

Estampagem incremental de aço inoxidável austenítico de baixo níquel: influência do manganês como estabilizador da fase γ

Henrique Cechinel Casagrande ^{1*} 

Daniel Fritzen ² 

Anderson Daleffe ² 

Pedro Henrique Menegaro Possamai ² 

Gilson de March ³ 

Marcelo Marcos Amoroso ³ 

Elton Costa Gomes ² 

Jovani Castelan ² 

Resumo

A estampagem incremental tem se destacado como uma alternativa eficiente para a conformação de chapas metálicas, especialmente de ligas com elevada resistência mecânica. Este trabalho avalia o comportamento mecânico, microestrutural e a formabilidade de um aço inoxidável austenítico com elevado teor de manganês, bem como a influência da geometria da peça no comportamento de fratura durante a estampagem incremental. A composição química foi determinada por espectroscopia de emissão óptica, caracterizando uma liga austenítica modificada. Ensaio de tração foram realizados em diferentes orientações em relação à direção de laminação, acompanhados por análise metalográfica. A formabilidade foi avaliada por meio da curva limite de conformação (CLC) e da curva limite de fratura (CLF), obtidas por estampagem incremental. Os resultados indicaram elevada resistência mecânica, comportamento anisotrópico e maior formabilidade associada aos caminhos de deformação não proporcionais.

Palavras-chave: Aço inoxidável austenítico; Estampagem incremental; CLC.

Incremental forming of low-nickel austenitic stainless steel: influence of manganese as a γ -phase stabilizer

Abstract

Incremental sheet forming has emerged as an efficient alternative for shaping metallic sheets, particularly high-strength alloys. This study evaluates the mechanical behavior, microstructure, and formability of a high-manganese austenitic stainless steel, as well as the influence of part geometry on fracture behavior during incremental sheet forming. The chemical composition was determined by optical emission spectroscopy, confirming a modified austenitic alloy. Tensile tests were performed along different orientations relative to the rolling direction, followed by metallographic analysis. Formability was assessed using the Forming Limit Curve (FLC) and Fracture Forming Limit Curve (FFLC), obtained through incremental sheet forming tests. The results revealed high mechanical strength, anisotropic behavior, and enhanced formability associated with non-proportional strain paths.

Keywords: Austenitic stainless steel; Incremental sheet forming; FLC.

¹Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

²Centro Universitário UNISATC, Departamento de Engenharia de Mineração, Metalurgia e Materiais, Criciúma, SC, Brasil.

³Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

*Autor correspondente: henrique_cechinel@hotmail.com

E-mails: daniel.fritzen@satc.edu.br; anderson.daleffe@satc.edu.br; pedropossamai@hotmail.com; gilson.march@satc.edu.br; marcelo.amoroso@satc.edu.br; eltoncri@gmail.com; jovani.castelan@satc.edu.br



1 Introdução

A estampagem incremental (*Incremental Sheet Forming* – ISF) é uma técnica de conformação de chapas metálicas que vem tendo destaque na indústria devido à sua flexibilidade e capacidade de produzir peças complexas com baixo custo ferramental, sem a necessidade de matrizes específicas para cada geometria [1-8]. Diferente dos processos convencionais, em que toda a chapa é deformada simultaneamente, na estampagem incremental a deformação é aplicada de forma gradual e progressiva, geralmente por meio de uma ferramenta que segue trajetórias controlada por CNC sobre a superfície da peça. Essa abordagem oferece vantagens significativas, incluindo maior flexibilidade no design, redução de custos, menor consumo de material e possibilidade de ajustes rápidos para diferentes geometrias e espessuras de chapa [9-16].

Com o avanço da manufatura digital e da automação, o ISF vem sendo amplamente estudado para aplicações de prototipagem rápida, personalização de peças biomédicas e fabricação de componentes automotivos e aeroespaciais [4,5,12]. Além disso, essa técnica pode ser potencializada com a integração a sistemas de controle híbridos e algoritmos de *machine learning* para compensação geométrica e previsão de defeitos, ampliando sua precisão dimensional e reprodutibilidade [14,15].

A técnica pode ser aplicada a uma variedade de materiais metálicos, cada um com características próprias que influenciam o comportamento durante a conformação. Entre os materiais comumente utilizados estão o aço ao carbono [17-19], apreciado por sua resistência mecânica e disponibilidade; o alumínio [20-26], valorizado por sua leveza e excelente relação resistência-peso; o latão, utilizado por sua boa conformabilidade e propriedades estéticas [27-29]; ligas especiais tal como o titânio, utilizada na área de medicina [30-34]; e diversas ligas metálicas específicas, que podem ser escolhidas de acordo com os requisitos funcionais das peças, ou até mesmo em materiais híbridos, utilizando polímero e metal [35]. A escolha do material adequado é fundamental, pois influencia diretamente na força necessária para a conformação, a ductilidade, o controle do enrugamento e a qualidade superficial da peça final.

Dentre esses materiais, o aço inoxidável austenítico se destaca devido à sua combinação única de resistência mecânica, ductilidade e elevada resistência à corrosão, o que o torna amplamente utilizado em setores como o automotivo, aeroespacial, biomédico e de utensílios domésticos [36-38]. Estudos como do comportamento do aço inoxidável 304 na estampagem incremental por exemplo, é de extrema importância [39,40], pois permite identificar limitações do processo, otimizar parâmetros de deformação e garantir a integridade das peças produzidas. Além disso, a análise detalhada do material durante o processo contribui para a previsão de falhas, como trincas ou enrugamento, e para o aprimoramento das práticas industriais [41-43].

Neste contexto, este estudo visa compreender os efeitos do elemento manganês como estabilizador da fase γ em aços inoxidáveis, visto a escassez de estudos relacionados a este tipo de material para estampagem incremental. Um dos trabalhos fundamentais sobre o manganês (Mn) como estabilizador da fase γ é o de Klueh et al. [44], que examina como o Mn modifica o equilíbrio entre austenita, martensita e δ -ferrita em sistemas Fe–Cr. Nesse estudo, o autor mostra que o manganês atua como forte promotor da fase austenítica, embora seu efeito dependa da interação com outros elementos presentes na liga, como o cromo e o carbono.

A influência do manganês também foi quantificada experimentalmente por Wendler et al. [45], que analisaram diferentes composições para determinar a intensidade do efeito austenitizante do Mn. Os autores apresentam resultados que permitem correlacionar a quantidade de Mn com a fração de austenita retida à temperatura ambiente, fornecendo dados importantes para o projeto de novas ligas [46].

Dessa forma, para compreender o desempenho do aço inoxidável em estudo na estampagem incremental, foram realizadas metodologias de caracterização.

Entre elas, destaca-se o ensaio mecânico de tração, que fornece informações sobre a resistência e ductilidade do material, o ensaio de Nakajima, utilizado para determinar a formabilidade e o limite de deformação da chapa, a análise metalográfica dos corpos de prova rompidos, que permite investigar a microestrutura e identificar possíveis alterações decorrentes do processo, e a espectrometria, aplicada para a caracterização química detalhada do material. A combinação desses ensaios oferece uma visão abrangente das propriedades mecânicas, estruturais e químicas do aço inoxidável em estudo, fornecendo subsídios essenciais para a otimização do processo de estampagem incremental e garantindo a qualidade e confiabilidade das peças produzidas.

