

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

FÁBIO HENRIQUE GULO JUNIOR

ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPAS DE ALUMÍNIO

Estudo Experimental em Chapas de Alumínio com Aplicação de ANOVA e Regressão Linear

LAGES

2025

FÁBIO HENRIQUE GULO JUNIOR

ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPAS DE ALUMÍNIO

Estudo Experimental em Chapas de Alumínio com Aplicação de ANOVA e Regressão Linear

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Rafael Gustavo Schreiber, Dr

Lages

2025

Fábio Henrique Gulo Junior

ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPAS DE ALUMÍNIO

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso de graduação em Engenharia Mecânica

Campus IFSC Lages, 04 de dezembro de 2025.

Prof. Júlio Azambuja da Silveira, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Rafael Gustavo Schreiber, Dr.
Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina

Profa. Natalia Madalena Boelter, MSc.
Avaliadora
Instituto Federal de Santa Catarina

Profa. Vilma Gisele Karsburg, MSc
Avaliadora
Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus colegas de classe, com quem compartilhei grandes momentos — bons e desafiadores. Aos meus pais, pelo apoio constante e pela confiança depositada em mim ao longo de toda a jornada. E aos meus professores, cuja dedicação e orientação foram fundamentais para meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente a todos os professores do IFSC que fizeram parte da minha trajetória de formação nesta instituição. Foram anos extremamente enriquecedores e muito divertidos.

Em especial, expresso minha gratidão aos professores Ailton Durigon e Vilma Gisele Karsburg, que me acompanharam em diversos projetos e despertaram em mim um grande carinho pela matemática e pela educação.

Agradeço também à professora Natalia Madalena Boelter, por sua paciência e por me auxiliar em tantos momentos de dúvida.

E, sobretudo, registro meu sincero agradecimento ao professor Rafael Gustavo Schreiber, pela dedicação, apoio e diligência ao me orientar no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho investiga o processo de Estampagem Incremental (Incremental Sheet Forming – ISF) com o objetivo de analisar como diferentes parâmetros influenciam a deformação máxima obtida em chapas metálicas. A partir de uma revisão bibliográfica abrangente, são apresentados os fundamentos históricos, técnicos e operacionais da ISF, destacando-se suas vantagens em relação aos métodos convencionais de conformação. Foram realizados experimentos variando-se principalmente o incremento vertical (Δz) e a velocidade de avanço (v), e os resultados foram avaliados por meio de Regressão Linear Simples e Análise de Variância (ANOVA). Os resultados mostraram que o incremento vertical exerce influência estatisticamente significativa sobre a deformação final, enquanto a velocidade de avanço apresentou efeito reduzido. Também não foi identificada interação significativa entre os fatores analisados. A validação do modelo de regressão indicou erros baixos, resultando em erro médio geral de 3,47%. Conclui-se que entre os parâmetros avaliados neste trabalho, o incremento vertical é o principal determinante da deformação máxima no processo SPIF.

Palavras-chave: Estampagem Incremental; ISF; SPIF; Regressão Linear; ANOVA; Deformação.

ABSTRACT

This study investigates the Incremental Sheet Forming (ISF) process with the objective of analyzing how different parameters influence the maximum deformation achieved in metal sheets. Based on an extensive literature review, the historical, technical, and operational foundations of ISF are presented, highlighting its advantages over conventional forming methods. Experiments were conducted primarily varying the vertical step size (Δz) and feed rate (v), and the results were evaluated using Simple Linear Regression and Analysis of Variance (ANOVA). The findings showed that the vertical increment has a statistically significant influence on the final deformation, while the feed rate exhibited a minor effect. No significant interaction between the analyzed factors was identified. The validation of the regression model indicated low errors, resulting in an overall average deviation of 3,47%. It is concluded that among the parameters evaluated in this work, the vertical increment is the main determinant of the maximum deformation in the SPIF process.

Keywords: Incremental Sheet Forming; ISF; SPIF; Linear Regression; ANOVA; Deformation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ferramenta Esférica Conformando uma Chapa.....	14
Figura 2 - Representação do Processo SPIF	15
Figura 3 - Processo TPIF com Diferentes Matrizes: (a) Matriz negativa completa, (b) matriz positiva completa e (c) Matriz positiva parcial.	16
Figura 4 - Processo DSIF	17
Figura 5 – Principais variações da Estampagem Incremental de Chapas (ISF).	18
Figura 6 - Princípio de Aplicação WJISF.....	19
Figura 7 - Máquinas de Usinagem Configuradas Para SFI: (a) Torno CNC, (b) Fresadora CNC.	20
Figura 8 - Configurações SPIF com Braço Robótico: (a) Chapas de alumínio, (b) Chapas de Policloreto de Vinila (PVC).	21
Figura 9 - Máquina para Conformação Incremental Desenvolvida por Allwood.....	22
Figura 10 - Máquina Amino para Conformação Incremental	23
Figura 11 - Máquina Amino para Conformação Incremental	24
Figura 12 - Capô do Honda S800 fabricado pela Amino em Pequena Série.....	25
Figura 13 - Próteses Criadas com SPIF: (a) Padrões de Deformação para Medições, (b) Próteses com dispositivos de Medição para Comparação de Carga - Deslocamento entre Protese SPIF e Convencional.	26
Figura 14 - Iteração dos Dados Gerados por ANOVA.....	27
Figura 15 – Representação da derivação de uma geratriz circular	29
Figura 16 – Conjunto Utilizado nos Experimentos	33
Figura 17 – Faixa Para Visioplaticidade.....	34
Figura 18 – (a) Chapa de Alumínio Marcada Quimicamente com Círculos de 1 mm;.....	34
Figura 19 – Corte Transversal de Formato Hiperboloide.....	34
Figura 20 – Corte Transversal de Formato Hiperboloide.....	36
Figura 21 - Chapas Conformadas Até a Falha.....	37
Figura 22 - Gráficos Deformação (φ) vs Velocidade de Avanço (v).....	38
Figura 23 - Gráficos Deformação (φ) vs Incremento Vertical (Δz).....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo Interações Parâmetros ISF	31
Tabela 2 – Resultados Das Medições Para os Ensaios	37
Tabela 3 – Resultados ANOVA	39
Tabela 4 – Erro Entre Deformações 1 e 3	41
Tabela 5 – Resultados Das Medições Para os Ensaios	42

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ANOVA – Análise de Variância

CAD – Computer-Aided Design

CNC – Controle Numérico Computadorizado

DSIF – Double Sided Incremental Forming

EMISF – Electromagnetic Incremental Sheet Forming

ISF – Incremental Sheet Forming)

MSPIF – Multi-Step Single Point Incremental Forming

PVC – Chapas de Policloreto de Vinila

SPIF – Single Point Incremental Forming

TPIF – Two Point Incremental Forming

WJISF – Water Jet Incremental Sheet Forming

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo Geral	12
1.2	Objetivos Específicos	12
2	Revisão bibliográfica	14
2.1	Estampagem Incremental.....	14
2.2	Máquinas de Estampagem Incremental.....	20
2.2.1	Máquinas CNC	20
2.2.2	Braços Robóticos.....	20
2.2.3	Máquinas Especializadas	22
2.2.4	Máquinas de Jato de Água de Alta Pressão	23
2.3	Aplicações da Estampagem Incremental.....	24
2.4	ANOVA.....	26
2.5	Regressão Linear	27
2.6	Parâmetros da Estampagem Incremental.....	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1	Aplicação de Análise de Variância.....	39
4.2	Elaboração de um Modelo Preditivo	40
4.3	Discutindo Resultados	43
5	CONCLUSÃO.....	44
5.1	Objetivos alcançados	44
5.2	Conclusões obtidas	44
5.3	Limitações do estudo	44
5.4	Trabalhos futuros	45

1 INTRODUÇÃO

A Estampagem Incremental (ISF – *Incremental Sheet Forming*) surgiu como uma evolução dos métodos convencionais de conformação, com raízes em variações do processo de spinning desenvolvidas ao longo do século XX. A origem histórica da ISF envolve diferentes propostas que antecederam o desenvolvimento moderno do processo. Dentre essas, destacam-se as patentes de Leszak (1967), que propunha a conformação de peças por meio do empurramento da chapa contra um meio elástico, e a de Berghahn (1967), que descrevia a conformação com um rolete controlado em três eixos (EMMENS; SEBASTIANI, 2010).

O crescimento da ISF nas últimas décadas está diretamente relacionado a dois fatores principais: os avanços na tecnologia de manufatura — especialmente com a popularização de máquinas com Controle Numérico Computadorizado (CNC) — e o aumento da demanda por processos que possibilitem a personalização sem a necessidade de ferramentas específicas (JACKSON; ALLWOOD, 2009).

Esse contexto favoreceu o desenvolvimento de variantes assimétricas da ISF, como a *Single Point Incremental Forming* (SPIF), na qual uma ferramenta única controlada por CNC percorre a superfície da chapa metálica, definindo a geometria da peça a partir de uma trajetória previamente programada. Como reforça De Souza et al. (2022), o controle numérico do processo e a liberdade de trajetória proporcionam à ISF um potencial significativo para aplicações em lotes pequenos e a prototipagem.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da velocidade e incremento da ferramenta na estampabilidade do AA1200-H14 por meio de ANOVA e regressão linear.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar 9 experimentos, variando a velocidade e o incremento da ferramenta;
- Determinar os valores de deformação máxima para cada combinação de parâmetro através do método de visioplasticidade;

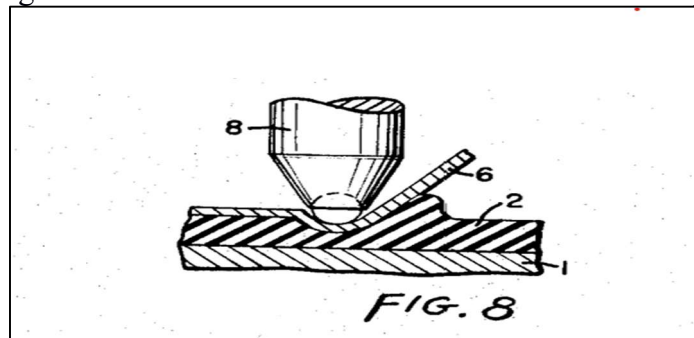
- Aplicar ANOVA para avaliar se os parâmetros de velocidade e incremento tem influência na estampabilidade;
- Aplicar regressão linear para definir equação de previsão da deformação máxima.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estampagem Incremental

A estampagem incremental, *incremental sheet forming* (ISF) é um processo de fabricação caracterizado pela conformação gradual de uma chapa metálica, utilizando pequenos deslocamentos de uma ferramenta controlada, sem a necessidade de um molde fixo. Uma das primeiras descrições formais desse conceito surgiu em 1967, quando Leszak registrou a patente norte-americana nº US3342051A, intitulada "*Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming*" (Aparato e Processo para Conformação sem Matriz), no qual uma amostra de chapa metálica dúctil pode ser trabalhada plasticamente até assumir formas cônicas ou de revolução, utilizando ferramentas simples e de baixo custo (LESZAK, 1967). A figura 1 foi retirada diretamente de sua patente inicial e apresenta uma ferramenta deformando uma chapa.

Figura 1 - Ferramenta Esférica Conformando uma Chapa



Fonte: LESZAK, 1967.

