



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia



Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

**MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE DEFORMAÇÃO NA
ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE DIFERENTES MATERIAIS**

Rafael Gustavo Schreiber

Tese de Doutorado

Porto Alegre
Março de 2022

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

**MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE DEFORMAÇÃO NA
ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE DIFERENTES MATERIAIS**

Rafael Gustavo Schreiber
Mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

Trabalho realizado junto ao Laboratório de Transformação Mecânica do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
Março de 2022

Tese submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGE3M, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para obtenção do Título de Doutor em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Lirio Schaeffer
PPGE3M/UFRGS

Co-orientador: Prof. Dr. Anderson Daleffe
UNISATC

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Daniel Fritzen – UNISATC

Prof. Dr. João Henrique Corrêa de Souza – FURG

Prof. Dr. Jovani Castelan – UNISATC

Prof. Dr. Afonso Reguly
Coordenador do PPGE3M

Dedico aos meus pais
Sergio Roberto Schreiber (*in memoriam*)
e Zenilda da Rosa Schreiber.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Camila Schreiber, por me acompanhar e me apoiar nessa jornada tão longa de estudos.

Aos professores Lirio Schaeffer e Anderson Daleffe, meus orientadores, que apesar da distância física me auxiliaram em reuniões online com suas contribuições e sugestões que viabilizaram o desenvolvimento deste trabalho.

Ao colega Ariton Araldi do IFSC Lages, pelo auxílio na operação do torno CNC do campus e pela parceria na realização dos experimentos de Estampagem Incremental.

Ao meu aluno Maurício Kiniz Júnior, pelo auxílio na dedução das equações apresentadas no método desenvolvido neste trabalho.

Ao meu aluno Lucas Santos Savi Mondo, pelo auxílio na instalação e calibração do sistema de medição de forças.

*" A resposta certa, não importa nada:
o essencial é que as perguntas estejam certas".*

Mario Quintana

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XIX
LISTA DE TABELAS	XXI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XXII
LISTA DE SÍMBOLOS	XXIII
ABSTRACT	XXVI
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 OBJETIVO GERAL.....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 VARIAÇÕES DO PROCESSO.....	17
2.2 MÁQUINAS PARA ESTAMPAGEM INCREMENTAL	22
2.3 APLICAÇÕES.....	23
2.4 PARÂMETROS DO PROCESSO	27
2.4.1 Raio da ferramenta (R_f)	29
2.4.2 Incremento vertical (Δz).....	29
2.4.3 Velocidade de rotação (N).....	30
2.4.4 Velocidade de avanço (a)	31
2.4.5 Temperatura	32
2.4.6 Lubrificação	32
2.4.7 Resumo da Influência dos Parâmetros	33
2.5 LIMITES DE DEFORMAÇÃO.....	34
2.6 TENSÕES.....	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 EXPERIMENTOS DE ESTAMPABILIDADE	43
3.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 LIMITES DE DEFORMAÇÃO.....	51
4.2 MEDIÇÃO DAS FORÇAS	56
4.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	59
5 CONCLUSÕES.....	62
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	63
REFERÊNCIAS.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de Estampagem Incremental [24].....	17
Figura 2: Processo SPIF [25].....	18
Figura 3: Variações do processo TPIF: (a) TPIF com matriz positiva completa e (b) TPIF com matriz positiva parcial [25].....	18
Figura 4: TPIF com matriz negativa completa [28]	19
Figura 5: Representação do processo DSIF [29].....	19
Figura 6: Representação do processo MSPIF [32].....	20
Figura 7: Aplicação do processo MSPIF: (a) Cone após 1° passe da ferramenta e (b) cone após 2° passe da ferramenta [32].....	21
Figura 8: TPIF de passes múltiplos com matriz parcial: (a) Estágios do processo e (b) Pré-forma e forma final [34].....	21
Figura 14: Máquinas de Estampagem Incremental: (a) Fresadora CNC [4], (b) Braço Robótico [36], (c) Torno CNC [4], (d) Máquina Amino Dedicada à Estampagem Incremental [1], (e) F3T Dedicada à Estampagem Incremental [37].	22
Figura 11: Protótipo de prótese craniana de titânio fabricada por Estampagem Incremental: (a) Projeto em CAD, (b) Vista isométrica da montagem do protótipo e (c) vista frontal da montagem [5]	24
Figura 9: Protótipo de Aleta de Coletor Solar fabricada por Estampagem Incremental: (a) Conjunto de aletas montadas na serpentina de tubos de cobre e (b) Detalhe de montagem da aleta estampada sobre tubo de cobre [9]	25
Figura 10: Protótipo de Forno Solar com cavidade fabricada por Estampagem Incremental: (a) Vista lateral do conjunto, (b) Parte interna da cavidade estampada e (c) parte externa da cavidade [35]	25
Figura 12: Capô do Honda S800 fabricado com Estampagem Incremental: (a) Parte superior do capô estampado, (b) Parte inferior do capô e (c) Capô montado no veículo [1]	26
Figura 13: Estampagem Incremental na porta do TOYOTA iQ-GRMN: (a) Logomarca estampada na porta e (b) Fotografia do veículo no Tokyo Auto Salon 2012 [1].....	27
Figura 15: Principais parâmetros do processo de Estampagem Incremental por SPIF [42]	27
Figura 16: Comparação entre a FLC e o FFLD [64]	34

Figura 17: Estratégia 1: Estampagem Convencional – Estiramento do material na ponta livre (a), Estricção em um único local (b), Fratura no local de estricção (c); Estratégia 2: Estampagem Incremental - Estiramento localizado na seção AA (d), Estiramento em diferentes seções (e), Material conformado com maior comprimento sem fratura (f) [66]	35
Figura 18: FFLD de diferentes materiais: AL5052-O, $s_0 = 0,8$ mm (a), AL3000, $s_0 = 0,6$ mm (b), STS304, $s_0 = 0,5$ mm (c), Ti, $s_0 = 0,5$ mm (d) [65]	36
Figura 19: Diferentes FFLDs com variação do incremento vertical e rotação da ferramenta em comparação com a FLC de AA1100-H14 [9].....	38
Figura 20: Área de contato entre ferramenta e peça no processo SPIF (a) e tensões principais em um elementos de volume na chapa (b) [70].....	39
Figura 21: Diagrama de blocos do planejamento experimental.....	43
Figura 22: Torno CNC Nardini LOGIC 195VS	44
Figura 23: Montagem do dispositivo no torno CNC	44
Figura 24: Vista em corte do dispositivo de fixação da chapa	45
Figura 25: Hiperboloide: Chapa conformada em corte (a) e Estratégia paralela ao contorno para conformação (b)	46
Figura 26: Dimensões das ferramentas.....	46
Figura 27: Método de determinação das deformações	47
Figura 28: Instalação da ponte completa na ferramenta (a) e circuito da ponte completa (b).....	48
Figura 29: Configuração das simulações	50
Figura 30: Efeito dos valores de raio da ferramenta e de material na tensão critica	53
Figura 31: FFLDs obtidos pelo método analítico para (a) AA1200-H14, (b) SAE1008 e (c) C268.....	56
Figura 32: Gráficos de comparação de forças entre diferentes raios de ferramenta para SAE1008 e $s_0 = 0.75$ mm	57
Figura 33: Gráficos de comparação de forças entre diferentes espessuras para SAE1008 e $R_f = 5$ mm	58
Figura 34: Gráficos de comparação de forças entre diferentes materiais com $R_f = 5$ mm	58
Figura 35: Gráficos de comparação de forças entre valores experimentais e simulação FEM para C268 com $s_0 = 0.50$ mm e $R_f = 7.5$ mm	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Influência dos parâmetros do processo de Estampagem Incremental	33
Tabela 2: Tensões Principais e Tensão Média no Estado Plano de Deformações em SPIF [52].....	39
Tabela 3: Propriedades dos Materiais	42
Tabela 4: Resultados dos experimentos de estampabilidade em SPIF.....	51
Tabela 5: Comparação dos resultados experimentais com o método analítico.....	55
Tabela 6: Comparação dos resultados experimentais de força com os obtidos pela equação de regressão.....	59
Tabela 7: Resultados das simulações	60

LISTA DE ABREVIATURAS

AA	Associação do Alumínio (<i>Aluminum Association</i>);
CAD	Desenho Assistido por Computador (<i>Computer Aided Design</i>);
CNC	Comando Numérico Computadorizado;
DP	Aço bifásico (<i>Dual phase steel</i>);
DSIF	Estampagem Incremental de Face Dupla (<i>Double Sided Incremental Forming</i>);
FEM	Método de Elementos Finitos (<i>Finite Element Method</i>);
FFLD	Diagrama Limite de Fratura (<i>Fracture Forming Limit Diagram</i>);
FLC	Curva Limite de Conformação (<i>Forming Limit Curve</i>);
F3T	Tecnologia Ford de Fabricação de Formas Livres (<i>Ford Freeform Fabrication Technology</i>);
ISF	Estampagem Incremental (<i>Incremental Sheet Forming</i>);
JIS	Normas Industriais Japonesas (<i>Japanese Industrial Standards</i>);
MSPIF	Estampagem Incremental de Ponto Único por Múltiplos Passes (<i>Multi-pass Single Point Incremental Forming</i>);
PPGE3M	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais;
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automotivos (<i>Society of Automotive Engineers</i>);
SPIF	Estampagem Incremental de Ponto Único (<i>Single Point Incremental Forming</i>).
STS	Aço de Tratamento Especial (<i>Special Treatment Steel</i>);
TPIF	Estampagem Incremental por Dois Pontos (<i>Two Point Incremental Forming</i>);
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Velocidade de avanço da ferramenta	[mm/s]
C	Coefficiente de resistência (da equação de Ludwick-Hollomon)	[MPa]
d	Comprimento final da elipse	[mm]
d_0	Dimensão inicial da grade de círculos	[mm]
E	Módulo de elasticidade	[GPa]
h	Profundidade estampada	[mm]
k_f	Resistência ao escoamento	[MPa]
N	Velocidade de rotação da ferramenta	[rpm]
n	Coefficiente de encruamento	[-]
PE	Erro percentual	[%]
R^2	Coefficiente de determinação	[-]
R_e	Limite de escoamento	[MPa]
R_f	Raio da ferramenta	[mm]
R_m	Limite de resistência à tração	[MPa]
s	Espessura final da chapa	[mm]
s_0	Espessura inicial da chapa	[mm]
X	Dado calculado	[-]
X_{exp}	Dado experimental	[-]

Símbolos gregos:

α	Nível de significância	[-]
Δxy	Incremento lateral da ferramenta	[mm]
Δz	Incremento vertical da ferramenta	[mm]
ε	Deformação percentual	[%]
φ_{eq}	Deformação verdadeira equivalente	[-]
φ_1	Maior deformação verdadeira no plano	[-]
φ_2	Menor deformação verdadeira no plano	[-]
φ_3	Deformação verdadeira na espessura	[-]
σ_c	Tensão crítica	[MPa]
σ_{eq}	Tensão equivalente	[MPa]
σ_m	Tensão média	[MPa]

σ_1	Tensão principal máxima	[MPa]
σ_2	Tensão principal intermediária	[MPa]
σ_3	Tensão principal mínima	[MPa]
θ	Ângulo de parede final	[° ou rad]
θ_0	Ângulo de parede inicial	[° ou rad]

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um método analítico para estimar os limites de deformação e também foi desenvolvida uma equação de regressão para estimar a força axial máxima no processo de Estampagem Incremental. 27 experimentos de estampabilidade foram realizados com diferentes materiais (SAE1008, AA1200-H14 e C268), diferentes espessuras e raios de ferramenta, seguidos de simulações pelo Método de Elementos Finitos (FEM), análise de variância (ANOVA) e regressão múltipla. A ANOVA mostrou efeito do material, do raio de ferramenta e da interação entre eles na tensão utilizada como critério de falha. As simulações FEM permitiram validar os resultados de forças medidas no processo. O método analítico para estimar os limites de deformação se mostrou eficiente, com erro percentual máximo de 6,7 % em relação aos valores experimentais. O modelo de regressão para estimativa da força axial máxima apresentou elevada precisão, com erro percentual máximo de 11,5%.

Palavras chaves: Estampagem Incremental, Limites de Deformação, Força Axial Máxima, FEM, ANOVA, Regressão Múltipla.

ABSTRACT

In this work an analytical method was developed to estimate the strain limits and a regression equation was also developed to estimate the maximum axial force in the Incremental Sheet Forming process. 27 formability experiments were carried out with different materials (SAE1008, AA1200-H14 and C268), different thicknesses and tool radii, followed by simulations by the Finite Element Method (FEM), analysis of variance (ANOVA) and multiple regression. ANOVA showed the effect of material, tool radius and the interaction between them on the stress used as failure criterion. The FEM simulations allowed to validate the results of forces measured in the process. The analytical method to estimate the strain limits proved to be efficient, with a maximum percentage error of 6.7% in relation to the experimental values. The regression model for estimating the maximum axial force showed high accuracy, with a maximum percentage error of 11.5%.

Key words: Incremental Sheet Forming, Strain Limits, Maximum Axial Force, FEM, ANOVA, Multiple Regression.

1 INTRODUÇÃO

A Estampagem Incremental é geralmente aplicada à prototipagem rápida e à fabricação de pequenos lotes de peças, podendo ser utilizada na conformação de chapas de diferentes materiais, conferindo alta estampabilidade e possibilitando a fabricação de formas complexas [1,2]. Este processo é extremamente flexível, pois não necessita de ferramental dedicado [3] e pode ser realizado em uma máquina CNC [4]. Além disso tem sido aplicada em diversas áreas, como na área de próteses [5–7], de coletores solares [8–10], de peças para indústria automotiva [1,11,12] e na indústria aeronáutica [13,14].

Duas patentes publicadas em 1967 podem ser consideradas as precursoras do atual processo de Estampagem Incremental, uma publicada por Leszak [15] e outra por Berghahn e Murray [16]. Anos depois, nos trabalhos de Mason em 1978 foi realizado o processo em um torno [17] e posteriormente, nos trabalhos de Iseki *et al.* em 1989 em uma fresadora, o que permitiu a fabricação de peças não simétricas [18].

Diversos estudos foram desenvolvidos utilizando métodos analíticos para tentar estabelecer um critério de falha para a Estampagem Incremental. Han e Kim [19] desenvolveram um critério de falha baseado no modelo de dano de Cockcroft-Latham e na máxima tensão de cisalhamento e o aplicaram em experimentos em chapas de aço e de alumínio. Gatea *et al.* [20] desenvolveram um critério de dano Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) modificado, considerando a triaxialidade para prever a fratura dúctil no processo ISF de titânio puro (grau 1 e 2). Huang *et al.* [21] desenvolveram um critério de falha baseado no modelo de Oyane, considerando diversos parâmetros do processo e duas constantes, e então o aplicaram em experimentos com AA5052-O. Wu *et al.* [22] desenvolveram um critério de dano baseado na triaxialidade e em parâmetros do processo e o aplicaram a AA1050-H111.

Este trabalho tem como objetivo apresentar um método analítico utilizando o valor de tensão média, calculada pela análise da membrana [23], como parâmetro de referência para determinar o limite de deformação na Estampagem Incremental de diferentes materiais. E, além disso avaliar a influência das propriedades do material, da espessura da chapa e do raio de ferramenta na máxima força axial

aplicada na ferramenta de conformação, definindo uma equação de regressão para estimar a intensidade desta força.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um novo método de previsão dos limites de deformação para a Estampagem Incremental, em função dos parâmetros de maior influência no processo (raio da ferramenta, espessura da chapa e tipo de material).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir os limites de deformação para cada material, de acordo com a variação dos parâmetros do processo;
- Desenvolver um método para estimar os limites de deformação;
- Desenvolver uma equação de regressão para estimar a força axial máxima necessária para o processo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a realização do processo de Estampagem Incremental a chapa a ser conformada deve ser fixada entre uma base e um prensa-chapas. Em seguida uma ferramenta com ponta semiesférica realiza a conformação da chapa de acordo com a sua trajetória, conforme indicado na Figura 1. Este processo pode ser executado com ou sem rotação da ferramenta.

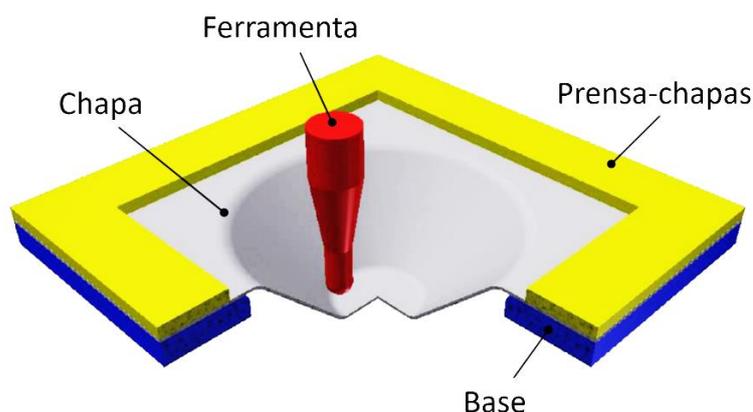


Figura 1: Processo de Estampagem Incremental [24]

A seguir são apresentadas as variações do processo de Estampagem Incremental, bem como diversos exemplos de aplicações, máquinas utilizadas, parâmetros de influência, determinação dos limites de deformação e cálculo de tensões.