O ensaio de Nakajima é amplamente utilizado para a determinação experimental da Curva Limite de Conformação (CLC), a qual representa o limite máximo de deformação que uma chapa metálica pode suportar antes da ocorrência de estricção localizada ou ruptura. Trata-se de um dos métodos mais consagrados para avaliação da estampabilidade de chapas metálicas, permitindo correlacionar as deformações principais máximas (ϵ_1) e mínimas (ϵ_2) em diferentes modos de deformação [5,7,12,47,48].

2 Materiais e Métodos

A seguir, são descritos os materiais, procedimentos experimentais e métodos de análise empregados neste estudo.

2.1 Material utilizado

A chapa utilizada neste trabalho consiste em aço inoxidável austenítico, obtido por laminação a frio e com espessura nominal de 0,5 mm. Para a caracterização mecânica, foram confeccionados corpos de prova para ensaio de tração

uniaxial em três orientações distintas em relação ao sentido de laminação da chapa: 0° , 45° e 90° . Esse procedimento possibilita avaliar a anisotropia do material, especialmente quanto ao comportamento de escoamento e alongamento em diferentes direções. Adicionalmente, foram preparadas amostras para o processo de estampagem incremental do tipo *Single Point Incremental Forming* (SPIF), direcionadas à fabricação de dois tipos de geometrias experimentais: cone e pirâmide de ponto único. Esse conjunto de geometrias permite analisar o desempenho do aço inoxidável sob diferentes condições de ângulo de parede, distribuição de deformação e afinamento da espessura, contribuindo para a avaliação da formabilidade e qualidade final das peças produzidas por esse processo.

2.2 Espectrometria de emissão óptica

Para a análise por espectrometria de emissão óptica (OES), foi utilizado um espectrômetro BRUKER modelo Q2 ION, operando a 400 W por 30 s. A amostra foi previamente preparada por meio de seccionamento em um cortador metalográfico Struers, modelo MESOTOM, garantindo uma superfície adequada para o ensaio.

2.3 Ensaio mecânico de tração

Com o objetivo de avaliar a anisotropia da chapa laminada, os corpos de prova foram retirados em três

direções em relação ao sentido de laminação: 0° , 45° e 90° (conforme Figura 1). Para cada orientação, foram realizados três ensaios, assegurando a repetibilidade e confiabilidade dos resultados obtidos.

Os ensaios de tração foram conduzidos com velocidade de deslocamento de 5 mm/min (milímetros por minuto), utilizando uma máquina universal de ensaios com capacidade de 200 kN. Os corpos de prova foram preparados conforme os requisitos da norma ASTM E8, por meio de corte a laser.

2.4 Análise metalográfica

As análises metalográficas foram realizadas por microscopia óptica utilizando um microscópio Olympus SC30. Para a preparação das amostras, os corpos de prova foram seccionados em cortador metalográfico marca Struer, modelo MESOTOM e, posteriormente, submetidos a lixamento sequencial em diferentes granulometrias (80, 120, 200, 320, 400, 600 e 1200), seguido de polimento com suspensão de alumina de 1 μm . Dessa forma, após a fratura nos ensaios de tração, foram examinadas as superfícies dos corpos de prova (Figura 2) para avaliar o comportamento metalúrgico, bem como a morfologia, direção e distribuição dos grãos resultantes do processo de fabricação.

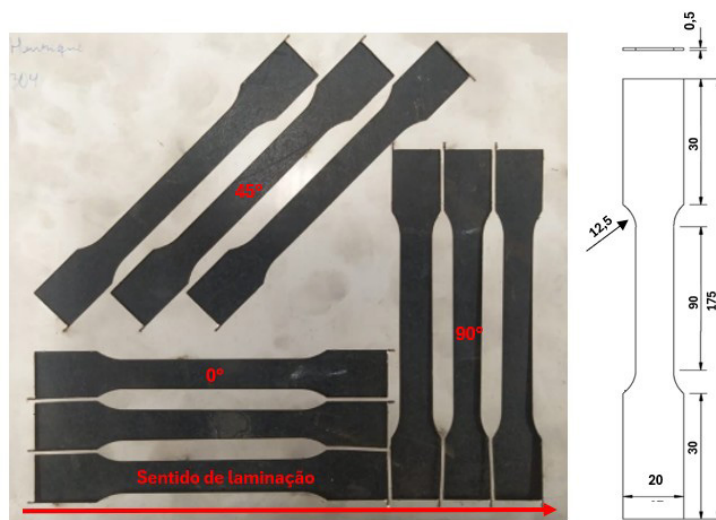


Figura 1. Chapa de aço inoxidável cortadas em três direções em relação ao sentido de laminação (0° , 45° e 90°).



Figura 2. Corpo de prova para análise metalográfica após a fratura no ensaio mecânico de tração para 0° , 45° e 90° em relação ao sentido de laminação.

2.5 Equipamento CNC para estampagem incremental

A estampagem incremental foi realizada em um centro de usinagem Romi D600, equipado com comando CNC e operação em três eixos simultâneos. O equipamento apresenta precisão de posicionamento, garantindo o controle adequado da trajetória da ferramenta e da deformação gradual da chapa.

2.6 Ensaio de Nakajima

A superfície das amostras foi marcada por viscoplasticidade eletroquímica, através da gravação de uma malha de círculos de 2,5 mm de diâmetro.

O processo de corrosão foi realizado utilizando uma fonte de 12 V e eletrólito específico para aços inoxidáveis. Essa técnica possibilita a medição direta das deformações principais após o ensaio, uma vez que os círculos impressos se tornam elipses deformadas nas regiões de maior alongamento, permitindo o cálculo preciso das deformações verdadeiras por meio das equações logarítmicas (Equações 1 e 2):

$$\varepsilon_1 = \ln \left(\frac{d_1}{d_0} \right) \quad (1)$$

e

$$\varepsilon_2 = \ln \left(\frac{d_2}{d_0} \right) \quad (2)$$

Onde d_0 é o diâmetro inicial da marca circular, d_1 e d_2 são os eixos principais da elipse após o ensaio [12,13]. A Figura 3 detalha as regiões onde serão retiradas as medições para a curva limite de conformação. O equipamento para o ensaio de Nakajima se encontra no laboratório de conformação da UNISATC, sendo produzido pela própria universidade.

2.7 SPIF em cone e pirâmide

Os ensaios de estampagem incremental de ponto único (SPIF) foram realizados com o objetivo de avaliar a formabilidade e o comportamento plástico do aço inoxidável

sob diferentes condições geométricas e parâmetros de processamento. Para isso, foram produzidas duas geometrias experimentais: cone truncado e pirâmide de base quadrada, ambas projetadas em ambiente CAD com o software EDGE CAM e convertidas em trajetórias CNC.

Os experimentos foram conduzidos no mesmo CNC Romi D600 de três eixos simultâneos (Figura 4). A ferramenta utilizada possuía ponta hemisférica com diâmetro de 10 mm, confeccionada em aço temperado, fixada em porta-ferramenta rígido e polida para minimizar o atrito com a chapa, além disso, foi utilizado graxa com base de lítio para minimizar o efeito do atrito entre ferramenta e amostra a ser conformada (conforme Figura 4). A chapa de aço inoxidável, com espessura nominal de 0,5 mm, foi rigidamente fixada por grampos e moldura metálica, garantindo a ausência de deslocamento durante o processo. O incremento utilizado para a conformação foi de 0,2 milímetros em espiral para ambas as amostras (em forma de pirâmide e cone).