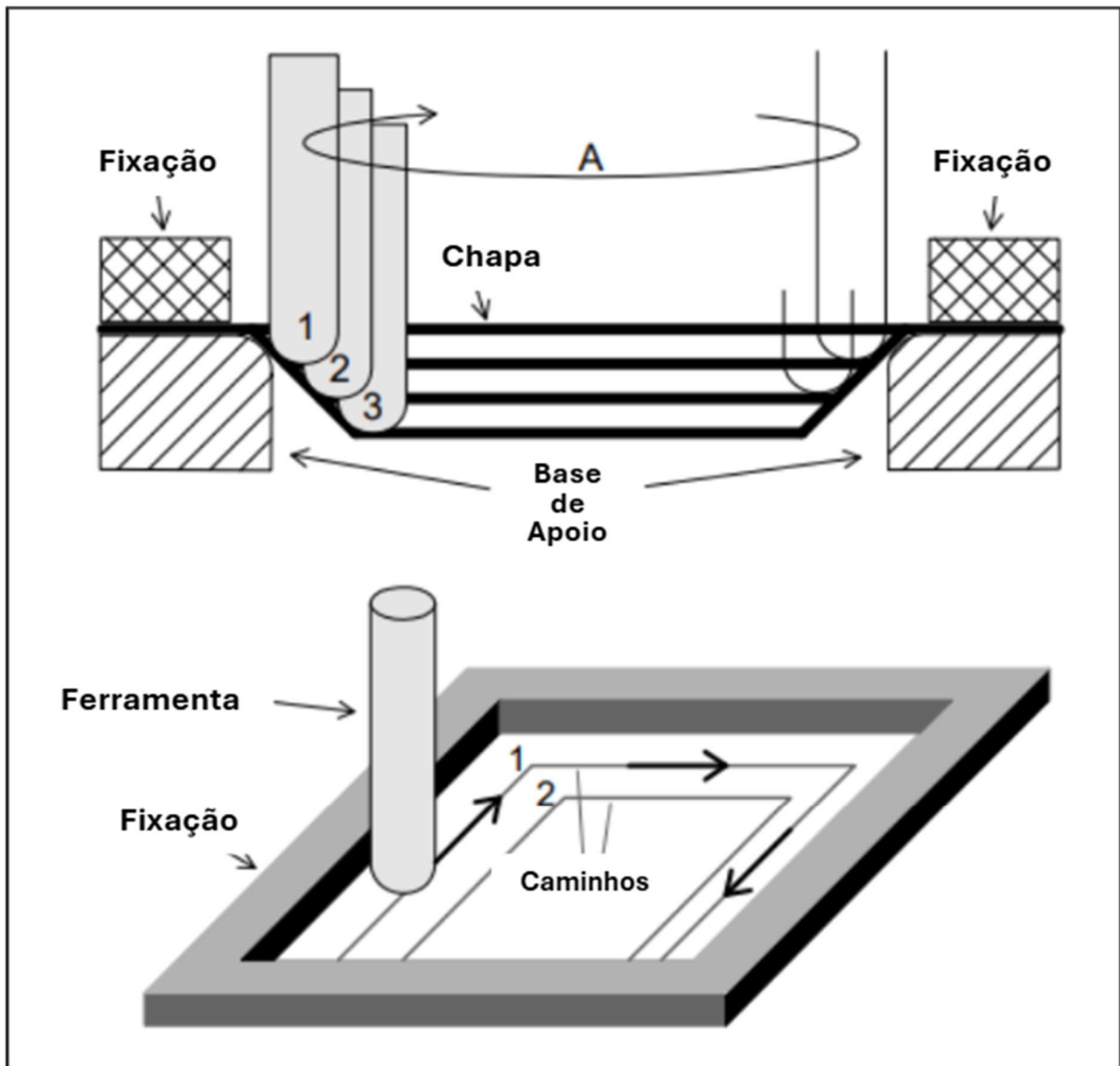
Existem diversas abordagens para a realização da estampagem incremental, que podem envolver o uso de matrizes ou a substituição de ferramentas tradicionais por tecnologias alternativas, como jatos de água de alta pressão (TRZEPIECIŃSKI et al, 2022).

A forma mais comum é a estampagem incremental de ponto único (*Single Point Incremental Forming – SPIF*) (SCHREIBER, 2022). Nesse processo, uma única ferramenta atua sobre a chapa, promovendo deformações localizadas por meio de pequenos avanços verticais (incrementos), até que se atinja a forma desejada.

A baixa complexidade do método o torna um dos mais simples (TRZEPIECIŃSKI et al, 2022) e de fácil implementação, permitindo a adaptação de diferentes tipos de máquinas para

esse fim (ver exemplos de máquinas no tópico 2.2). Pode-se observar na figura 2 uma representação do processo de estampagem incremental SPIF.

Figura 2 - Representação do Processo SPIF



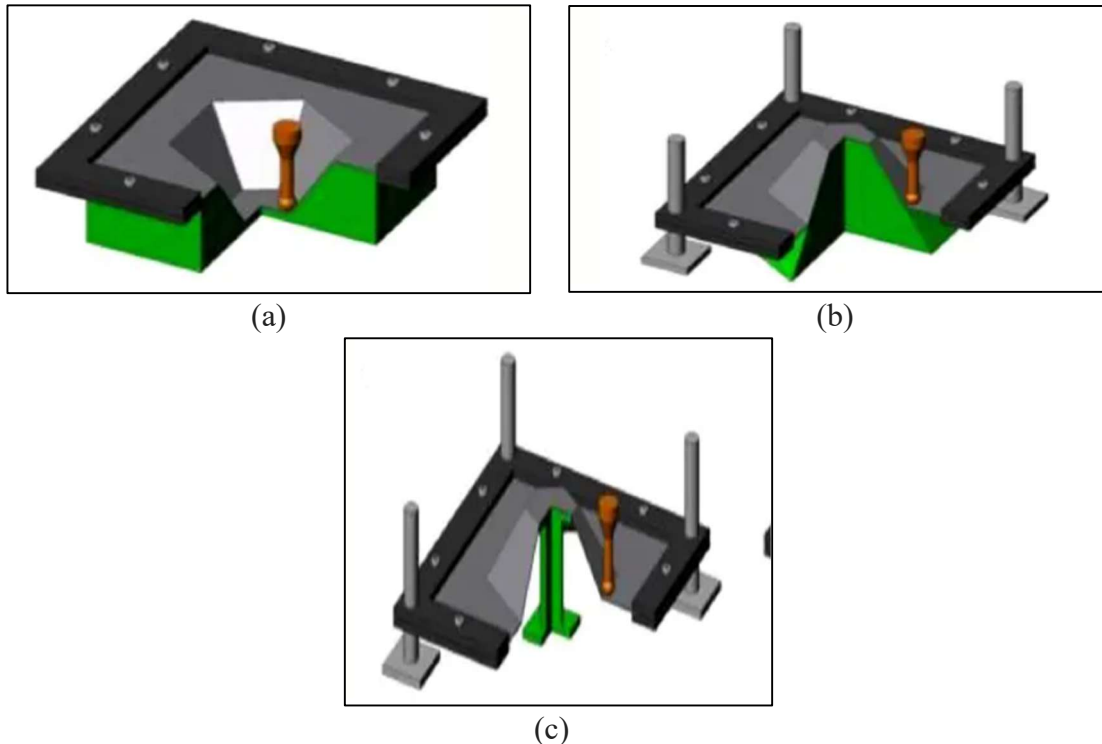
Fonte: Iseki (1989, apud EMMENS, W. C.; SEBASTIANI, 2010).

Como o nome sugere, durante a SPIF, apenas a ponta da ferramenta entra em contato com a chapa, que está fixada somente em seu perímetro. A geometria desejada é obtida progressivamente, da borda em direção ao centro da peça (EMMENS; SEBASTIANI, 2010).

Outra configuração do processo ISF é a estampagem incremental por dois pontos (*Two Point Incremental Forming* – TPIF), na qual existem dois pontos simultâneos de aplicação de força: o primeiro é a ponta da ferramenta, como na SPIF, e o segundo é uma matriz ou apoio

localizado na face oposta da chapa. Essa matriz pode ser completa ou parcial, e o movimento da conformação em relação à matriz ser negativo ou positivo, conforme ilustrado na Figura 3 (BAGUDANCH FRIGOLÉ, 2017). A figura 3 traz exemplos visuais dessas variações do processo.

Figura 3 - Processo TPIF com Diferentes Matrizes: (a) Matriz negativa completa, (b) matriz positiva completa e (c) Matriz positiva parcial.



Fonte: ALLWOOD, Julian M., 2010.

Fundamentalmente, a chapa fixada em seu perímetro é deslocada verticalmente no sentido oposto ao movimento da ferramenta, permitindo que a conformação ocorra de dentro para fora. Essa abordagem foi apresentada pela primeira vez por Matsubara em 1994 (EMMENS; SEBASTIANI, 2010).

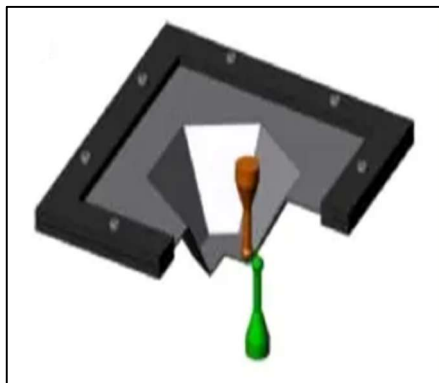
A utilização da TPIF exige uma estrutura mais complexa em comparação com a SPIF, tanto no planejamento na elaboração das matrizes, quanto na operação do processo. No entanto, essa configuração apresenta vantagens significativas, como maior precisão dimensional.

Ademais, as matrizes podem ser fabricadas com materiais de baixo custo e fácil usinagem, como madeira ou resinas, o que reduz significativamente os custos quando comparados aos moldes utilizados em processos tradicionais de grande escala, tornando a TPIF

uma alternativa economicamente viável, inclusive para a produção de pequenos lotes (BAGUDANCH FRIGOLÉ, 2017).

Uma variação mais avançada e flexível da conformação incremental é a Estampagem Incremental de Face Dupla (*Double Sided Incremental Forming* – DSIF – figura 4). Diferentemente da TPIF, esse processo não utiliza matrizes, assim como na SPIF, mas opera com duas ferramentas sincronizadas, posicionadas nos lados opostos da chapa — uma atuando por cima e a outra por baixo. Essa configuração permite alcançar maiores deformações e melhorar a precisão geométrica da peça final, combinando a flexibilidade da ausência de matriz com resultados mais refinados (SCHREIBER, 2022a).

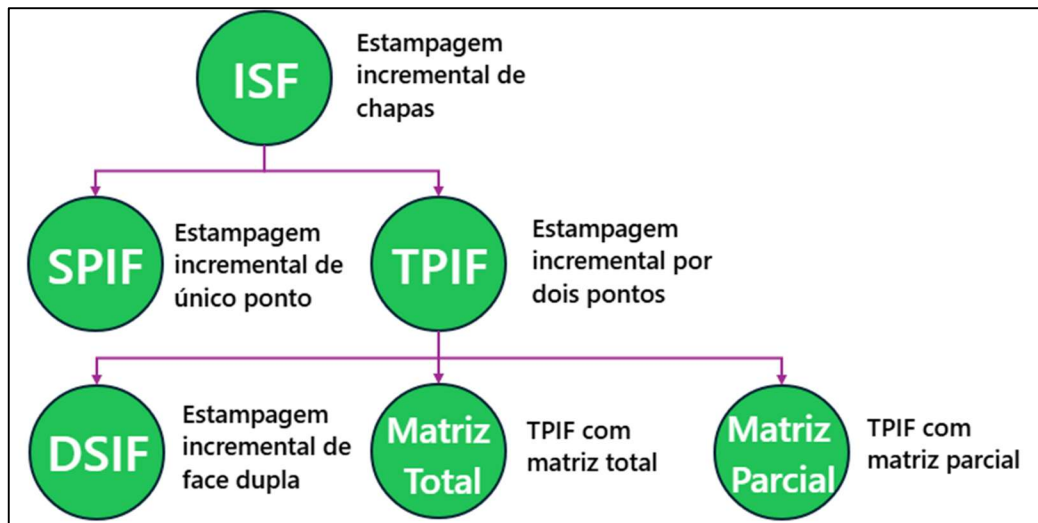
Figura 4 - Processo DSIF



Fonte: ALLWOOD, Julian M., 2010.

Abaixo a figura 5 representa visualmente as principais ramificações do processo de estampagem incremental.