2.1 VARIAÇÕES DO PROCESSO

A forma mais comum do processo de Estampagem Incremental é o SPIF (Estampagem Incremental de Ponto Único - *Single Point Incremental Forming*). Neste processo a chapa é fixada entre uma base e um prensa-chapas, enquanto uma ferramenta semiesférica realiza a conformação do material por meio do incremento de sua trajetória, sem necessidade da utilização de matriz, conforme indicado na Figura 2

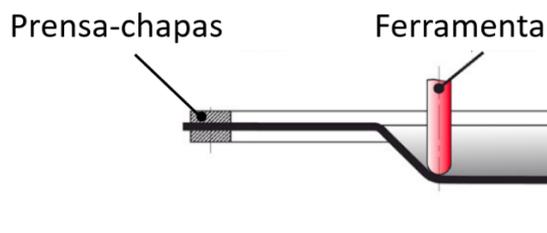


Figura 2: Processo SPIF [25]

O processo TPIF (Estampagem Incremental por Dois Pontos - *Two Point Incremental Forming*) é realizado com uma matriz completa ou parcial abaixo da chapa a ser conformada. O TPIF é usado para melhorar as tolerâncias geométricas na fabricação de peças complexas, sem custo extra substancial, pois as matrizes podem ser fabricadas com materiais de baixo custo (como aços baixo carbono, materiais poliméricos e madeira) [2,26].

No TPIF com matriz positiva completa, indicado na Figura 3(a), assim como no TPIF com matriz positiva parcial, indicado na Figura 3(b), é necessário o uso de um sistema constituído de guias e prensa-chapas móvel, que permita a movimentação da chapa para baixo à medida que a ferramenta executa sua trajetória contra a chapa.

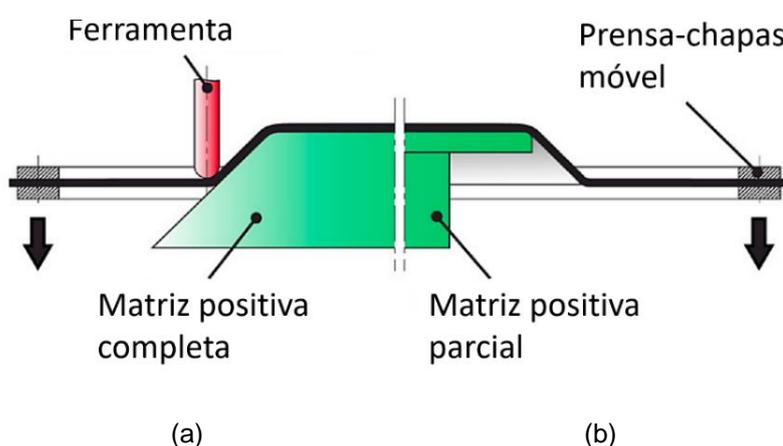


Figura 3: Variações do processo TPIF: (a) TPIF com matriz positiva completa e (b) TPIF com matriz positiva parcial [25]

Como no TPIF com matriz parcial, a matriz não apresenta exatamente o formato da peça a ser estampada, este confere maiores desvios geométricos à peça em comparação com o TPIF com matriz completa.

O processo TPIF também pode ser realizado com matriz negativa (completa ou parcial). Neste caso o ferramental exigido é mais simples, não necessitando de sistema de guias e prensa-chapas móvel, conforme indicado na Figura 4. Ao comparar TPIF com matriz positiva e TPIF com matriz negativa, verifica-se que apesar de exigir ferramental de maior complexidade (com partes móveis) o TPIF com matriz positiva necessita de menor força para realizar a conformação, o que gera menores tensões residuais na chapa e conseqüentemente menores desvios geométricos à peça devido ao menor retorno elástico [27].

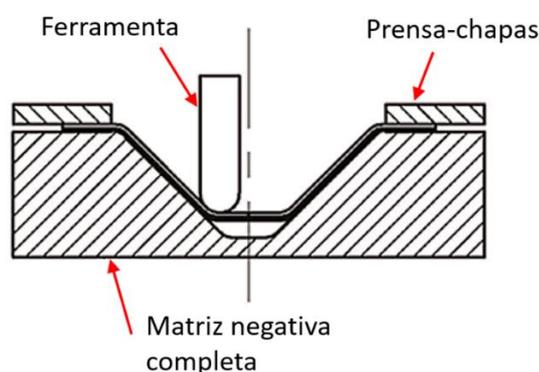


Figura 4: TPIF com matriz negativa completa [28]

Outra variação da Estampagem Incremental é o processo DSIF (Estampagem Incremental de Face Dupla - *Double Sided Incremental Forming*), que assim como em SPIF é realizada sem matriz. No entanto nessa variação são utilizadas duas ferramentas que atuam de forma sincronizada, uma na parte superior e outra na parte inferior da chapa, conforme indicado na Figura 5 [29]. O processo DSIF possibilita maiores deformações e menores desvios geométricos à peça quando comparado ao processo SPIF, além de ser mais flexível e não necessitar da fabricação de matrizes, como nos processos TPIF [30].

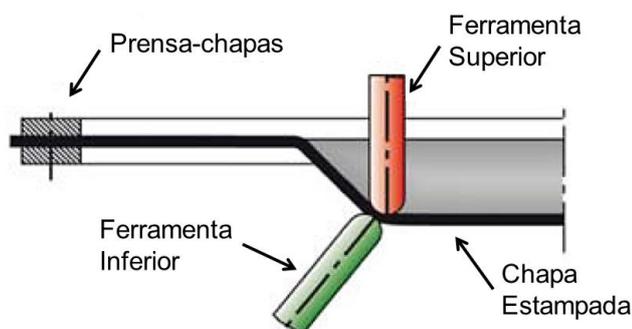


Figura 5: Representação do processo DSIF [29]

Ainda que o processo de Estampagem Incremental permita a fabricação de peças com grandes deformações (maiores que na estampagem convencional) [31], a fabricação de peças com ângulos de parede próximos de 90° são difíceis de serem obtidos em apenas um passe da ferramenta [32]. Para superar esta dificuldade foi desenvolvido o processo MSPIF (Estampagem Incremental de Ponto Único por Múltiplos Passes - *Multi-pass Single Point Incremental Forming*), que permite a distribuição uniforme da espessura com maiores ângulos de parede [32,33]. No processo MSPIF é realizada a estampagem de perfis em ângulos intermediários, conforme indicado na Figura 6.

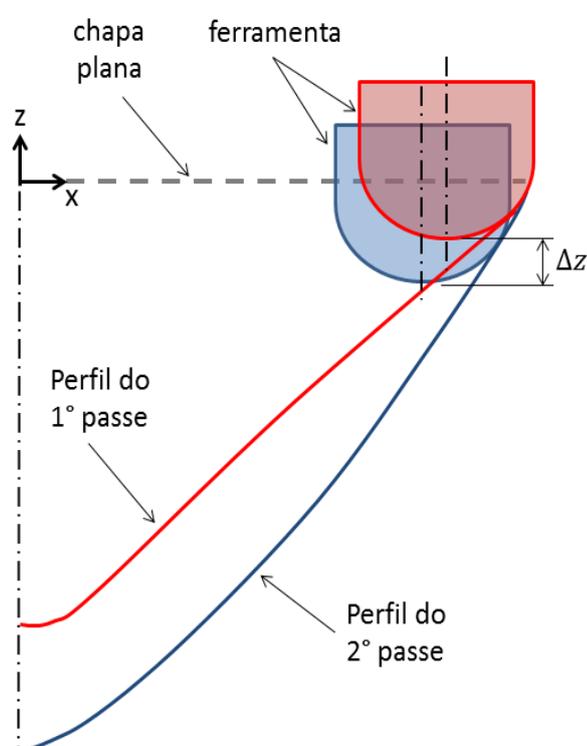


Figura 6: Representação do processo MSPIF [32]

A Figura 7(a) mostra uma aplicação do processo MSPIF, no qual foi realizado o primeiro passe da ferramenta em um ângulo de 30° em liga de alumínio AA5052 com espessura inicial de 1 mm. Na Figura 7(b) é apresentada a peça após o segundo passe da ferramenta com ângulo de parede de 60°, sendo que nessa figura também é indicado que na base do cone ocorre uma redução brusca de espessura na chapa.

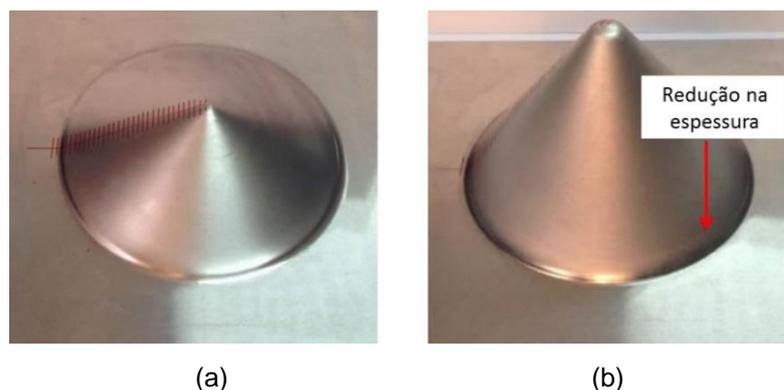


Figura 7: Aplicação do processo MSPIF: (a) Cone após 1° passe da ferramenta e (b) cone após 2° passe da ferramenta [32]

Ainda existe a possibilidade da combinação entre os processos de Estampagem Incremental apresentados anteriormente, de acordo com as peculiaridades da peça a ser fabricada. Na Figura 8(a) é apresentada a aplicação de TPIF de múltiplos passes com matriz parcial. Neste processo foram realizados três passes de deformação alternando movimentos descendentes e ascendentes da ferramenta. A Figura 8(b) apresentado resultado da peça estampada após o primeiro passe (pré-forma) com ângulo de parede inicial $\theta_0 = 45^\circ$ e logo abaixo a forma final estampada após o terceiro passe com ângulo de parede $\theta = 81^\circ$ [34].

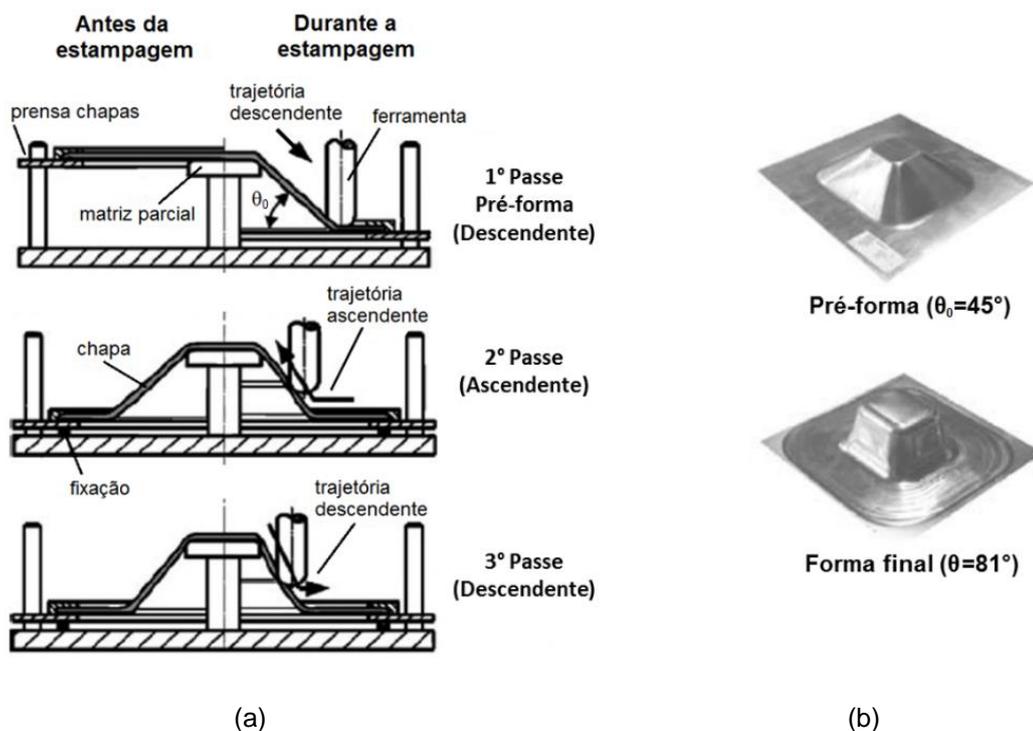


Figura 8: TPIF de passes múltiplos com matriz parcial: (a) Estágios do processo e (b) Pré-forma e forma final [34]

2.2 MÁQUINAS PARA ESTAMPAGEM INCREMENTAL

O processo de Estampagem Incremental pode ser realizado em diferentes tipos de máquinas, como fresadoras [4], tornos CNC [4], braços robóticos [29,35], ou em máquinas dedicadas ao processo [1,36]. A Figura 9 apresenta uma visão geral das máquinas que podem ser aplicadas ao processo de Estampagem Incremental.

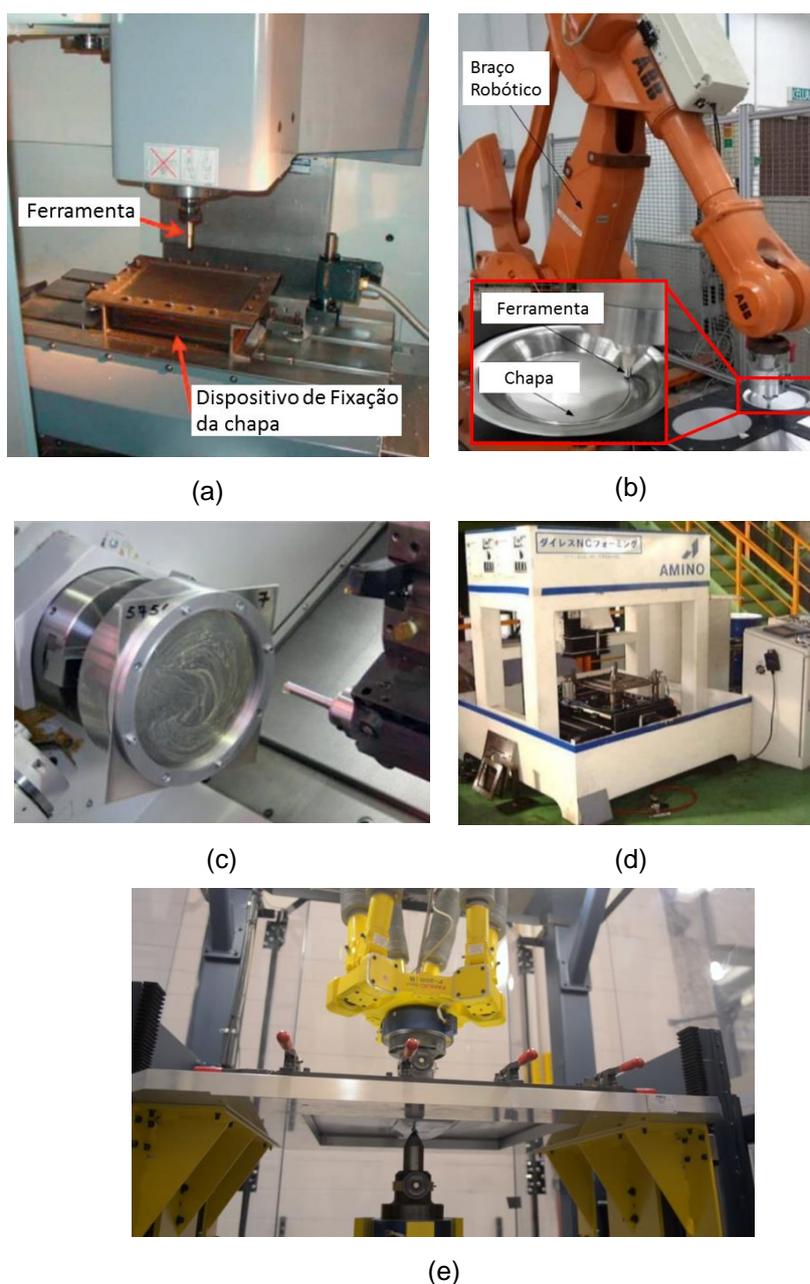


Figura 9: Máquinas de Estampagem Incremental: (a) Fresadora CNC [4], (b) Braço Robótico [35], (c) Torno CNC [4], (d) Máquina Amino Dedicada à Estampagem Incremental [1], (e) F3T Dedicada à Estampagem Incremental [36].

Diversos estudos de Estampagem Incremental têm sido realizados com máquinas CNC [4,37,38]. A vantagem entre o uso de uma fresadora é que ela permite a fabricação de peças assimétricas, enquanto que no torno, sua aplicação restringe-se a peças de simetria axial [39]. Na Figura 9(a) é apresentado o uso de uma fresadora CNC no processo de Estampagem Incremental, enquanto que na Figura 9(c) é apresentado o uso de um torno CNC.