3 Resultados e discussões

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos neste estudo, acompanhados de suas respectivas análises e discussões.

3.1 Espectroscopia de emissão óptica

A Tabela 1 apresenta a composição química da chapa analisada, inicialmente identificada como aço inoxidável austenítico. Observa-se que, embora alguns elementos estejam dentro das faixas usuais do AISI 304 por exemplo, como o cromo em 13,24% e o baixo teor de carbono (0,183%), a liga exibe discrepâncias significativas em relação às especificações típicas, sobretudo nos teores de níquel e manganês. O teor de níquel encontrado (1,595%) está muito abaixo da faixa convencional do AISI 304 (8–11%), configurando uma composição incompatível com o comportamento totalmente austenítico esperado para esse aço. Em contrapartida, o teor de manganês (9,418%) está consideravelmente elevado em comparação à norma ASTM A240, que normalmente limita Mn em cerca de 2%.

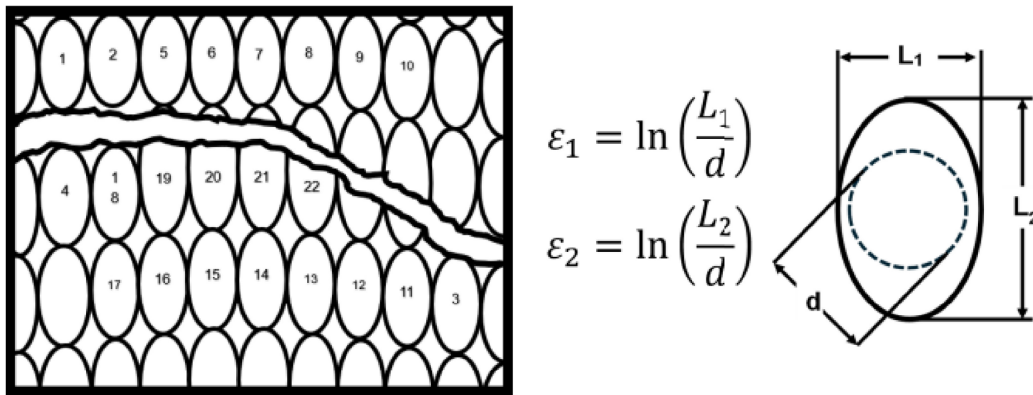


Figura 3. Região de fratura de uma amostra e equações para cálculo da curva limite de conformação. Adaptado de [47].

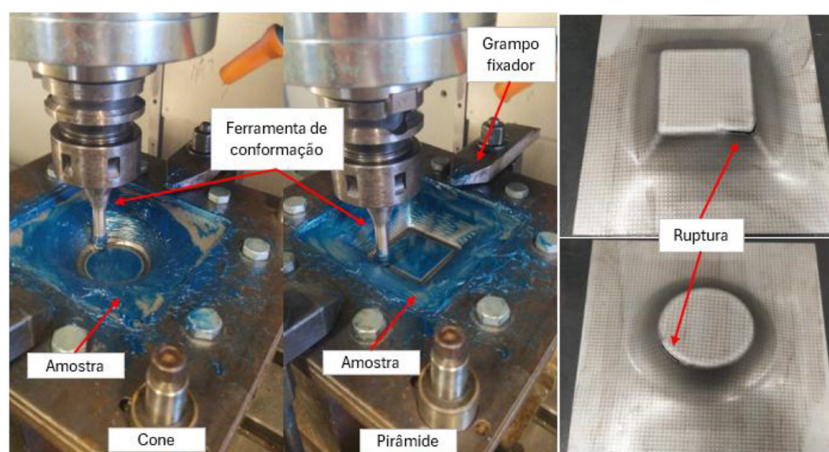


Figura 4. SPIF para base cone e pirâmide durante o processo de conformação e após a ruptura.

Tabela 1. Composição química para o aço inoxidável em estudo

Composição química (%) em massa	% em massa
Carbono (C)	0,183
Silício (Si)	0,483
Manganês (Mn)	9,418
Cromo (Cr)	13,24
Níquel (Ni)	1,595
Molibdênio (Mo)	<0,0100
Ferro (Fe)	Balanço

Apesar disso, teores elevados de Mn são coerentes com composições alternativas de aços inoxidáveis austeníticos de baixo níquel, comumente empregados como substitutos econômicos do 304 em alguns países [49]. O manganês atua como estabilizador da fase austenítica, compensando parcialmente a redução do teor de níquel. Conforme descrito por Schweitzer (Metallic Materials: Physical, Mechanical, and Corrosion Properties) [49], ligas austeníticas modificadas podem conter teores de Mn significativamente superior aos aços inoxidáveis tradicionais, e valores próximos a 9–10% são compatíveis com a faixa apresentada em tabelas de composições de aços austeníticos de baixo custo que utilizam Mn como elemento substitutivo do Ni. Dessa forma, embora esta composição não corresponda ao AISI 304 convencional, ela se alinha ao comportamento descrito por Schweitzer para ligas projetadas para manter estrutura austenítica com redução de níquel por meio do aumento de manganês.

3.2 Ensaio mecânico de tração

Os resultados apresentados na Figura 5 mostram que a orientação 0° (paralela à direção de laminação) apresenta os maiores valores de resistência e ductilidade, comportamento amplamente descrito na literatura de materiais metálicos laminados [50]. Essa superioridade mecânica está associada ao fato de que, ao longo da direção de laminação, os grãos alongados, as

bandas de deformação e a textura cristalográfica preferencial permanecem alinhados com o sentido de aplicação da carga, permitindo uma maior capacidade de acomodação plástica e reduzindo a probabilidade de nucleação de trincas. Os resultados obtidos evidenciam comportamento anisotrópico dependente da orientação em relação à direção de laminação. Observou-se redução significativa da deformação específica para os corpos de prova ensaiados a 45° , enquanto as orientações de 0° e 90° apresentaram valores de alongamento semelhantes. Esse comportamento indica que, para o material analisado, a influência da textura cristalográfica e da microestrutura sobre a ductilidade é mais pronunciada na orientação de 45° , não sendo observada redução expressiva do alongamento na direção de 90° , diferentemente do comportamento frequentemente reportado para algumas chapas laminadas [51,52].

De acordo com [48], diversas ligas inoxidáveis foram desenvolvidas como alternativas ao aço AISI 304 durante e após a Segunda Guerra Mundial, período marcado pela escassez de níquel. Entre essas ligas, destaca-se uma classe em que parte do níquel é substituída por manganês, permitindo reduzir significativamente o teor de Ni sem comprometer a estabilidade da fase austenítica. De acordo com registros históricos de desenvolvimento, a adição de manganês combinada com nitrogênio possibilitou a redução do teor de níquel para valores menores, originando ligas austeníticas de menor custo destinadas a substituir o tipo 304. Embora apresentem resistência mecânica superior à do aço inoxidável 304 convencional, seu desempenho em corrosão é inferior, aproximando-se do observado para o aço tipo 301. Essa diferença decorre da menor estabilidade passiva associada à redução do teor de níquel, mesmo com o efeito estabilizante proporcionado pelo manganês e pelo nitrogênio. Ainda de acordo com [49], a tensão máxima para esses aços austeníticos estabilizados com manganês e nitrogênio fica em torno de 150 ksi, o que equivale a aproximadamente 1034 MPa, e para o alongamento os valores ficam entre 39 – 47%, o que corrobora com os resultados apresentados na Tabela 2.

