduce weight and increase the mechanical strength of the produced parts, in addition to promoting material savings and process sustainability. Initially, a graphical diagram was developed, in which an attempt was made to relate the applied pressure to the work force during forming, in order to predict the material's behavior and optimize designs. This hydroforming diagram is an important tool for metal forming; however, it is available in the literature for only a limited number of alloys, largely due to their specific characteristics, such as sheet thickness. For this purpose, the AA 3003F alloy was selected because of its wide commercial availability and cost-effectiveness. The objective was to create a graphical diagram relating the applied pressure to the forming load, in order to predict the material behavior and optimize industrial designs. The AA 3003F alloy with a thickness of 0.4 mm was used, along with a free die to obtain a hemispherical geometry. The samples were subjected to progressive pressures ranging from 5 to 20 kgf/cm² and subsequently analyzed by optical microscopy to identify parameters and defects, resulting in the hydroforming diagram for the alloy. Subsequently, the study deepens the analysis by evaluating the influence of annealing heat treatment on the mechanical properties of the same alloy. The samples were heat-treated at three temperatures (250 °C, 325 °C, and 450 °C), followed by forming until rupture. Tensile, hardness, roughness, and microstructural analyses were performed. The results indicated significant improvements, including up to a 14% increase in ultimate strength, a 60% increase in forming height (particularly at 250 °C), and an average surface roughness of 0.65 μm suitable for industrial applications. Metallographic analysis confirmed the occurrence of strain hardening in critical regions, with no significant structural changes. Overall, the study demonstrates that the combination of hydroforming and annealing heat treatment enhances the performance of the AA 3003F alloy, making it highly suitable for industrial applications requiring strength, lightweight characteristics, and good formability.

Keywords: Hydroforming. Heat Treatment. Annealing. Aluminum.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1 – DIAGRAMA DE HIDROCONFORMAÇÃO LIGA AA 3003F

Figura 1: Conexão tipo T hidroconformada.....	11
Figura 2: Máquina de Hidroconformação tipo Quadro.....	12
Figura 3: Hidroconformação por: (a) expansão/compressão pura (b) expansão /compressão e calibração local, (c) calibração pura.....	12
Figura 4: Hidroconformação por: (a) matriz livre, (b) matriz transversal, (c) matriz longitudinal.....	13
Figura 5: Diagrama do processo de hidroconformação.....	14
Figura 6: Fluxograma de desenvolvimento e metodologia.....	16
Figura 7: Propriedades da liga Al - 3003.....	17
Figura 8: Blank Al-3003.....	17
Figura 9: Desenvolvimento da peça hidroconformada.....	18
Figura 10: Dispositivo de Hidroconformação.....	18
Figura 11: Partes e peças do dispositivo de hidroconformação.....	19
Figura 12: Método de medida do deslocamento.....	19
Figura 13: Amostras hidroconformadas a) 20 kgf/cm ² , b) 15 kgf/cm ² , c) 10 kgf/cm ² e d) 5 kgf/cm ²	21
Figura 14: Tipos de defeitos na Hidroconformação: (1) Ruptura, (2) Enrugamento (3) Estrias.....	22
Figura 15: Identificação do sentido de ruptura perpendicular ao sentido de laminação do material.....	23
Figura 16: Metalografia da Liga Al - 3003.....	23
Figura 17: Diagrama de Hidroconformação Liga Al - 3003 F.....	24

ARTIGO 2 – INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO NA LIGA AA 3003F APLICADAS AO PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO

Figura 1: Processo de Hidroconformação.....	34
Figura 2: Fluxograma das etapas de desenvolvimento.....	36
Figura 3: Detalhamento de fabricação de amostras para a hidroconformação.....	37
Figura 4: Processo de hidroconformação.....	37
Figura 5: Método de medida da altura da deformação da calota hidroconformada.....	38

Figura 6: Ensaio de Rugosidade.....	40
Figura 7: Ensaio de Tração na liga de alumínio AA 3003F.....	40
Figura 8: Ensaio de Dureza.....	41
Figura 9: Altura de hidroconformação para o alumínio com e sem recozimento.....	42
Figura 10: Pressão de ruptura versus Recozimento.....	43

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1 - DIAGRAMA DE HIDROCONFORMAÇÃO LIGA AA 3003F

Tabela 1: Hidroconformação de amostras.....20

ARTIGO 2 - INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO NA LIGA AA 3003F APLICADAS AO PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO

Tabela 1: Metalografias da liga AA 3003F - para comparação, a micrografia de uma liga AA3003O.....44

Tabela 2: Metalografias da liga AA 3003F recozidas nas temperaturas de 250 °C, 325 °C e 450 °C, seguidas de hidroconformação até a ruptura.....44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL	3
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2 MATERIAIS E MÉTODOS	4
3 ARTIGO 1 - DIAGRAMA DE HIDROCONFORMAÇÃO LIGA AA 3003 F	6
4 ARTIGO 2 - INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO NA LIGA AA 3003 F APLICADAS AO PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO	29
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
5.1 POSSIBILIDADES DE TRABALHOS FUTUROS	48
REFERÊNCIAS ADICIONAIS	52

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por processos industriais mais eficientes, sustentáveis e capazes de produzir componentes com geometrias complexas tem impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias de conformação de materiais metálicos. Nesse contexto, a hidroconformação se destaca como um processo promissor, utilizando fluido sob alta pressão para moldar chapas metálicas, proporcionando diversas vantagens técnicas e econômicas. Entre os principais benefícios, destacam-se a redução de peso, o aumento da resistência mecânica, a diminuição do desperdício de material e a simplificação de etapas de fabricação, características altamente valorizadas em setores como o automobilístico, aeroespacial e eletroeletrônico. (BELL, 2020)

A aplicação da hidroconformação envolve conhecimentos interdisciplinares das áreas de ciência dos materiais, engenharia mecânica, metalurgia e processos de fabricação, sendo de grande interesse tanto para a pesquisa acadêmica quanto para a indústria. Neste estudo, foi utilizada a liga de alumínio AA 3003F, amplamente disponível no mercado e reconhecida por sua leveza, boa conformabilidade e versatilidade em aplicações industriais. Apesar dos avanços no uso da hidroconformação, ainda existem lacunas significativas na modelagem e análise do comportamento mecânico das chapas metálicas durante o processo, especialmente no que se refere à interação com tratamentos térmicos subsequentes. (SCHULER, 1998) Com o objetivo de contribuir para o entendimento e a otimização desse processo, foi conduzido um estudo experimental que abrange desde a caracterização do comportamento da liga AA 3003F durante a conformação até a avaliação da influência do tratamento térmico de recozimento sobre suas propriedades mecânicas e microestruturais.

Apesar do amplo volume de estudos dedicados à hidroconformação e à conformabilidade de chapas metálicas, a literatura disponível limita-se a abordagens gerais do processo ou à aplicação de diagramas limite de conformação convencionais, não sendo identificados trabalhos que proponham ou apresentem diagramas de hidroconformação para chapas finas da liga AA 3003-F. Em especial, não há registros de representações gráficas capazes de correlacionar diretamente parâmetros operacionais, como pressão interna e esforço de conformação, com os limites de

instabilidade plástica e ruptura específicos dessa liga no estado F. A inexistência desses diagramas impede a definição sistemática de janelas operacionais seguras e mantém o desenvolvimento de processos de hidroconformação fortemente dependente de métodos empíricos. Nesse contexto, o presente trabalho se insere como uma contribuição inédita, ao propor um diagrama de hidroconformação específico para chapas finas de AA 3003-F.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento da liga de alumínio AA 3003F submetida ao processo de hidroconformação, por meio da elaboração de um diagrama gráfico que relaciona pressão aplicada à força de trabalho durante a conformação e analisar a influência do tratamento térmico de recozimento sobre suas propriedades mecânicas e microestruturais.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Desenvolver um dispositivo experimental para a conformação de chapas metálicas em matriz livre, utilizando fluido pressurizado;
- b) Aplicar diferentes níveis de pressão (5, 10, 15 e 20 kgf/cm²) para conformar a liga AA 3003F e caracterizar os resultados obtidos;
- c) Mensurar a deformação das chapas hidroconformadas, identificando defeitos como rugas e estrias;
- d) Propor um Diagrama de Hidroconformação, relacionando pressão aplicada e força de trabalho necessária para conformação da liga;
- e) Recozer as amostras conformadas a três temperaturas distintas (250 °C, 325 °C e 450 °C) sob condições controladas de aquecimento e resfriamento;
- f) Avaliar as propriedades mecânicas (limite de ruptura, dureza) e características superficiais (rugosidade) das chapas após o recozimento e hidroconformação;
- g) Analisar a microestrutura das regiões de ruptura, identificando possíveis alterações metalúrgicas decorrentes dos tratamentos aplicados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para apresentação dos materiais e métodos, será apresentado um fluxograma de acordo com a Figura 1, que contempla o passo-a-passo das etapas e técnicas utilizadas.

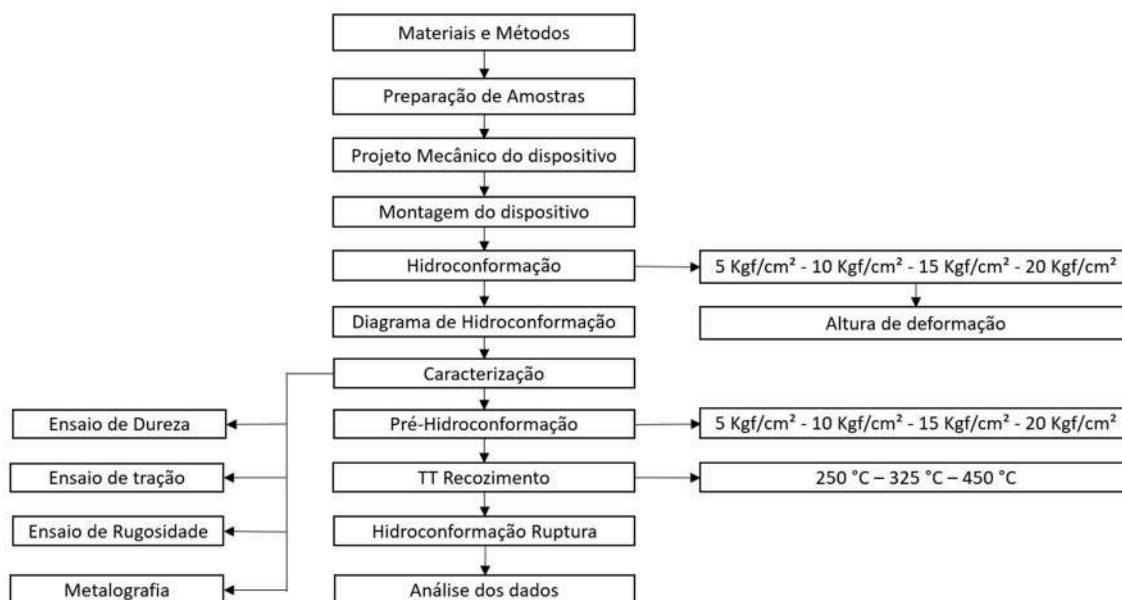


Figura 1 – Fluxograma de desenvolvimento e metodologia.

Fonte: Autor.