Braços robóticos industriais também podem ser usados nos processos de Estampagem Incremental. Por permitirem movimentos da ferramenta em seis eixos, viabilizam a estampagem de peças complexas [35]. No entanto, os braços robóticos apresentam como desvantagem a baixa rigidez do sistema, quando comparado com máquinas fresadoras [39]. A Figura 9(b) apresenta um exemplo de aplicação dos processos de Estampagem Incremental com braço robótico.

Máquinas dedicadas ao processo de Estampagem Incremental, por terem sido construídas especificamente para este propósito, geralmente possuem recursos que facilitam a aplicação do processo. Na Figura 9(d) é apresentada uma máquina dedicada à Estampagem Incremental desenvolvida pela Amino Corp., que possui um dispositivo de placa móvel para realização do processo TPIF com matriz positiva [1,40].

Outro exemplo de equipamento dedicado à Estampagem Incremental é o F3T (Tecnologia Ford de Fabricação de Formas Livres - *Ford Freeform Fabrication Technology*), desenvolvido pela *Ford Motor Company* e apresentado na Figura 9(e). O F3T possui um cabeçote superior movimentando a ferramenta de conformação sobre a chapa metálica e um cabeçote inferior com outra ferramenta atuando como apoio para realização do processo DSIF [36].

2.3 APLICAÇÕES

O processo de Estampagem Incremental não exige ferramental dedicado, possibilitando a prototipagem rápida e a fabricação de pequenos lotes de peças [1], além de permitir a conformação com deformações maiores que as obtidas na estampagem convencional [31]. Diversas aplicações têm sido estudadas para o desenvolvimento deste processo.

Castelan *et al.* [5] realizaram o projeto em CAD e a fabricação de uma prótese de crânio em titânio puro grau 2 com 0,5 mm de espessura por meio do processo TPIF com matriz negativa. Neste estudo se chegou à conclusão que o processo de Estampagem Incremental pode ser utilizado para fabricação de implantes personalizados, ainda que tenham ocorrido algumas variações dimensionais na peça final. Essa variação dimensional após o corte do produto pode ser reduzida por meio de alteração do método de corte e tratamento térmico. Neste estudo também foi realizada a impressão 3D de um biomodelo no qual foi instalada a prótese. A fabricação desse biomodelo teve como objetivo auxiliar no planejamento pré-operatório e melhorar a comunicação entre médico e paciente. A Figura 10(a) apresenta o desenho em CAD da prótese, enquanto que a Figura 10(b) e a Figura 10(c) apresentam a vista isométrica e frontal da montagem da prótese no biomodelo de crânio, respectivamente.

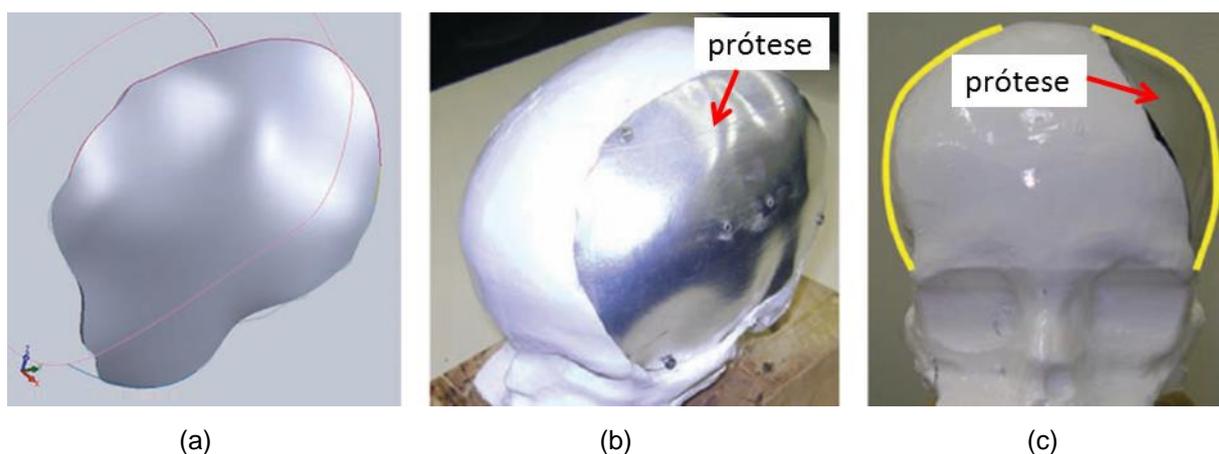


Figura 10: Protótipo de prótese craniana de titânio fabricada por Estampagem Incremental: (a) Projeto em CAD, (b) Vista isométrica da montagem do protótipo e (c) vista frontal da montagem [5]

Nos estudos de Schreiber e Schaeffer [9] foi realizada uma série de experimentos para definir os parâmetros de Estampagem Incremental para fabricação de aletas para coletor solar. Estas aletas foram fabricadas com alumínio puro AA1100-H14 de 1 mm de espessura e o processo foi realizado utilizando TPIF com uma matriz parcial negativa. Na Figura 11(a) é apresentado o conjunto de aletas fabricadas por Estampagem Incremental montadas na serpentina de tubos de cobre, enquanto que na Figura 11(b) é apresentado o detalhe de montagem da aleta de alumínio estampada sobre tubo de cobre.

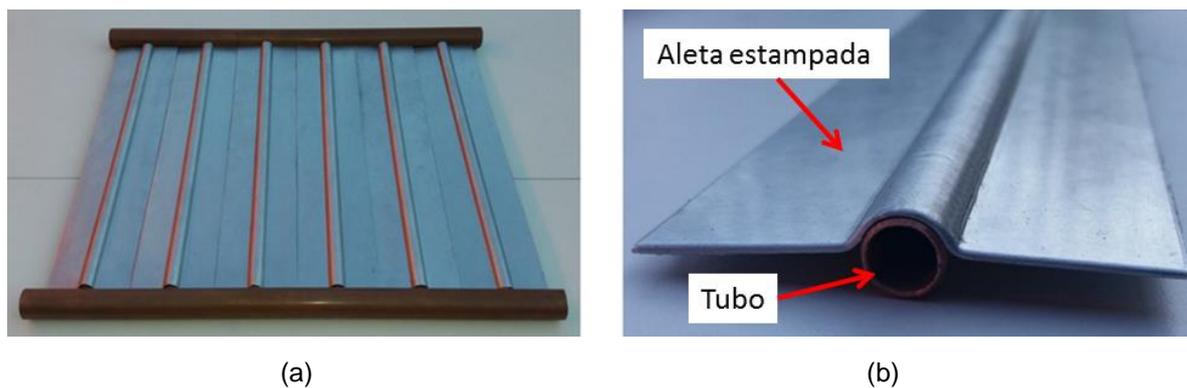


Figura 11: Protótipo de Aleta de Coletor Solar fabricada por Estampagem Incremental: (a) Conjunto de aletas montadas na serpentina de tubos de cobre e (b) Detalhe de montagem da aleta estampada sobre tubo de cobre [9]

Jeswiet *et al.* [41] fabricaram a cavidade de um forno solar com a liga de alumínio AA8006-O com 1,3 mm de espessura através do processo SPIF. Neste estudo foi concluído que a Estampagem Incremental deste produto apresenta custos menores que a fabricação por estampagem convencional, ou a fabricação da peça em fibra de vidro. Além disso o retorno elástico da peça após a estampagem manteve-se dentro das tolerâncias exigidas para a aplicação. Na Figura 12(a) é indicada uma representação de um forno solar em vista lateral, com tampa de vidro e com a cavidade a ser estampada, enquanto que na Figura 12(b) e Figura 12(c) é a parte interna da cavidade do forno e a vista lateral da cavidade após estampagem, respectivamente.

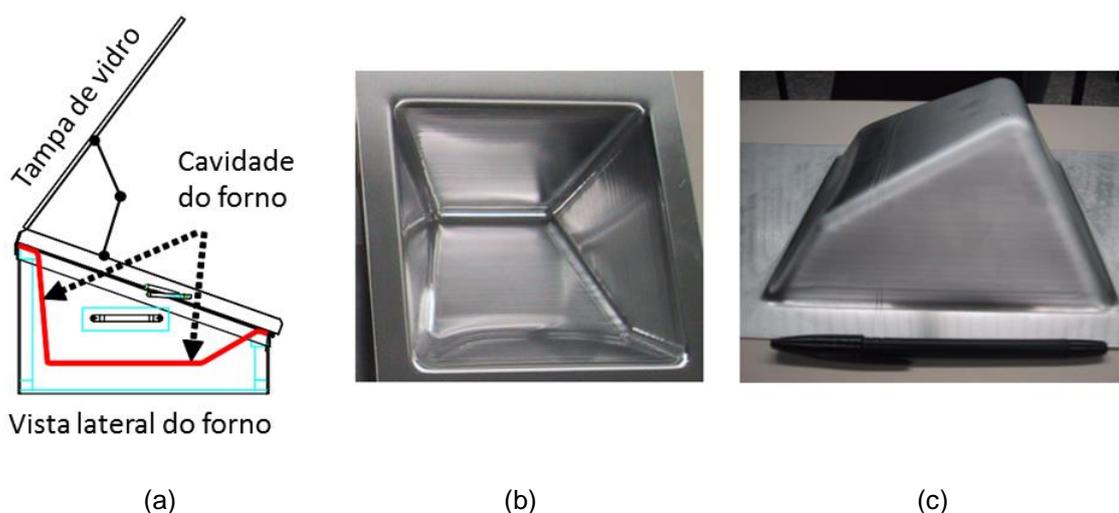


Figura 12: Protótipo de Forno Solar com cavidade fabricada por Estampagem Incremental: (a) Vista lateral do conjunto, (b) Parte interna da cavidade estampada e (c) parte externa da cavidade [41]

Em uma parceria entre a Honda Motor Co. Ltd. e a Amino Corp. foi realizado um trabalho para o desenvolvimento de peças automotivas de reposição, fabricadas por meio do processo de Estampagem Incremental [1]. Neste trabalho foi feita a digitalização das partes externa e interna do capô do automóvel Honda S800. Em seguida, chapas de aço JIS SPCE com espessura 0,7 mm foram submetidas à uma operação de estiramento e depois passaram por Estampagem Incremental. A Figura 13(a) e a Figura 13(b) mostram as partes externa e interna do capô logo após o processo de conformação, enquanto que a Figura 13(c) mostra o capô montado no veículo.



Figura 13: Capô do Honda S800 fabricado com Estampagem Incremental: (a) Parte superior do capô estampado, (b) Parte inferior do capô e (c) Capô montado no veículo [1]

Outro exemplo de aplicação do processo de Estampagem Incremental à área automotiva foi a gravação da logomarca na porta da edição especial do TOYOTA IQ-GRMN [1]. Normalmente este tipo de personalização é adicionada por meio de adesivos ou peças plásticas cromadas. No entanto, nesta aplicação a porta (previamente fabricada por estampagem convencional) recebeu os detalhes em relevo por meio do processo de Estampagem Incremental. A Figura 14(a) apresenta o detalhe da logomarca estampado na porta do TOYOTA iQ-GRMN, enquanto que a Figura 14(b) mostra uma foto do veículo no Tokyo Auto Salon 2012.

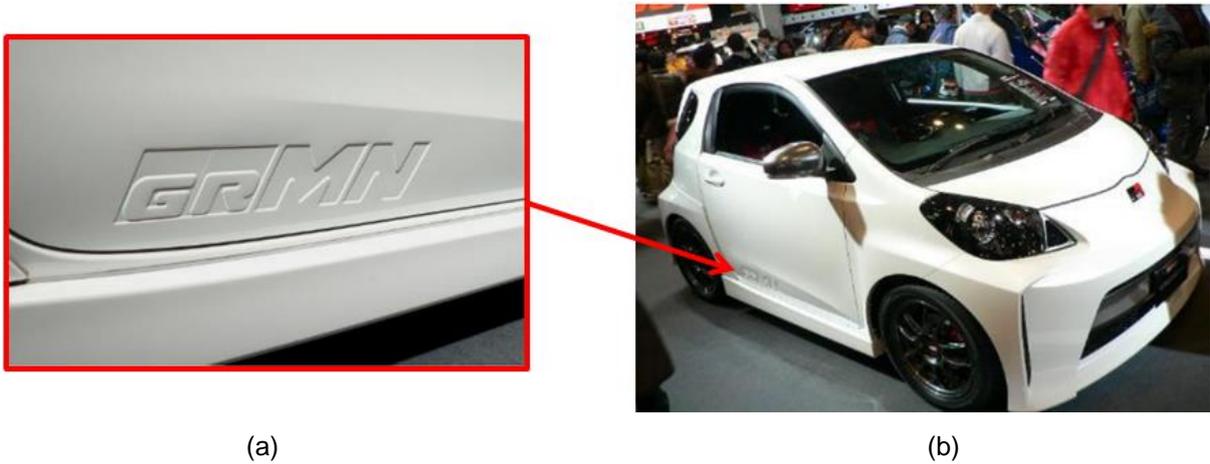


Figura 14: Estampagem Incremental na porta do TOYOTA iQ-GRMN: (a) Logomarca estampada na porta e (b) Fotografia do veículo no Tokyo Auto Salon 2012 [1]

2.4 PARÂMETROS DO PROCESSO

Diversos parâmetros do processo de Estampagem Incremental, como a velocidade de avanço (a), a velocidade de rotação (N), o incremento vertical (Δz) e o raio da ferramenta (R_f), bem como o lubrificante utilizado e a temperatura do processo, influenciam na força necessária para realização do processo, na estampabilidade do material, no acabamento superficial e nos desvios geométricos do produto final. A Figura 15 apresenta os principais parâmetros do processo de Estampagem Incremental por SPIF.

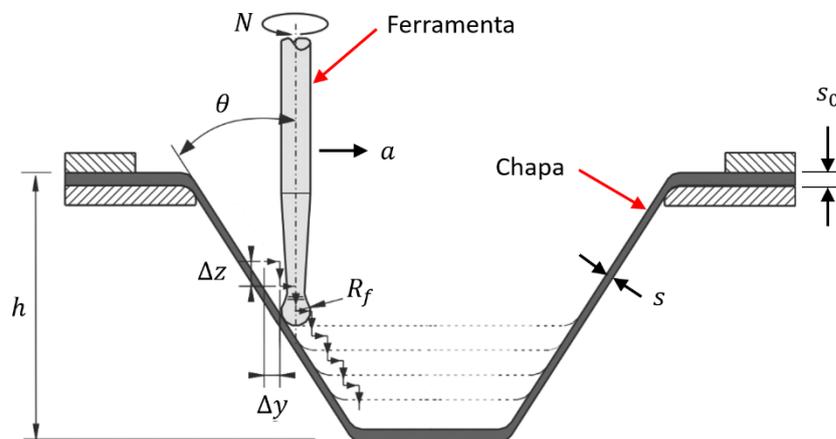


Figura 15: Principais parâmetros do processo de Estampagem Incremental por SPIF [42]

Conforme indicado na Figura 15, a trajetória executada pela ferramenta determina o formato final da chapa estampada, sendo que a espessura inicial da chapa (s_0) sofre redução até a espessura final (s), de acordo com ângulo de parede utilizado (θ), que é determinado pelo valor do incremento lateral (Δy). A máxima profundidade estampada (h), assim como o máximo ângulo de parede são parâmetros de referência para comparar a estampabilidade de diferentes materiais [9,43].

É possível estabelecer a relação entre o ângulo de parede (θ) e a espessura final da chapa estampada (s), que é denominada “lei do cosseno” e está apresentada na Equação 1 [44].

$$s = s_0 \cos \theta \quad (1)$$

Onde:

- s = espessura final da chapa (mm);
- s_0 = espessura inicial da chapa (mm);
- θ = ângulo de parede ($^\circ$).

Para obter um ângulo de parede maior, deve-se aumentar a espessura inicial da chapa [44], sendo que o diâmetro da ferramenta e o incremento vertical apresentam pouca influência no ângulo máximo de parede [45].

Também há uma relação entre a deformação verdadeira na espessura (φ_3) e o ângulo de parede (θ) obtido em radianos, conforme Equação 2 [46].

$$\theta = \frac{\pi}{2} - e^{\varphi_3} \quad (2)$$

Onde:

- θ = Ângulo de parede (rad);
- φ_3 = Deformação verdadeira na espessura (-).

Isolando a deformação em espessura (φ_3) na Equação 2 obtêm-se a Equação 3, em função do ângulo de parede em radianos.

$$\varphi_3 = \ln\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \quad (3)$$

2.4.1 Raio da ferramenta (R_f)

O valor selecionado de raio de ferramenta para o processo de estampagem Incremental influencia na estampabilidade, no acabamento superficial, nos desvios geométricos e na força necessária para conformação da peça.

Quanto maior for o raio de ferramenta utilizado na Estampagem Incremental, menor será a estampabilidade da chapa a ser conformada [40,47,48].