Figura 5 – Principais variações da Estampagem Incremental de Chapas (ISF).



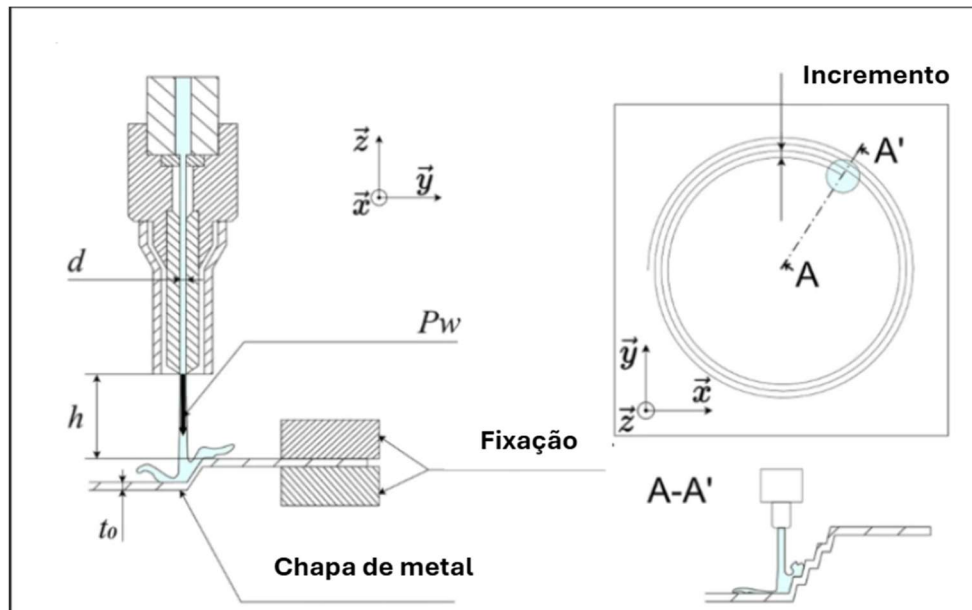
Fonte: Adaptado de TRZEPIECIŃSKI et al, 2022.

Uma característica comum entre as variações de ISF discutidas anteriormente é o acabamento superficial limitado, geralmente marcado pelos deslocamentos incrementais da ferramenta — característica inerente ao próprio princípio do processo. Embora o uso de lubrificantes possa atenuar essas marcas, elas são resultado direto da fricção contínua entre a ferramenta e a peça conformada (MIROIR et al., 2022), como demonstrado na figura 6.

Como demonstrado por Iseki (2001), é possível substituir a ferramenta metálica tradicional por um jato de água de alta velocidade, reduzindo o desgaste e as marcas deixadas na superfície da peça, além de eliminar o uso de lubrificantes como graxa e óleo, o que também diminui o risco de contaminação. Apesar das limitações tecnológicas da época, o autor se mostrou otimista quanto à aplicação prática do método: “*It won't be too long before water jet forming is put into practice*”, ou seja, “Não demorará muito até que a conformação com jato de água seja colocada em prática” (ISEKI, 2001).

A técnica conhecida como Estampagem Incremental com Jato de Água (*Water Jet Incremental Sheet Forming – WJISF*) adapta o processo de corte por jato d’água, substituindo a ferramenta sólida por um feixe de fluido de alta velocidade gerado por uma bomba de pressão elevada. Ao contrário do corte convencional, que utiliza abrasivos para romper o material, a WJISF não emprega partículas abrasivas, permitindo deformações em camadas sem danificar a superfície. Os principais parâmetros do processo incluem a pressão da bomba, o diâmetro do jato e a distância entre a extremidade do bico e a chapa metálica (MIROIR et al., 2022).

Figura 6 - Princípio de Aplicação WJISF



Fonte: MIROIR et al., 2022.

Quando comparada diretamente com as variações tradicionais da estampagem incremental, como a SPIF e a TPIF, a técnica com jato de água (WJISF) apresenta vantagens notáveis, como maior flexibilidade operacional, melhor qualidade no acabamento superficial e menor impacto ambiental. Além disso, o processo dispensa o uso de lubrificantes e pode ser conduzido com equipamentos mais simples. Em contrapartida, a WJISF ainda enfrenta desafios relacionados à precisão dimensional, maior consumo de energia e tempos de conformação mais longos (TRZEPIECIŃSKI et al., 2022).

Além das variações mais consolidadas, como SPIF, TPIF, DSIF e WJISF, novas técnicas continuam sendo desenvolvidas à medida que os estudos na área de estampagem incremental avançam. Entre essas, destacam-se a estampagem incremental eletromagnética (*Electromagnetic Incremental Sheet Forming – EMISF*) (TRZEPIECIŃSKI et al., 2022) e a estampagem incremental de ponto único com múltiplos passos (*Multi-Step Single Point Incremental Forming – MS-SPIF*) (SCHREIBER, 2022a). Tais inovações ampliam o escopo de aplicação do processo, possibilitando o desenvolvimento de geometrias mais complexas e adaptando-se a diferentes demandas industriais.

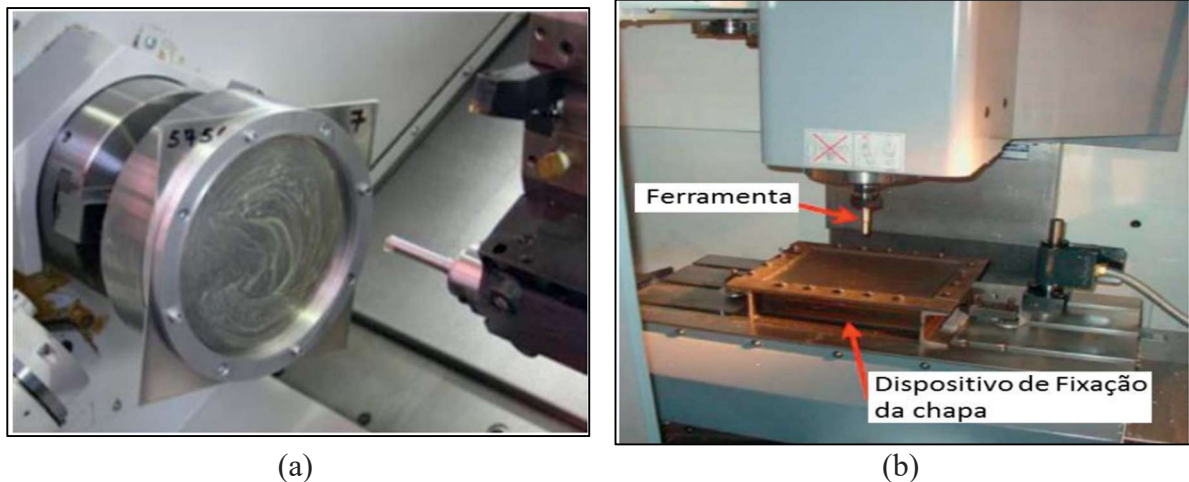
2.2 Máquinas de Estampagem Incremental

Os equipamentos e materiais utilizados na estampagem incremental exercem grande influência sobre os resultados do processo de conformação (POPP et al., 2024). Como destacado pelos autores, atualmente há uma escassez de maquinário especializado para esse tipo de aplicação, o que torna bastante atrativa a adaptação de equipamentos convencionais do que o investimento em soluções exclusivas para a ISF.

2.2.1 Máquinas CNC

Máquinas de usinagem CNC (figura 7) estão entre os equipamentos mais utilizados na estampagem incremental desde os primeiros experimentos. Um destaque importante é o trabalho de Iseki (1989), realizado em uma época em que as limitações e aplicabilidades de fresadoras para esse tipo de processo ainda não eram bem compreendidas. Nos experimentos iniciais, optou-se por utilizar uma mesa X-Y operada manualmente, uma vez que o uso de máquinas CNC tridimensionais na conformação de chapas era considerado arriscado tanto para o equipamento quanto para a operação (EMMENS; SEBASTIANI, 2010).

Figura 7 - Máquinas de Usinagem Configuradas Para SFI: (a) Torno CNC, (b) Fresadora CNC.



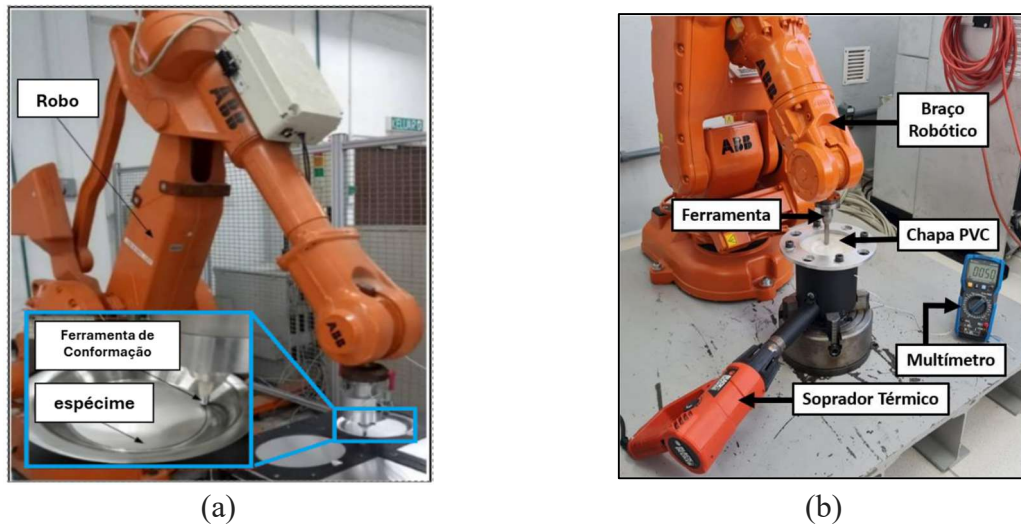
Fonte: (SCHREIBER, 2022a).

2.2.2 Braços Robóticos

Braços robóticos industriais são extremamente versáteis e podem ser adaptados para aplicações em estampagem incremental. Sua capacidade de operar com seis graus de liberdade

permite a conformação de geometrias complexas (SCHREIBER, 2022a). Além disso, esses sistemas podem ser configurados com uma ampla variedade de dispositivos auxiliares, o que os torna uma opção viável tanto para pesquisas acadêmicas em ambiente laboratorial quanto para o desenvolvimento de protótipos no setor industrial.

Figura 8 - Configurações SPIF com Braço Robótico: (a) Chapas de alumínio, (b) Chapas de Policloreto de Vinila (PVC).



Fonte: (a) ISMAIL et al., 2019 e (b) MACEDO, 2023.

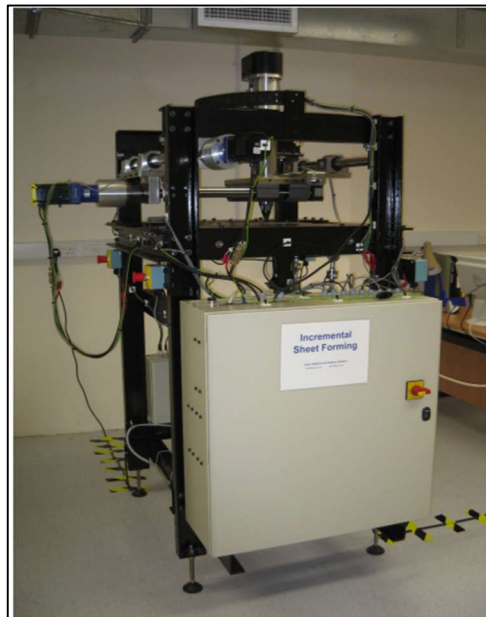
Durante os experimentos realizados por Ismail et al. (2019), foi possível validar que braços robóticos são equipamentos viáveis para a aplicação da técnica SPIF em chapas de alumínio com espessura de 0,5 mm. Utilizando um percurso helicoidal para a ferramenta e variando o incremento vertical, a velocidade de avanço e o ângulo da parede conformada, os autores concluíram que o incremento vertical tem o maior impacto no resultado. Para se obter melhor qualidade superficial, incrementos menores são preferíveis.