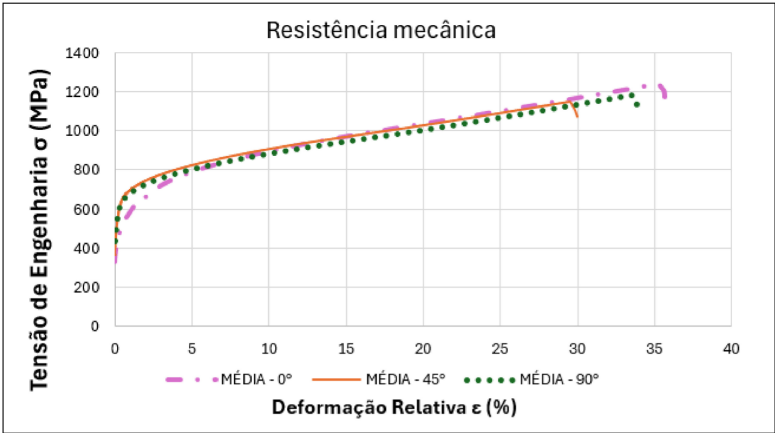


Figura 5. Ensaio mecânico de tração para chapa laminada de aço inoxidável em 0°, 45° e 90° em relação ao sentido de laminação.

Tabela 2. Ensaio mecânico de tração para as três orientações em estudo (0°, 45° e 90°)

Amostras:	Tensão máxima (MPa)	Tensão escoamento (MPa)	Deformação específica (%)
CP 1 – 0°	1263	620	35
CP 2 – 0°	1298	701	37
CP 3 – 0°	1239	711	40
CP 1 – 45°	1218	699	22
CP 2 – 45°	1137	692	30
CP 3 – 45°	1004	661	34
CP 1 – 90°	1176	668	34
CP 2 – 90°	1184	714	35
CP 3 – 90°	1225	706	36
Médias			
CP – 0°	1266,67	677,33	37,33
CP – 45°	1119,67	684,00	28,67
CP – 90°	1195,00	696,00	35,00

Tabela 3. Ensaio mecânico de tração para o aço AISI 304 adaptados de Jaimes et al. [53]

Amostras:	Tensão máxima (MPa)	Tensão escoamento (MPa)	Deformação específica (%)
CP – 0°	550	255	59
CP – 45°	515	251	65
CP – 90°	525	253	66

No entanto, ao comparar o material em estudo com aço inoxidável 304, nota-se diferença em relação as propriedades mecânicas. A Tabela 3 faz uma comparação entre os resultados mecânicos obtidos em relação a literatura.

O aço analisado neste estudo apresenta aproximadamente 9% de manganês em massa, teores superiores aos encontrados em aços inoxidáveis austeníticos convencionais, como o AISI 304. Essa elevação no teor de Mn exerce influência direta sobre o comportamento mecânico observado, especialmente no aumento da resistência mecânica e na redução do alongamento. Do ponto de vista metalúrgico, o Mn atua como estabilizador da fase austenítica, reduzindo a energia de falha de empilhamento e favorecendo mecanismos de deformação como formação de maclas mecânicas (TWIP) e bandas de deslizamento altamente densas (SIP), que contribuem para o endurecimento por deformação [54,55].

Além disso, o Mn promove endurecimento por solução sólida, dificultando o movimento de discordâncias e elevando tanto o limite de escoamento quanto a resistência máxima do material [56].

Essa combinação de mecanismos explica os valores significativamente elevados de tensão máxima obtidos neste estudo, variando entre 1119 e 1298 MPa, e limites de escoamento da ordem de 661 a 720 MPa, superiores aos encontrados em aços 304 laminados convencionais. Jaimes et al. [53], por exemplo, reportam valores típicos de 550 MPa para a tensão máxima e aproximadamente 250 MPa para o limite de escoamento em laminados com alongamentos acima de 59%, evidenciando ductilidade muito superior. Em contraste, o material estudado apresenta deformações específicas médias entre 28% e 37%, indicando perda de ductilidade associada ao maior encruamento e ao fortalecimento microestrutural induzido pelo Mn.

3.3 Análise metalográfica

A microestrutura, observada na Figura 6, é característica de aço inoxidável austenítico, composta majoritariamente por austenita (γ – fase CFC), podendo haver traços de martensita α induzida por deformação, especialmente nas regiões próximas à fratura. Os grãos estão notoriamente alongados ao longo da direção de laminação, evidenciando o intenso encruamento e a textura cristalográfica resultante do processamento.

Durante o ensaio de tração, a carga aplicada atuou paralelamente ao alongamento dos grãos, favorecendo o deslizamento e rearranjo das discordâncias ao longo dos planos ativamente deformáveis. Como consequência, há maior capacidade de deformação plástica, maior alongamento antes da fratura e comportamento mecânico mais favorável nessa orientação. A orientação 0° apresenta a melhor ductilidade e resistência, pois a microestrutura está diretamente alinhada com o sentido da aplicação da carga.

A microestrutura apresentada na Figura 7 também é predominantemente austenítica, porém com um grau

de alongamento dos grãos intermediário, uma vez que a orientação diagonal rompe parte da estrutura alongada pela laminação. Observa-se maior heterogeneidade morfológica, indicando atuação combinada de cisalhamento e tração.

Nessa condição, o material não apresenta total compatibilidade entre a direção da carga e o arranjo microestrutural, o que resulta em mecanismo de deformação misto (cisalhamento e deslizamento planar), propriedades mecânicas intermediárias entre 0° e 90° e início da fratura associado à concentração de deformações locais, com isso a orientação de 45° revela comportamento mecânico intermediário, sendo uma condição de transição da anisotropia induzida pela laminação.

A microestrutura da Figura 8 mantém-se composta por austenita com possível transformação parcial para martensita na fratura, porém os grãos aparecem mais equiaxiais quando comparados às outras imagens. Isso ocorre porque a observação é feita perpendicularmente ao alongamento gerado pela laminação, ocultando o efeito direcional sobre a morfologia.

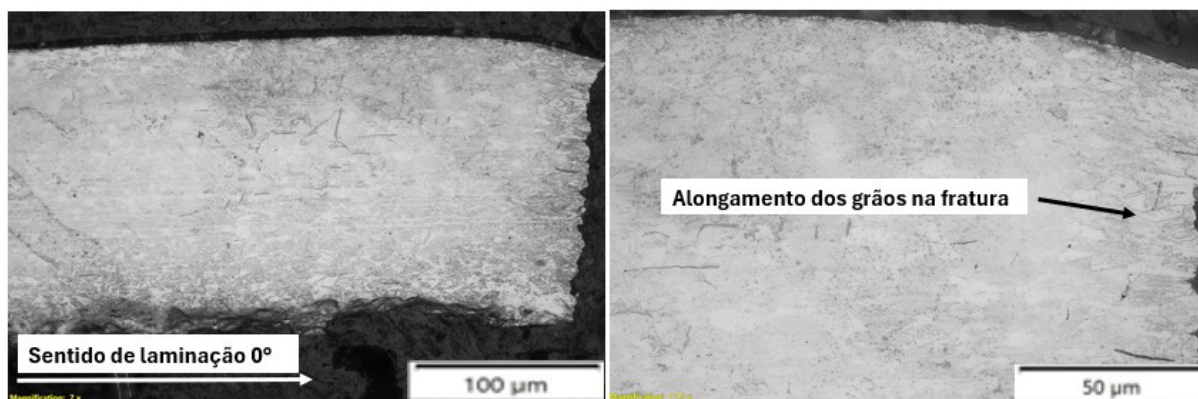


Figura 6. Análise metalográfica para o corpo de prova de ensaio mecânico de tração a 0° com aumento de 100 e 500 vezes, respectivamente.