A utilização de pequenos raios de ferramenta promove maiores deformações antes que ocorra a fratura do material, pois concentram as tensões em uma pequena região sob a ferramenta. Enquanto que grandes raios de ferramenta promovem maior distribuição da tensão em uma área maior e o processo se assemelha à Estampagem Convencional, permitindo menores deformações [46].

Além disso, com o aumento do raio da ferramenta também há aumento da rugosidade [40] e do retorno elástico [47] na peça estampada, bem como aumento da força necessária para realizar a deformação [48,49].

Estudos que relacionam o raio da ferramenta e a espessura da chapa estampada obtiveram êxito ao encontrar um valor crítico para a relação $R_f \approx 2,2 s_0$ (onde R_f é o raio da ferramenta e s_0 a espessura de chapa). De forma que, seguindo essa relação, é possível obter as maiores deformações na chapa estampada, sem dependência do material a ser conformado [43].

2.4.2 Incremento vertical (Δz)

O incremento vertical da ferramenta na Estampagem Incremental influencia no tempo de processo, na estampabilidade, no acabamento superficial, nos desvios geométricos e na força necessária para realizar o processo.

Quanto maior for o valor de incremento vertical utilizado, menor será o tempo de processo [9,48,50,51], no entanto a estampabilidade será menor [47,50,52]. Já que valores altos de incremento aumentam as tensões no processo, fazendo com que a falha ocorra mais cedo [53].

Além disso, o aumento do incremento vertical ocasiona maior rugosidade da peça estampada [40,52], aumenta os desvios geométricos [47,51,54] e exige maiores forças para realização da conformação da peça [40,49].

No trabalho de Jeswiet *et al.* [40] foi concluído que a utilização de grandes valores de incremento vertical, além de aumentar as forças necessárias para realização do processo e aumentar a rugosidade, também podem causar o efeito “casca de laranja” que se resulta em uma rugosidade superficial extremamente elevada.

No trabalho de Schreiber e Schaeffer [9] foi verificado que quando se utiliza alta rotação da ferramenta associada com baixo incremento vertical, é obtida alta estampabilidade. No entanto, essa combinação de parâmetros pode ocasionar remoção de material da chapa na forma de pó.

2.4.3 Velocidade de rotação (N)

A velocidade de rotação da ferramenta influencia na estampabilidade, no acabamento superficial e na força necessária para realizar o processo. O movimento de rotação da ferramenta gera atrito e provoca aquecimento na interface peça-ferramenta [55]. De forma que, com o aumento da velocidade de rotação da ferramenta, é conferida maior estampabilidade à peça [9,40,53,55], no entanto exigindo menor força para realização do processo [56]. O aumento da velocidade de rotação também pode aumentar a rugosidade da peça estampada [40].

Na pesquisa realizada por Durante *et al.* [57] para Estampagem Incremental de AA7075-T0, com rotação variando de 0 e 800 rpm, verificou-se que com o aumento da rotação da ferramenta há uma tendência de aumento na temperatura, bem como a diminuição nas forças necessárias para a estampagem. Neste estudo a variação de rugosidade superficial nas peças se mostrou insignificante.

No trabalho realizado por Schreiber e Schaeffer [9] para Estampagem Incremental de AA1200-H14, com velocidades de rotação variando de 50 a 800 rpm foi verificado que o aumento da rotação da ferramenta gera aumento da estampabilidade do material. Esse estudo também indica que quanto se utiliza grandes valores de incremento vertical (entre 1 e 2 mm) a rotação não apresenta influência na estampabilidade.

Xu *et al.* [55] desenvolveram estudos para Estampagem Incremental de alumínio AA5052-H32 com velocidades de rotação variando de 0 a 7000 rpm. Nestes estudos foi verificado que o aumento da estampabilidade do material em baixas rotações (até 1000 rpm) ocorre devido à variação das condições de atrito. Enquanto que em rotações mais elevadas o efeito do aumento de temperatura é o responsável pela maior estampabilidade.

2.4.4 Velocidade de avanço (a)

A velocidade de avanço da ferramenta influencia no tempo de processo, na estampabilidade e no acabamento superficial da peça estampada. O aumento da velocidade de avanço permite a fabricação de peças estampadas em menor período de tempo [51], no entanto diminui a estampabilidade do material [47].

Segundo os estudos de Ham e Jeswiet [53], na Estampagem incremental de alumínio AA3003, foi concluído que com a diminuição da velocidade de avanço (associada às rotações de 100 rpm a 600 rpm) ocorre o aumento da geração de calor por atrito, tendo como consequência o aumento da estampabilidade do material.

Para Teixeira *et al.* [58] as maiores deformações na Estampagem Incremental de alumínio AA1200-H14 foram obtidas utilizando baixos valores de avanço. No entanto, quando associado o baixo valor de avanço (200 mm/min) com alto valor de rotação (800 rpm) foi verificado o surgimento do efeito “casca de laranja” nas superfícies estampadas.

Rauch *et al.* [51] concluíram que a velocidade de avanço utilizada no processo (entre 500 mm/min a 1500 mm/min) não apresenta influência significativa

nos desvios geométricos da peça estampada, nem nas forças necessárias para realização do processo.

No entanto, no estudo de Fan *et al.* [47] na Estampagem Incremental a quente de TiAl₂Mn_{1.5} foi possível eliminar a distorção nas peças aumentando a temperatura do processo e diminuindo o avanço de 800 mm/min para 400 mm/min.

2.4.5 Temperatura

Através da aplicação de calor no material durante a estampagem é possível reduzir as forças necessárias para conformação da chapa, aumentar a estampabilidade do material e diminuir o retorno elástico das peças, como verificado nos estudos de Al-Obaidi *et al.* [59], nos quais foi realizado aquecimento por indução dos aços DC04, DP800 e 22MnB5.

No trabalho de Fan *et al.* [47] na Estampagem Incremental de TiAl₂Mn_{1.5} com aquecimento por meio da aplicação de corrente elétrica foi verificado que o aumento da temperatura no processo, além de contribuir para a maior estampabilidade do material, permite a estampagem de formas sem simetria axial livres de distorção geométrica.

No estudo de Khazaali e Fereshteh-Saniee [54] na Estampagem Incremental de chapas da liga de titânio Ti-6Al-4V com 0,5 mm de espessura com um sistema de aquecimento elétrico, foi verificado que em maiores temperatura há menor retorno elástico da peça estampada.

O aumento da temperatura no processo também pode ser conferido por meio do aumento da rotação da ferramenta, gerando aumento na estampabilidade do material [60].

2.4.6 Lubrificação

Quanto ao uso dos lubrificantes na Estampagem Incremental, esses têm a função de diminuir a rugosidade do produto final, reduzir o atrito entre ferramenta e

material, resfriar a peça e a ferramenta, reduzir o desgaste da ferramenta e diminuir a força exercida pela ferramenta [61].

No trabalho de Azevedo *et al.* [62] a menor rugosidade alcançada nas chapas de aço DP780 foi proporcionada pelo óleo Finarol B5746 e pela graxa AS-40, enquanto que para alumínio AA1050, pelo óleo SAE 30 e pela graxa AL-M. Nestes estudos foi concluído que quanto maior a dureza do material, menor deve ser a viscosidade do lubrificante a fim de se obter melhor acabamento. Quando à avaliação das forças, estas não mostraram diferenças significativas para diferentes lubrificantes.

Nos estudos de Jawale *et al.* [63] em chapas de cobre, a menor rugosidade da peça estampada foi obtida com óleo mineral Castrol Magnaglide D68 comparado com as graxas Copaslip, AS40, Weicon Ni Special, Weicon montage.

2.4.7 Resumo da Influência dos Parâmetros

Na Tabela 1 são organizados os principais parâmetros de influência no processo de Estampagem Incremental. Na primeira coluna são apresentados os parâmetros que se aumentados trazem consequências às peças estampadas, sendo que essas consequências como tempo de processo, estampabilidade, acabamento superficial, desvios geométricos e força necessária são relacionadas nas demais colunas. Na Tabela 1 os quadros em branco correspondem à situações em que não há consequências relevantes associadas a estes parâmetros.

Tabela 1: Influência dos parâmetros do processo de Estampagem Incremental

Aumento do parâmetro:	Consequência em:				
	Tempo de Processo	Estampabilidade	Acabamento Superficial	Desvios Geométricos	Força necessária
Raio da ferramenta (R_f)	-	Diminui [40,46–48]	Piora [40]	Aumentam [47]	Aumenta [48,49]
Incremento vertical (Δz)	Diminui [9,48,50,51]	Diminui [47,50,52]	Piora [40,52]	Aumentam [47,51,54]	Aumenta [40,49].
Velocidade de rotação (N)	-	Aumenta [9,40,53,55]	Piora [40]	-	Diminui [56].
Velocidade de avanço (a)	Diminui [51]	Diminui [47]	Piora [58] ^a .	-	-
Temperatura	-	Aumenta [47,59]	-	Diminuem [47,54,59]	Diminui [59].

^a Associando baixo valor de avanço com alto valor de rotação.

2.5 LIMITES DE DEFORMAÇÃO

No processo de Estampagem Incremental os limites de deformação são diferentes dos expressos na Curva Limite de Conformação (*Forming Limit Curve - FLC*), que geralmente é usada para delimitar os limites de estampabilidade no processo de Estampagem Convencional. A estampabilidade de um material na Estampagem Incremental é melhor descrita pelo Diagrama Limite de Fratura na Conformação (*Fracture Forming Limit Diagram - FFLD*). A Figura 16, de forma esquemática, apresenta uma comparação entre a FLC e o FFLD para um mesmo material, onde é possível identificar que a estampabilidade (caracterizada pelas deformações principais φ_1 e φ_2) é maior na Estampagem Incremental do que na Estampagem Convencional.

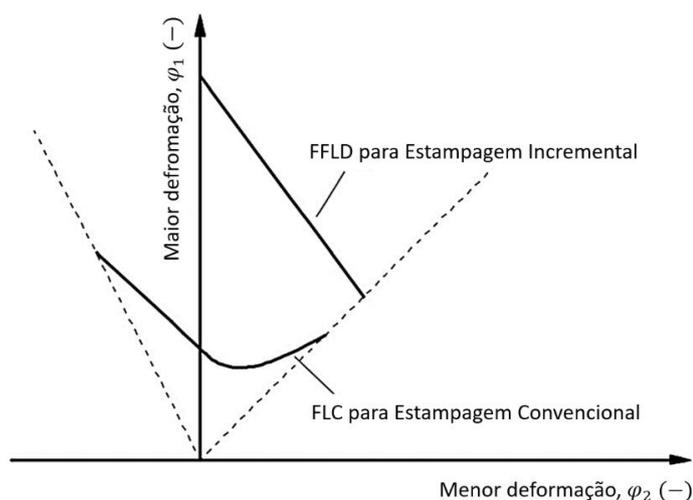


Figura 16: Comparação entre a FLC e o FFLD [64]

Conforme indicado na Figura 16, verifica-se que diferente da FLC com formato em “V”, o FFLD é definido por uma linha reta no primeiro quadrante do tipo $\varphi_1 = a \varphi_2 + b$ [65], sendo que o coeficiente angular dessa reta em vários estudos é considerado igual a “-1” [46,65], resultando em uma inclinação negativa. No estado plano de deformação (quando $\varphi_2 = 0$), a estampabilidade é extremamente elevada, enquanto que em expansão biaxial ($\varphi_1 = \varphi_2$) ocorre o ponto mais baixo da reta, e que em todos os casos os limites de deformação do FFLD para Estampagem Incremental são superiores aos apresentados na FLC para Estampagem Convencional [31].

No trabalho de Malhotra *et al.* [66] é proposta a “teoria do macarrão”, que tem o propósito de explicar o motivo pelo qual a Estampagem Incremental apresenta maior limite de deformação que a Estampagem Convencional. Conforme indicado na Figura 17(a), (b) e (c), na Estampagem Convencional o material é estirado, gerando estrição localizada e conseqüente fratura; enquanto que, conforme Figura 17(d), (e) e (f), na Estampagem Incremental ocorre estiramento localizado, seguido de mais estiramento em diferentes locais, dessa forma a deformação aumenta de modo gradual, possibilitando maiores limites de deformação.

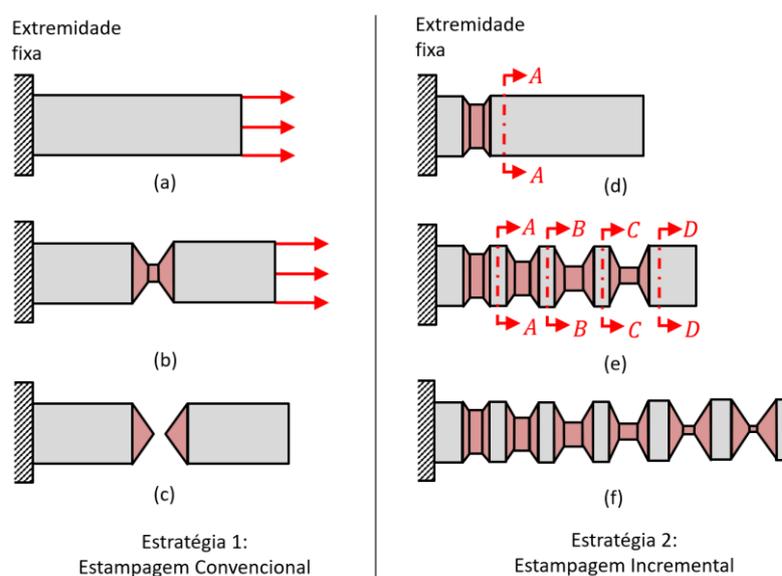


Figura 17: Estratégia 1: Estampagem Convencional – Estiramento do material na ponta livre (a), Estrição em um único local (b), Fratura no local de estrição (c); Estratégia 2: Estampagem Incremental - Estiramento localizado na seção AA (d), Estiramento em diferentes seções (e), Material conformado com maior comprimento sem fratura (f) [66]

No trabalho de Martins *et al.* [46] a razão de triaxialidade σ_m/σ_{eq} é utilizada para explicar o motivo do limite de deformação ser maior na Estampagem Incremental do que na Estampagem Convencional, já que essa razão é maior no processo convencional, fazendo com que o dano cresça mais rapidamente. Esta razão ainda pode ser usada para explicar o motivo pelo qual o aumento do raio da ferramenta diminui a estampabilidade, enquanto que o aumento da espessura da chapa aumenta a estampabilidade. Isso está relacionado ao fato de que o aumento do raio aumenta a razão de triaxialidade, entretanto o aumento da espessura diminui essa razão.

Segundo Ai *et al.* [67], que conduziram experimentos com AA1100 e AA5052, o aumento na estampabilidade obtido na Estampagem Incremental é mais evidente em materiais com baixo coeficiente de encruamento e elevada ductilidade.

Micari [68] comparou os limites de deformação na Estampagem Incremental de diferentes materiais (latão, cobre, alumínio e aço) a fim de determinar a influência do coeficiente de encruamento, do coeficiente de resistência, da anisotropia, do alongamento percentual e da resistência máxima nestes limites. Neste estudo foi verificado que o coeficiente de encruamento, seguido do coeficiente de resistência são as propriedades dos materiais com maior influência na estampabilidade.

Do *et al.* [65] definiram as equações do FFLD para dois alumínios (AL5052-O e AL3000), aço inoxidável (STS304) e titânio puro, com diferentes valores de espessura, conforme indicado na Figura 18.