Outro estudo relevante foi realizado por Macedo (2023), utilizando um braço robótico para a estampagem incremental de chapas de PVC com espessura de 0,7 mm (Figura 8). O objetivo foi analisar a influência da temperatura e do incremento vertical na estampabilidade do material. Constatou-se que temperaturas mais elevadas, combinadas com incrementos baixos, aumentam a estampabilidade. No entanto, temperaturas muito altas também intensificam a ocorrência de rugas na superfície do polímero durante o processo.

2.2.3 Máquinas Especializadas

Com o objetivo de superar algumas limitações observadas no uso de máquinas CNC convencionais para estampagem incremental, pesquisadores e grupos industriais passaram a desenvolver equipamentos dedicados ao processo. O primeiro modelo voltado exclusivamente para essa aplicação foi construído por Hideo Iseki em 1992, no Japão, sendo considerado um marco na história da ISF (MATEUS, 2018). Posteriormente, outras máquinas foram projetadas com foco na otimização do processo, como a desenvolvida por Julian Allwood em 2004, nos Estados Unidos, que incorporou sensores capazes de registrar simultaneamente a força e a posição da ferramenta durante a conformação. Esse avanço possibilitou maior controle e monitoramento do processo, além de permitir o acesso à face inferior da peça, o que viabiliza o uso de uma segunda ferramenta ou mesmo de câmeras térmicas para análise (JACKSON; ALLWOOD, 2008), a figura 9 traz esse modelo desenvolvido pelos pesquisadores.

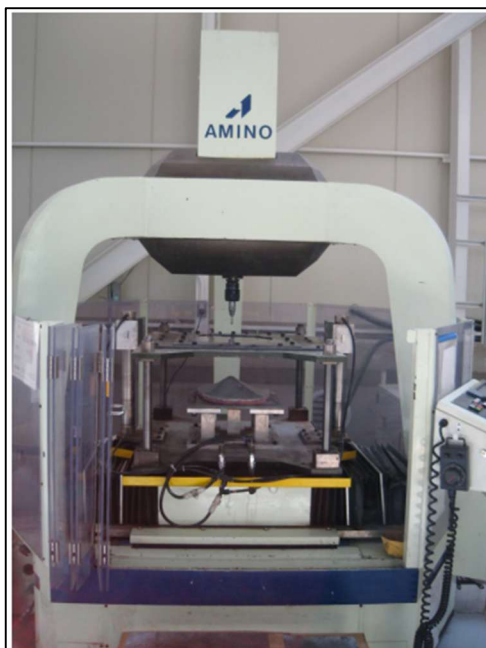
Figura 9 - Máquina para Conformação Incremental Desenvolvida por Allwood



Fonte: MATEUS, 2018.

A produção de máquinas especializadas em estampagem incremental ainda não é uma prática adotada de maneira abrangente no mercado, se restringindo a unidades produzidas pela empresa japonesa Amino, com as máquinas podendo variar de 100.000,00 a 200.000,00 Euros (POPP et al., 2024). Abaixo a figura 10 apresenta uma dessas máquinas.

Figura 10 - Máquina Amino para Conformação Incremental



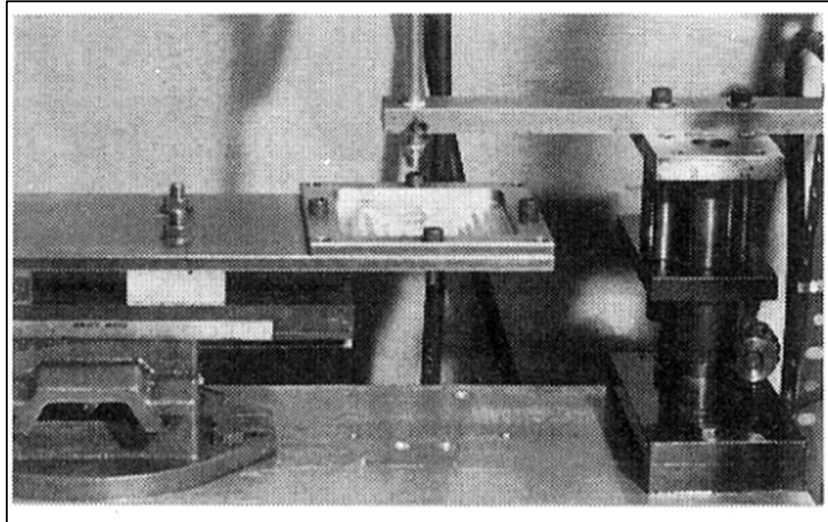
Fonte: JACKSON; ALLWOOD, 2008

2.2.4 Máquinas de Jato de Água de Alta Pressão

As técnicas de conformação incremental como SPIF, TPIF e DSIF dependem de ferramentas sólidas para realizar a deformação do material, na maioria das vezes uma haste metálica de ponta arredondada, sendo manipuladas por uma máquina CNC adaptada. Apesar dos avanços em entender como melhorar a qualidade superficial e precisão da ISF, o desgaste das ferramentas utilizadas sempre é notável, já que o processo envolve a abrasão direta da ferramenta com a chapa, o que encurta a vida útil da ferramenta e prioriza a qualidade da superfície, e não pode ser eliminado mesmo com o uso de lubrificantes (MIROIR, M, 2022).

Uma das primeiras tentativas de avaliar a viabilidade do uso de jatos de água como alternativa às ferramentas sólidas na estampagem incremental foi conduzida por Hideo Iseki, em 2001. No experimento, o bico do jato de água foi acoplado a um braço móvel fixado manualmente por parafusos de aperto (figura 11), enquanto a chapa metálica era mantida em posição por um sistema de fixação. A máquina utilizada permitia deslocamentos relativos do bico nas direções x, y e z de 160 mm, 280 mm e 100 mm, respectivamente, com velocidade máxima de 10 mm/s. A mesa de trabalho era controlada por computador, e o molde possuía contornos vazados previamente definidos por corte a laser. O sistema operava com uma pressão máxima de 19,6 MPa e vazão de até 15 L/min (ISEKI, 2001).

Figura 11 - Máquina Amino para Conformação Incremental

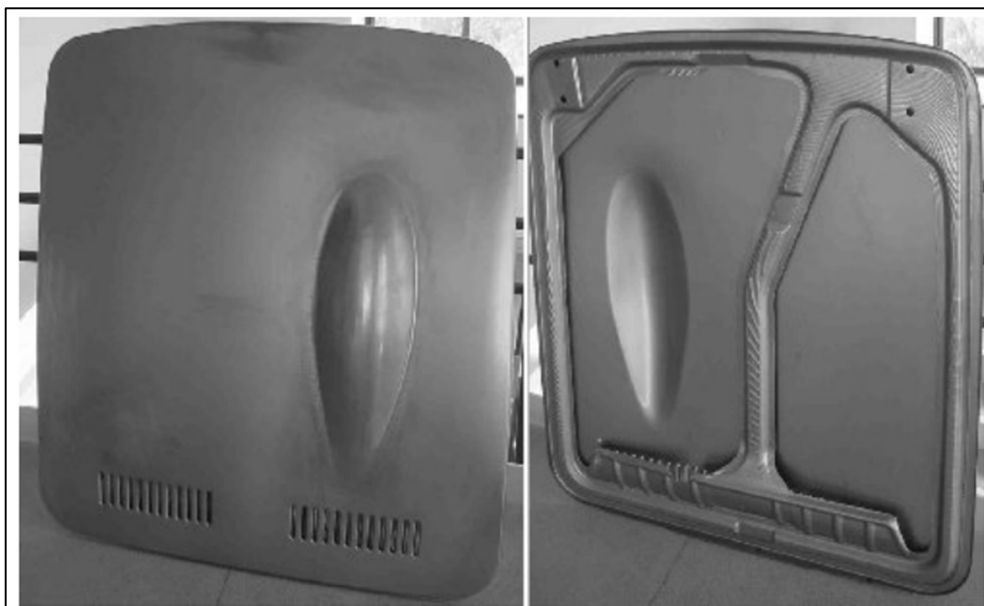


Fonte: ISEKI, 2001

2.3 Aplicações da Estampagem Incremental

As principais características do processo de fabricação por estampagem incremental são sua flexibilidade e a capacidade de conformar peças com geometria complexa sem a necessidade de grandes investimentos em ferramental específico. Isso torna o processo especialmente atrativo para produções de baixo volume, nas quais métodos convencionais exigiram a fabricação de ferramentas dedicadas — o que implicaria em altos custos fixos e longos prazos de entrega. Diante dessa limitação, a ISF se destaca como uma solução viável para a fabricação de protótipos ou lotes reduzidos. Além disso, como os custos diretos da ISF concentram-se principalmente em materiais, mão de obra e operação da máquina, enquanto os custos fixos são minimizados pela ausência de ferramentas complexas, o processo também surge como uma alternativa promissora para aplicações emergentes. Entre elas, destacam-se cenários de manufatura distribuída, como o mercado de reposição automotiva (figura 12) e serviços de reparo de carrocerias, onde a produção pode ocorrer localmente com base apenas na transmissão de dados digitais, reduzindo significativamente os custos logísticos e permitindo maior personalização sem aumento de preço (PRASAD, 2025).

Figura 12 - Capô do Honda S800 fabricado pela Amino em Pequena Série

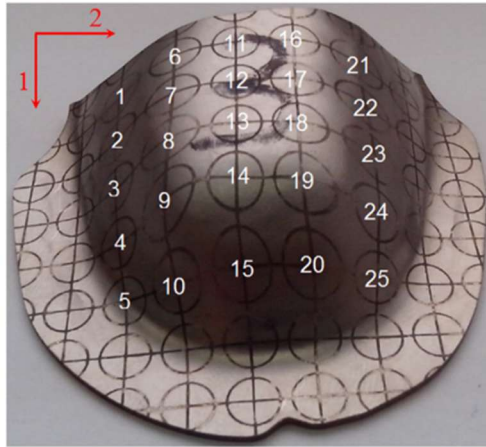


Fonte: EMMENS; SEBASTIANI, 2010

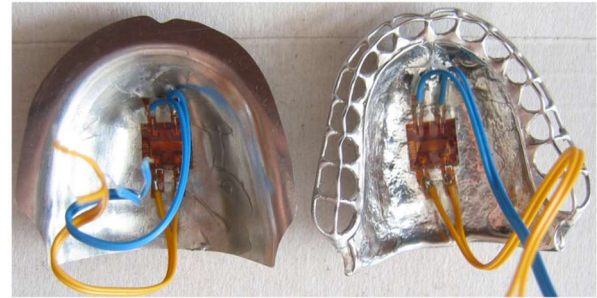
Outro ramo de aplicação importante é o de próteses médicas ou ortodônticas — áreas em que a fisionomia de cada paciente ou particularidades de lesões geram grande variação e exigem flexibilidade na produção, pontos fortes da ISF. Conforme demonstrado em estudo experimental recente (MILUTINOVIĆ, 2021), o processo de estampagem incremental de ponto único (SPIF) mostrou-se uma alternativa eficaz para a fabricação de estruturas metálicas de próteses dentárias (figura 13), substituindo com sucesso o método tradicional de fundição por cera perdida.

A aplicação em chapas finas de aço inoxidável permitiu reduzir o tempo de produção de 24 horas para apenas 2 horas, além de alcançar uma redução de 25% no peso da peça, beneficiando o conforto do paciente. A precisão geométrica foi considerada satisfatória, com desvios menores que 0,25 mm em relação ao modelo *Computer-Aided Design* (CAD), e os testes mecânicos confirmaram propriedades equivalentes às próteses convencionais, mesmo com espessura reduzida. O estudo também destacou o endurecimento localizado do material por deformação plástica, evidenciado pelo aumento da microdureza nas zonas mais solicitadas (MILUTINOVIĆ et al., 2021).