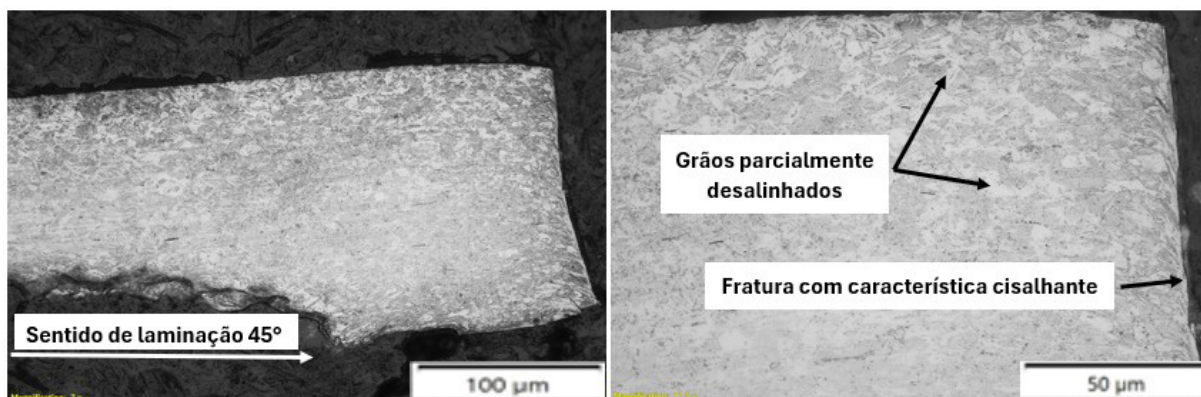


Figura 7. Análise metalográfica para o corpo de prova de ensaio mecânico de tração a 45° com aumento de 100 e 500 vezes, respectivamente.

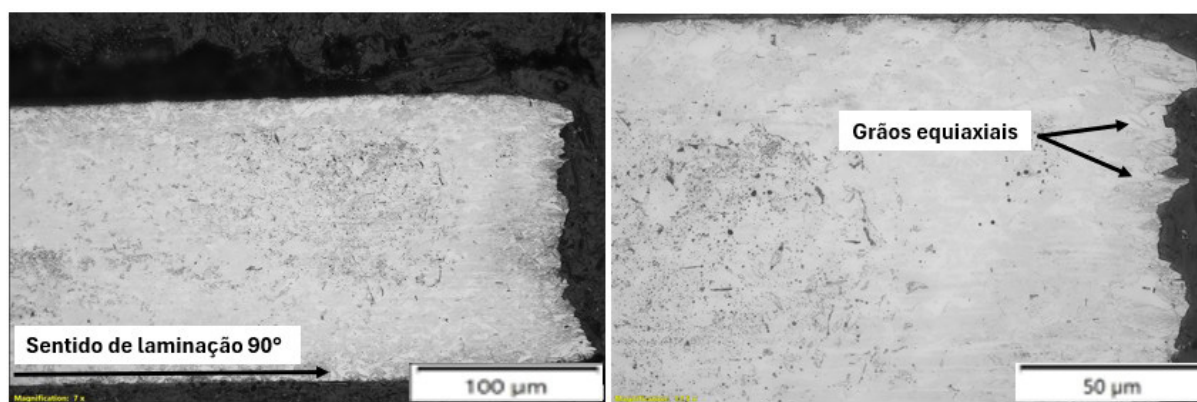


Figura 8. Análise metalográfica para o corpo de prova de ensaio mecânico de tração a 90° com aumento de 100 e 500 vezes, respectivamente.

Embora seja frequentemente relatado que corpos de prova ensaiados a 90° em relação à direção de laminação possam apresentar redução da ductilidade devido à maior resistência ao movimento de discordâncias através dos grãos alongados, os resultados deste estudo indicaram o menor alongamento para a orientação de 45°. Esse comportamento pode ser atribuído à anisotropia introduzida pelo processo de laminação e à textura cristalográfica desenvolvida durante a deformação plástica do material.

Na orientação de 45°, a aplicação da carga de tração favorece a atuação das tensões cisalhantes máximas, o que pode promover a localização da deformação plástica e a formação de bandas de cisalhamento. Como consequência, ocorre uma antecipação da estricção e da nucleação de danos, reduzindo o alongamento uniforme e a ductilidade total do material. Além disso, a orientação de 45° em relação à direção de laminação frequentemente corresponde a uma condição crítica para a interação entre os sistemas de escorregamento ativos e a textura cristalográfica, favorecendo a concentração de deformação em regiões específicas da microestrutura.

Dessa forma, a menor ductilidade observada para a orientação de 45° está associada aos efeitos combinados da textura de laminação, da anisotropia microestrutural e da localização do escoamento plástico [57,58].

3.4 Curva CLC

A curva limite de conformação (Figura 9) obtida para o aço inoxidável avaliado, apresenta valores de deformação principal (ϵ_1) predominantemente entre 0,48 e 0,56, ao longo da faixa de deformação secundária (ϵ_2) analisada. Observa-se uma tendência levemente decrescente de ϵ_1 com o aumento de ϵ_2 , sem a formação de um mínimo pronunciado na região de deformação plana. Esse comportamento indica uma distribuição relativamente uniforme da capacidade de deformação do material, característica de processos de conformação incremental, nos quais a deformação localizada e os caminhos de deformação

não proporcionais contribuem para um aumento aparente da formabilidade.

A curva limite de conformação obtida neste trabalho apresenta níveis de deformação principal superiores aos reportados na literatura para o aço inoxidável AISI 304L, por exemplo, que apresentaram valores de ϵ_1 de aproximadamente 0,52 a 0,42, enquanto os valores de ϵ_2 ficaram entre -0,22 a 0,18, conforme reportado por [59], especialmente na região de tração-compressão e deformação plana. Tal comportamento é atribuído ao processo de estampagem incremental, no qual a deformação localizada e os caminhos de deformação não proporcionais promovem um aumento aparente da formabilidade quando comparado aos ensaios convencionais utilizados na determinação da CLC.

No entanto, a curva limite de fratura, apresentada na Figura 10, evidencia que, mesmo com o uso de ferramenta hemisférica, a geometria da peça conformada exerce influência significativa sobre o comportamento de fratura do aço inoxidável. As peças conformadas em formato de cone apresentaram maiores valores de deformação principal no momento da fratura quando comparadas às peças piramidais, indicando que trajetórias de deformação mais contínuas e estados de tensões mais uniformes favorecem a deformabilidade do material.

Esse comportamento está em concordância com estudos prévios sobre estampagem incremental, os quais demonstram que a trajetória da ferramenta e o caminho de deformação imposto pela geometria da peça resultam em estados de tensões não proporcionais, capazes de retardar a instabilidade plástica e a fratura quando comparados a geometrias com descontinuidades geométricas mais acentuadas [60]. Resultados semelhantes foram discutidos por Jeswiet et al. [61], que destacam que, em processos de estampagem incremental, a forma final da peça e a trajetória da ferramenta influenciam significativamente o estado de tensões e os mecanismos de fratura. Geometrias com trajetórias mais suaves tendem a promover estados de deformação mais homogêneos, retardando o início da fratura.