Os materiais bem como os métodos utilizados serão descritos no decorrer deste tópico. Foi escolhida a liga AA 3003F por ser um material de fácil acesso e comum na utilização da indústria automotiva e eletrônica. Dentre as espessuras comerciais fornecidas desta bobina de alumínio, a de menor valor é de 0,4 mm de espessura. A escolha da espessura também se deu pelo seu baixo custo e fácil aquisição.

Trata-se de uma liga de alumínio–manganês não tratável termicamente, que apresenta propriedades mecânicas relevantes, como elevada resistência à corrosão e excelente conformabilidade. Na espessura típica de aproximadamente 0,4 mm, essa liga é amplamente empregada na fabricação de diversos produtos industriais, tais como isolantes térmicos, furgões, tanques industriais, placas de identificação veicular, latas para bebidas e alimentos, além de telhas, calhas, entre outras aplicações.

Inicialmente, foi proposto o desenvolvimento de um diagrama gráfico representando a relação entre a pressão do fluido aplicada e a força de trabalho necessária para a conformação da liga em uma matriz livre, formando uma semiesfera

metálica. As chapas com espessura de 0,4 mm, como mostra a Figura 2, foram submetidas a pressões 4 progressivas de 5, 10, 15 e 20 kgf/cm². A ruptura da chapa foi observada na maior pressão testada. A partir da medição do raio das semiesferas conformadas e da análise de defeitos visuais, como rugas e estrias, foi possível construir um diagrama de hidroconformação, o qual pode ser utilizado como ferramenta preditiva no desenvolvimento de componentes e na otimização de parâmetros do processo. Com o objetivo de aprofundar a compreensão sobre a influência de tratamentos térmicos, amostras previamente conformadas foram submetidas a ciclos de recozimento a 250 °C, 325 °C e 450 °C, seguidos de nova conformação até a ruptura.

A construção do Diagrama de Hidroconformação e a análise dos efeitos dos ciclos térmicos oferecem uma base sólida para a previsão do comportamento do material e para a otimização de processos industriais. Este estudo contribui, portanto, com uma abordagem prática e científica para o aprimoramento de processos de conformação aplicados a ligas de alumínio, atendendo às exigências por leveza, resistência e conformabilidade em aplicações avançadas. A execução das duas etapas deste trabalho, bem como os resultados obtidos estão detalhados nos dois artigos apresentados a seguir.

3 ARTIGO 1 - DIAGRAMA DE HIDROCONFORMAÇÃO LIGA AA 3003 F

O artigo “Diagrama de hidroconformação liga AA 3003F”, derivado desta dissertação, foi submetido à revista ScientiaTec e está em avaliação editorial. A ScientiaTec é um periódico científico e multidisciplinar, com foco em educação e ensino, que divulga pesquisas originais voltadas à formação profissional técnica, tecnológica e superior.

Este estudo teve como objetivo propor um Diagrama de Hidroconformação, com base na análise do comportamento da liga de alumínio AA 3003F (espessura de 0,4 mm) submetida a diferentes pressões (5, 10, 15 e 20 kgf/cm²) em matriz livre. A última pressão resultou na ruptura da chapa. As semiesferas obtidas foram avaliadas quanto ao grau de deformação e presença de defeitos. Com base nos dados experimentais e em análises matemáticas, foi desenvolvido um diagrama gráfico relacionando pressão e força de trabalho, o qual pode servir como ferramenta de apoio ao desenvolvimento e otimização de peças metálicas.

Diagrama de Hidroconformação Liga Al - 3003

DOI/scientiatec.vxxxix.xxxx

Anderson Joel velho¹
Daniela Lupinacci Villanova²

Resumo: A hidroconformação é um processo de conformação mecânica amplamente aplicado na indústria por possibilitar a fabricação de geometrias complexas com redução de etapas produtivas, menor desperdício de material e melhoria das propriedades mecânicas devido ao encruamento induzido. Essas características tornam o processo particularmente relevante para os setores automotivo, aeroespacial e eletrônico, além de contribuir para práticas industriais mais sustentáveis. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal a construção de um diagrama de hidroconformação inédito para a liga AA 3003-F, desenvolvido a partir de uma investigação analítica e experimental do comportamento de chapas metálicas submetidas à hidroconformação. O diagrama proposto correlaciona a pressão interna aplicada e a força de trabalho, permitindo identificar janelas operacionais seguras, bem como regiões críticas associadas à instabilidade plástica e à ruptura, específicas desta liga no estado F. Para o desenvolvimento do estudo, foram utilizadas chapas de alumínio AA 3003-F com espessura de 0,4 mm, conformadas por meio de matriz livre, devido ao seu baixo custo de fabricação. Foi projetado um dispositivo experimental com capacidade de operação até 60 kgf/cm², utilizando água filtrada como fluido pressurizante. Ensaios foram conduzidos sob pressões de 5, 10, 15 e 20 kgf/cm², sendo observada a ruptura da chapa na condição de maior pressão. As amostras conformadas foram caracterizadas quanto ao grau de deformação, a partir do raio das semiesferas obtidas, e pela ocorrência de defeitos superficiais, como rugas e estrias. A partir do equacionamento analítico e das observações experimentais, foi possível estabelecer o diagrama de hidroconformação proposto, o qual atua como uma ferramenta de projeto de processo, auxiliando na definição de parâmetros operacionais e reduzindo a dependência de abordagens empíricas no desenvolvimento de componentes hidroconformados em AA 3003-F.

Palavra-chave: Hidroconformação, limite de escoamento, limite de ruptura, defeitos mecânicos, alumínio.

Abstract: Hydroforming is a metal forming process widely applied in industry due to its ability to manufacture complex geometries with reduced production stages, lower material waste, and improved mechanical properties resulting from process-induced strain hardening. These characteristics make hydroforming particularly relevant to the automotive, aerospace, and electronics sectors, while also contributing to more sustainable industrial practices. In this context, the main objective of this study is the construction of an original hydroforming diagram for the AA 3003-F aluminum alloy, developed through an analytical and experimental investigation of the behavior of metallic sheets subjected to hydroforming. The proposed diagram correlates the applied internal pressure with the forming force, enabling the identification of safe operational windows as well as critical regions associated with plastic instability and rupture, specific to this alloy in the F temper. For the experimental study, AA 3003-F aluminum sheets with a thickness of 0.4 mm were used and formed using a free-die hydroforming approach due to its low manufacturing cost. An experimental device with an operating capacity of up to 60 kgf/cm² was designed, using filtered water as the pressurizing fluid. Hydroforming tests were conducted at pressures of 5, 10, 15, and 20 kgf/cm², with sheet rupture observed at the highest pressure level. The hydroformed specimens were characterized in terms of deformation degree, based on the radius of the resulting hemispheres, and by the presence of surface defects such as wrinkles and striations. Based on analytical formulations and experimental observations, the proposed hydroforming diagram was established, which serves as a process design tool, directly

¹ Mestrando do IFRS, E-mail: andersonjoelvelho@gmail.com

² Professor do IFRS, E-mail: daniela.villanova@farroupilha.ifrs.edu.br

supporting the definition of operating parameters and reducing reliance on empirical trial-and-error approaches in the development of hydroformed components made from AA 3003-F.

Keywords: Hydroforming, yield point, rupture limit, mechanical defects, aluminum.

1 INTRODUÇÃO

A hidroconformação é um método relativamente novo para moldar metais que oferece várias vantagens em relação aos métodos tradicionais de conformação a frio. Ele possibilita a fabricação de peças mais complexas com menos etapas, especialmente para formas específicas como, por exemplo, chapas e tubos. Além disso, a hidroconformação é mais econômica, produzindo peças mais leves e rígidas, enquanto gera menos resíduos (BELL, 2020).

Nas últimas décadas, tem sido crescente na indústria a busca por processos diferentes para aumento de resistência, redução de peso, redução de volume, *designs* inovadores e complexos. Dentro dos processos convencionais, que são as operações de torneamento, fresamento e usinagem, existem os processos não convencionais, tais como a hidroconformação (SCHULER, 1998).

A técnica de hidroconformação consiste em manufaturar componentes a partir de chapas ou tubos, através da aplicação de pressão uniforme de um fluido (SINGH, 2003; GROOVER, 2014) e que permite a obtenção de peças com geometrias complexas (BELL, 2020). O controle do processo envolve parâmetros como expansão e compressão pura, expansão/compressão e calibração pura ou apenas calibração pura. Assim, os efeitos da geometria da peça e do tamanho de grão em processos de hidroconformação são identificados como influentes na conformabilidade de materiais metálicos durante os processos de conformação em micro/meso escala (ZHUTIAN, 2018).

Os processos de hidroconformação de chapas metálicas são classificados em 5 tipos: hidroconformação com diafragma de membrana, trefilação hidromecânica profunda, estiramento hidráulico, trefilação profunda combinada e formação por estiramento, além da hidroconformagem em *blank* duplo (BEEL, 2020).

Em geral, o processamento de chapas metálicas é semelhante à estampagem, mas com algumas diferenças significativas. Enquanto a estampagem utiliza uma matriz e punções, na hidroconformação de chapas metálicas, a matriz ou punção

são substituídos pela pressão de um fluido. Ao longo da maior parte do processo de conformação, um lado da chapa fica exposto ao fluido ou a uma membrana de borracha ou diafragma. Isso, em geral, resulta em uma distribuição mais uniforme e acentuada da deformação em toda a superfície do metal.

A utilização da hidroconformagem de chapas metálicas oferece algumas vantagens notáveis. Ela permite alcançar uma profundidade de conformação significativamente maior, chegando a até 1,5 vezes em comparação com operações de conformação convencionais. Além disso, esse processo proporciona um melhor acabamento superficial, reduz o efeito mola da peça, diminui o tempo necessário para desenvolver as ferramentas e, conseqüentemente, reduz os custos de ferramental (SINGH, 2003).

A hidroconformação de tubos, também considerada um processo inovador, permite a manufatura de tubos de forma complexa. É classificada em dois tipos: alta pressão e baixa pressão, sendo esta última menos exigente em termos de pressão e força de matriz. O uso de materiais de alta resistência em tubos oferece a vantagem de reduzir o peso, mas também aumenta o risco de flambagem com o uso de baixa pressão. Neste caso, estudos propõem um método baseado na energia plástica para estimar a pressão mínima necessária para o processo levando em consideração as propriedades do material, a espessura e o comprimento da seção do tubo. A análise de sensibilidade destaca a influência significativa da tensão de escoamento do material do tubo na pressão necessária (NIKHARE, 2017).

O processo de hidroconformação tem grande importância para a sociedade e para o meio ambiente, visto que o mesmo reduz etapas em um processo produtivo e também reduz a geração de resíduos. No entanto, é importante mencionar que, devido aos tempos de ciclo mais longos, a hidroconformação de chapas metálicas é mais adequada para a produção de baixo volume. Isso ocorre porque a utilização de prensas hidráulicas de grande porte é frequentemente necessária para lidar com peças maiores, o que pode resultar em despesas de capital elevadas.

Uma ferramenta usada para auxiliar neste processo de manufatura é o diagrama de hidroconformação. Neste, constam informações como parâmetros de fabricação, permitindo determinar a espessura necessária ou o material na escolha da aplicação em um novo projeto mecânico e ainda, prever as áreas de defeitos e restrições geométricas dadas pela necessidade do dimensionamento das peças.

Uma limitação de seu uso é a quase inexistência desses diagramas na literatura e para cada condição (material e espessura) é necessário um diagrama específico; nem mesmo os fornecedores de materiais não os disponibilizam.