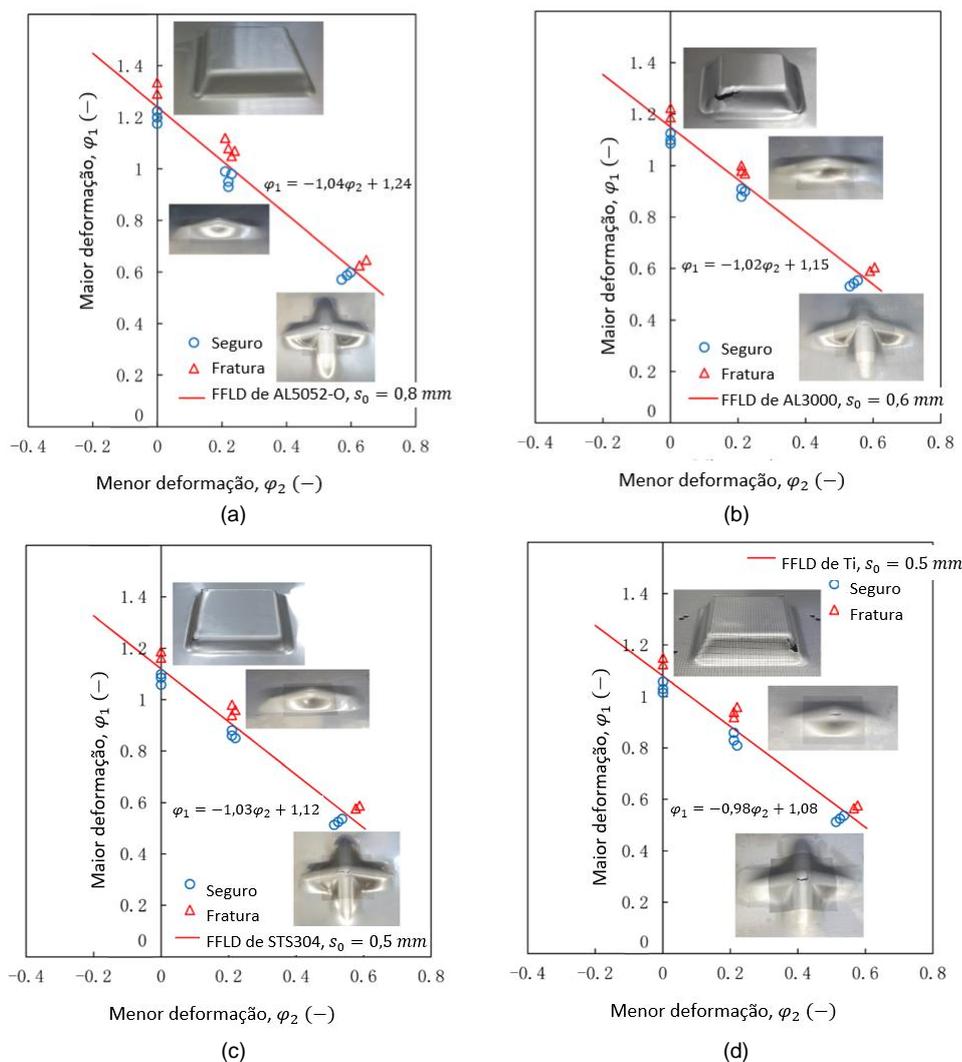


Figura 18: FFLD de diferentes materiais: AL5052-O, $s_0 = 0,8 \text{ mm}$ (a), AL3000, $s_0 = 0,6 \text{ mm}$ (b), STS304, $s_0 = 0,5 \text{ mm}$ (c), Ti, $s_0 = 0,5 \text{ mm}$ (d) [65]

O FFLDs apresentados na Figura 18 foram definidos por meio da conformação incremental de três formatos: uma pirâmide com quadro lados ($\varphi_2 = 0$), um canal reto em rampa ($\varphi_1 \neq \varphi_2$), e um canal cruzado em rampa ($\varphi_1 = \varphi_2$). Na Figura 18 é possível identificar que, apesar da diferença entre os materiais e as espessuras, o coeficiente angular de cada FFLD variou entre -0,98 e -1,04, ou seja, valores muito próximos de uma unidade negativa.

Segundo Do *et al.* [65] valores de coeficiente angular do FFLD com grande variação, ou seja, muito diferentes de uma unidade negativa, são obtidos quando se utiliza um método de medição impreciso. Se o coeficiente angular do FFLD for considerado -1 , a deformação na espessura φ_3 (obtida pela Equação 4) será constante, independentemente do tipo de deformação à qual a chapa foi submetida [69]. E a partir da determinação da deformação em espessura é possível estimar a espessura final da chapa, conforme Equação 5.

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (4)$$

$$s = s_0 e^{\varphi_3} \quad (5)$$

No entanto, como a estampabilidade do material varia de acordo com os parâmetros de processo utilizados na Estampagem Incremental, é possível obter diversos FFLDs para um mesmo material, de acordo com os parâmetros utilizados.

Na Figura 19 são apresentadas diferentes FFLDs para um mesmo material considerando um coeficiente angular -1 , e ainda uma comparação com a FLC. Neste estudo foi realizada Estampagem Incremental de AA1100-H14 mantendo constante o avanço da ferramenta, variando o incremento vertical e a rotação da ferramenta em cada experimento. Este trabalho apresentou como conclusão que o aumento da rotação associado com a diminuição do incremento vertical possibilita a obtenção de maiores limites de deformação à peça conformada [9].

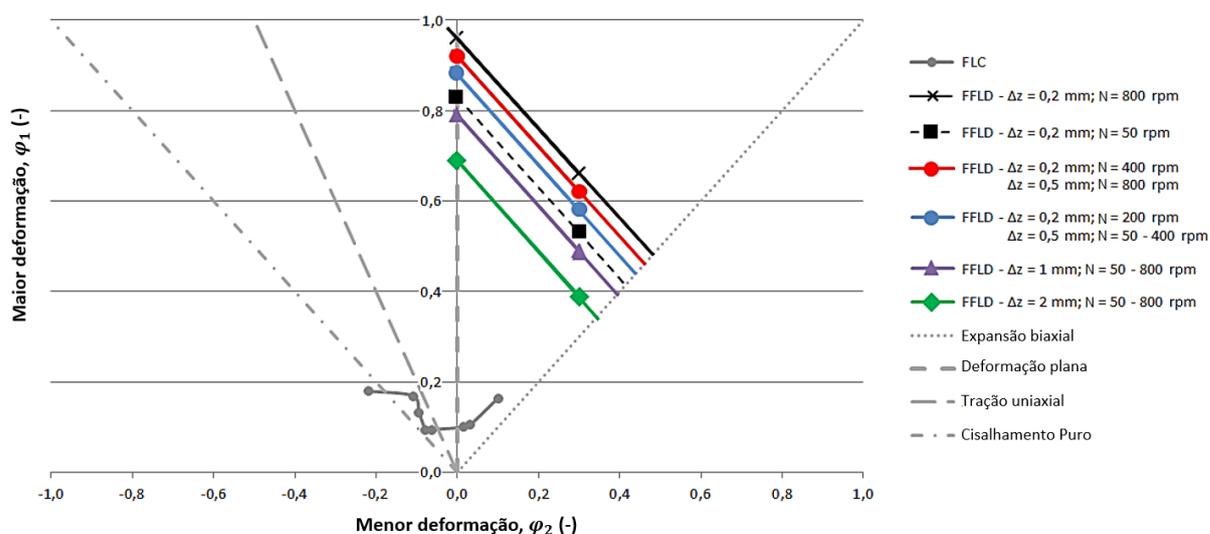


Figura 19: Diferentes FFLDs com variação do incremento vertical e rotação da ferramenta em comparação com a FLC de AA1100-H14 [9]

2.6 TENSÕES

Para o estado plano de deformações ($\varphi_2 = 0$) é possível considerar que no processo de Estampagem Incremental por SPIF a região na área de contato entre chapa e ferramenta esteja submetida às tensões principais em três direções, sendo elas a tensão principal máxima (σ_1), a tensão principal intermediária (σ_2) e a tensão principal mínima (σ_3) [46,52]. Neste caso a flexão próxima à região de fixação da chapa é desconsiderada, bem como o atrito na interface chapa-ferramenta, além de que o material da chapa é considerado isotrópico [52].

A Figura 20(a) destaca a área de contato entre chapa e ferramenta no processo de SPIF, enquanto que na Figura 20(b) são indicados os vetores correspondentes às tensões principais atuantes em um elemento de volume da chapa no processo.

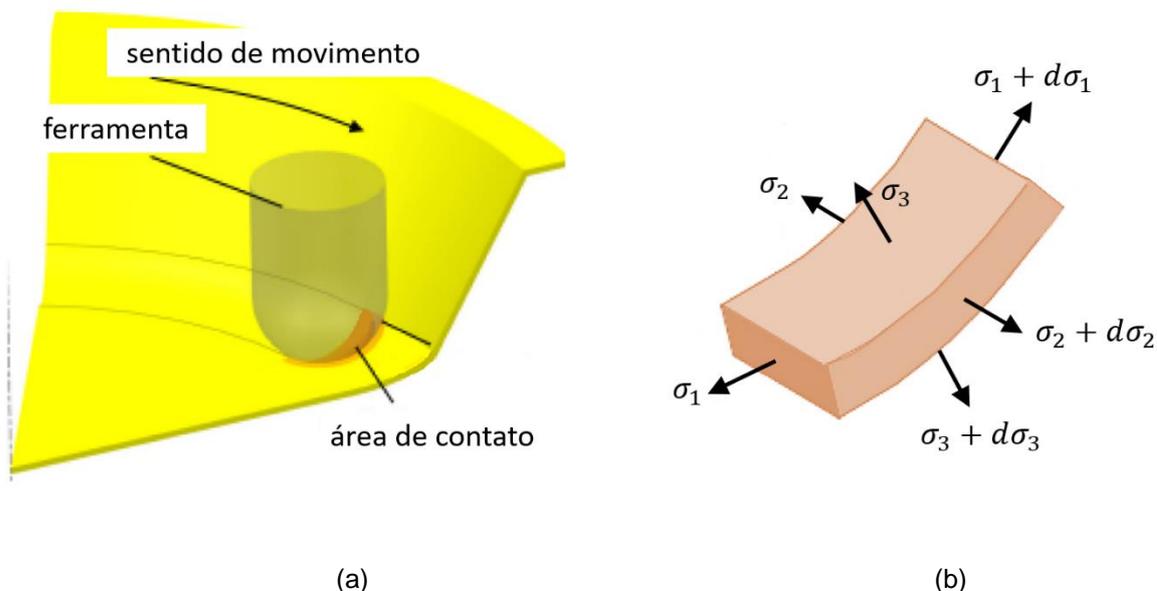
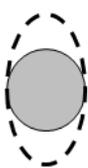


Figura 20: Área de contato entre ferramenta e peça no processo SPIF (a) e tensões principais em um elemento de volume na chapa (b) [70]

A Tabela 2 apresenta as equações para determinar as tensões principais no processo de Estampagem Incremental por SPIF, para a condição de estado plano de deformações.

Tabela 2: Tensões Principais e Tensão Média no Estado Plano de Deformações em SPIF [52]

Estado de Deformações	Tensões Principais	Tensão Média
Plano  $\varphi_2 = 0$ $\varphi_1 = -\varphi_3$	$\sigma_1 = \frac{2\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_f}{R_f + s} \right)$ $\sigma_2 = \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_f - s}{R_f + s} \right)$ $\sigma_3 = -\frac{2\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{s}{R_f + s} \right)$	$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ $\sigma_m = \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_f - s}{R_f + s} \right)$

As equações indicadas na Tabela 2 seguem as simplificações impostas pelas condições de equilíbrio da membrana, ou seja, desconsideram os momentos de fletores, bem com os efeitos do encruamento e da anisotropia do material. Além

disso, assumem simetria axial e que o atrito é pequeno, sendo a tensão de atrito constituída por dois componentes no plano [23].

Na condição de deformação plana, verifica-se que a menor deformação verdadeira no plano é nula ($\varphi_2 = 0$) e as demais deformações principais são iguais em intensidade, mas com sinais opostos ($\varphi_1 = -\varphi_3$).

As equações 6, 7 e 8 apresentam a forma de calcular as tensões principais, sendo $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

$$\sigma_1 = \frac{2\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_f}{R_f + s} \right) \quad (6)$$

Onde:

- σ_1 = Tensão principal máxima [MPa];
- σ_{eq} = Tensão equivalente [MPa];
- s = Espessura final [mm];
- R_f = Raio da ferramenta [mm].

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_f - s}{R_f + s} \right) \quad (7)$$

Onde:

- σ_2 = Tensão principal intermediária [MPa].

$$\sigma_3 = -\frac{2\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{s}{R_f + s} \right) \quad (8)$$

Onde:

- σ_3 = Tensão principal mínima [MPa].

A tensão média para estado plano de deformações pode ser obtida por meio da Equação 9.

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_f - s}{R_f + s} \right) \quad (9)$$

Onde:

σ_m = Tensão média [MPa].

A relação entre as tensões principais ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) é obtida pela tensão equivalente de von Mises, conforme expresso na Equação 10.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (10)$$

A tensão equivalente também pode ser determinada em função das propriedades do material e da deformação equivalente, conforme expresso na Equação 11 (equação de Ludwick-Hollomon). Essa tensão equivalente é igual à resistência ao escoamento (k_f) do material, que aumenta à medida que este sofre deformação plástica.

$$\sigma_{eq} = C \varphi_{eq}^n = k_f \quad (11)$$

Onde:

C = Coeficiente de resistência [MPa];

φ_{eq} = Deformação verdadeira equivalente [-];

n = Coeficiente de encruamento [-];

k_f = Resistência ao escoamento [MPa].

A deformação verdadeira equivalente, por sua vez, é determinada também pelo critério de von Mises pela Equação 12.

$$\varphi_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2} \quad (12)$$

Onde:

φ_1 = Maior deformação verdadeira no plano [-];

φ_2 = Menor deformação verdadeira no plano [-].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram realizados experimentos de estampabilidade para Estampagem Incremental, variando os parâmetros de raio da ferramenta, material e espessura inicial de chapa. Os raios de ferramenta utilizados variaram entre 3, 5 e 7,5 mm. Os materiais das chapas utilizadas nestes experimentos foram alumínio AA1200-H14, aço SAE1008 e latão C268, com espessuras e propriedades mecânicas, conforme indicado na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades dos Materiais

Material	Espessura inicial, s_0 (mm)	Limite de escoamento, Re (MPa)	Limite de resistência, Rm (MPa)	Deformação percentual, ϵ (%)	Módulo de elasticidade, E (GPa)	Coefficiente de resistência, C (MPa)	Coefficiente de encruamento, n (-)
SAE1008	0,60	265	359	41,5	190	619,86	0,2163
	0,75						
	0,90						
AA1200-H14	0,50	97	117	3,6	70	181,45	0,1080
	0,80						
	1,20						
C268	0,50	296	413	37,5	105	734,28	0,2624
	0,81						
	1,06						

Foram utilizadas chapas de três valores distintos de espessura para cada material. As propriedades mecânicas dos materiais indicados na Tabela 3 foram obtidos a partir da literatura, com base nos estudos de Haag e Ferranti [71] para aço SAE1008, Schreiber *et al.* [10] para alumínio AA1200-H14 e Maximiliano *et al.* [72] para latão C268.

Com base nestes dados foi realizada a elaboração de um método para estimar o limite de deformação do material em função de um valor crítico de tensão média.

Após a conclusão dos experimentos de estampabilidade foram realizadas simulações FEM para validação dos resultados medidos e calculados. Por fim, foi conduzida regressão linear múltipla com o objetivo de prever a força axial máxima para cada condição de processo.

A Figura 21 apresenta um diagrama de blocos com o planejamento experimental desenvolvido neste trabalho. Inicialmente foram realizados 27 experimentos de estampabilidade, em função da seleção de três materiais, três espessuras de chapa e três valores de raios de ferramenta. Os dados obtidos nestes experimentos foram utilizados para elaboração de um método para estimar os limites de deformação e de uma equação para estimar a máxima força axial no processo de Estampagem Incremental.

Conforme indicado na Figura 21, para definir um método analítico a ser utilizado como critério de falha foram calculadas as tensões principais em cada experimento, foi realizada análise de variância (ANOVA) e então foram desenvolvidas as equações do método. Para a análise de forças foram elaborados os gráficos de força axial em função do tempo para cada experimento. Em seguida foi realizada validação dos ensaios por FEM e desenvolvida a equação para estimativa de força máxima no processo.

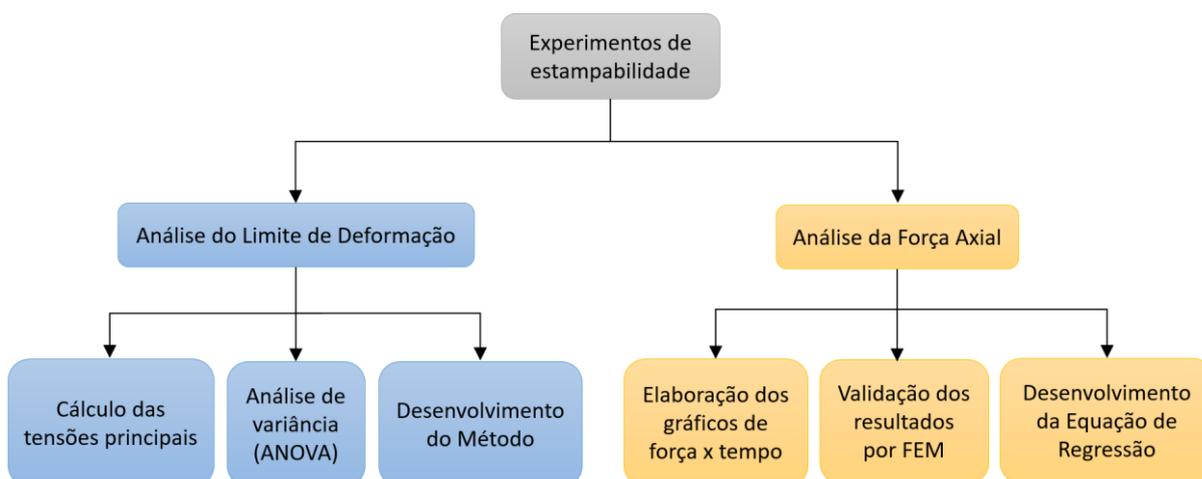


Figura 21: Diagrama de blocos do planejamento experimental

3.1 EXPERIMENTOS DE ESTAMPABILIDADE

Os experimentos de estampabilidade consistiram da Estampagem Incremental do tipo SPIF de 27 peças no formato de hiperboloide até a fratura das chapas. Nestes experimentos foram variados os parâmetros de raio de ferramenta

(R_f), espessura inicial da chapa (s_0) e tipo de material. Em cada experimento foram avaliadas as deformações verdadeiras e medidas as forças axiais.