Figura 13 - Próteses Criadas com SPIF: (a) Padrões de Deformação para Medições, (b) Próteses com dispositivos de Medição para Comparação de Carga - Deslocamento entre Protese SPIF e Convencional.



(a)



(b)

Fonte: MILUTINOVIĆ et al., 2021.

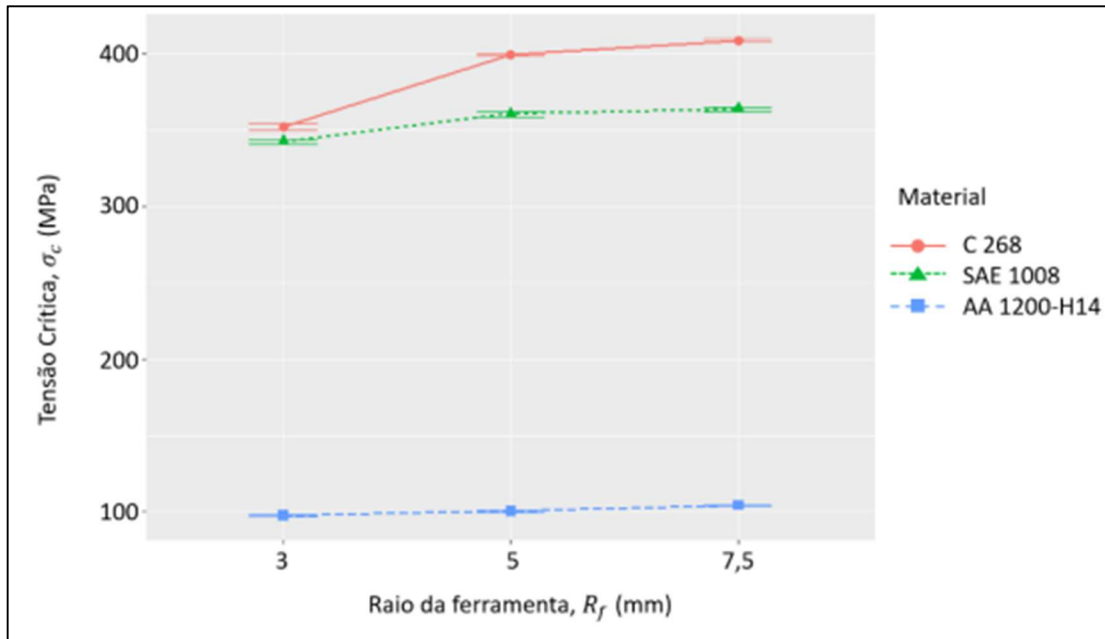
2.4 ANOVA

A Análise de Variância (ANOVA) é uma ferramenta estatística amplamente utilizada para comparar três ou mais médias amostrais, com o objetivo de identificar se ao menos uma delas difere significativamente das demais. Seu propósito central é avaliar o efeito de variáveis categóricas (fatores) sobre uma variável de resposta quantitativa (MONTGOMERY, 2013).

No contexto da Estampagem Incremental (ISF), a ANOVA se mostra especialmente útil para investigar quais parâmetros do processo — como velocidade da ferramenta, incremento vertical, temperatura ou tipo de material — exercem influência estatisticamente significativa sobre características da peça conformada, como rugosidade superficial, espessura final ou força de conformação.

Diversos estudos têm adotado a ANOVA como ferramenta central na análise de resultados experimentais em ISF. Um exemplo é o trabalho de Schreiber (2022a), no qual a técnica foi aplicada para avaliar os efeitos do tipo de material, do raio da ferramenta e da interação entre esses fatores sobre a tensão crítica utilizada como critério de falha. Os resultados indicaram que a influência do raio da ferramenta na tensão crítica foi mais acentuada no latão e no aço, em comparação ao alumínio.

Figura 14 - Iteração dos Dados Gerados por ANOVA



Fonte: SCHREIBER, 2022a.

No gráfico da figura 14, pode-se concluir que o raio da ferramenta aumentou a tensão crítica aplicada durante os experimentos de Schreiber (2022a), sendo o material identificado como C 268 o que apresentou a maior variação, também indicando que diferentes propriedades dos materiais utilizados na ISF podem alterar o comportamento dos parâmetros.

Outro estudo experimental que utilizou a ANOVA em conjunto com o método Taguchi foi conduzido para otimizar a rugosidade superficial média em chapas de liga de alumínio conformadas via SPIF com braço robótico. Os fatores avaliados foram o passo vertical (*step size*), a velocidade do robô e o ângulo de parede. Os resultados mostraram que o passo vertical foi o parâmetro mais influente, respondendo por 45,35% da variância total, seguido pela velocidade do robô (19,41%), enquanto o ângulo de parede teve influência estatisticamente insignificante. O estudo confirmou que, com a combinação ideal de parâmetros (*step size* de 0,3 mm, velocidade de 150 mm/s e ângulo de 45°), houve significativa melhora na qualidade superficial da peça conformada.

2.5 Regressão Linear

A regressão linear é uma técnica estatística amplamente utilizada na engenharia para investigar e modelar relações entre duas (regressão linear simples) ou mais (Regressão Linear

Múltipla) variáveis. Em muitos contextos, deseja-se prever ou entender como uma variável de interesse (variável dependente) se comporta em função de outra variável (variável independente). Por exemplo, é comum avaliar o impacto de parâmetros de processo — como temperatura, velocidade ou espessura — sobre propriedades do material conformado. Nesse contexto, a regressão linear simples propõe um modelo matemático baseado na relação linear entre as variáveis, podendo ser empregado tanto para fins de previsão quanto para a otimização ou controle de processos (MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, 2009).

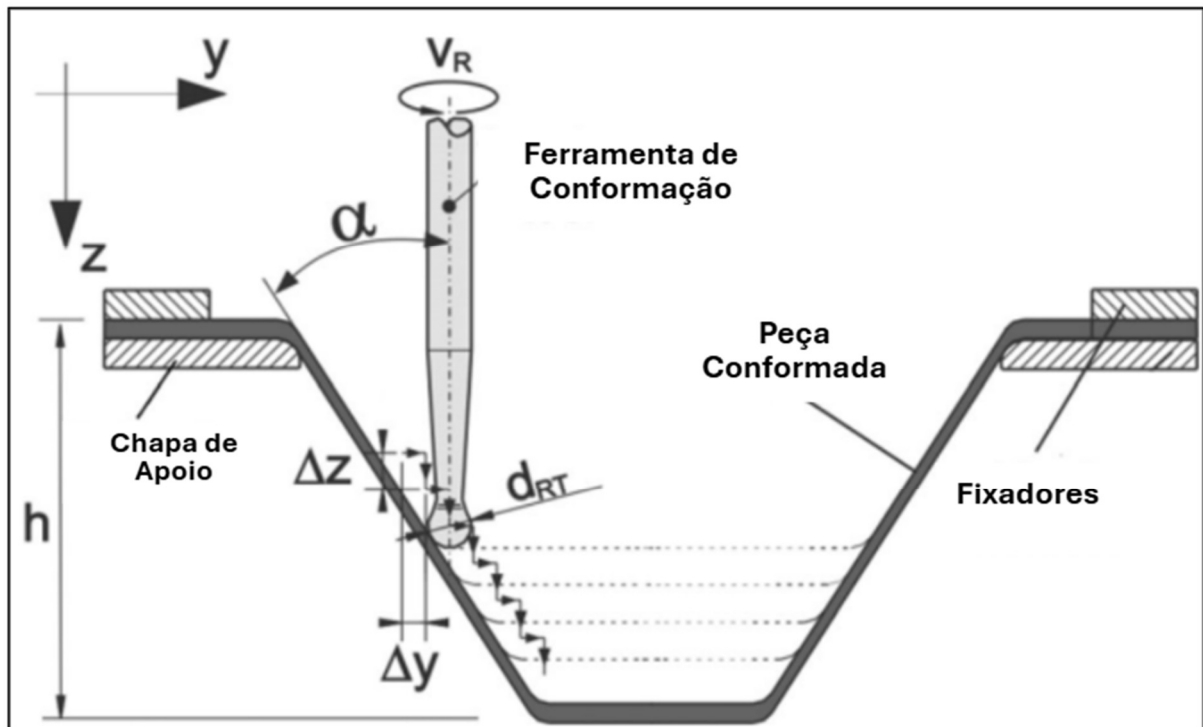
Dentro do contexto da Estampagem Incremental, a regressão linear tem sido amplamente utilizada como ferramenta estatística para identificar combinações de variáveis que resultem em melhores desempenhos do processo, conforme o objetivo definido. Estudos recentes aplicam essa técnica para avaliar a proximidade entre os valores experimentais e os teóricos, além de desenvolver modelos preditivos confiáveis. Um exemplo disso é o trabalho de Schreiber (2022a), no qual foi construída uma equação de regressão linear múltipla capaz de estimar a força axial máxima com base em variáveis como raio da ferramenta, espessura da chapa, coeficiente de resistência, coeficiente de encruamento e suas interações.

2.6 Parâmetros da Estampagem Incremental

Ao se trabalhar com estampagem incremental de materiais um dos pontos centrais de estudos é a estampabilidade do material durante o processo, estampabilidade podendo ser entendida como a capacidade ou limite de um material ser deformado sem apresentar falhas ou rupturas (GATEA; OU; McCARTNEY, 2016).

Como mencionado por Tisza (2012) a estampabilidade é um tema complexo e de difícil análises, porém está fortemente ligada ao ângulo da parede do item a ser produzido (TISZA, 2012).

Figura 15 – Representação da derivação de uma geratriz circular



Fonte: TISZA, 2012.

Na Figura 15 pode-se observar visualmente essa relação geométrica, na qual o incremento vertical (Δz) e o incremento lateral (Δy) definem a trajetória da ferramenta e, conseqüentemente, determinam o ângulo de parede (α) obtido no processo. Esses dois deslocamentos sucessivos, combinados, estabelecem a inclinação resultante da superfície conformada, influenciando diretamente a redução de espessura e a estampabilidade da chapa durante o SPIF. Para esta configuração podemos determinar inclusive aproximar a espessura final equação (1) abaixo (SCHREIBER, 2022a):

$$s_f = s_0 \cos \alpha \quad (1)$$

Onde:

s_f : espessura final [mm];

s_0 : Espessura inicial [mm];

α : ângulo de parede [°].

Cada incremento realizado a espessura inicial da chapa (s_0) diminui, atingindo no final do processo o valor de espessura final (s_f), sendo também quando a profundidade máxima estampada (h) e o ângulo máximo da parede (α) serão atingidos.

Segundo a revisão realizada por Gatea, Ou e McCartney (2016), diversos parâmetros de processo e material exercem impacto significativo sobre a estampabilidade, a qualidade superficial e a precisão dimensional das peças produzidas. Com base na síntese apresentada pelos autores, esses fatores podem ser organizados conforme a seguir.

- Ângulo de parede: considerado o principal indicador da estampabilidade no SPIF. Ângulos mais inclinados intensificam a deformação plástica e aumentam a redução de espessura, aproximando o material do ponto de fratura.
- Material da chapa: propriedades como ductilidade e resistência definem a capacidade do material de suportar deformações maiores sem falhar e o esforço necessário para conformar o item.
- Espessura inicial: chapas mais espessas apresentam maior resistência ao afinamento e suportam ângulos de parede mais altos; chapas finas são mais suscetíveis à falha.
- Raio da ferramenta: raios maiores geram distribuição mais suave das tensões e menor concentração de esforços; raios reduzidos intensificam tensões locais e favorecem rupturas.
- Parâmetros de avanço da ferramenta (velocidade, passo e trajetória): definem como a deformação é aplicada. Passos menores e trajetórias mais suaves tendem a gerar melhor acabamento e menor variação de espessura.
- Atrito e lubrificação: influenciam as forças de processo, a temperatura local e a integridade superficial. Lubrificação insuficiente aumenta as tensões e pode causar defeitos.
- Geometria da peça: formatos mais complexos impõem gradientes de deformação mais abruptos, aumentando a chance de falhas localizadas.
- Condições da máquina e rigidez estrutural: a rigidez da máquina, a estratégia de trajetória e outros aspectos operacionais afetam diretamente a estabilidade do processo e a precisão da geometria final.