Assim, o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um diagrama de hidroconformação para chapas da liga de alumínio Al-3003, escolhida por ser uma das mais comuns empregadas no setor automotivo e eletrônico.

O estudo foi viabilizado, inicialmente pela interpretação e compreensão, por meio de técnicas de bibliometria e revisão sistemática, sobre o processo de hidroconformação, os quais possibilitam o embasamento e utilização desta ferramenta. Também foi construído um equipamento de hidroconformação em escala laboratorial para a realização dos ensaios. Espera-se que a metodologia empregada proporcione uma base sólida de como proceder para a elaboração de diagramas de hidroconformação para outras ligas.

Apesar do amplo volume de estudos dedicados à hidroconformação e à conformabilidade de chapas metálicas, a literatura disponível limita-se a abordagens gerais do processo ou à aplicação de diagramas limite de conformação convencionais, não sendo identificados trabalhos que proponham ou apresentem diagramas de hidroconformação para chapas finas da liga AA 3003-F. Em especial, não há registros de representações gráficas capazes de correlacionar diretamente parâmetros operacionais, como pressão interna e esforço de conformação, com os limites de instabilidade plástica e ruptura específicos dessa liga no estado F. A inexistência desses diagramas impede a definição sistemática de janelas operacionais seguras e mantém o desenvolvimento de processos de hidroconformação fortemente dependente de métodos empíricos. Nesse contexto, o presente trabalho se insere como uma contribuição inédita, ao propor um diagrama de hidroconformação específico para chapas finas de AA 3003-F.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A hidroconformação é um processo *near-net-shape* que consiste na conformação plástica a frio de metais através do uso de fluidos pressurizados. Em comparação com outros processos de conformação a frio, demonstra vantagens tais como desenvolvimento de novas geometrias, utilização de materiais mais leves,

redução de etapas e processos como a soldagem de componentes, além da colaboração com o meio ambiente, visto que o processo gera menos resíduos (BELL, 2019).

O surgimento do processo de hidroconformação iniciou-se em meados de 1900; nesta época, foi empregado um aparelho que utilizava chumbo fundido como fluido de trabalho para a hidroconformação de serpentinas. Em 1939, utilizou-se novamente o processo de hidroconformação, porém desta vez para a fabricação de conexões T produzidas em cobre, como mostra a Figura 1. Este é o mesmo processo utilizado atualmente, mas com maior grau de tecnologia envolvido. Logo após, em 1986, surgiu uma das primeiras patentes adquiridas pela empresa Veriform, voltada para a produção de peças estruturais (BELL, 2020).

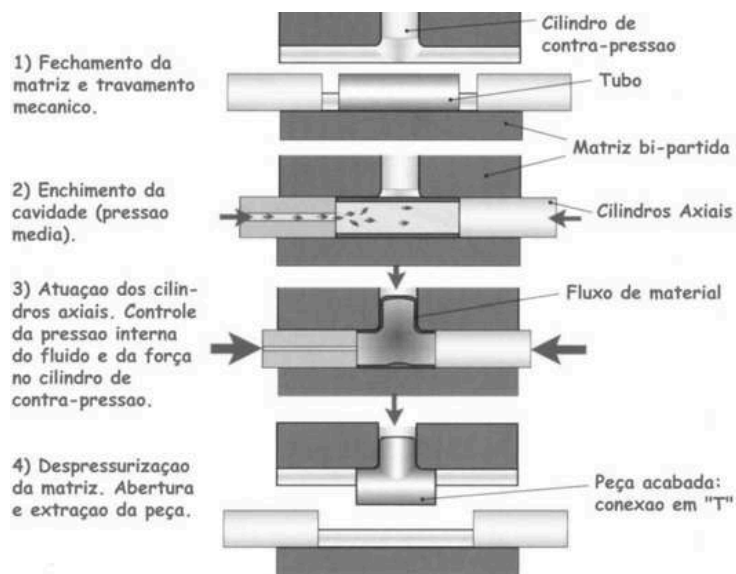


Figura 1 – Conexão tipo T hidroconformada.

Fonte: Schuler, 1998.

Em 1940, a empresa americana Cincinnati Milacron desenvolveu máquinas para hidroconformação de chapas tipo quadro, apresentada na Figura 2. Este tipo de máquina era ideal para produções de pequenos lotes e utilizava apenas uma ferramenta para o processo. Cabe ainda ressaltar que o fluido utilizado era o óleo (SCHULER, 1998).

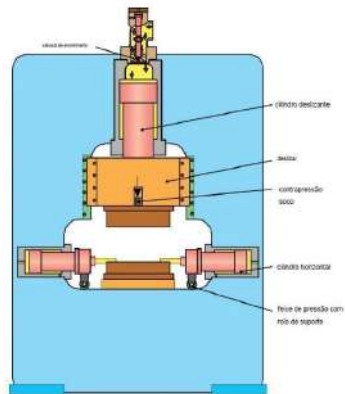


Figura 2 – Máquina de Hidroconformação tipo quadro.

Fonte: Schuler, 1998.

A metodologia da hidroconformação é realizada através de determinada força combinada a pressão aplicada em um fluido. Para isso o material é submetido a três etapas de acordo com a Figura 3, sendo elas a expansão, compressão e calibração (GROOVER, 2018).



Figura 3 – Hidroconformação por : (a) expansão/compressão pura, (b) expansão/compressão e calibração local, (c) calibração pura.

Fonte: Schuler, 1998.

Como mostra a Figura 4, basicamente o processo de hidroconformação é dividido entre processo de hidroconformação livre ou hidroconformação com matrizes. A hidroconformação por matriz é subdividida entre matrizes transversais e matrizes longitudinais e isso se dá por conta da forma de posicionamento da máquina com a matriz.

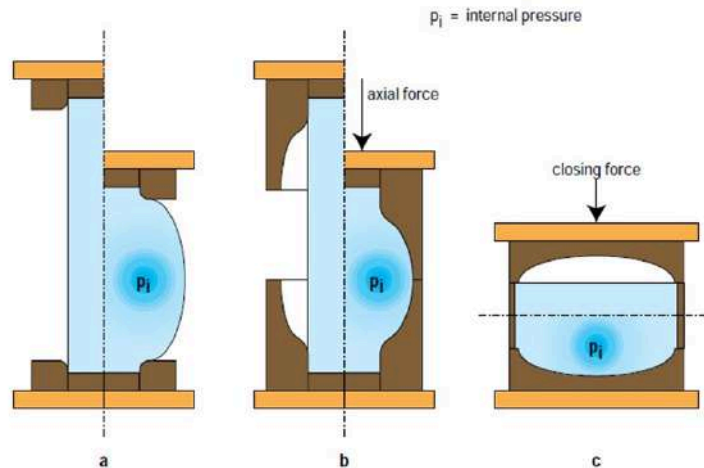


Figura 4 – Hidroconformação por: (a) matriz livre, (b) matriz transversal, (c) matriz longitudinal.

Fonte: Schuler, 1998.

Os materiais utilizados para conformação a frio se adequam ao processo de hidroconformação e devem possuir uma granulação fina em sua estrutura e serem dúcteis. A obtenção de uma melhor conformação se dá pela escolha de um material com alto grau de alongamento, muito utilizado em processos de estamparia. Alguns processos de tratamentos térmicos intermediários podem ser incorporados ao processo a fim de melhorar o processo de hidroconformação e eliminar defeitos (REDDY, 2020).

Um método de controle do processo de hidroconformação envolve a regulação da pressão de conformação com base no deslocamento da força. Esse método é representado em um gráfico que mostra a pressão de conformação e a força de avanço. A pressão é aumentada gradualmente até um valor ligeiramente abaixo da pressão de escoamento; em seguida, a força de avanço é aumentada para atingir a pressão de expansão do material. A pressão pode ser aumentada até o valor máximo de conformação para eliminar rugas menores, enquanto uma pequena quantidade de avanço axial contribui efetivamente para uma boa vedação (RAMALHEIRA, 2008).

Para compreender o efeito dos parâmetros do processo de hidroconformação deve-se elaborar um gráfico que representa as condições limites de conformação, como mostra a Figura 5, na qual a pressão no interior do componente é representada no eixo horizontal e a força do cilindro de vedação axial é representada no eixo vertical. Esse gráfico, chamado de "diagrama de processo de hidroconformação", também inclui uma curva que descreve o progresso do

processo. Garantir que os parâmetros permaneçam dentro da "zona segura" delimitada por esse gráfico (área verde hachurada) é essencial durante a hidroconformação (SINGH,2003).

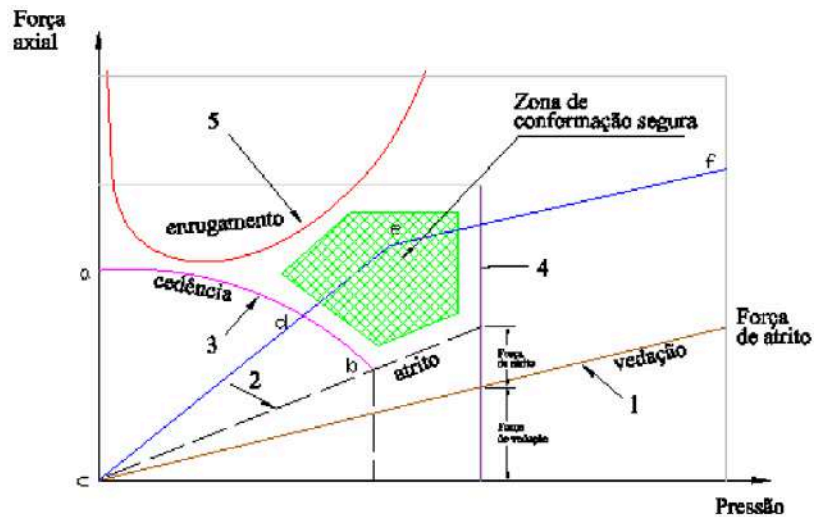


Figura 5 – Diagrama do processo de hidroconformação.

Fonte: Ramalheira, 2008.

As equações são adaptadas com base na geometria de chapas circulares. Ainda, de acordo com Singh, a linha 1 do gráfico representa a força de vedação mínima do sistema para a vedação do processo, que é representada pela equação 1.

$$FS = [((\pi r^2) * t)^2 * Pr] / 4 \quad (1)$$

Onde:

FS = Força de vedação mínima (N);

Pr = Pressão do fluido (MPa);

r = raio (mm);

t = espessura da chapa (mm).

A linha 2 representa a força de atrito entre a peça e a matriz e é representada pela equação 2.

$$FR = \mu * (\pi r^2) * Pr * l \quad (2)$$

Onde:

FR = Força de atrito (N);

μ = coeficiente de atrito;

l = comprimento da peça (mm).

A linha 3 demonstra a força e pressão necessárias para propiciar o escoamento do material indicado pelos pontos A e B. O ponto A é representado pela equação 3 e o ponto B pela equação 4.

$$Fa = \gamma d * (\pi r^2) * t \quad (3)$$

Onde:

Fa = Força de escoamento (N);

γd = resistência ao escoamento (MPa).

$$Pb = (2 * \gamma d * t) / (\pi r^2) \quad (4)$$

Onde:

Pb = Pressão de escoamento (MPa);

A linha 4 representa a pressão de ruptura dada pela equação 5.

$$Pf = (2 * UTS * t) / (\pi r^2) \quad (5)$$

Onde:

Pf = Pressão de ruptura;

UTS = tensão final (MPa).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para melhor entendimento e compreensão dos materiais e métodos utilizados neste trabalho é apresentado o fluxograma apresentado na Figura 6, que contempla o passo-a-passo das etapas e técnicas utilizadas.