Todos os experimentos foram executados em um torno CNC marca Nardini, modelo LOGIC 195VS e comando GE FANUC Series Oi-TC, conforme indicado na Figura 22.



Figura 22: Torno CNC Nardini LOGIC 195VS

A Figura 23 apresenta a configuração utilizada para os experimentos no torno CNC, indicando a ferramenta, a chapa (fixada em um suporte), bem como a torre e a placa do torno e o sistema de medição de força no eixo z, constituída por extensômetros colados na ferramenta e microcontrolador.

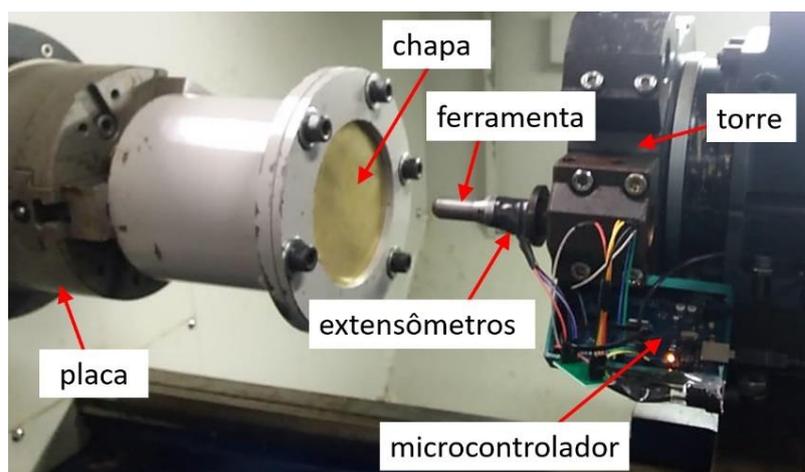


Figura 23: Montagem do dispositivo no torno CNC

A Figura 24 apresenta uma vista em corte do dispositivo de fixação das chapas, constituído por uma base e um prensa-chapas fixados por parafusos de

cabeça cilíndrica com sextavado interno. Todos os experimentos foram realizados até que fosse identificada a primeira fratura na chapa conformada.

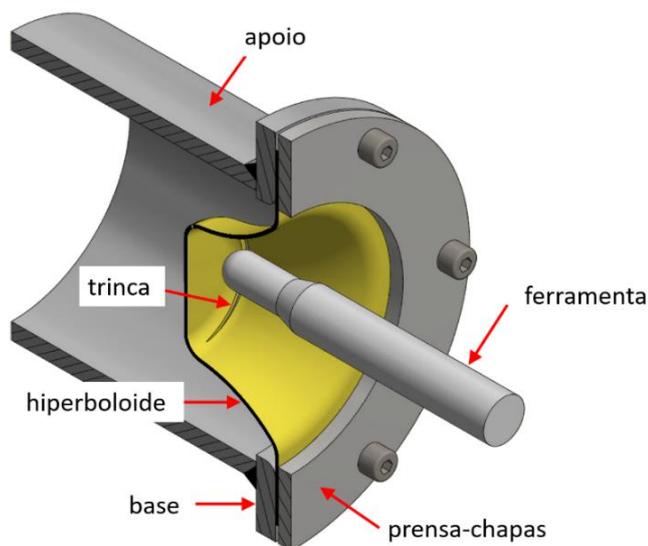


Figura 24: Vista em corte do dispositivo de fixação da chapa

Antes do início de cada experimento foi depositada uma fina camada de 5 ml de óleo VG100 por meio de uma pipeta sobre a superfície a ser estampada.

A Figura 25(a) apresenta o formato de hiperboloide estampado, com diâmetro inicial de 95 mm e um raio lateral de 60 mm. Esse formato possibilita que a cada incremento da ferramenta sobre a peça seja formado um novo ângulo de parede, de forma que esse ângulo aumente gradativamente de θ_0 a θ à medida que a espessura inicial s_0 diminui gradativamente até a espessura final s e ocorra a fratura da chapa em uma profundidade máxima h .

A Figura 25(b) apresenta a estratégia paralela ao contorno seguida pela ferramenta para conformação nos experimentos. No torno CNC as trajetórias lineares foram realizadas pelo deslocamento da ferramenta (com velocidade de 100 mm/min), enquanto que as trajetórias circulares foram obtidas por meio da rotação da placa (com velocidade 2 rpm). Na programação CNC foi determinada a sequência de operações conforme Figura 25(b), iniciada por incremento da ferramenta ($\Delta z = 1$ mm), seguido de uma rotação completa da placa do torno; posteriormente foi realizado novo incremento (no sentido radial e axial da ferramenta); depois disso foi realizada uma nova rotação da ferramenta; e essas etapas foram seguidas de acordo com o formato da peça até que fosse identificada a fratura do material.

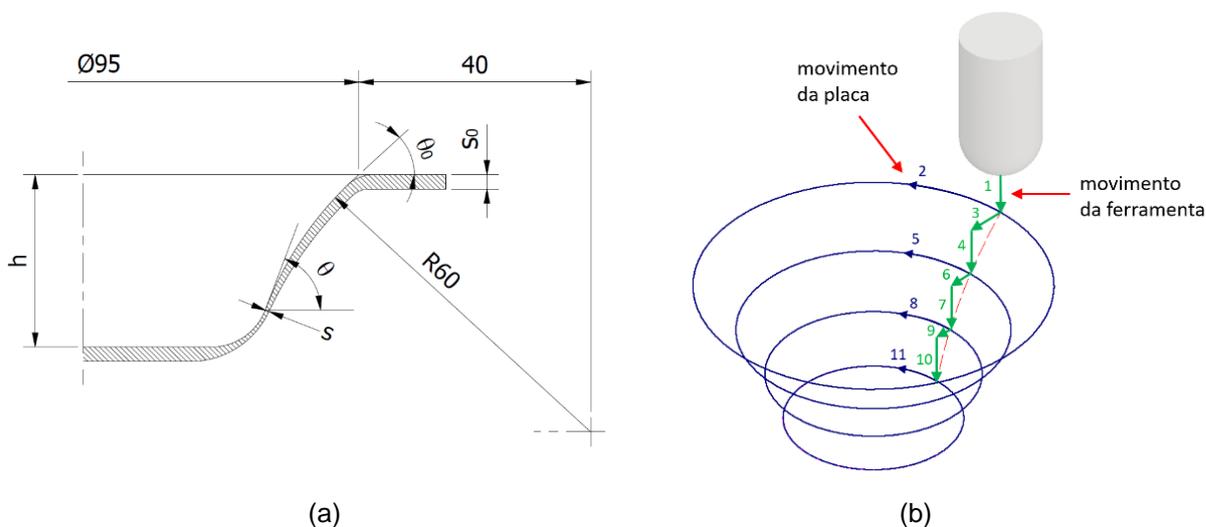


Figura 25: Hiperboloide: Chapa conformada em corte (a) e Estratégia paralela ao contorno para conformação (b)

Para estes experimentos foi necessária a utilização de três ferramentas com ponta semiesférica (cada uma com um raio diferente), sendo todas fabricadas em aço SAE1045 temperado e revenido. Na Figura 26 são apresentadas as dimensões das ferramentas utilizadas nos experimentos.

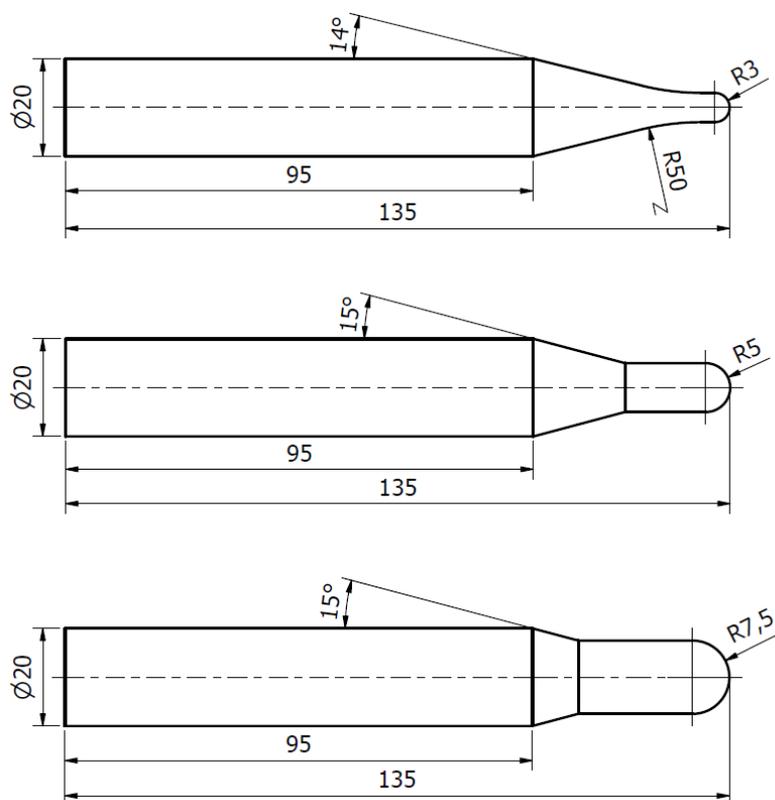


Figura 26: Dimensões das ferramentas

A análise das deformações obtidas em cada peça conformada foi realizada por meio de gravação eletroquímica de uma grade de círculos sobre as chapas, com dimensão inicial $d_0 = 1$ mm. Após a deformação os círculos transformam-se em elipses, e a determinação das deformações foi feita por meio da medição das mesmas (Figura 27). A deformação principal φ_1 foi calculada pela Equação 13.

$$\varphi_1 = \ln\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (13)$$

Onde:

d = Comprimento final da elipse [mm];

d_0 = Dimensão inicial da grade de círculos [mm].

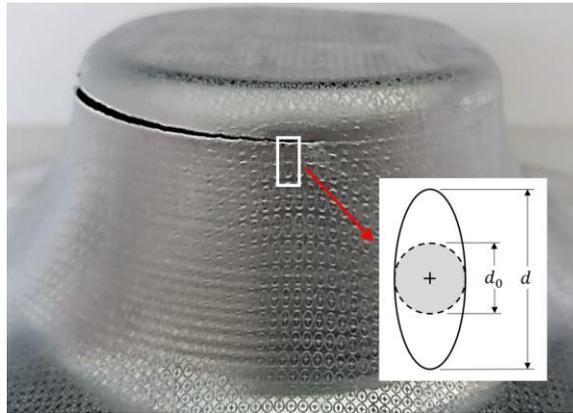


Figura 27: Método de determinação das deformações

No caso do hiperboloide obteve-se o estado plano de deformações, onde a deformação secundária $\varphi_2 = 0$ e a deformação na espessura é definida como $\varphi_3 = -\varphi_1$ (em função da lei da constância de volume). A espessura final foi estimada em função da deformação na espessura (Equação 5). Enquanto que o ângulo de parede final θ foi calculado pela Equação 2, também em função da deformação na espessura.

A deformação equivalente de von Mises em cada experimento foi calculada pela Equação 12, que para o estado plano de deformações foi simplificada pela Equação 14.

$$\varphi_{eq} = \frac{2\sqrt{3}}{3} |\varphi_3| \quad (14)$$

A tensão equivalente (σ_{eq}) foi determinada em função das propriedades do material e da deformação equivalente, conforme expresso na Equação 11 (equação de Ludwick-Hollomon).

Para o estado plano de deformações as tensões principais (usando o critério de von Mises) foram calculadas pelas Equações 6-8 e a tensão média (σ_m) foi calculada pela Equação 9 [52].

A análise de variância ANOVA foi realizada para avaliar o efeito dos parâmetros de material, raio de ferramenta e espessura no resultado de tensão crítica obtida em cada experimento. Para determinar se os dados obtidos eram paramétricos foi realizado o teste de Shapiro-Wilk e o teste de Levene. Para comparar as diferentes combinações dos grupos analisados a ANOVA foi seguida pelo teste de Post hoc de Bonferroni. As análises estatísticas foram realizadas no software RStudio e o valor de $p < 0.05$ foi usado como critério de significância estatística na análise.

Para a medição do parâmetro de força no eixo Z foram utilizados quatro extensômetros unidirecionais da marca Excel e modelo PA-06-060BA-350L. Os extensômetros foram instalados nas ferramentas na configuração de ponte completa, a fim de se analisar, através da deformação da ferramenta, a força axial aplicada durante o processo de Estampagem Incremental. A aquisição dos dados foi realizada por meio de um microcontrolador Arduino MEGA 2560 R3 ligado a um computador. A Figura 28(a) indica a forma de instalação dos extensômetros na ferramenta e a Figura 28(b) indica o circuito.

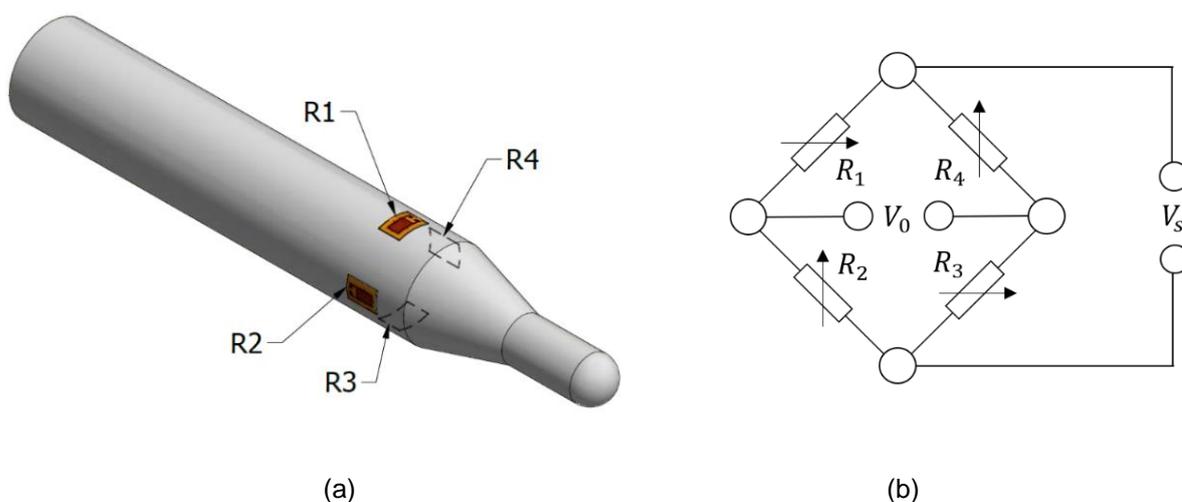


Figura 28: Instalação da ponte completa na ferramenta (a) e circuito da ponte completa (b)

No circuito de ponte completa, indicado na Figura 28(b) são apresentados os quatro extensômetros (R_1 a R_4), onde a tensão de excitação da ponte é indicada como V_s e a tensão de saída da ponte como V_0 . Este tipo de instalação permite a medição da força no eixo Z, que é a força com maior intensidade no processo de estampagem incremental.

Após a realização dos experimentos e medição da força axial, foi determinada uma equação geral para estimar a força axial máxima, através de regressão múltipla, em função das propriedades dos parâmetros do processo.

Para comparação dos dados dos modelos elaborados neste trabalho com os dados experimentais foi utilizada a Equação 15 para cálculo do erro percentual.

$$PE = \frac{|X - X_{exp}|}{X_{exp}} 100 \quad (15)$$

Onde:

PE = Erro percentual [%];

X = Dado calculado [-];

X_{exp} = Dado experimental [-].

3.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Com o objetivo de validar os dados de força axial obtidos nos experimentos por meio de extensômetros, foram realizadas três simulações pelo Método de Elementos Finitos (FEM) com o software *Simufact Forming*. Os resultados obtidos nas simulações foram comparados com os dados experimentais, e foi calculado o erro percentual na força axial máxima em cada simulação por meio da Equação 15. Foram selecionados três experimentos (um para cada material) para comparação a fim de comparar os valores de força axial em diferentes materiais e validar as medições.

As simulações foram realizadas com o tipo de simulação 3D e com elementos do tipo *solid-shell*, dentro do módulo *Sheet Metal Forming* do *software*. A malha criada para cada chapa foi configurada com comprimento da borda do elemento de 1.0 mm. A Figura 29 apresenta a montagem da simulação, constituída por ferramenta, chapa, base e prensa chapas. A fim de reduzir o tempo total de simulação, o diâmetro inicial do hiperboloide foi diminuído de 95 mm para 65 mm, e todas as demais dimensões foram mantidas iguais às usadas nos experimentos.