Simplificando as informações em forma de tabela, temos como resultado a tabela 1, apresentada a seguir.

Tabela 1 – Resumo Interações Parâmetros ISF

Aumento no Parâmetro	Impacto na Deformação Máxima ($\varphi_{m\acute{a}x}$)
Incremento Vertical (ΔZ)	Diminui
Velocidade do Avanço (v)	Diminui
Ductilidade	Aumenta
Resistência	Diminui
Espessura Inicial da Chapa (S_0)	Aumenta
Raio da Ferramenta (d_{RT})	Aumenta
Velocidade de Rotação da Ferramenta (V_R)	Aumenta
Lubrificação	Aumenta
Temperatura da Chapa (pré-aquecimento)	Aumenta
Complexidade Geométrica da Peça Produzida	Diminui

Fonte: elaboração própria com base em Gatea, Ou e McCartney (2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para possibilitar a análise dos efeitos dos parâmetros do processo sobre a conformabilidade das chapas no SPIF, foi estruturado um planejamento experimental contemplando variações controladas de incremento vertical e velocidade da ferramenta. Neste capítulo são descritos os materiais empregados, a configuração dos equipamentos, os procedimentos de execução dos ensaios e os métodos utilizados para caracterização geométrica e cálculo das deformações.

A metodologia empregada pode ser dividida nas seguintes etapas:

- Definição da máquina de estampagem e fixação.
- Preparação das chapas e definição do método de medição.
- Realização dos experimentos.
- Cálculo da deformação máxima.
- Análise com ANOVA e regressão linear.

Para a máquina utilizada no processo de estampagens dos experimentos foi escolhido utilizar um braço robótico, pela sua facilidade de programação e versatilidade, sendo validados pelo sucesso em outros trabalhos, como o realizado por Macedo (2023).

O modelo de braço robótico foi modelo IRB 140, marca ABB, a ferramenta de conformação utilizada apresentava uma ponta utilizada nos experimentos equipado com uma ferramenta de ponta semiesférica de 10 mm de diâmetro.

Como a força máxima que o braço pode exercer com segurança é equivalente à 6 kg, foi escolhido trabalhar com o material alumínio AA1200-H14, que comparado à chapas de aço possuem uma resistência muito menor, sendo necessário menos força exercida pelo braço robótico durante os experimentos. Ao todo foram preparadas 11 chapas para os experimentos, duas a mais do que o objetivo. As chapas foram cortadas em formatos hexagonais de lado aproximadamente iguais a 80 mm, todas com 0,5 mm de espessuras.

Para fixar as chapas e impedir seu movimento durante a realização dos experimentos, foi utilizado um gabarito elaborado pelo professor orientador e alunos bolsistas, feito no material aço 1045, o mesmo utilizado por Macedo (2023), fixado à chapa por um mancal e quatro parafusos. O conjunto completo utilizado em todas os ensaios pode ser conferido na

figura 16, onde a chapa estava fixada com todos os parafusos apertados e a posição do robô em seu ponto zero.

Figura 16 – Conjunto Utilizado nos Experimentos

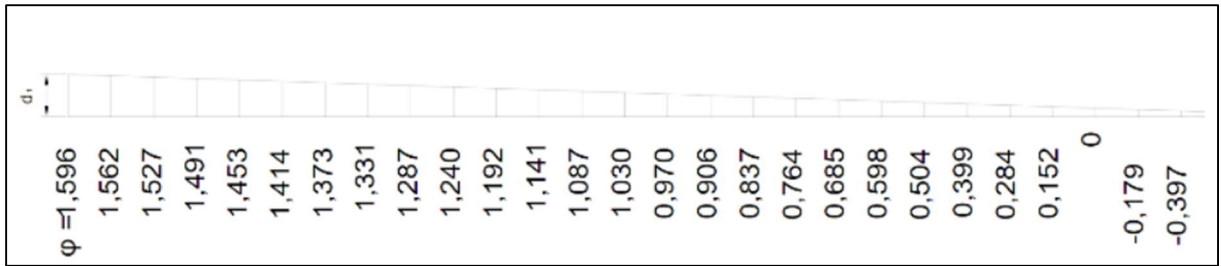


Fonte: Autor.

Para permitir a comparação da estampabilidade das chapas em diferentes configurações dos parâmetros, as chapas preparadas foram marcadas eletroquimicamente com uma malha formada por círculos de 1 mm (figura 18 - a), tornando evidente as regiões de deformação, e permitindo realizar a medição através de uma faixa flexível (figura 17, figura 18 - b) para visioelasticidade, assim como De Souza (2022).

A forma escolhida para conformação foi a helicoidal, com diâmetro inicial de 80 mm (figura 19). A escolha do formato se deve pelo fato da inclinação da parede aumentar gradativamente durante a estampagem, aumentando as chances de que haja uma ruptura, já que com o objetivo de comparar a estampabilidade, se mais de uma combinação não apresentasse falha não seria possível determinar a deformação máxima.

Figura 17 – Faixa Para Visioplaticidade



Fonte: DE SOUZA, 2022.

Figura 18 – (a) Chapa de Alumínio Marcada Quimicamente com Círculos de 1 mm;
(b) Exemplo de Medição por Visioplaticidade

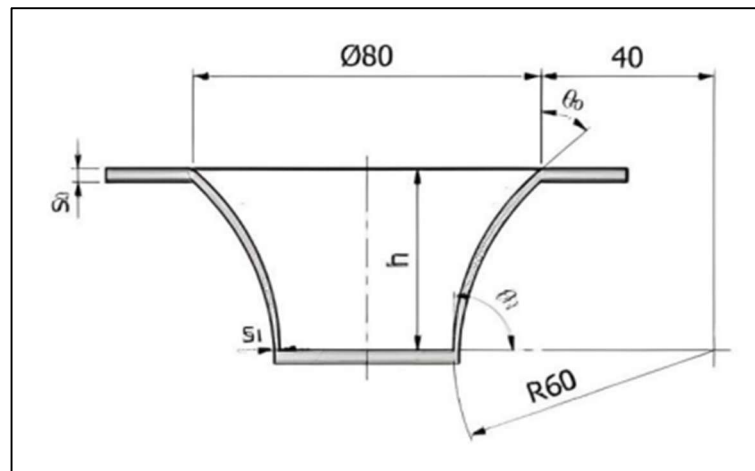


(a)

(b)

Fonte: Autor.

Figura 19 – Corte Transversal de Formato Hiperboloide



Fonte: SCHREIBER et al., 2022c.

Com as preparações e planejamentos prontos, os experimentos foram realizados da como se desenvolve a seguir.

No dia do experimento a chapa é posicionada entre os lados do mancal e fixada pelos quatro parafusos, sendo os parafusos apertados gradualmente, em uma ordem em cruz, para reduzir as chances de algum esforço pontual da fixação deforme a chapa antes da realização do experimento. A chapa marcada e a ponta da ferramenta, presa ao braço robótico, são lubrificadas com lubrificante desengripante Starrett M1. A posição inicial da ponta da ferramenta é alinhada com o centro da chapa, permitindo que haja espaço para a movimentação do braço robótico por todo o percurso programado, sem o risco de colisão com a parede do gabarito.

Com o robô e chapa em suas posições iniciais é dado início no programa, que conduzirá a ferramenta a conformar o formato helicoidal em todas a chapas, variando a velocidade de avanço (v) e o incremento vertical (Δz), sem rotação na ferramenta.

Cada ensaio termina quando ocorre a ruptura do material, assim, o programa não é realizado até final em nenhuma das rodadas. A chapa é então removida do gabarito, marcada com caneta permanente, e os valores dos parâmetros utilizados são anotados em planilha, a chapa então é reservada para ter seu valor de deformação determinado. Então o procedimento se repete para as 9 configurações planejadas do experimento, não sendo necessária a utilização das chapas sobressalentes preparadas.

Após o término dos ensaios, as deformações máximas de cada chapa são determinadas utilizando a visioplasticidade, medindo em vários pontos e anotando o valor máximo para d_1 indicado pela faixa flexível.

Para determinar a deformação a partir do valor de d_1 pode-se utilizar a equação 2 (DE SOUZA, 2022):

$$\varphi_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \quad (2)$$

Onde:

φ_1 : Deformação verdadeira no comprimento;

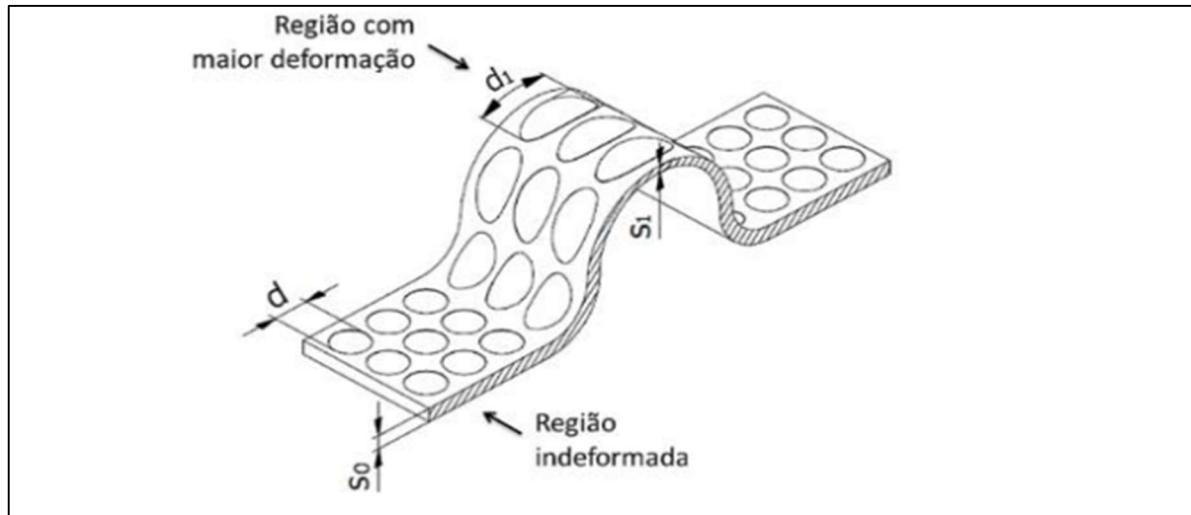
d_1 : Diâmetro final da malha [mm];

d_0 : Diâmetro inicial da malha [mm].

O diâmetro d_1 é o maior apresentado pela faixa previamente marcada nas chapas, e correlacionando com a equação 1, a espessura final ou a menor espessura da chapa também

ocorrerá neste ponto, vide figura 20. Ao estampar uma forma helicoidal, onde o rompido da chapa e propiciado pelo aumento do ângulo da parede, a espessura final e o diâmetro maior das elipses vão estar próximos ou na linha de rompimento.

Figura 20 – Corte Transversal de Formato Hiperboloide



Fonte: De SOUZA, 2022.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após finalizar a realização de todos os ensaios e determinar os valores para as deformações, o resultado obtido é conforme a tabela 2, a seguir.