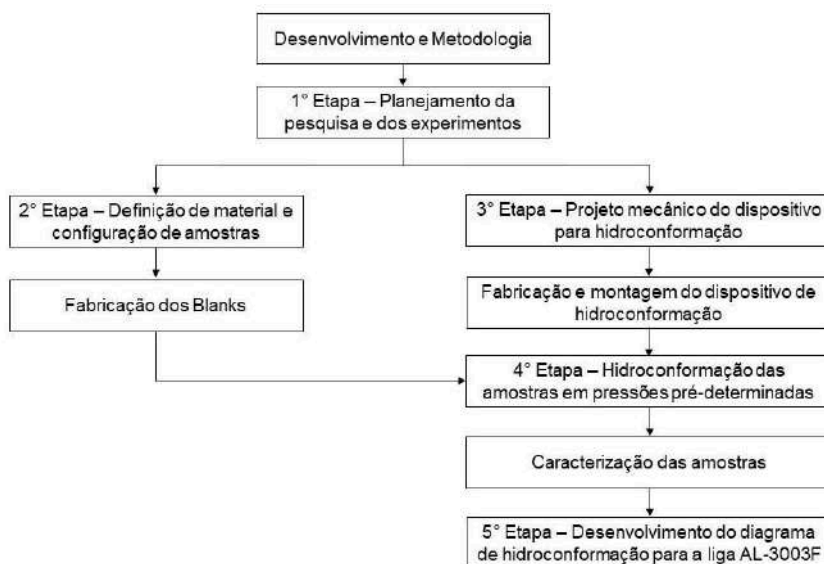


Figura 6 – Fluxograma de desenvolvimento e metodologia.

Fonte: Autor.

Os materiais bem como os métodos utilizados serão descritos no decorrer deste tópico. Foi escolhida a liga Al-3003 por ser um material de fácil acesso e comum na utilização da indústria automotiva e eletrônica. Dentre as espessuras comerciais fornecidas desta bobina de alumínio, a de menor valor é de 0,4 mm de espessura. A escolha da espessura também se deu pelo seu baixo custo e fácil aquisição.

Esta é uma liga de alumínio/manganês sem tratamento térmico com boas características mecânicas como a alta resistência à corrosão e alta formabilidade. Sua aplicação é muito utilizada na fabricação de isolantes térmicos, carrocerias de ônibus e furgões, tanques para indústria, placas de identificação de veículos, extintores, latas para bebidas e alimentos, telhas, calhas e entre outros. A Figura 7 demonstra suas propriedades físicas e químicas.

Propriedades Químicas		Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Mn	1,0 - 1,5 %	Condutibilidade Elétrica	43 % I.A.C.S	Limite de resistência	165 - 205 MPa
Fe	0,70%	Condutibilidade Térmica	0,38 cal/cms°C		
Cu	0,05 - 0,2 %	Densidade	2,73 g/cm ³	Alongamento	Em 1,6 de espessura com 50 mm = 2%
Si	0,60%	Expansão Térmica	23x10 ^{-6.1/°C}		
Al	Restante	Módulo de Elasticidade	70000 MPa		
Zi	0,10%	Ponto de Fusão	640 - 655 °C		
Outros	Total 0,15%				

Figura 7 – Propriedades da liga Al - 3003.

Fonte: Adaptado de Império dos Metais.

O *blank* utilizado para a hidroconformação das amostras foi um disco com 150 mm de diâmetro e 0,4 mm de espessura, como mostra a Figura 8. Ao total foram fabricadas 20 amostras.

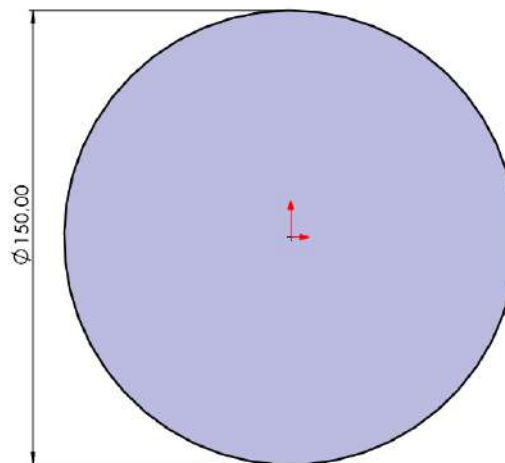


Figura 8 – *Blank* Al-3003.

Fonte: Autor.

Como desenvolvimento de uma peça, a geometria formada pelo processo de hidroconformação de matriz livre obteve-se uma semiesfera com raio de aproximadamente 25 mm, como mostra a Figura 9. Este valor limite deve-se pela ruptura da chapa hidroconformada.

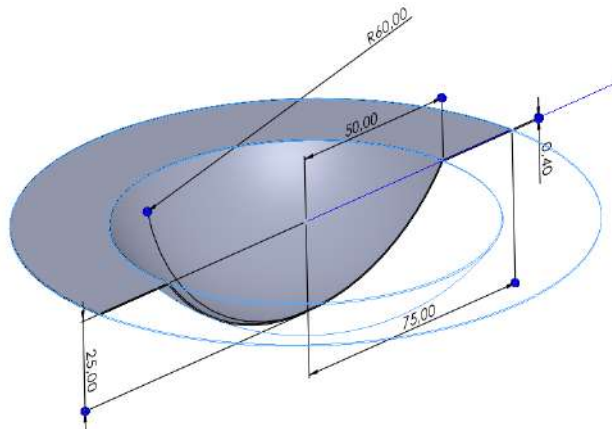


Figura 9 – Desenvolvimento da peça hidroconformada.

Fonte: Autor

Para que fosse possível submeter as amostras ao processo de hidroconformação, foi desenvolvido um dispositivo para hidroconformação com capacidade de pressão de 60 kgf/cm^2 . O reservatório utilizado tem o volume de 4,7 litros e o fluido utilizado foi a água. O equipamento limita-se a espessuras de até 1mm e podendo ser utilizados outras ligas além do alumínio como latão, aço e inox. Além disso, o dispositivo está equipado com a matriz de hidroconformação livre e estrutura em alumínio $20 \times 20 \text{ mm}$ como mostra a Figura 10.

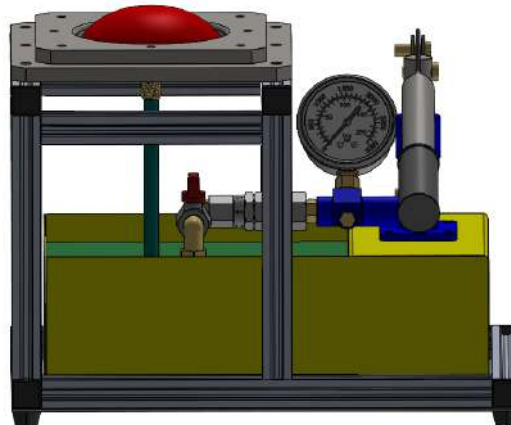


Figura 10 – Dispositivo de Hidroconformação.

Fonte: Autor

Para um maior controle do processo de hidroconformação, apesar de simples, o dispositivo foi equipado com um manômetro de precisão com escala de 1 kgf/cm^2 e com capacidade máxima manométrica de 60 kgf/cm^2 . Além disso, o manômetro foi calibrado conforme norma NBR 14105-1. O dispositivo também conta com uma

válvula de alívio, para ser possível despressurizar o sistema no momento de retirada das amostras, visto que as amostras são gradualmente hidroconformadas. A lista de peças e componentes do dispositivo estão demonstrados na Figura 11.



Figura 11 – Partes e peças do dispositivo de hidroconformação.

Fonte: Autor

Após os ensaios de hidroconformação das amostras, foi possível medir o raio atingido pelas mesmas com o auxílio de um micrômetro analógico de profundidade; suas hastes auxiliaram no paralelismo em relação às abas das amostras, como mostra em corte a Figura 12.

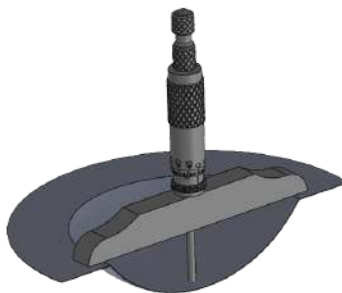


Figura 12 – Método de medida do deslocamento.

Fonte: Autor

Com o objetivo de determinar a pressão máxima de teste e estabelecer as demais condições de pressão de trabalho, as amostras utilizadas na elaboração do diagrama foram caracterizadas por meio da análise visual dos defeitos gerados durante o processo, da medição do deslocamento (em mm) para cada nível de pressão aplicado e da observação da fratura até a ruptura. Ao todo, foram analisadas 20 amostras, distribuídas em quatro grupos: o primeiro submetido à

pressão de 5 kgf/cm² e os demais às pressões de 10 kgf/cm² , 15 kgf/cm² e 20 kgf/cm².

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

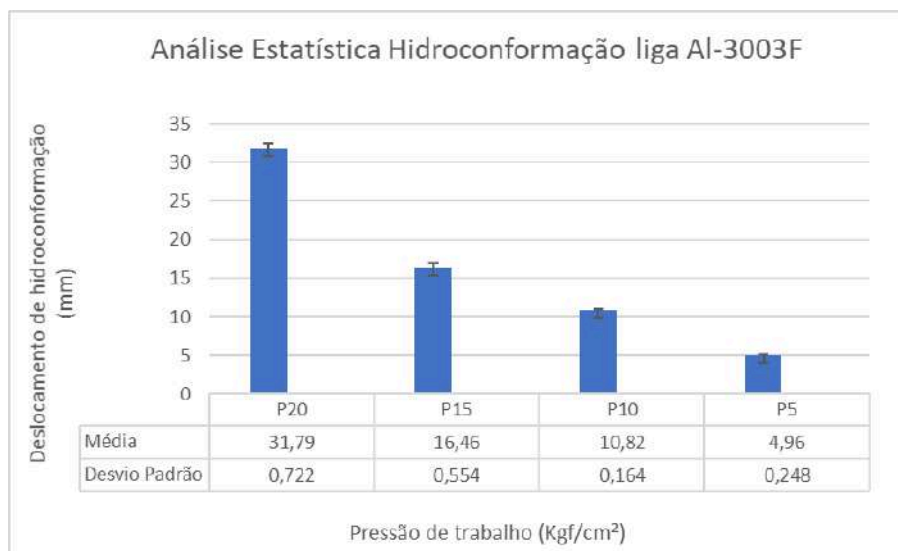
A Tabela 1 apresenta a pressão de trabalho utilizada e a medida do deslocamento do raio da peça hidroconformada para cada amostra testada, bem como a média do deslocamento por pressão.

TABELA I – HIDROCONFORMAÇÃO DAS AMOSTRAS.