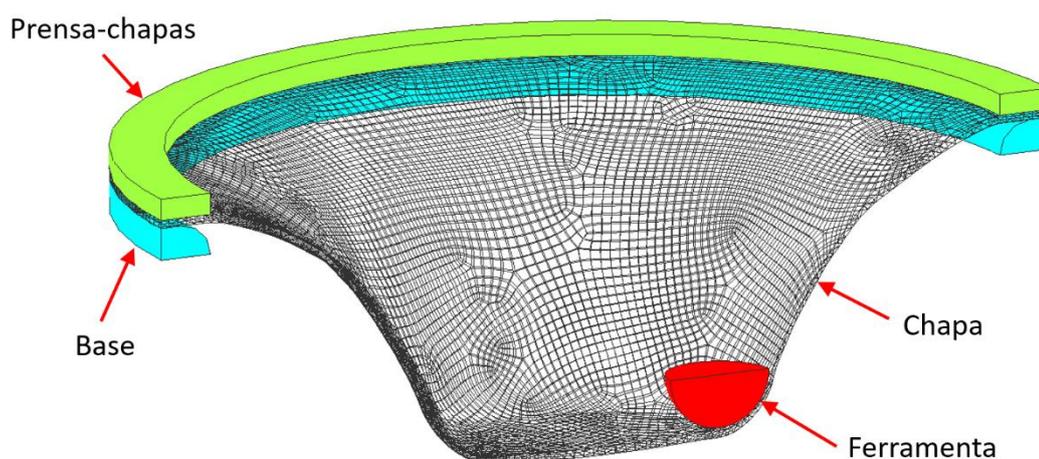


Figura 29: Configuração das simulações

Os materiais foram considerados isotópicos nas simulações, ou seja, os efeitos da anisotropia foram desconsiderados. A trajetória da ferramenta foi configurada por *tabular motion*, o coeficiente de atrito selecionado foi de 0.1 (lei de Coulomb) e as temperaturas do ferramental e da chapa foram mantidas em 20 °C.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 LIMITES DE DEFORMAÇÃO

A Tabela 4 apresenta os resultados dos experimentos de estampabilidade, com os parâmetros de entrada de material, raio de ferramenta e espessura inicial, bem como com os resultados de espessura final, ângulo final, deformações e tensões.

Tabela 4: Resultados dos experimentos de estampabilidade em SPIF

Exp.	Material	R _f (mm)	s ₀ (mm)	s (mm)	θ (rad)	φ ₁ (-)	φ ₂ (-)	φ ₃ (-)	φ _{eq} (-)	σ ₁ (MPa)	σ ₂ (MPa)	σ ₃ (MPa)	σ _{eq} (MPa)	σ _m (MPa)
1	SAE1008	7,5	0,60	0,182	1,267	1,192	0,000	-1,192	1,376	748,8	365,3	-18,2	664,2	365,3
2	SAE1008	7,5	0,75	0,217	1,281	1,240	0,000	-1,240	1,432	751,8	365,0	-21,8	669,9	365,0
3	SAE1008	7,5	0,90	0,260	1,281	1,240	0,000	-1,240	1,432	747,6	360,8	-26,0	669,9	360,8
4	AA1200-H14	7,5	0,50	0,160	1,251	1,141	0,000	-1,141	1,318	211,4	103,4	-4,5	186,9	103,4
5	AA1200-H14	7,5	0,80	0,203	1,317	1,373	0,000	-1,373	1,585	214,4	104,3	-5,8	190,7	104,3
6	AA1200-H14	7,5	1,20	0,252	1,361	1,562	0,000	-1,562	1,804	216,1	104,4	-7,2	193,4	104,4
7	C268	7,5	0,50	0,202	1,167	0,906	0,000	-0,906	1,046	835,4	406,5	-22,5	743,0	406,5
8	C268	7,5	0,81	0,289	1,214	1,030	0,000	-1,030	1,189	854,3	410,7	-32,9	768,4	410,7
9	C268	7,5	1,06	0,357	1,234	1,087	0,000	-1,087	1,255	858,9	409,0	-40,9	779,3	409,0
10	SAE1008	5,0	0,60	0,170	1,288	1,264	0,000	-1,264	1,460	751,3	362,9	-25,5	672,7	362,9
11	SAE1008	5,0	0,75	0,203	1,301	1,309	0,000	-1,309	1,512	752,2	360,9	-30,5	677,8	360,9
12	SAE1008	5,0	0,90	0,238	1,307	1,331	0,000	-1,331	1,537	749,8	357,1	-35,7	680,2	357,1
13	AA1200-H14	5,0	0,50	0,160	1,251	1,141	0,000	-1,141	1,318	209,2	101,2	-6,7	186,9	101,2
14	AA1200-H14	5,0	0,80	0,207	1,312	1,352	0,000	-1,352	1,561	211,1	101,2	-8,7	190,4	101,2
15	AA1200-H14	5,0	1,20	0,286	1,332	1,434	0,000	-1,434	1,656	209,3	98,7	-12,0	191,6	98,7
16	C268	5,0	0,50	0,196	1,179	0,938	0,000	-0,938	1,083	833,2	400,3	-32,6	749,8	400,3
17	C268	5,0	0,81	0,281	1,224	1,059	0,000	-1,059	1,223	846,2	399,3	-47,5	774,0	399,3
18	C268	5,0	1,06	0,339	1,251	1,141	0,000	-1,141	1,318	853,5	397,9	-57,8	789,2	397,9
19	SAE1008	3,0	0,60	0,182	1,267	1,192	0,000	-1,192	1,376	723,1	339,6	-43,9	664,2	339,6
20	SAE1008	3,0	0,75	0,198	1,307	1,331	0,000	-1,331	1,537	736,8	344,1	-48,7	680,2	344,1
21	SAE1008	3,0	0,90	0,219	1,328	1,414	0,000	-1,414	1,633	741,7	343,8	-54,1	689,2	343,8
22	AA1200-H14	3,0	0,50	0,160	1,251	1,141	0,000	-1,141	1,318	204,9	97,0	-10,9	186,9	97,0
23	AA1200-H14	3,0	0,80	0,180	1,346	1,491	0,000	-1,491	1,722	209,6	98,5	-12,6	192,4	98,5
24	AA1200-H14	3,0	1,20	0,225	1,383	1,674	0,000	-1,674	1,933	209,3	96,8	-15,7	194,8	96,8
25	C268	3,0	0,50	0,233	1,105	0,764	0,000	-0,764	0,882	761,4	351,1	-59,1	710,6	351,1
26	C268	3,0	0,81	0,307	1,192	0,970	0,000	-0,970	1,120	792,3	355,6	-81,1	756,4	355,6
27	C268	3,0	1,06	0,368	1,224	1,059	0,000	-1,059	1,223	796,2	349,3	-97,6	774,0	349,3

Com base na análise nos resultados obtidos na Tabela 4 verificou-se que, para cada combinação entre material e raio de ferramenta, a falha ocorreu dentro de um patamar de valores de tensão média (σ_m), apesar da variação de espessuras finais e de deformações obtidas em cada experimento.

Deve-se salientar que, apesar de ter sido observado também um patamar de valores de tensão equivalente (σ_{eq}) relacionado à falha do material, a faixa de variação, bem como o desvio padrão obtidos nos valores de tensão média foram inferiores aos obtidos para tensão equivalente.

Sendo assim, a fim de definir um critério de falha baseado em tensão, estabeleceu-se a nomenclatura “tensão crítica” para descrever a tensão média na qual foi identificada a fratura em cada experimento. De acordo com Martins *et al.* [46], a triaxialidade desempenha um papel importante no mecanismo de fratura em SPIF. Na conformação incremental de chapas a triaxialidade é menor do que nos processos convencionais, o que permite obter maiores deformações no material. Sendo a tensão média um parâmetro relacionado com a triaxialidade, este pode ser um bom indicador de falha, principalmente por ser fácil de calcular.

Um modelo de ANOVA de três vias (Material x R_f x s_0) mostrou que não há efeito da espessura inicial nem de suas interações com os demais parâmetros no valor de tensão crítica. Apesar da espessura inicial da chapa ser um parâmetro influente na estampabilidade [40,43], conforme indicado pela lei do cosseno (Equação 1), foi observado que a fratura do material ocorreu com valores de tensão crítica que não dependeram da espessura inicial da chapa.

Um modelo de ANOVA de duas vias (Material x R_f), criado em seguida, mostrou haver efeito significativo do material [$F(2, 18) = 48310$; $p < 0,001$], do raio da ferramenta [$F(2, 18) = 437$; $p < 0,001$] e da interação entre material e raio da ferramenta [$F(4, 18) = 129$; $p < 0,001$] no valor da tensão crítica. Devido aos valores de F suficientemente elevados, e valores de p inferiores a 0,001, é verificada significância estatística nestes casos.

Os testes de Shapiro-Wilk e Levene indicaram que há normalidade nos resíduos e homogeneidade de variâncias. Análises de Post hoc (Bonferroni) mostraram que o valor da tensão crítica é dependente do material, conforme esperado. As análises de Post hoc também mostraram que a tensão crítica é dependente do raio da ferramenta no latão, em todas as comparações. No entanto,

não é dependente do raio para o aço entre 5 e 7,5 mm. E no alumínio a tensão crítica só apresentou dependência do raio da ferramenta entre 3 e 7,5 mm.

A Figura 30 apresenta o gráfico de interação entre os parâmetros avaliados na ANOVA de duas vias, onde é possível perceber que a influência do raio da ferramenta na tensão crítica no latão e no aço é mais acentuada do que no alumínio.

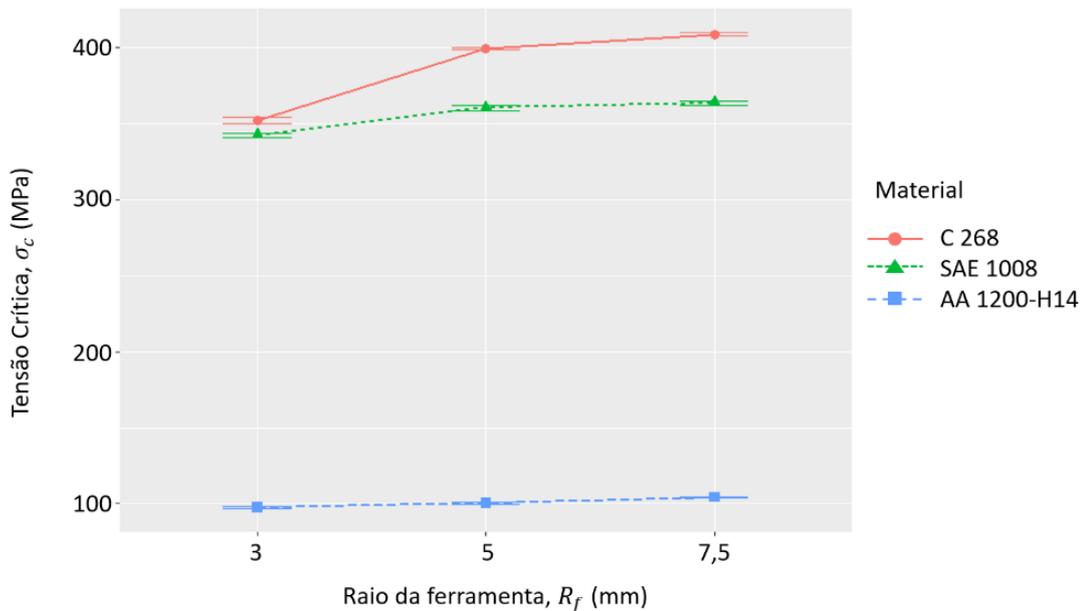


Figura 30: Efeito dos valores de raio da ferramenta e de material na tensão crítica

Como os parâmetros de coeficiente de resistência e coeficiente de encruamento, bem como a tensão de ruptura varia bastante entre os materiais utilizados neste estudo (Tabela 3), já era esperado que o material tivesse efeito sobre a tensão crítica, assim como tem na estampabilidade [68].

Como o raio da ferramenta tem seu efeito sobre a estampabilidade explicado em função da triaxialidade [46], também era esperado seu efeito sobre o valor de tensão crítica. No entanto, foi constatado que esse efeito não é igual em todos os materiais.

Considerando a tensão média (Tabela 4) como a “tensão crítica” é possível estabelecer este valor como critério de falha em SPIF, conforme indicado na Equação 16 (aplicada ao estado plano de deformações $\varphi_2 = 0$).

$$\sigma_c = \sigma_m = \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_f - s}{R_f + s} \right) \quad (16)$$

Em função deste critério de falha baseado na tensão crítica foram deduzidas as Equações 16-19, para serem utilizadas como método iterativo para previsão do máximo ângulo de parede θ (Equação 17), da deformação em espessura φ_3 (Equação 18) ou da maior deformação φ_1 (Equação 19), para cada condição de processo.

$$\sigma_c = \frac{C}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_f - s_0 \cos \theta}{R_f + s_0 \cos \theta} \right) \left[\frac{2\sqrt{3}}{3} \left| \ln \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \right| \right]^n \quad (17)$$

$$\sigma_c = \frac{C}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_f - s_0 e^{\varphi_3}}{R_f + s_0 e^{\varphi_3}} \right) \left(\frac{2\sqrt{3}}{3} |\varphi_3| \right)^n \quad (18)$$

$$\sigma_c = \frac{C}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_f - s_0 e^{(-\varphi_1)}}{R_f + s_0 e^{(-\varphi_1)}} \right) \left(\frac{2\sqrt{3}}{3} \varphi_1 \right)^n \quad (19)$$

A Equação 17, para determinação do ângulo de parede, foi obtida substituindo-se as Equações 1, 3 e 11 na Equação 16. Enquanto que a Equação 18, em função da deformação em espessura, foi obtida substituindo-se as Equações 5, 11 e 14 na Equação 16.

Para obtenção dos limites de deformação em forma gráfica pelo FFLD, é útil utilizar a Equação 19, que foi obtida a partir da Equação 18, considerando que para o estado plano de deformação $\varphi_3 = -\varphi_1$.

Com base nos resultados de análise estatística o valor de tensão crítica foi determinado como uma função do material e do raio da ferramenta. A Tabela 5 apresenta os valores médios de tensão crítica para cada material e raio de ferramenta, independente da espessura inicial da chapa. Na Tabela 5 também é indicada uma comparação entre a maior deformação calculada pela Equação 19 (φ_1 calc) e obtida nos experimentos (φ_1 exp). O erro percentual (PE) máximo apresentado pelo método proposto neste trabalho foi de 6,7 %.

Tabela 5: Comparação dos resultados experimentais com o método analítico

Material	R_f (mm)	σ_c (MPa)	s_0 (mm)	φ_1 exp. (-)	φ_1 calc. (-)	PE (%)
SAE1008	7,5	363,7	0,60	1,192	1,173	1,6
			0,75	1,240	1,225	1,2
			0,90	1,240	1,273	2,7
	5,0	360,3	0,60	1,264	1,234	2,4
			0,75	1,309	1,303	0,5
			0,90	1,331	1,366	2,7
	3,0	342,5	0,60	1,192	1,221	2,4
			0,75	1,331	1,316	1,2
			0,90	1,414	1,401	0,9
AA1200-H14	7,5	104,0	0,50	1,141	1,182	3,6
			0,80	1,373	1,351	1,6
			1,20	1,562	1,534	1,8
	5,0	100,4	0,50	1,141	1,089	4,5
			0,80	1,352	1,305	3,5
			1,20	1,434	1,530	6,7
	3,0	97,4	0,50	1,141	1,161	1,7
			0,80	1,491	1,434	3,8
			1,20	1,674	1,703	1,8
C268	7,5	408,7	0,50	0,906	0,922	1,8
			0,81	1,030	1,015	1,4
			1,06	1,087	1,085	0,2
	5,0	399,2	0,50	0,938	0,930	0,8
			0,81	1,059	1,058	0,1
			1,06	1,141	1,150	0,8
	3,0	352,0	0,50	0,764	0,769	0,6
			0,81	0,970	0,949	2,2
			1,06	1,059	1,075	1,5

A Figura 31 apresenta os FFLDs mínimo e máximo para AA1200-H14, SAE1008 e C268, determinados pelo método analítico desenvolvido neste trabalho em função dos parâmetros de raio de ferramenta e espessura inicial. Cada FFLD foi determinado utilizando o coeficiente angular -1, de modo que φ_3 apresenta valor constante em qualquer modo de deformação, enquanto que no estado plano de deformações $\varphi_2 = 0$ e que no estado de expansão biaxial $\varphi_1 = \varphi_2$.