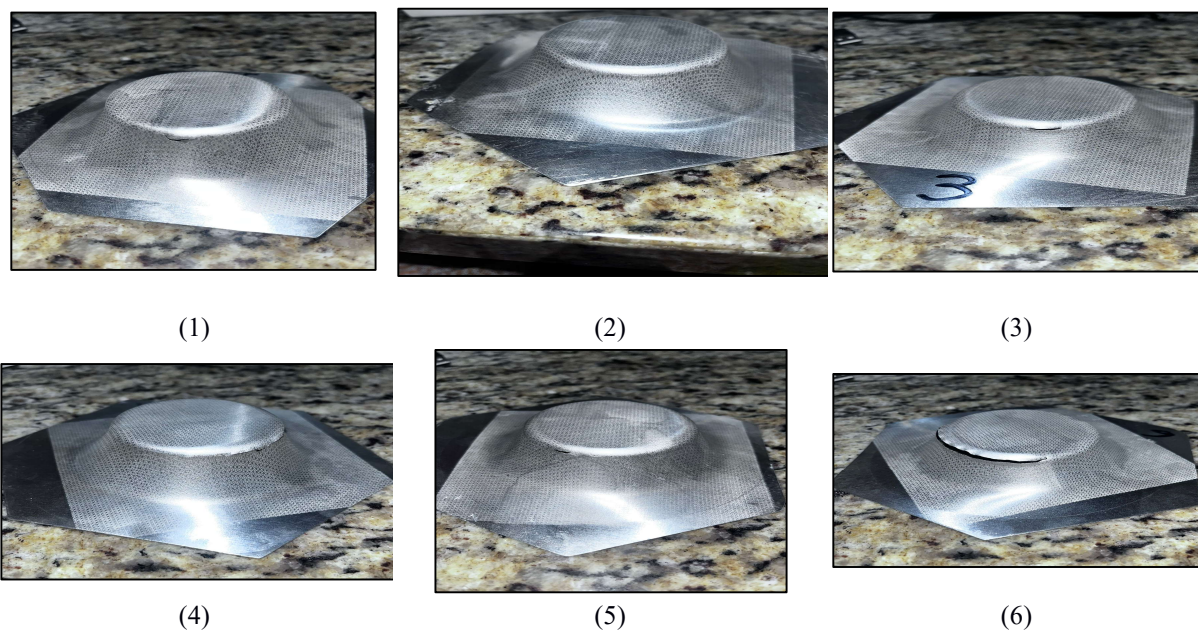
Tabela 2 – Resultados Das Medições Para os Ensaio

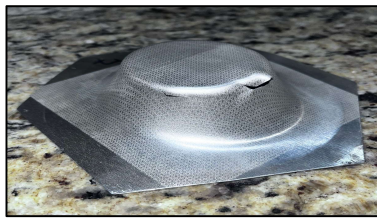
Ensaio	Velocidade de Avanço (v) [mm/s]	Incremento Vertical (Δz) [mm]	Deformação Máxima ($\varphi_{m\acute{a}x}$)
1	20,000	0,300	1,287
2	20,000	0,600	1,331
3	20,000	1,000	1,141
4	40,000	0,300	1,344
5	40,000	0,600	1,192
6	40,000	1,000	1,141
7	80,000	0,300	1,287
8	80,000	0,600	1,240
9	80,000	1,00	1,030

Fonte: Autor.

Todas as chapas utilizadas nos ensaios foram fotografadas, e as imagens de suas falhas podem ser visualizadas na figura 21.

Figura 21 – Chapas Conformadas Até a Falha

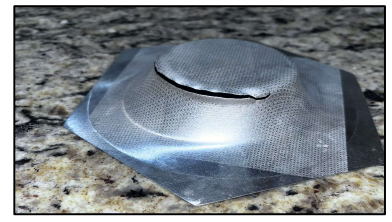




(7)



(8)



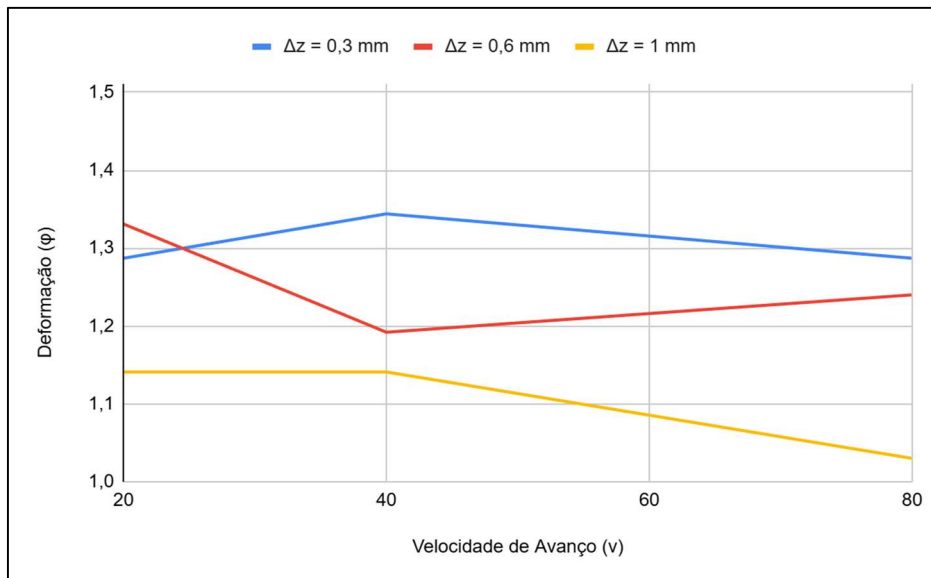
(9)

Fonte: Autor.

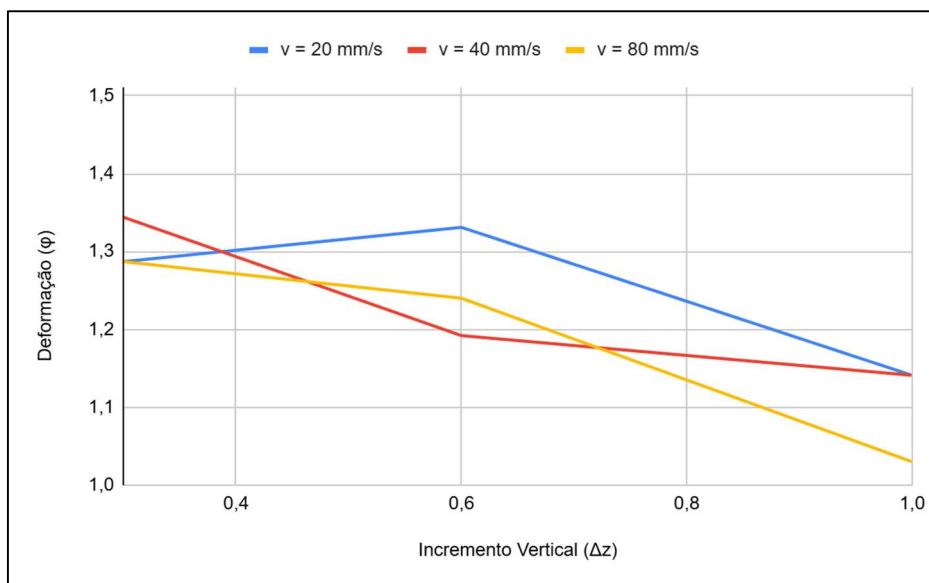
Com os dados dos experimentos prontos, foram gerados gráficos de linha simples para facilitar a visualização dos resultados.

O objetivo deste trabalho é focado exclusivamente na análise objetiva de resultados mensuráveis, porém é possível perceber pelas imagens das chapas, que as maiores velocidades de avanço geraram uma falha maior, mesmo com pequenos incrementos verticais. Isso pode ser devido ao fato de haver um tempo de reação mais estrito para encerrar o experimento assim que a ruptura ocorrer, porém mesmo nessa hipótese, é ressaltado como uma velocidade elevada de incremento pode tornar o processo mais volátil e aumentar a complexidade em controlá-lo. Os dados foram plotados em gráficos de linhas simples (figuras 22 e 23) para facilitar a visualização dos dados:

Figura 22 - Gráficos Deformação (φ) vs Velocidade de Avanço (v)



Fonte: Autor.

Figura 23 - Gráficos Deformação (φ) vs Incremento Vertical (Δz)

Fonte: Autor.

4.1 Aplicação de Análise de Variância

Observando a disposição dos dados no gráfico da figura 22 é possível identificar que mesmo havendo variação entre diferentes valores de velocidade de avanço (v), as linhas para cada valor de incremento vertical (Δz) estão posicionadas com valores cada vez menores conforme o incremento vertical (Δz) aumenta. Tal comportamento é reforçado ao se analisar as linhas da figura 23, onde todas as linhas apresentam a tendência de diminuir a deformação conforme se aumenta o incremento.

Para identificar com precisão a influência de cada parâmetro sobre a deformação, foi conduzida uma análise de variância (ANOVA) para dois critérios, no *software* RStudio. A seguir a tabela com os dados resultantes

Tabela 3 – Resultados ANOVA

Termo	Df	Soma dos Quadrados (SQ)	Média dos Quadrados (MQ)	Valor F	p-valor
Δz	1	0,06365	0,06365	14,737	0,0312
v	2	0,00688	0,00344	0,797	0,5279
$\Delta z : V_{\alpha}$	2	0,00293	0,00146	0,339	0,7366
Resíduos	3	0,01296	0,00432	—	—

Fonte: Autor.

Para poder identificar com maior precisão a influência de cada parâmetro sobre a deformação, foi conduzida uma análise de variância (ANOVA) para dois critérios, utilizando o software RStudio, com um valor de P de 0,05, referente à uma confiança de 95% de que os resultados obtidos pela análise do parâmetro são estatisticamente relevantes.

Os resultados mostraram que o fator Δz apresentou efeito estatisticamente significativo ($p = 0,0312$), indicando que a variação entre seus níveis altera de forma relevante o comportamento da resposta. Por outro lado, o fator $V\alpha$ não apresentou significância estatística ($p = 0,5279$), assim como a interação entre os fatores ($p = 0,7366$), demonstrando que estes não contribuem de maneira relevante para a variabilidade observada.

A soma dos quadrados dos resíduos foi relativamente baixa ($SQ = 0,01296$), representando aproximadamente 15,0% da variabilidade total. Isso indica que o modelo de ANOVA apresentou bom ajuste aos dados experimentais, com elevado grau de explicação da variação total. Apesar do número reduzido dos graus de liberdade associados ao erro ($GL = 3$), decorrente da quantidade limitada de repetições, os resultados obtidos são consistentes e permitem afirmar com segurança que o fator Δz é o principal responsável pelas diferenças observadas nos ensaios.

4.2 Elaboração de um Modelo Preditivo

Para complementar a análise de variância, ajustou-se um modelo de regressão linear múltipla relacionando a deformação verdadeira (φ) com a velocidade de avanço (v) e o incremento vertical (Δz). O modelo apresentou coeficiente de determinação $R^2 = 0,8156$, indicando que 81,56% da variabilidade dos resultados é explicada pelas variáveis independentes. O termo referente ao incremento vertical mostrou-se altamente significativo ($p = 0,00272$), confirmando sua forte influência sobre a deformação obtida. Já a velocidade de avanço apresentou efeito negativo, porém não significativo ($p = 0,15978$), sugerindo apenas uma tendência de redução da deformação para valores maiores de v , sem evidência estatística robusta.

O erro padrão residual foi de 0,05153, e o teste F indicou significância global do modelo ($p = 0,006268$), demonstrando que, em conjunto, as variáveis explicativas contribuem de forma relevante para prever o comportamento da deformação.

$$\varphi = 1,4587 - 0,0011v - 0,2456\Delta z \quad (3)$$

Onde:

φ : Deformação verdadeira no comprimento;

v : Velocidade de Avanço [mm/s];

Δz : Incremento Vertical [mm].

O baixo erro residual (0,05153) confirma a adequação do modelo para descrever o comportamento experimental na faixa de parâmetros estudada.

Com o fim de verificar a eficácia da fórmula em prever os resultados experimentais, foi utilizado a fórmula 4 para verificar o erro de cada repetição.

$$Erro = \left| \frac{(\varphi_3 - \varphi_1)}{\varphi_1} \cdot 100 \right| \quad (4)$$

Onde:

φ_3 : Deformação pela fórmula 3 (regressão);

φ_1 : Deformação pela fórmula 1 (medição por visioplasticidade).