Nº AMOSTRA	P (kgf/cm ²)	DESLOCAMENTO HIDROCONFORMAÇÃO (mm)	MÉDIA DESLOCAMENTO (MM)
01	20	31,54	31,792
02	20	32,24	
03	20	32,64	
04	20	30,74	
05	20	31,80	
06	15	15,84	16,46
07	15	15,94	
08	15	16,64	
09	15	17,14	
10	15	16,74	
11	10	10,84	10,82
12	10	10,94	
13	10	10,84	
14	10	10,54	
15	10	10,94	
16	5	5,14	4,96
17	5	5,14	
18	5	4,54	
19	5	5,04	
20	5	4,94	

Para análise estatística do estudo empregou-se a média e desvio padrão sobre os valores coletados de 5 amostras em cada faixa de pressão, como mostra o Gráfico 1. Para as análises com pressões de 20 kgf/cm² o desvio padrão foi de 0,722 representando um erro de 2,27 %. Para pressões de trabalho de 15 kgf/cm², o desvio padrão foi de 0,554 representando um erro de 3,36%. Nas pressões de trabalho de 10 kgf/cm² o desvio padrão foi de 0,164 representando um erro de 1,51% e nas pressões de trabalho de 5 kgf/cm² obteve-se o desvio padrão de 0,248 representado um erro de 5%.

Gráfico I – Análise Estatística Hidroconformação Liga Al-3003F



A Figura 13 apresenta as amostras hidroconformadas. Pode-se observar que na pressão de ruptura as amostras apresentaram a formação de rugas, estrias e a própria ruptura do material. Este efeito foi menor à medida que as amostras foram conformadas com menores pressões.

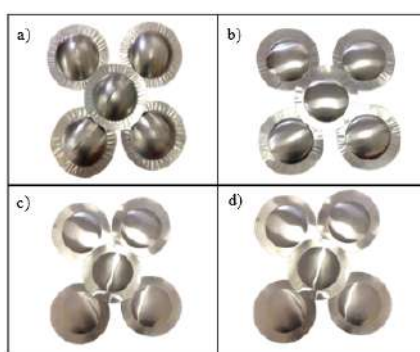


Figura 13 – Amostras hidroconformadas a) 20 kgf/cm², b) 15 kgf/cm², c) 10 kgf/cm² e d) 5 kgf/cm².

Fonte: Autor

A Figura 14 demonstra os tipos de defeitos mais comuns ocasionados em um processo de hidroconformação. Na região 1 destacada é possível observar a linha

de ruptura central do material e a característica observada em todos os testes é de que a ruptura se dá sempre perpendicular ao sentido de laminação do material.

Na região 2, o tipo de defeito ocasionado é o enrugamento, pois é nesta região que o material recebe uma maior deformação devido ao repuxo da semiesfera. E na região 3, observam-se as estrias, ocasionadas pela redução da espessura dada pelo processo de hidroconformação. Normalmente, a região de estrias fica mais aparente ao redor da região de ruptura do material.



Figura 14 – Tipos de defeitos na Hidroconformação: (1) Ruptura, (2) Enrugamento (3) Estrias.

Fonte: Autor

A Figura 15 demonstra com mais clareza a observação sobre o sentido de laminação *versus* o sentido de ruptura do material. Durante os testes de ruptura do material sob o processo de hidroconformação foi possível notar que a ruptura do material se deu perpendicular ao sentido de laminação do material. Cabe salientar ainda que o material não ofereceu nenhum risco ou corte que promovesse um caminho de ruptura, afetando a observação do sentido de rompimento, pois esta é uma característica intrínseca do processo de hidroconformação de chapas.

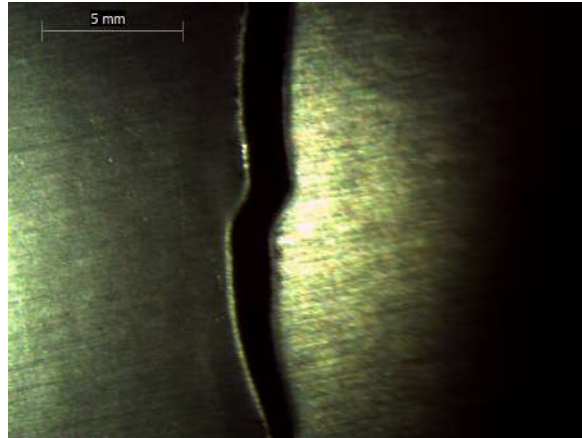


Figura 15 – Identificação do sentido de ruptura perpendicular ao sentido de laminação do material.

Fonte: Autor

Ainda, de acordo com a Figura 16, com o aumento de 40x é possível observar na análise metalográfica na região de ruptura em destaque que, a região próxima à ruptura apresenta um alongamento na sua macroestrutura caracterizando o encruamento do material. Nesta região também ocorre a redução de espessura do material ocasionado pelo processo de hidroconformação. A região superior externa sofre um processo de tração e a região superior interna sofre um processo de compressão.

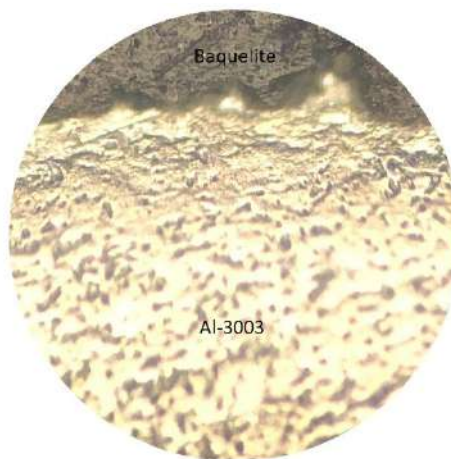


Figura 16 – Metalografia da Liga Al - 3003 (aumento 40x).

Fonte: Autor

Com base nos dados apresentados na Tabela 1, foi possível elaborar o diagrama de hidroconformação da Liga Al-3003 , conforme ilustrado na Figura 17. A construção do diagrama de hidroconformação seguiu a seguinte abordagem: os valores de pressão, obtidos a partir das amostras, foram plotados no eixo horizontal (x), enquanto os dados de força aplicada nas amostras foram representados no eixo

vertical (y). A magnitude da força é determinada pela Equação 6, na qual F corresponde à força (N), A representa a área (cm²), e a pressão é indicada por P (kgf/cm²).

$$P = F/A \quad (6)$$

Após a conversão dos valores, conectam-se as coordenadas, identificando-as por região. Essas regiões são discernidas tanto visualmente quanto por meio de técnicas de microscopia óptica. É possível identificar a região de zona segura de hidroconformação, caracterizada pela ausência de defeitos mecânicos. Após a zona segura, inicia-se a região de escoamento, seguida por enrugamento e ruptura. Pode-se observar também a existência de linhas tracejadas e linhas sólidas: as linhas tracejadas indicam a parte dimensionada pelo autor Singh, que caracteriza as zonas de hidroconformação; já as linhas sólidas indicam a parte adaptada do diagrama conforme os testes práticos da liga de alumínio Al-3003 em específico. Também deve-se considerar para esta adaptação, as condições experimentais realizadas neste estudo, uma vez que o dispositivo desenvolvido neste trabalho utiliza um sistema de fechamento mecânico estático pelo sistema de parafusos, mantendo a força de retenção constante durante os ensaios. A partir desse diagrama, torna-se viável a aplicação em setores industriais e automotivos, pois sua representação reflete de maneira prática o comportamento do material. Além disso, ele serve como parte integrante da documentação técnica e análise do projeto, auxiliando os engenheiros na utilização desta liga específica.

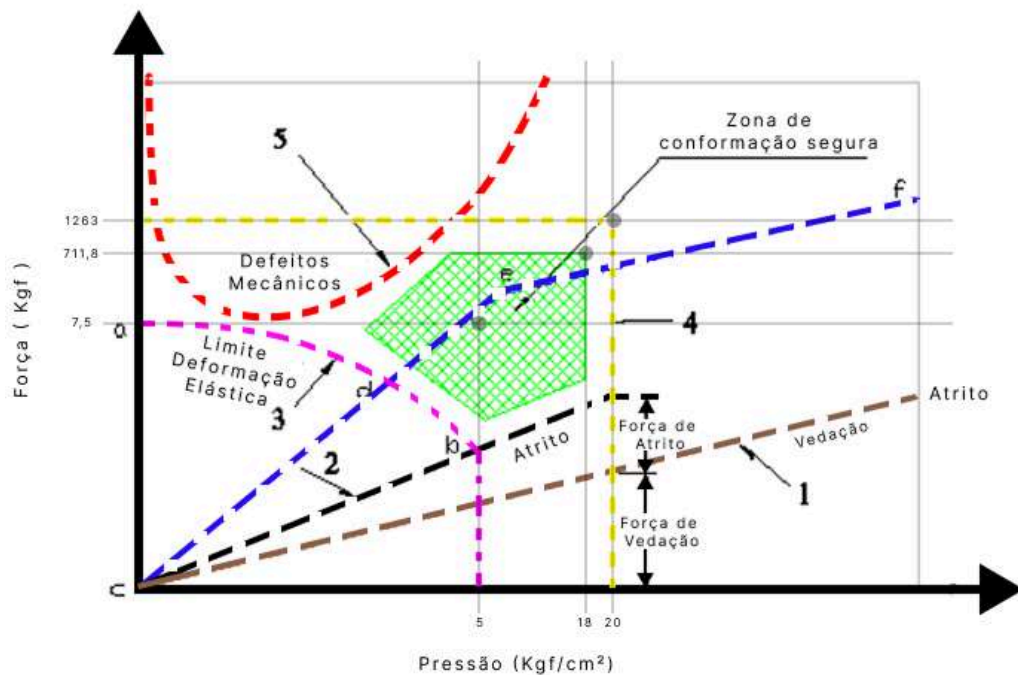


Figura 17 – Diagrama de Hidroconformação Liga Al - 3003 F.

Fonte: Adaptado de Singh (2003)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de hidroconformação é um tema novo para o Brasil e para a região da Serra Gaúcha, conhecido pólo metal mecânico, visto que em sua maioria os processos aplicados geram em torno da estampagem. Ainda assim, vale salientar a importância da utilização do processo de hidroconformação para a fabricação de peças e produtos nos quais as exigências de precisão são altas. Possivelmente, o alto custo dos equipamentos se justificaria com a utilização de automação e a eliminação de etapas em um processo comparado com a estampagem. Diante das dificuldades de encontrar fornecedores para hidroconformação, o estudo deste trabalho deu-se no desenvolvimento do diagrama de hidroconformação para a liga de alumínio Al-3003, uma das ligas mais comuns e utilizadas na indústria, visto o seu baixo custo de aquisição para a elaboração dos testes. Ainda, a escolha da liga de alumínio se deu pela capacidade do equipamento, limitada pela sua capacidade de pressão hidráulica.

Os resultados foram satisfatórios, visto que todos os testes mantiveram repetibilidade. Além disso, foi possível estabelecer, através dos dados coletados, o diagrama de hidroconformação da liga AL-3003.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHN, H.; KUUTILA, N. E.; POURBOGHRAAT, F. **MECHANICAL ANALYSIS OF THERMO-HYDROFORMING OF A FIBER-REINFORCED THERMOPLASTIC COMPOSITE HELMET USING PREFERRED FIBER ORIENTATION MODEL**. *Journal of Composite Materials*, v. 52, n. 23, p. 3183–3198, 1 set. 2018.

ASHBY, Michael; SHERCLIFF, Hugh; CEBON, David. **MATERIAIS: ENGENHARIA, CIÊNCIA, PROCESSAMENTO E PROJETO**. Tradução de Arlete Simille Marques. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

BELL, C. et al. **ENABLING SHEET HYDROFORMING TO PRODUCE SMALLER RADII ON AEROSPACE NICKEL ALLOYS**. *International Journal of Material Forming*, v. 12, n. 5, p. 761–776, 1 set. 2019.