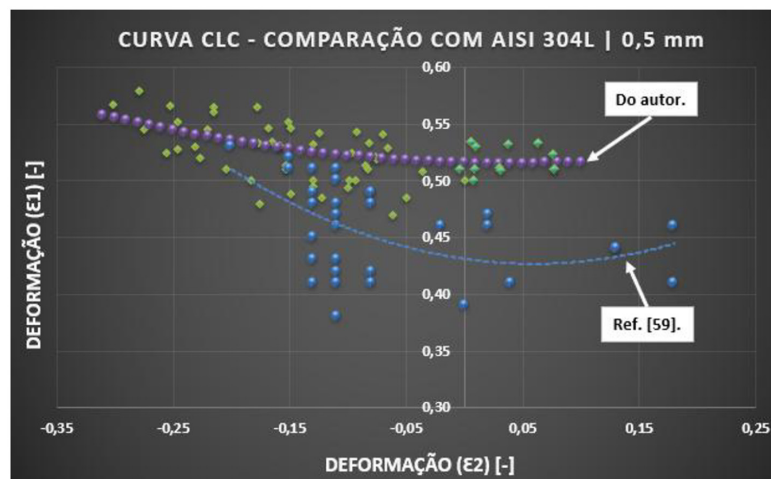


Figura 9. Curva Limite de Conformação – CLC, para o aço inoxidável austenítico.

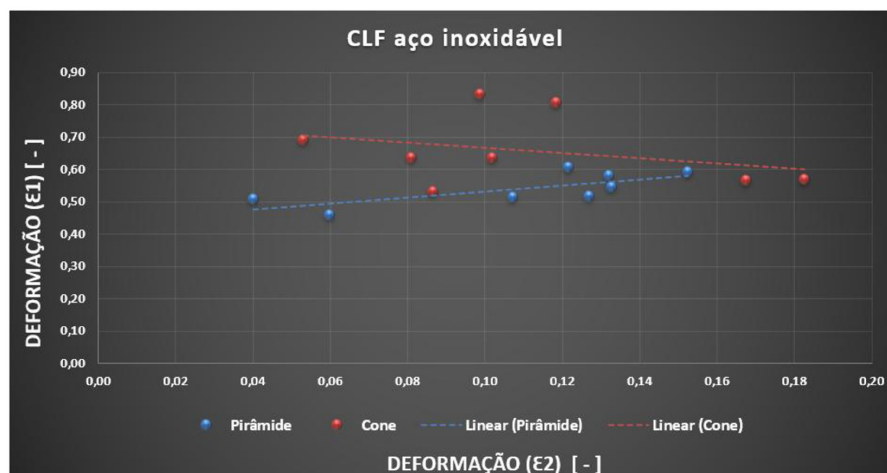


Figura 10. Curva Limite de Fratura – CLF, para o aço inoxidável austenítico.

4 Conclusões

O presente estudo permitiu a caracterização química, microestrutural, mecânica e de conformabilidade de uma chapa de aço inoxidável inicialmente identificada como austenítica, avaliada sob o contexto da estampagem incremental. A análise por espectroscopia de emissão óptica evidenciou que a liga estudada não corresponde à composição típica do aço AISI 304 convencional, apresentando baixo teor de níquel e elevado teor de manganês. Essa combinação é característica de aços inoxidáveis austeníticos de baixo custo, nos quais o manganês atua como elemento substitutivo do níquel para a estabilização da fase austenítica.

Os ensaios mecânicos de tração indicaram que os limites de escoamento obtidos para as orientações de 45° e 90° apresentaram valores muito próximos entre si, enquanto a orientação de 0° apresentou um limite de escoamento ligeiramente inferior, evidenciando apenas uma pequena influência da direção de laminação sobre essa propriedade.

Quando comparados aos valores normalmente reportados na literatura para o aço inoxidável AISI 304 convencional, os resultados obtidos para o aço inoxidável austenítico de alto manganês investigado neste estudo revelaram níveis superiores de resistência mecânica e limite de escoamento, porém acompanhados de menor ductilidade. Esse comportamento pode ser atribuído ao elevado teor de manganês, ao endurecimento por solução sólida e à atuação de mecanismos adicionais de deformação, como maclação mecânica e deslizamento planar.

Em relação à ductilidade, observou-se que a menor capacidade de deformação ocorreu na orientação de 45°, diferentemente do comportamento frequentemente relatado para materiais laminados, nos quais a menor ductilidade é geralmente associada à orientação transversal (90°). Esse resultado foi atribuído à anisotropia introduzida pelo processo de laminação e à textura cristalográfica do material, que favorecem a atuação de tensões cisalhantes máximas na orientação de 45°, promovendo a localização da

deformação plástica, a formação de bandas de cisalhamento e a antecipação da estricção.

Dessa forma, a redução da ductilidade observada nessa orientação está associada à interação entre a textura de laminação, a anisotropia microestrutural e a localização do escoamento plástico. A análise metalográfica corroborou os resultados mecânicos, evidenciando grãos austeníticos alongados na direção de laminação e características microestruturais compatíveis com os diferentes comportamentos de deformação observados nas distintas orientações de ensaio.

A curva limite de conformação obtida apresentou valores elevados de deformação principal e ausência de um mínimo pronunciado na região de deformação plana, comportamento típico de processos de conformação incremental. Esse resultado confirma que a deformação localizada e os caminhos de deformação não proporcionais associados ao processo promovem um aumento aparente da formabilidade quando comparado aos métodos convencionais de determinação da CLC.

Por sua vez, a análise da curva limite de fratura demonstrou que, mesmo com a utilização de ferramenta hemisférica constante, a geometria da peça conformada exerce influência significativa sobre o comportamento de fratura do material. As peças conformadas em formato de cone apresentaram maiores valores de deformação principal no momento da fratura em relação às peças piramidais, evidenciando que trajetórias de deformação mais suaves

e estados de tensões mais uniformes contribuem para o retardamento da fratura. Esses resultados reforçam que, em processos de estampagem incremental, a fratura não é uma propriedade intrínseca do material, mas depende fortemente do histórico de deformação imposto pela geometria da peça.

De forma geral, os resultados obtidos demonstram que o aço inoxidável austenítico de alto teor de manganês avaliado apresenta elevada resistência mecânica e boa capacidade de conformação incremental, embora com ductilidade inferior à do aço AISI 304 convencional. O estudo evidencia a importância da consideração simultânea da composição química, da anisotropia induzida pela laminação e da geometria da peça na análise da conformabilidade e do comportamento à fratura em processos de estampagem incremental.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo apoio financeiro concedido, fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradecem, ainda, à UNISATC pela disponibilização de sua infraestrutura laboratorial e de seus recursos técnicos, que possibilitaram a execução dos ensaios experimentais e a realização deste estudo.