Os valores de cada ensaio estão organizados na tabela 4, a seguir.

Tabela 4 – Erro Entre Deformações 1 e 3

Ensaio	Vel. de Avanço (v) [mm/s]	Incremento Vertical (Δz) [mm]	Deformação Eq. 1 (φ_1)	Deformação Eq. 3 (φ_3)	Erro [%]
1	20,000	0,300	1,287	1,363	5,91%
2	20,000	0,600	1,331	1,289	3,13%
3	20,000	1,000	1,141	1,191	4,39%
4	40,000	0,300	1,344	1,341	0,22%
5	40,000	0,600	1,192	1,267	6,32%
6	40,000	1,000	1,141	1,169	2,46%
7	80,000	0,300	1,287	1,297	0,78%
8	80,000	0,600	1,240	1,223	1,34%
9	80,000	1,000	1,030	1,125	9,23%
Média					3,75%

Fonte: Autor.

A velocidade de avanço não apresentou relevância estaticamente pela análise de variância aplicada (ANOVA), contudo, o coeficiente da equação de regressão referente a este parâmetro, mesmo que extremamente pequeno ao se comparar com o incremento vertical, possui um valor negativo, o que condiz com o comportamento visto em outros estudos e citado na revisão realizada por Gatea, Ou e McCartney (2016).

Desta forma, para determinar se a permanência deste parâmetro no modelo está gerando um valor mais preciso da deformação teórica, ou apenas trazendo ruído para os resultados, foi gerada uma nova equação, desta vez com a deformação dependendo exclusivamente dos valores de incremento vertical.

A equação 5 é o modelo fruto da regressão linear simples utilizando somente a, enquanto a tabela 5, apresenta os resultados de erro para essa nova equação, sendo φ_5 o valor da deformação prevista pela equação 5.

$$\varphi = 1,40719 - 0,29329\Delta z \quad (5)$$

Tabela 5 – Resultados Das Medições Para os Ensaio

Ensaio	Incremento Vertical (Δz) [mm]	Deformação Eq. 1 (φ_1)	Deformação Eq. 3 (φ_5)	Erro [%]
1	0,300	1,287	1,319	2,50%
2	0,600	1,331	1,231	7,50%
3	1,000	1,141	1,113	2,38%
4	0,300	1,344	1,319	1,85%
5	0,600	1,192	1,231	3,29%
6	1,000	1,141	1,114	2,38%
7	0,300	1,287	1,319	2,50%
8	0,600	1,240	1,231	0,71%
9	1,000	1,030	1,114	8,15%
Média				3,47%

Fonte: Autor.

Ao comparar os erros médios obtidos, nota-se que a presença da velocidade de avanço (v) aumenta afeta a precisão do modelo de regressão linear, com valores de 3,47% sem a variável, e 3,75%, com ela, trazendo a conclusão de que o modelo definitivo para este trabalho

deve ser o representado pela equação 5, realmente desprezando o envolvimento da velocidade de avanço.

4.3 Discutindo Resultados

Os resultados obtidos permitiram avaliar a influência dos parâmetros de processo na deformação máxima durante a Estampagem Incremental de Chapas (ISF), sendo analisados por meio de Análise de Variância (ANOVA) e modelos de regressão linear.

A análise estatística evidenciou que o incremento vertical (Δz) apresenta influência estatisticamente significativa sobre a deformação máxima, enquanto a velocidade de avanço (v) não demonstrou efeito relevante dentro da faixa investigada. Além disso, não foi identificada interação significativa entre esses parâmetros, indicando que o comportamento da deformação é predominantemente governado pelo incremento vertical. Esses resultados em concordância com a literatura atual, que aponta o incremento vertical e o ângulo de parede como fatores determinantes da conformabilidade no processo SPIF (JACKSON; ALLWOOD, 2009; SCHREIBER, 2022a; SCHREIBER et al., 2022c).

O modelo de regressão linear múltipla inicialmente ajustado permitiu descrever a deformação em função dos dois parâmetros estudados; entretanto, observou-se que a inclusão da velocidade de avanço introduziu maior dispersão nos resultados, sem contribuição estatisticamente significativa para a capacidade explicativa do modelo. Em função disso, foi ajustado um modelo de regressão linear simples considerando apenas o incremento vertical como variável independente.

O novo modelo apresentou desempenho superior, reduzindo o erro médio de 3,75% para 3,47%, além de apresentar coeficiente estatisticamente significativo e menor erro residual. A validação do modelo indicou boa concordância entre os valores experimentais e os valores estimados, com erro médio geral de 3,47%, evidenciando adequada capacidade preditiva. Esse nível de precisão é compatível com estudos semelhantes disponíveis na literatura, como os de Schreiber (2022b) e De Souza et al. (2022).

De forma geral, os resultados reforçam o consenso de que o incremento vertical é um parâmetro crítico para o controle da deformação e da estampabilidade no processo SPIF, enquanto a velocidade de avanço apresenta influência secundária ou dependente da faixa operacional analisada.

5 CONCLUSÃO

5.1 Objetivos alcançados

Este trabalho teve como objetivo analisar o processo de Estampagem Incremental de Chapas (*Incremental Sheet Forming* – ISF), com foco na influência dos parâmetros de processo sobre a deformação máxima. A metodologia adotada permitiu avaliar de forma estruturada o comportamento do processo, utilizando ensaios experimentais, análise estatística e modelagem por regressão.

De maneira geral, os objetivos propostos foram atendidos, permitindo estabelecer conclusões claras sobre o papel dos parâmetros analisados no comportamento da deformação no processo ISF, em alinhamento com o conhecimento consolidado na literatura.

5.2 Conclusões obtidas

A partir dos resultados analisados, conclui-se que o incremento vertical é o principal parâmetro responsável pela variação da deformação máxima no processo de estampagem incremental, exercendo influência predominante dentro das condições estudadas.

Constatou-se também que a velocidade de avanço apresentou influência secundária sobre a deformação máxima, não sendo determinante para o comportamento do processo na faixa operacional analisada.

Além disso, verificou-se que a deformação máxima pode ser adequadamente estimada por meio de modelos de regressão linear simplificados, desde que baseados nos parâmetros mais relevantes do processo.

5.3 Limitações do estudo

Apesar dos resultados obtidos, o estudo apresenta limitações associadas à quantidade de ensaios realizados e à restrição da faixa de variação dos parâmetros analisados, o que limita a extrapolação dos resultados para outras condições e características do processo.

Adicionalmente, a análise concentrou-se exclusivamente na deformação máxima, não abrangendo outros aspectos relevantes, como qualidade superficial, estabilidade operacional e esforços de conformação.

5.4 Trabalhos futuros

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a ampliação do número de ensaios experimentais e da faixa de variação dos parâmetros de processo, visando a obtenção de modelos mais robustos e abrangentes.

Sugere-se também a investigação da influência da velocidade de avanço e de outros parâmetros do processo sobre parâmetros complementares, como qualidade superficial, forças de conformação, aquecimento local e desgaste da ferramenta.

Por fim, estudos futuros podem explorar modelos não lineares e a influência de variáveis adicionais, como raio da ferramenta, condições de atrito, parâmetros de rotação, influência do método de fixação e faixas ótimas de velocidade de avanço, onde esta pode ser estabelecida em um ponto máximo de desempenho sem comprometer a segurança da operação.

REFERÊNCIAS

- ALLWOOD, Julian M.; BRAUN, Daniel; MUSIC, Omer. **The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming**. Journal of Materials Processing Technology, v. 210, n. 11, p. 1501-1510, 2010.
- BAGUDANCH FRIGOLÉ, Isabel et al. **Incremental sheet forming applied to the manufacturing of biocompatible polymer prostheses**. 2017.
- BERGHAHN JR., Walter G.; MURRAY, George F. **Method of dielessly forming surfaces of revolution**. Titular: General Electric Co. US n. US3316745A. Depósito: 08 fev. 1965. Concessão: 02 maio 1967. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US3316745A/en>. Acesso em: 15 out. 2025.
- DE SOUZA, Régis Marcelo et al. **Comparação entre visioelasticidade e FEM para determinação das deformações na estampagem incremental em latão C-268: Comparison between visioelasticity and FEM for determination of strains in incremental sheet forming in brass sheet C-268 alloy**. Brazilian Journal of Development, v. 8, n. 10, p. 65200-65213, 2022.
- EMMENS, W. C.; SEBASTIANI, Gerd; VAN DEN BOOGAARD, Antonius H. **The technology of incremental sheet forming—a brief review of the history**. Journal of Materials processing technology, v. 210, n. 8, p. 981-997, 2010.
- GATEA, Shakir; OU, Hengan; McCARTNEY, Graham. **Review on the influence of process parameters in incremental sheet forming**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 87, n. 1, p. 479-499, 2016.
- ISEKI, Hideo. **Flexible and incremental bulging of sheet metal using high-speed water jet**. JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, v. 44, n. 2, p. 486-493, 2001.
- ISMAIL, Nazarul Abidin, et al. **Parametric optimization of robot-based single point incremental forming using Taguchi method**. International Journal of Integrated Engineering, 2019, 11.1.
- JACKSON, K.; ALLWOOD, J., 2009. **The mechanics of incremental sheet forming**. Journal of materials processing technology, 209(3), pp.1158-1174.
- LESZAK, Erich. **Apparatus and process for incremental dieless forming**. Patente de invenção nº US3342051A, Estados Unidos, 19 dez. 1967.
- MACEDO, Maria E Silva De. **Avaliação De Parâmetros Em Estampagem Incremental Para Chapas De Policloreto De Vinila (PVC)**. Orientador: Prof. Dr. Rafael Gustavo Schreiber. 2023. Trabalho de conclusão (bacharelado em engenharia mecânica) - Instituto Federal De Santa Catarina, Lages, 2023.

MATEUS, Victor von Glehn. **Estudo do processo de estampagem incremental em chapas de aço AISI 430**. 2018. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

MILUTINOVIĆ, M et al. **Characterisation of geometrical and physical properties of a stainless steel denture framework manufactured by single-point incremental forming**. Journal of Materials Research and Technology, [S. l.], v. 10, p. 605–623, jan. 2021.

MIROIR, M. et al. **Water jet incremental sheet metal forming: a critical state-of-the-art review and a proposal for technological windows**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, London, v. 119, n. 7, p. 4159–4175, abr. 2022.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments**. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

POPP, Gabriela-Petruța et al. **State of the art in incremental forming: process variants, tooling, industrial applications for complex part manufacturing and sustainability of the process**. Materials, v. 17, n. 23, p. 5811, 2024.

PRASAD, Ranjeet; ORAON, Manish; SHARMA, Vinay. **Exploring Advancements in Incremental Sheet Metal Forming: A Review**. Engineering Research Express, 2025.

SCHREIBER, Rafael Gustavo; ARALDI, Ariton; KINIZ JÚNIOR, Maurício; DALEFFE, Anderson; SCHAEFFER, Lirio. **Failure criterion for SPIF based on mean stress**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 44, n. 5, p. 193, 2022a.

SCHREIBER, Rafael Gustavo. **Método De Determinação Do Limite De Deformação Na Estampagem Incremental De Diferentes Materiais**. Orientador: Prof. Dr. Lirio Schaeffer, Co-orientador: Prof. Dr. Anderson Daleffe. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2022b.

SCHREIBER, Rafael Gustavo; KINIZ JÚNIOR, Maurício; FIUZA FILHO, Fernando; SCHAEFFER, Lirio. **Influência dos parâmetros de estampagem incremental na estampabilidade de chapas de alumínio puro**. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 27, p. 13140, 2022c.

TISZA, Miklós. **General overview of sheet incremental forming**. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, v. 55, n. 1, p. 113-120, 2012.

TRZEPIECIŃSKI, Tomasz et al. **Recent developments and future challenges in incremental sheet forming of aluminium and aluminium alloy sheets**. Metals, v. 12, n. 1, p. 124, 2022.