BELL, C. et al. **A STATE OF THE ART REVIEW OF HYDROFORMING TECHNOLOGY: ITS APPLICATIONS, RESEARCH AREAS, HISTORY, AND FUTURE IN MANUFACTURING**. *International Journal of Material Forming* Springer, 1 set. 2020.

BLALA, H. et al. **AN ANALYSIS OF PROCESS PARAMETERS IN THE HYDROFORMING OF A HEMISPHERICAL DOME MADE OF FIBER METAL LAMINATE**. *Applied Composite Materials*, v. 28, n. 3, p. 685–704, 1 jun. 2021.

CHEN, D. et al. **EVALUATION OF NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON THE HYBRID SHEET HYDROFORMING PROCESS TO PRODUCE A NOVEL HIGH-CAPACITY ENGINE OIL PAN**. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 97, n. 9–12, p. 3625–3636, 1 ago. 2018.

DAVIM, J.P; MAGALHÃES, A.G. **ENSAIOS MECÂNICOS E TECNOLÓGICOS**. Publindústria, Edições Técnicas, 2010.

FATEMI, A.; MOROVVATI, M. R.; BIGLARI, F. R. **THE EFFECT OF TUBE MATERIAL, MICROSTRUCTURE, AND HEAT TREATMENT ON PROCESS RESPONSES OF TUBE HYDROFORMING WITHOUT AXIAL FORCE**. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 68, n. 1–4, p. 263–276, 1 set. 2013.

GHALEB, A. M. et al. **A NEW METHOD TO PRODUCE T-SHAPED TUBULAR FITTINGS WITH EXPERIMENTAL AND SIMULATION RESULTS**. *PLoS ONE*, v. 14, n. 4, 1 abr. 2019.

GROOVER, Mikell P. **INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

HASHEMI, A. et al. **A NEW SIMULATION-BASED METAHEURISTIC APPROACH IN OPTIMIZATION OF BILAYER COMPOSITE SHEET HYDROFORMING.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 39, n. 10, p. 4011–4020, 1 out. 2017.

HASHEMI, A.; GOLLO, M. H.; SEYEDKASHI, S. M. H. **APPLICATION OF A NEW INTEGRATED OPTIMIZATION APPROACH IN SHEET HYDROFORMING PROCESS.** Mechanics and Industry, v. 19, n. 3, 2018.

HU, G.; PAN, C. **INVESTIGATION ON DEFORMATION BEHAVIOR OF MAGNESIUM ALLOY SHEET AZ31B IN PULSATING HYDROFORMING.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, v. 235, n. 1–2, p. 198–206, 1 jan. 2021.

IORIO, L.; MASPERO, E.; STRANO, M. **HYDROFORMING OF LOCALLY HEAT TREATED TUBES.** Journal of Manufacturing Processes Elsevier Ltd, , 2014.

JIN, K. et al. **A MODIFIED ISOTROPIC–KINEMATIC HARDENING MODEL TO PREDICT THE DEFECTS IN TUBE HYDROFORMING PROCESS.** Journal of Materials Engineering and Performance, v. 26, n. 11, p. 5188–5196, 1 nov. 2017.

LANG, L. et al. **ANALYSIS OF THE FLOW PROPERTY OF ALUMINUM ALLOY AA6016 BASED ON THE FRACTURE MORPHOLOGY USING THE HYDROFORMING TECHNOLOGY.** AIP Advances, v. 7, n. 9, 1 set. 2017.

LIN, S. L.; CHEN, Z. W.; CHEN, F. K. **A STUDY ON LOCALIZED EXPANSION DEFECTS IN TUBE HYDROFORMING.** Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A, v. 41, n. 2, p. 149–159, 17 fev. 2018.

LIU, W.; CHEN, Y. Z.; YUAN, S. J. **MECHANISM ANALYSIS ON THICKNESS DISTRIBUTION OF ALUMINUM ALLOY HEMISPHERICAL SHELLS IN DOUBLE-SIDED SHEET HYDROFORMING.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 89, n. 5–8, p. 2011–2020, 1 mar. 2017.

LIU, X. J. et al. **CONSTRUCTION OF 6061-T6 ALUMINUM ALLOY CONSTITUTIVE MODEL BASED ON HOT BULGING TEST AND STUDY ON THE NON-ISOTHERMAL HYDROFORMING PROCESS.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 109, n. 5–6, p. 1625–1641, 1 jul. 2020.

REDDY, P. V.; REDDY, B. V.; RAMULU, P. J. **EFFECT OF HEAT TREATMENT TEMPERATURES ON FORMABILITY OF SS 304 DURING TUBE HYDROFORMING PROCESS.** SN Applied Sciences, v. 2, n. 2, 1 fev. 2020.

RUAN, S.; LANG, L.; GE, Y. **Hydroforming Process for an Ultrasmall Bending Radius Elbow.** Advances in Materials Science and Engineering, v. 2018, 2018.

SEONG, H. et al. **A forming process design for a non-welded metal seal**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 98, n. 5–8, p. 1989–2001, 1 set. 2018.

SINGH, H. et al. **FUNDAMENTALS OF HYDROFORMING**. Society of Manufacturing Engineers, 2003.

SOLTANPOUR, M.; FAZLI, A.; NIARAKI, R. J. **HIGH SPEED HYDROFORMING AND DIRECT QUENCHING: AN ALTERNATIVE METHOD FOR PRODUCTION OF HOT STAMPED PARTS WITH HIGH PRODUCTIVITY**. Procedia Engineering. Anais...Elsevier Ltd, 2017.

TÜRKÖZ, M. et al. **NUMERICAL OPTIMIZATION OF WARM HYDROMECHANICAL DEEP DRAWING PROCESS PARAMETERS AND ITS EXPERIMENTAL VERIFICATION**. Journal of Manufacturing Processes, v. 57, p. 344–353, 1 set. 2020.

VELHO, J. ANDERSON. **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO EM MATERIAIS HIDROCONFORMADOS SUBMETIDOS A FLUIDO AQUECIDO**. Repositório Cruzeiro do Sul, 13 jul. 2021.

VENKATESHWAR REDDY, P.; VEERABHADRA REDDY, B. **EFFECT OF TUBE MATERIAL AND HEAT TREATMENT TEMPERATURES ON TUBE FORMABILITY DURING TUBE HYDROFORMING PROCESS**. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, v. 101, n. 6, p. 991–998, 1 dez. 2020.

VLACK, Van; HALL, Lawrence. **PRINCÍPIOS DE CIÊNCIA DOS MATERIAIS**. Traduzido pelo Eng. Luiz Paulo Camargo Ferrão – São Paulo: Blucher, 2015.

WEBER, F. et al. **ANALYTICAL PROCESS DESIGN FOR INTERFERENCE-FIT JOINING OF RECTANGULAR PROFILES**. Journal of Materials Processing Technology, v. 276, 1 fev. 2020.

WINTER, S. et al. **PROCESSING Q&P STEELS BY HOT-METAL GAS FORMING: INFLUENCE OF LOCAL COOLING RATES ON THE PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF A 3RD GENERATION AHSS**. Journal of Materials Processing Technology, v. 293, 1 jul. 2021.

ZARINI, S. et al. **FORMABILITY ENHANCEMENT OF AL 6060 SHEETS THROUGH FIBER LASER HEAT TREATMENT**. International Journal of Material Forming, v. 10, n. 5, p. 741–751, 1 out. 2017.

ZHANG, Q. et al. **APPLICATION OF THE MODIFIED CRITICAL VOIDS EXPANSION RATIO CRITERION TO THE PREDICTION OF THE FORMING LIMIT OF 6016-O ALUMINUM ALLOY**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 98, n. 5–8, p. 2069–2082, 1 set. 2018.

ZHOU, B. J.; XU, Y. C. **THE EFFECT OF UPPER SHEET ON WRINKLING AND THICKNESS DISTRIBUTION OF FORMED SHEET PART USING DOUBLE-LAYER SHEET HYDROFORMING**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 99, n. 5–8, p. 1175–1182, 1 nov. 2018.

ZHOU, B. J.; XU, Y. C.; ZHANG, Z. C. **RESEARCH ON THE SELECTION PRINCIPLE OF UPPER SHEET IN DOUBLE-LAYER SHEETS HYDROFORMING.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 109, n. 5–6, p. 1663–1669, 1 jul. 2020

4 ARTIGO 2 - INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO NA LIGA AA 3003 F APLICADAS AO PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO

O artigo “Influência do tratamento térmico de recozimento na liga AA 3003 F aplicadas ao processo de hidroconformação”, publicado na revista Derecho y Cambio Social (Qualis A2 – CAPES), analisa como o recozimento afeta as propriedades mecânicas da liga de alumínio AA 3003F após o processo de hidroconformação.

Amostras da liga AA 3003F foram submetidas a hidroconformação em diferentes pressões (5, 10, 15 e 18 kgf/cm²) e depois recozidas a 250 °C, 325 °C e 450 °C. Os ensaios mecânicos indicaram que o recozimento a 250 °C resultou no melhor desempenho, com aumento de 14% no limite de ruptura e melhoria de 60% na altura de conformação, além de rugosidade média de 0,65 µm, considerada adequada para uso industrial.

A análise microestrutural revelou encruamento nas regiões de ruptura, mas sem alterações significativas na estrutura do material. Assim, conclui-se que a associação entre hidroconformação e recozimento otimiza as propriedades mecânicas da liga AA 3003F, tornando-a indicada para aplicações que demandam leveza, resistência e boa conformabilidade.

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

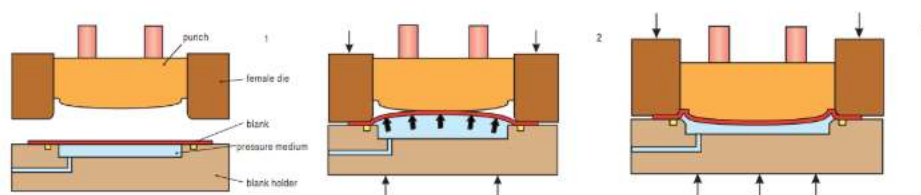
A hidroconformação, também conhecida como conformação por pressão de fluidos, é uma técnica que tem suas origens no início do século XX e foi inicialmente aplicada em áreas como caldeiras a vapor, instrumentos musicais e membros artificiais. Durante o período de 1950 a 1985, o processo evoluiu para a 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.