Referências

- 1 Amlan D. A comprehensive review on incremental sheet forming and its associated aspects. *JESTR*. 2024;17(3):159-178. <https://doi.org/10.25103/jestr.173.19>.
- 2 Singh RP, Kumar S, Brambley EJ, Dhara S, Singh PK, Dhara S. Optimizing formability of incremental sheet forming using the straight groove test assessed with a variable wall angle conical frustum. *Manufacturing Letters*. 2025;44:453. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2025.06.054>.
- 3 Vanhulst M, Lee Y, Steinfels D, Bremen T, Perzyński K, Vanhove H, et al. ESAFORM benchmark 2024: study on the geometric accuracy of a complex shape with single point incremental forming. *International Journal of Material Forming*. 2025;18(3):72. <https://doi.org/10.1007/s12289-025-01928-1>.
- 4 Guzmán CF, Gu J, Duflou J, Vanhove H, Flores P, Habraken AM. Study of the geometrical inaccuracy on a SPIF two-slope pyramid by finite element simulations. *International Journal of Solids and Structures*. 2012;49(25):3594-3604. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.07.016>.
- 5 Castelan J, Schaeffer L, Daleffe A, Fritzen D, Salvato V, Silva F. Manufacture of custom-made cranial implants from DICOM® images using 3D printing, CAD/CAM technology and incremental sheet forming. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*. 2014;30(3):265-273. <https://doi.org/10.1590/rbeb.2014.024>.
- 6 Daleffe A. Fabricação de próteses cranianas personalizadas em chapas de titânio através da estampagem incremental [tese]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2014 [acesso em 6 abr. 2026]. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/114468/000953351.pdf>
- 7 Önal Ü, Seçgin Ö, Özsert I, Çoban A, Cesur IA. New approach to multi-stage incremental forming method. *AJSE*. 2024;49(11):15325-15334. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08970-2>.
- 8 Zhu H, Ou H. Analytical modelling of local contact behaviour in incremental sheet forming. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025;36:6741-6757. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.04.257>.
- 9 Castelan J. Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano [tese]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2010 [acesso em 6 abr. 2026]. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/28829>

- 10 Nagar S, Sahu K, Banjare R, Dewangan YK, Bandyopadhyay K. Influence of Tool Geometry and Tool Material on the Formability and Formed Part Accuracy in Single Point Incremental Forming. MATEC Web Conf. 2025;408:01051. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202540801051>.
- 11 Schreiber RG, Kiniz M Jr, Fiuza F Fo, Schaeffer L. Influência dos parâmetros de estampagem incremental na estampabilidade de chapas de alumínio puro. Matéria. 2022;27(1):13140. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620220001.1340>.
- 12 Popp GP, Racz SG, Breaz RE, Oleksik VŞ, Popp MO, Morar DE, et al. State of the art in incremental forming: process variants, tooling, industrial applications for complex part manufacturing and sustainability of the process. Materials (Basel). 2024;17(23):5811. <https://doi.org/10.3390/ma17235811>.
- 13 Hasanlu M, Mokari S. Numerical-experimental single point incremental forming of thin circular plate. AMR. 2025;3(1):1-13. <https://doi.org/10.21595/amr.2025.24756>.
- 14 Gralha MF, Magrinho JPG, Sousa JMC, Silva MB. Development of a machine learning algorithm for geometric compensation of Single Point Incremental Forming (SPIF) process. MATEC Web Conf. 2025;408:02011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202540802011>.
- 15 Sevsek L, Simic M, Herakovi N, Pepelnjak T. Development of an innovative hydraulic press for incremental forming: machine and process evaluation using a hybrid two-step process. Materials & Design. 2025;258:114602. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114602>.
- 16 Bădulescu E, Nițu EL, Iordache DM, Bădulescu C. Innovative tool for improving surface quality in single point incremental forming: a comparison with hemispherical tools. Materials. 2025;18(18):4275. <https://doi.org/10.3390/ma18184275>.
- 17 Abbas EA, Mansor KK. Analysis of the effect of low carbon steel strength on the thickness distribution and thinning ratio in single point incremental forming process. AIP Conference Proceedings. 2023;3169(1):040087. <https://doi.org/10.1063/5.0254310>.
- 18 Américo MA, Daleffe A, Casagrande HC, March G, Castelan J, Fritzen D, et al. Análise do processo de estampagem incremental de ponto único em chapa de aço AISI 1008. Revista Vincci. 2024;9(2):426-451. <https://doi.org/10.70185/2525-6025.2024.v9.416>.
- 19 Kurra S, Rahman NH, Regalla SP, Gupta AK. Modeling and optimization of surface roughness in single point incremental forming process. Journal of Materials Research and Technology. 2015;4(3):304-313. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.01.003>.
- 20 March G, Pinheiro WC, Fritzen D, Daleffe A, Castelan J. Estudo do processo de estampagem incremental em chapas de alumínio para uso em aquecedor solar. Revista Vincci. 2023;8(2):446-468. <https://doi.org/10.70185/2525-6025.2023.v8.339>.
- 21 Coman CC, Mazurchevici SN, Carausu C, Nedelcu D. Analysis of incremental sheet forming of aluminum alloy. Materials (Basel). 2023;16(19):6371. <https://doi.org/10.3390/ma16196371>.
- 22 Zhang Q, Li G, Liu Z, Zhao A, Xiong X, Lei Y. Friction stir incremental forming of AA7075-O sheets: experimental investigations on performance evaluation of formed parts. Rare Metal Materials and Engineering. 2018;47(12):3659-3665. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(19\)30014-1](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(19)30014-1).
- 23 Heinz A, Haszler A, Keidel C, Moldenhauer S, Benedictus R, Miller WS. Recent development in aluminium alloys for aerospace applications. Materials Science and Engineering A. 2000;280(1):102-107. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00674-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00674-7).
- 24 Harrison N, Luckey S. Hot stamping of a B-Pillar outer from high strength aluminum sheet AA7075. SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 2014;7(3):567-573. <https://doi.org/10.4271/2014-01-0981>.
- 25 Obikawa T, Satou S, Hakutani T. Dieless incremental micro-forming of miniature shell objects of aluminum foils. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2009;49(12-13):906-915. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.07.001>.
- 26 Daleffe A. Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de alumínio puro [dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2008 [acesso em 6 abr. 2026]. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/16205>
- 27 Fritzen D, Daleffe A, Castelan J, Schaeffer L. Brass 70/30 and incremental sheet forming process. Key Engineering Materials. 2013;544-557:1419-1431. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.1419>.
- 28 Fritzen D, Daleffe A, De Lucca GS, Castelan J, Schaeffer L, Souza RJA. Incremental forming of Cu-35Zn brass alloy. International Journal of Material Forming. 2018;11(3):389-404. <https://doi.org/10.1007/s12289-017-1373-4>.