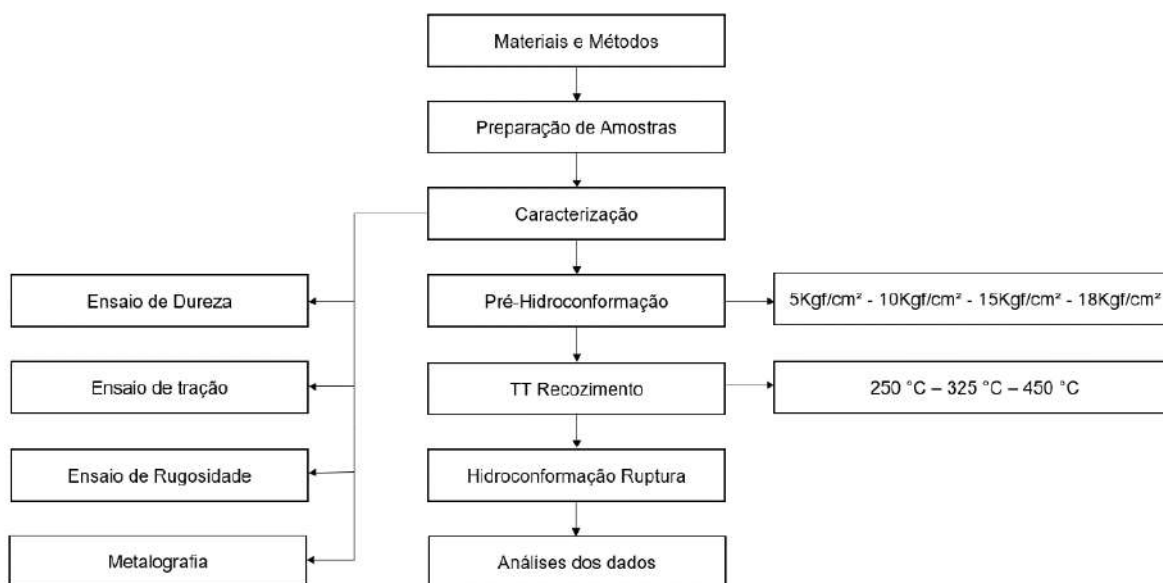
Especificamente, o recozimento para alívio de tensões é uma técnica utilizada para eliminar as tensões residuais internas formadas durante processos como deformação a frio e soldagem. Essas tensões residuais podem comprometer significativamente as propriedades mecânicas do material, como a ductilidade 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.

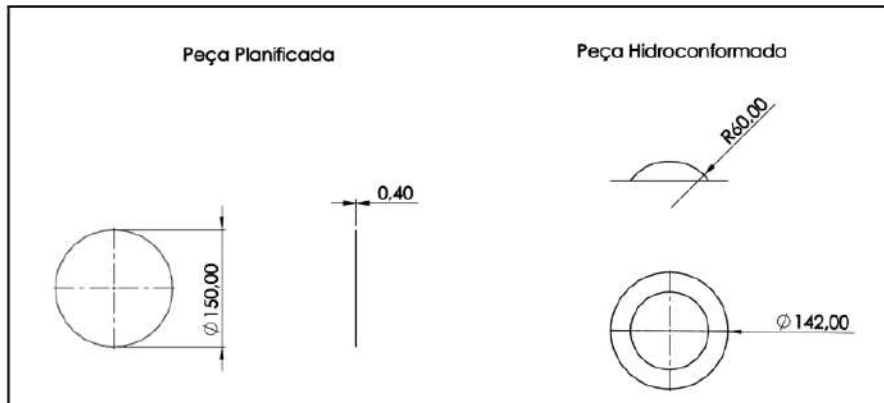


Figura 4

Processo de hidroconformação.

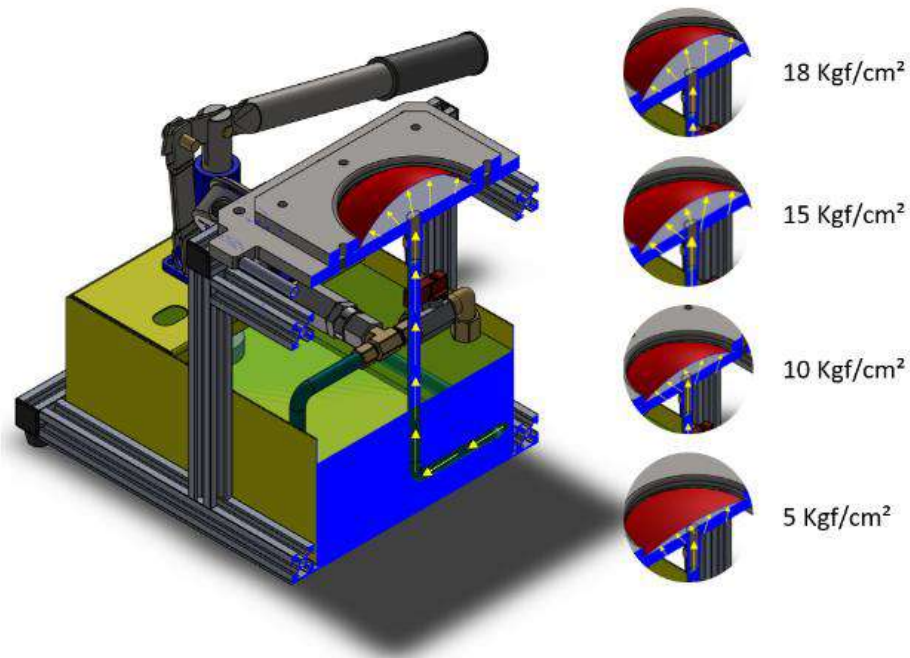
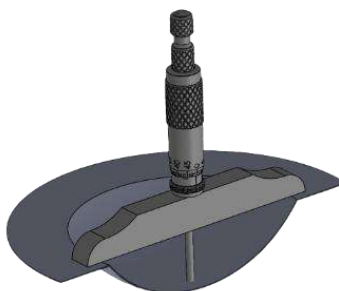


Figura 5

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 (Ra) 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.

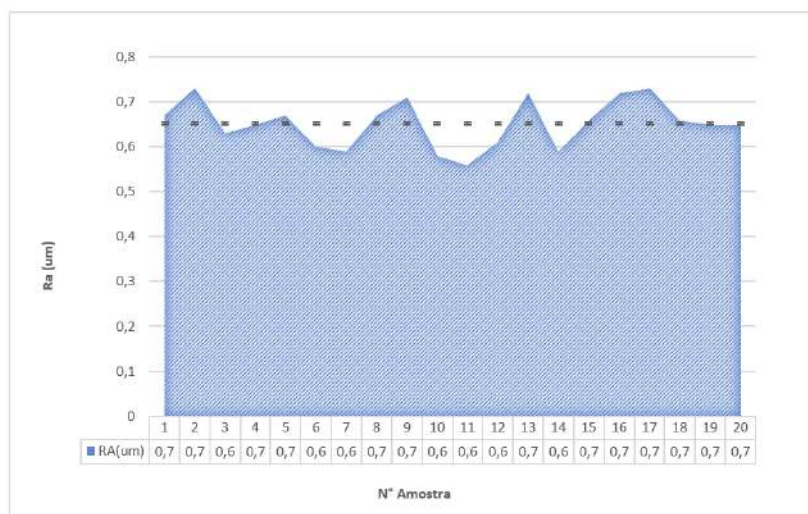
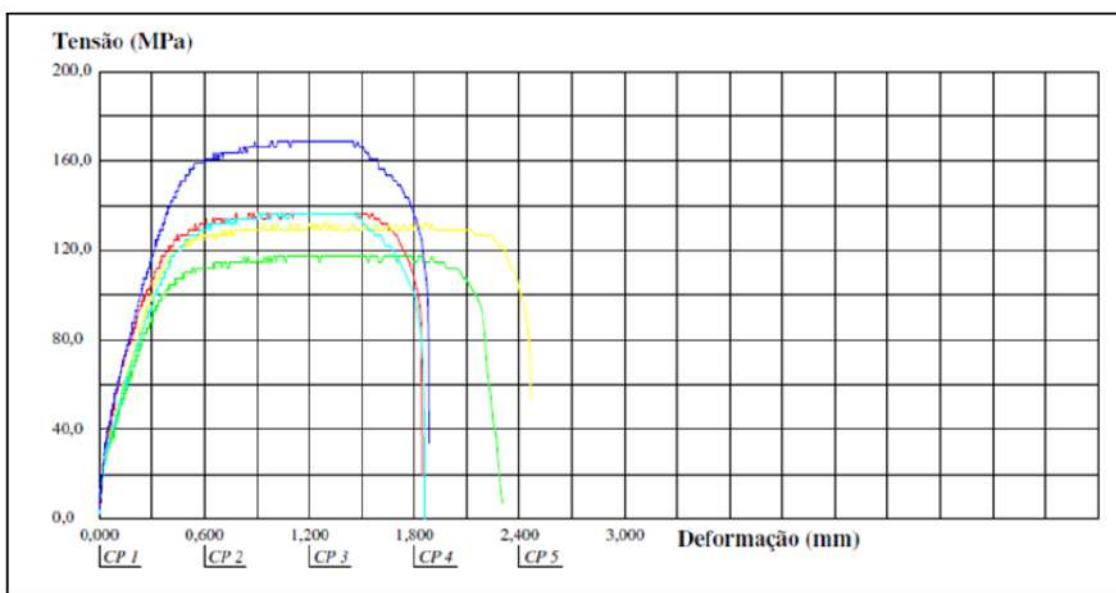


Figura 7

Ensaio de Tração na liga de alumínio AA 3003F.

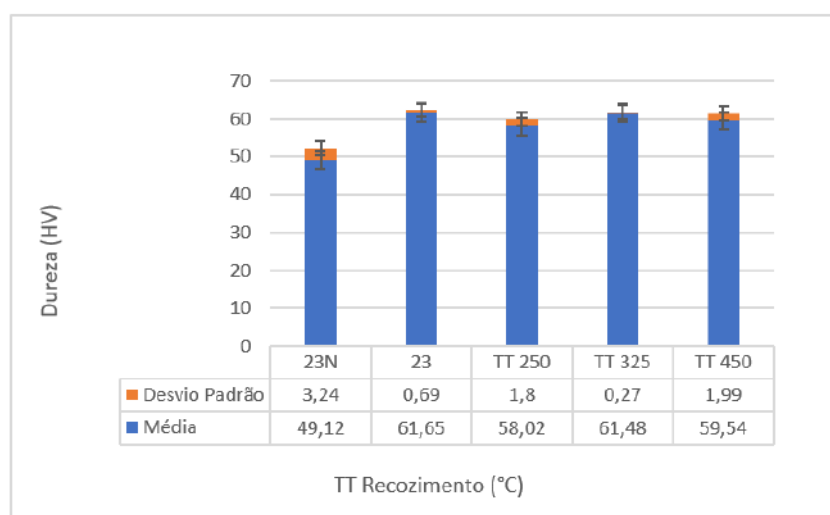


De acordo com os dados apresentados na Figura 8, o ensaio de dureza indicou que a hidroconformação resultou no aumento da dureza do material. Esse comportamento está relacionado ao encruamento, que eleva a densidade de discordâncias na rede cristalina, dificultando a mobilidade dos planos de deslizamento e, conseqüentemente, 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.



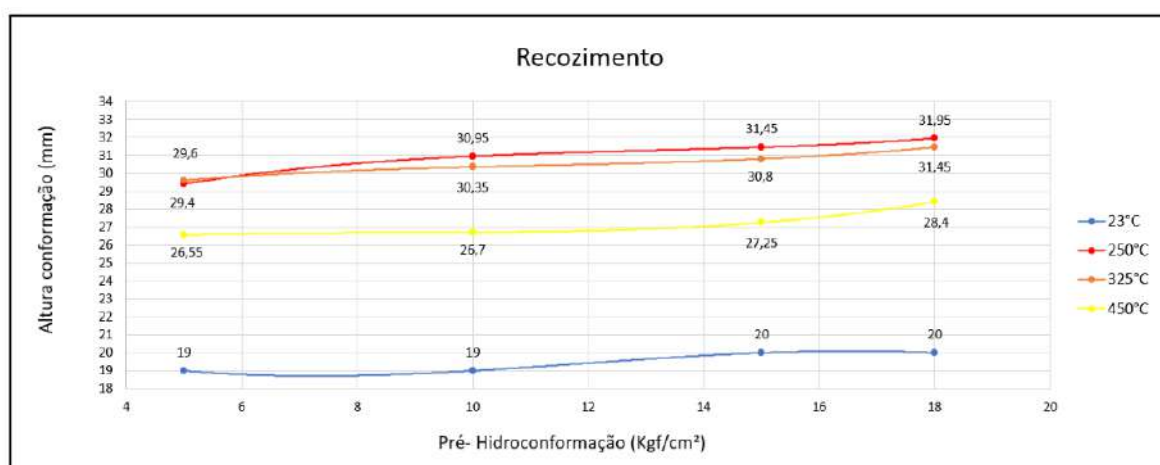
Embora as diferenças entre as condições encruada e recozida não tenham sido estatisticamente significativas como mostra a Figura 8, os resultados obtidos estão de acordo com o comportamento típico das ligas da série 3xxx quando submetidas à deformação a frio seguida de tratamentos térmicos de alívio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

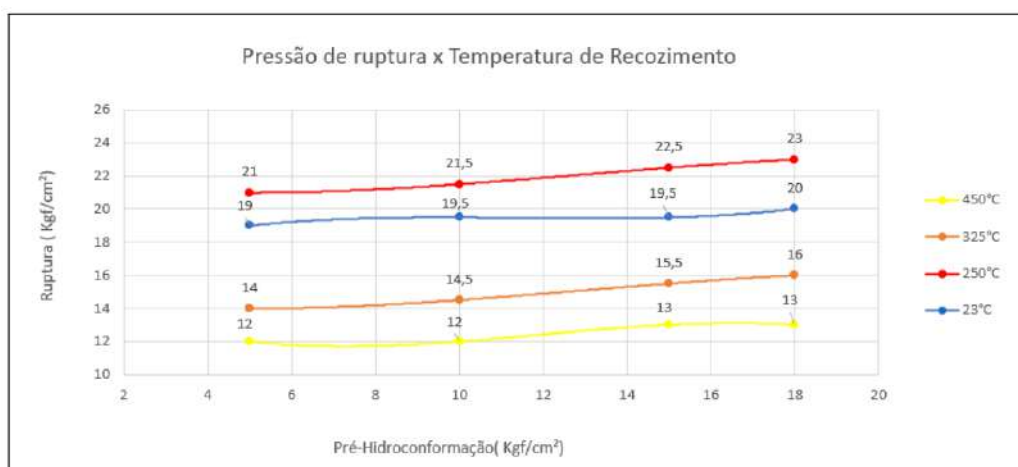
Figura 9

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*

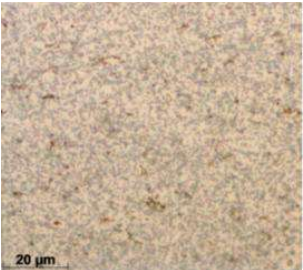

De acordo com Barbosa (2014), as ligas da série 3XXX, do sistema Al-Mn, não são tratáveis termicamente por precipitação, obtendo resistência mecânica principalmente por encruamento. Microestruturalmente, apresentam matriz de alumínio com manganês parcialmente dissolvido e fases intermetálicas formadas 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 alumínios, 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 conseqüente aumento da resistência mecânica, típico de ligas não tratáveis por precipitação.

Tabela 1

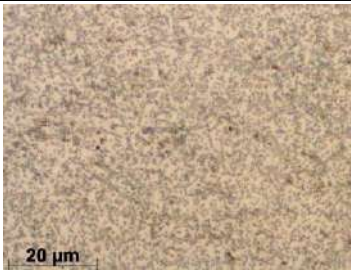
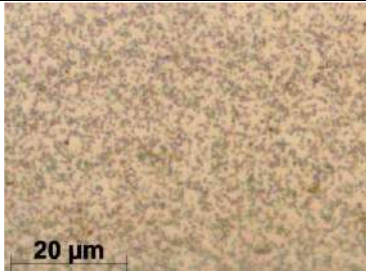
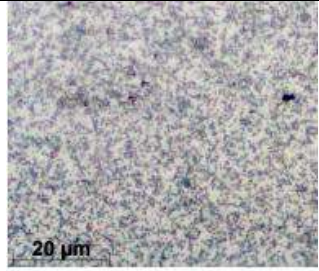
Metalografias da liga AA 3003F - para comparação, a micrografia de uma liga AA 3003O.

		
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 (fsw) 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 épitaxiales 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.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento dos dois estudos permitiu uma análise aprofundada do processo de hidroconformação aplicado à liga de alumínio Al-3003, com ênfase na construção do diagrama de conformação e na influência do tratamento térmico de recozimento sobre o desempenho mecânico do material. A partir desses trabalhos, foi possível atingir os objetivos propostos e demonstrar que a hidroconformação, apesar de ainda pouco difundida no Brasil e especialmente na região da Serra Gaúcha, representa uma alternativa tecnológica promissora para a fabricação de componentes com alto grau de precisão dimensional e integridade estrutural.

No primeiro artigo, a definição do diagrama de hidroconformação para a liga Al-3003 representou um avanço significativo, visto que se trata de uma base de dados essencial para a aplicação do processo em escala industrial. Os ensaios realizados apresentaram resultados consistentes e repetíveis, demonstrando a viabilidade do processo mesmo com as limitações de pressão do equipamento disponível. A escolha da liga também se mostrou acertada, tanto pela compatibilidade com o equipamento quanto pelo seu amplo uso na indústria.

Já o segundo estudo complementa o primeiro ao investigar a influência do tratamento térmico de recozimento, com destaque para a temperatura de 250 °C, que se mostrou eficaz na recuperação da ductilidade do material encruado durante o processo de conformação. A melhoria de até 60% na altura de conformação e o aumento no limite de ruptura reforçam a importância da integração entre os parâmetros térmicos e mecânicos para a otimização do processo. Dessa forma, evidencia-se que a combinação adequada entre conformação e tratamentos térmicos pode ampliar significativamente o desempenho da liga, tornando-a mais competitiva para aplicações que exigem estruturas leves e resistentes, como no setor automotivo.

5.1 Possibilidades de trabalhos futuros

Como possibilidade de trabalhos futuros, recomenda-se a expansão da pesquisa para outras ligas metálicas de interesse industrial, como aço inoxidável, aço carbono e

latão, além da análise comparativa de diferentes ciclos de recozimento e sua influência sobre a anisotropia e o comportamento mecânico direcional das peças hidroconformadas. A realização de ensaios de tração e a análise do tamanho de grão também podem trazer informações relevantes para a correlação entre propriedades mecânicas e microestruturais. Essas investigações contribuirão para consolidar o conhecimento sobre hidroconformação e ampliar sua aplicação na indústria nacional.

Anexos



Rua Antoninho D. Campagnollo, 33 - CNPJ: 03.245.071/0001-42 - Bairro Floresta
Fone/Fax: (54) 3225-3211 - 95.012-230 - Caxias do Sul/RS - E-mail: mitec@mitec.com.br



Laboratório de Pressão, Vazão e Nível N° 9203

Página 1 de 2

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°: 7367/24

Versão: 32 - Data: 20/03/2024

CLIENTE

Solicitante: Mecaniza Eng. e Tecnologia Ltda.
Endereço: Av. Amabile Faoro Marcon, 682

Cidade: Caxias do Sul
Estado: RS

DADOS DO EQUIPAMENTO

Descrição: Manômetro de 0 - 60 kgf/cm²
Marca: Famabras
N° de Identificação: MA-01

Resolução: 1 kgf/cm²
N° do Fabricante: Não consta

PADRÕES

Código	Descrição	N° Certificado	Laboratório	Validade
MPT-002	Manômetro digital com transmissor de pressão de 0 - 100 bar	LMP339591/22-1	WIKARBC	31/03/24
EP-005	Escala padrão de aço de 0 - 300 mm	9499/22	MITECRMRS	31/05/27

REFERÊNCIAS

Procedimento (s) de Calibração: MTC-M-012 Rev. 21 **Norma Técnica:** NBR 14105-1 de Mar/2013
Método: Calibração por comparação, utilizando escala padrão de aço e manômetro digital.
Condições Ambientais: **Temperatura:** 20 ± 2 °C **Umidade Relativa:** 60 ± 10 %
Data do Recebimento: 20/03/2024 **Data da Calibração:** 27/03/2024 **Data da Emissão:** 28/03/2024

OBSERVAÇÕES

Não há.

Este certificado somente pode ser reproduzido por inteiro e com prévia autorização da Mitec.

Resultados válidos para o estado atual do instrumento em condições ideais de calibração.

Este certificado não tem valor para fins de metrologia legal e se limita exclusivamente ao instrumento calibrado.

A incerteza de medição expandida, multiplicada pelo (s) fator (es) de abrangência "k", para um nível de confiança de aproximadamente 95%, foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Este certificado foi assinado e emitido eletronicamente através do software Cali Labe e é válido desta forma.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N^o: 7367/24

Pontos de Calibração		Unidade: kgf/cm ²			
SI (MPa)	VN	1 ^o Ciclo		2 ^o Ciclo	
		Avanço	Retorno	Avanço	Retorno
0,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,961	20,0	20,6	20,3	20,6	20,3
3,942	30,0	30,6	30,4	30,6	30,4
3,923	40,0	40,5	40,4	40,5	40,4
4,903	50,0	50,5	50,4	50,5	50,4
5,884	60,0	60,2	60,2	60,2	60,2

Resultados (%)			IM (σ)	k	Veff
Denominação					
Erro Máximo	Histerese	Repetibilidade			
-1,00	0,50	0,00	0,17	2,00	>100

Fatores de Conversão: 1 kgf/cm² = 0,0980665 MPa, Unidade de Pressão do Sistema Internacional = 0,980665 bar.

—Fim—

RICARDO
ZILIO:89088921091

Assinado de forma digital por
 RICARDO ZILIO:89088921091
 Dados: 2024.03.28 11:35:59 -03'00'

Definições:	
VN:	Valor Nominal (Indicação do Instrumento)
IM:	Incerteza de Medição
Veff:	Graus de Liberdade Efetivos
Erro Máximo (%):	Erro máximo de medição do manômetro, obtido em um dos ciclos nos sentidos ascendente e descendente, dividido pela amplitude da faixa nominal e multiplicado por 100.
Histerese (%):	Diferença máx.ima entre duas medições ascendentes e descendentes do teste em um dos ciclos na mesma pressão, considerando os dois ciclos, dividido pela amplitude da faixa nominal e multiplicado por 100.
Repetibilidade (%):	Diferença máx.ima entre duas medições do teste na mesma pressão o mesmo sentido, considerando avanço e retorno, dividido pela amplitude da faixa nominal e multiplicado por 100.

REFERÊNCIAS ADICIONAIS

BLALA, H. et al. An Analysis of Process Parameters in the Hydroforming of a Hemispherical Dome Made of Fiber Metal Laminate. *Applied Composite Materials*, v. 28, n. 3, p. 685–704, 1 jun. 2021.

DAVIM, J.P; MAGALHÃES, A.G. ENSAIOS MECÂNICOS E TECNOLÓGICOS. Publindústria, Edições Técnicas, 2010.

VLACK, Van; HALL, Lawrence. PRINCÍPIOS DE CIÊNCIA DOS MATERIAIS. Traduzido pelo Eng. Luiz Paulo Camargo Ferrão – São Paulo: Blucher, 2015.