- 29 Fritzen D. Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de latão 70/30 [dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2012 [acesso em 6 abr. 2026]. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/49294>
- 30 Daleffe A, Schaeffer L, Fritzen D, Castelan J. Analysis of the incremental forming of titanium F67 grade 2 sheet. KEM. 2013;554-557:195-203. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.195>.
- 31 Castelan J, Schaeffer L, Daleffe A. Desenvolvimento de produtos personalizados através de estampagem incremental para aplicações da medicina ortopédica. Ferramental. 2009 [acesso em 6 abr. 2026];24:15-20. Disponível em: <https://www.cbcm-metalforming.com/publicacoes/2009/medicinaortopedica.pdf>
- 32 De Lucca GS, Ferreira CA, Daleffe A, Fritzen D, Castelan J, Santos R, et al. Investigation of photofunctionalization applied to cranial implants produced by incremental sheet forming (ISF). Journal of Materials Research and Technology. 2021;15:2633-2645. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.059>.
- 33 Lucca GDSD, Daleffe A, Scheffer GS, Souza MAD, Marques CR, Castelan J, et al. Investigation of wettability using contact angle measurements and geometric discrepancy analysis of heat-treated pure titanium grade 2. Materials Research. 2021;24(4):e20210102. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2021-0102>.
- 34 Marques CRM, Daleffe A, Fritzen D, Marques CRM, De March G. Estudo do processo de estampagem incremental em chapas de titânio comercialmente puro ASTM F-67 grau 2 [dissertação]. Criciúma (SC): Centro Universitário SATC; 2022. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n4-373>.
- 35 Khani S, Harhash M, Palkowski H, Buhl J. Incremental sheet forming on tailored hybrid steel/polymer/ steel sandwich materials; formability and residual stress investigation. Journal of the Minerals Metals & Materials Society. 2025;77(10):7505-7518. <https://doi.org/10.1007/s11837-025-07486-w>.
- 36 American Society for Testing and Materials. AISI Type 304 Stainless Steel – Material Data Sheet. West Conshohocken: ASTM; 2024.
- 37 AZO Materials. Ferrous and non-ferrous metals stockist. Grade 304 stainless: Properties, fabrication and applications. Wednesbury: AZOM; 2005 [atualizada em 16 out. 2020; acesso em: 7 abr. 2026]. Disponível em: https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2867&utm_source
- 38 Yan X, Cao W, Li H. Biomedical alloys and physical surface modifications: a mini-review. Materials (Basel). 2022;15(1):66. <https://doi.org/10.3390/ma15010066>.
- 39 Cavaler LCC. Parâmetros de conformação para a estampagem incremental de chapas de aço inoxidável AISI 304L [tese]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2010.
- 40 Centeno G, Martínez-Donaire AJ, Bagudanch I, Morales-Palma D, Garcia-Romeu ML, Vallengano C. Revisiting formability and failure of AISI304 sheets in SPIF: experimental approach and numerical validation. Metals. 2017;7(12):531. <https://doi.org/10.3390/met7120531>.
- 41 Kumar DS, Ethiraj N. Experimental investigation on AISI 304 steel sheets formed by multi stage incremental forming. In: International conference on Advances in Mechanical Engineering. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. 2018;402:012107. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/402/1/012107>.
- 42 Bensaid K, Souissi R, Fredj NB. Numerical investigation of incremental forming process of AISI 304 stainless steel. Ironmaking & Steelmaking: Processes. Ironmaking & Steelmaking. 2023;50(2):174-183. <https://doi.org/10.1080/03019233.2022.2099695>.
- 43 Chezhian BS, Senthil KVS. Experimental studies on incremental forming of stainless steel AISI 304 sheets. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B, Journal of Engineering Manufacture. 2012;226(7):1224-1229. <https://doi.org/10.1177/0954405412441286>.
- 44 Klueh RL, Maziasz PJ, Lee EH. Manganese as an austenite stabilizer in Fe Cr Mn C steels. Materials Science and Engineering A. 1988;102(1):115-124. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(88\)90539-3](https://doi.org/10.1016/0025-5416(88)90539-3).
- 45 Wendler M, Mola J, Kruger L, Weib A. Experimental quantification of the austenite-stabilizing effect of manganese. Steel Research International. 2014;85. <https://doi.org/10.1002/srin.201300271>.
- 46 Chen G, Du S, Zhou Z. The effect of replacing Ni with Mn on the microstructure and properties of Al₂O₃-Forming austenitic stainless steels: a review. Materials (Basel). 2024;17(1):19. <https://doi.org/10.3390/ma17010019>.
- 47 Abed AH, Shwaish RR, Abbas AA, Mahdi BS, Ahmed W. Impact of uniaxial pre-strains on the forming limit curve (FLC) of CuZn 70-30 brass sheets for enhanced formability in production applications using the Nakajima Test. J. Manuf. Mater. Process. 2024;8(6):273. <https://doi.org/10.3390/jmmp8060273>.

- 48 Barth K, Afrasiabi M, Bambach M. Exploring forming limit of stainless steel below room temperature by Nakazima tests using an actively cooled additively manufactured punch. *Mechanics of Materials*. 2025;207:105392. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2025.105392>.
- 49 Schweitzer PE. *Metallic materials: physical, mechanical, and corrosion properties*. 1st ed. York: CRC Press; 2003. <https://doi.org/10.1201/9780203912423>.
- 50 Almeida IJ, Silva JV, Milane M. Análise da conformação mecânica e anisotropia do aço DOMEX S700MC aplicado em implementos rodoviários. *Revista Vincci*. 2019 [acesso em 6 abr. 2026];4:64-89. Disponível em: <https://revistavincci.satc.edu.br/index.php/Revista-Vincci/article/view/156>
- 51 Hill R. *The mathematical theory of plasticity*. Oxford: Oxford University Press; 1998. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198503675.001.0001>.
- 52 Altan T, Tekkaya E. *Sheet metal forming: processes and applications*. West Conshohocken: ASM International; 2012 [acesso em 20 abr. 2026]. Disponível em: https://www.iqytechnicalcollege.com/Sheet%20Metal%20Forming_%20Processes%20and%20Applications.pdf
- 53 Jaimes JB, Páez IG, Medina VG. Analysis of formability of AISI 304 steel sheets with different thicknesses by the tensile properties. *Rev UIS Ing*. 2022;21(4):97-106. <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n4-2022009>.
- 54 Wang Z, Sun XJ, Song C, Chen H, Tong S, Han W, et al. Grain size-dependent mechanical properties of high-manganese austenitic steel. *Acta Metallurgica Sinica*. 2019;32(6):746-754. <https://doi.org/10.1007/s40195-018-0828-z>.
- 55 Dobrzanski LA, Borek W, Mazurkiewicz J. Mechanical properties of high-manganese austenitic TWIP-Type steel. *Materials Science Forum*. 2014;783-786:27-32. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.27>.
- 56 Dong X, Wang F, Huang L, Lan J, Chen Y, Li B, et al. Effect of solution process on microstructure and properties of Cr-Mn-N austenitic stainless steel. *Materials (Basel)*. 2025;18(6):1290. <https://doi.org/10.3390/ma18061290>.
- 57 Lee NS, Chen JH, Kao PW, Tseng TY, Su JR. Anisotropic tensile properties of recovery annealed aluminum alloy sheet. *Materials Science and Engineering A*. 2011;528(4-5):1979-1986. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.068>.
- 58 Lee NS, Chen JH, Kao PW, Chang LW, Tseng TY, Su JR. Anisotropic tensile ductility of cold-rolled and annealed aluminum alloy sheet and the beneficial effect of post-anneal rolling. *Scripta Materialia*. 2009;60(5):340-343. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.10.036>.
- 59 Cavaler LCC. *Parâmetros de conformação para a estampagem incremental de chapas de aço inoxidável AISI 304L [tese]*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2010 [acesso em 20 abr. 2026]. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/27922>
- 60 Emmens WC, Sebastiani G, Van Den Boogaard AH. The technology of Incremental Sheet Forming: a brief review of the history. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010;210(8):981-997. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.02.014>.
- 61 Jeswiet J, Adams D, Doolan M, Mcanulty T, Gupta P. Single point and asymmetric incremental forming. *Advances in Manufacturing*. 2015;3(4):253-262. <https://doi.org/10.1007/s40436-015-0126-1>.

Recebido em: 21 Abr. 2026

Aceito em: 23 Jun. 2026

Editor responsável:

André Luiz Vasconcellos da Costa e Silva 