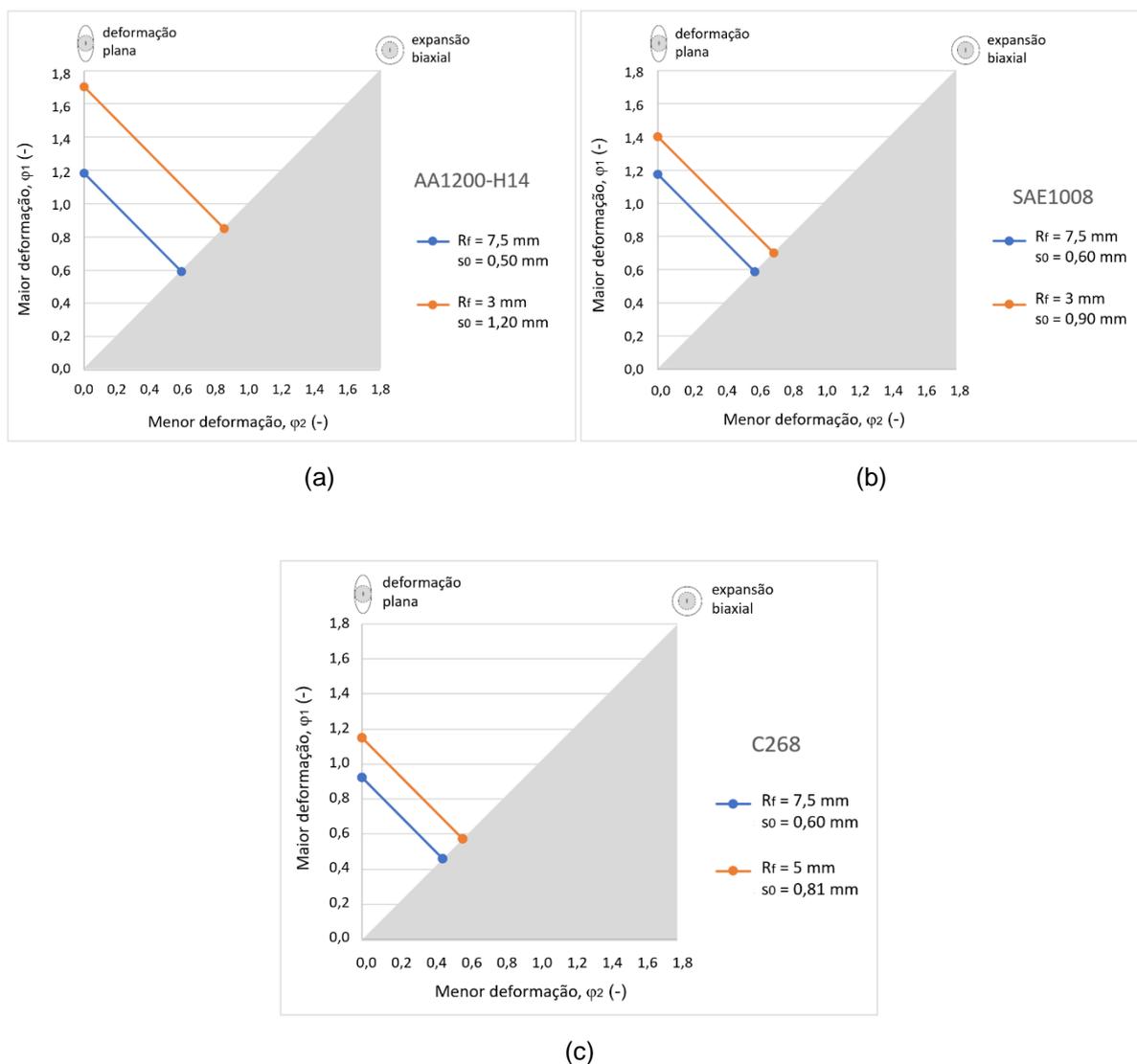


Figura 31: FFLDs obtidos pelo método analítico para (a) AA1200-H14, (b) SAE1008 e (c) C268

Por meio deste método, conhecendo-se a tensão crítica em que ocorre a fratura do material e selecionando os dados do material (C , n e s_0), bem como o raio da ferramenta (R_f) é possível estimar o máximo ângulo de parede, a máxima deformação, e além disso, definir a posição do FFLD.

4.2 MEDIÇÃO DAS FORÇAS

Os gráficos de força obtidos nos experimentos apresentaram tendência semelhante à encontrada em outros estudos realizados com peças no formato de

hiperboloide [55,66,73], nos quais é possível observar o aumento da força axial até um ponto de pico, seguido de uma diminuição da intensidade da força axial até que ocorre a fratura da chapa.

Na Figura 32 é apresentado o gráfico de força axial x tempo para aço SAE1008 com $s_0 = 0,75$ mm utilizando diferentes raios de ferramenta. Nesta figura verifica-se os pontos de pico de força nos locais onde ocorre o movimento da ferramenta no eixo z, seguido por um patamar de forças mais baixo, devido ao movimento de rotação da placa. Para o experimento com raio de ferramenta de 7,5 mm está indicado o ponto de força axial máxima ($F_{z\text{máx}}$), sendo que após esse ponto a força reduz gradativamente até que ocorra uma redução brusca na força (também indicado na figura). O ponto de redução brusca na força axial indica que a trinca foi iniciada no experimento. A Figura 32 indica que quanto maior for o raio da ferramenta maior será a força axial requerida pela máquina. Essa tendência está de acordo com outros estudos [70,74–76] e pode ser explicado como consequência do aumento da área de contato [48,74].

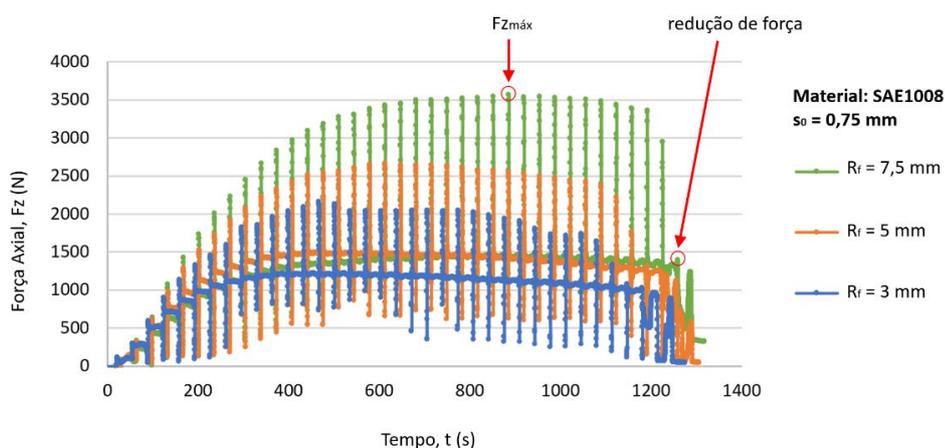


Figura 32: Gráficos de comparação de forças entre diferentes raios de ferramenta para SAE1008 e $s_0 = 0.75$ mm

A Figura 33 apresenta a comparação entre os gráficos de força axial para diferentes espessuras iniciais para aço SAE1008. Nesta figura fica evidente que quanto maior for a espessura da chapa, maior será a força axial requerida pela máquina, assim como relatado em outros estudos [49,70,74,75]. Essa tendência está relacionada com o fato de que com o aumento da espessura mais material tem que ser deformado pela ferramenta, exigindo força maior [77].

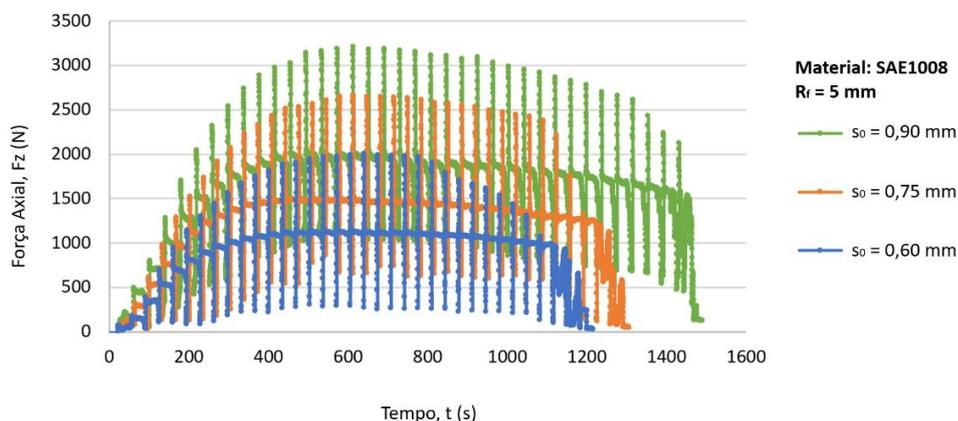


Figura 33: Gráficos de comparação de forças entre diferentes espessuras para SAE1008 e $R_f = 5$ mm

Na Figura 34 é apresentada a comparação de força axial requerida em função do material. Nessa figura é possível verificar que materiais com maior limite de resistência (Tabela 3) necessitam de forças mais elevadas para serem deformados, assim como verificado nos estudos de Aerens *et al.* [75].

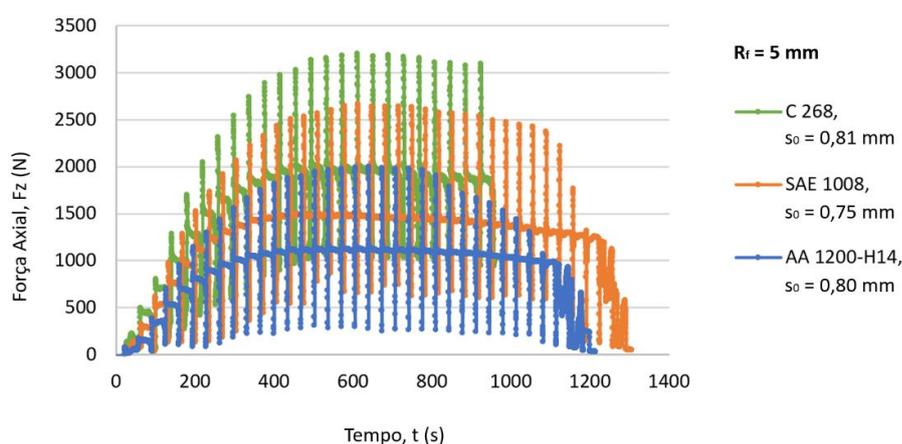


Figura 34: Gráficos de comparação de forças entre diferentes materiais com $R_f = 5$ mm

A partir da construção de um modelo de regressão linear múltipla foi obtida a Equação 20, que relaciona a força axial máxima em função do raio da ferramenta, da espessura inicial da chapa, do coeficiente de resistência, do coeficiente de encruamento do material e de interações entre estes parâmetros. O R^2 obtido nesta regressão múltipla foi de 98,85% e o erro percentual máximo obtido pela Equação 20 foi de 11,5%, conforme indicado entre colchetes ao lado da equação.

$$\begin{aligned}
 Fz_{m\acute{a}x} = & 416,7 + 172,8R_f + 275s_0 + 0,1479C - 5555n + 225,5R_f s_0 \\
 & + 0,8436R_f C + 5,189s_0 C - 2929R_f n - 6284s_0 n + 1,585R_f s_0 C \\
 & - 3727R_f s_0 n \quad [PE_{m\acute{a}x} = 11,5\%]
 \end{aligned} \tag{20}$$

A Tabela 6 apresenta uma comparação entre a força axial máxima calculada pela Equação 20 ($F_{\text{máx calc}}$) e a obtida nos experimentos ($F_{\text{máx exp}}$). O erro percentual (PE) também é indicado na tabela.

Tabela 6: Comparação dos resultados experimentais de força com os obtidos pela equação de regressão

Material	R_f (mm)	s_0 (mm)	$F_{\text{máx exp.}}$ (N)	$F_{\text{máx calc.}}$ (N)	PE (%)
SAE1008	7,5	0,60	2947,9	2860,7	3,0
		0,75	3567,3	3632,6	1,8
		0,90	4508,8	4404,5	2,3
	5,0	0,60	2000,7	2102,5	5,1
		0,75	2668,5	2723,7	2,1
		0,90	3203,7	3344,9	4,4
	3,0	0,60	1485,9	1496,0	0,7
		0,75	2157,0	1996,6	7,4
		0,90	2508,8	2497,3	0,5
AA1200-H14	7,5	0,50	638,9	598,8	6,3
		0,80	918,6	1008,9	9,8
		1,20	1595,0	1555,8	2,5
	5,0	0,50	471,5	436,7	7,4
		0,80	745,1	763,9	2,5
		1,20	1205,3	1200,2	0,4
	3,0	0,50	323,4	307,0	5,1
		0,80	515,0	567,9	10,3
		1,20	939,6	915,8	2,5
C268	7,5	0,50	2110,8	2032,7	3,7
		0,81	3672,7	3750,8	2,1
		1,06	5413,8	5136,3	5,1
	5,0	0,50	1450,2	1452,2	0,1
		0,81	2619,8	2849,7	8,8
		1,06	3566,6	3976,7	11,5
	3,0	0,50	1071,1	987,7	7,8
		0,81	2067,6	2128,8	3,0
		1,06	3378,4	3049,0	9,8

4.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Os gráficos de força axial em função do tempo obtidos nas simulações foram comparados com os gráficos experimentais. Os erros percentuais na estimativa da

força axial máxima variaram de 4,6 a 9,5 %, conforme indicado na Tabela 7. Esse baixo erro percentual permite concluir que os dados de força obtidos por medição nos experimentos são coerentes com os dados previstos nas simulações.

Tabela 7: Resultados das simulações

Exp.	Resultado Experimental	Resultado da Simulação FEM	PE (%)
	$F_{z\text{máx}}$ (N)	$F_{z\text{máx}}$ (N)	
4	2110,8	1995,2	9,5
7	638,9	699,6	5,5
11	2668,5	2790,0	4,6

A Figura 35 indica o gráfico experimental e de simulação FEM para o 7º experimento. Nesta figura é indicado o ponto onde ocorre o início de uma trinca (gráfico experimental) e no incremento anterior o ponto de força máximo, que foi utilizado como ponto de comparação entre os dois gráficos. Na Figura 35 também é possível identificar a mesma tendência de elevação de forças em ambos os gráficos, ainda que os pontos de pico são melhores descritos pela simulação do que os pontos de força média (patamar inferior).

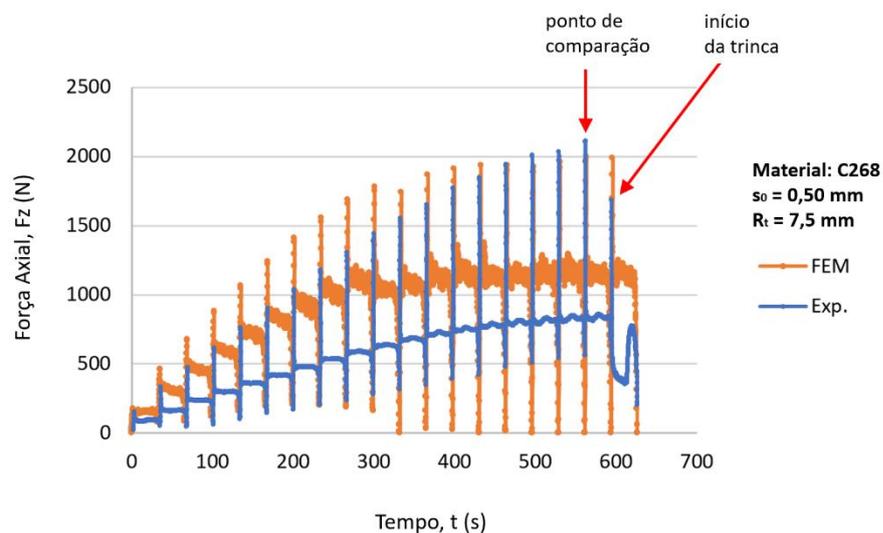


Figura 35: Gráficos de comparação de forças entre valores experimentais e simulação FEM para C268 com $s_0 = 0.50$ mm e $R_f = 7.5$ mm

Conforme indicado na Figura 35, a força é superestimada pelo modelo de elementos finitos em comparação aos dados experimentais, principalmente no início do gráfico. Essa diferença também foi verificada nos estudos de Neto *et al.* [24], que

atribuíram esse fato a um possível deslizamento entre a chapa e o prensa-chapas, caso que não é considerado na simulação. Além disso, já era esperada uma pequena diferença entre os valores experimentais e os obtidos por FEM, uma vez que, devido à complexidade do processo, simplificações foram impostas ao modelo de simulação [78,79].

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi definido um método analítico iterativo para estimar o limite de deformação e foi definida uma equação de regressão para estimar a força axial máxima no processo de Estampagem Incremental. A partir dos resultados obtidos neste trabalho é possível relacionar as seguintes conclusões:

1. A análise estatística (ANOVA) mostrou que apenas o material, o raio de ferramenta e a interação entre material e raio da ferramenta têm efeito sobre a tensão crítica;
2. Considerando o processo SPIF adaptado à um torno CNC, com estratégia de conformação paralela ao contorno, o método iterativo desenvolvido permitiu definir os limites de deformação, com erro máximo de 6,7%;
3. A simulação FEM apresentou previsões de força axial máxima com as quais foi possível validar os resultados experimentais;
4. A força axial máxima pôde ser estimada por equação de regressão linear múltipla em função do coeficiente de resistência, do coeficiente de encruamento, da espessura inicial da chapa e do raio da ferramenta, com erro máximo 11,5%.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O método iterativo apresentado neste trabalho para estimar os limites de deformação é baseado nos parâmetros de material (coeficiente de resistência e coeficiente de encruamento), espessura inicial da chapa e raio da ferramenta. Expandir essa análise considerando também outros parâmetros como o incremento vertical, a rotação e a velocidade de avanço da ferramenta é uma alternativa que poderia ser explorada.

Além disso, uma gama maior de materiais poderia ser utilizada em novos experimentos a fim de expandir a aplicação deste método.

A equação de regressão para estimativa da força axial máxima também poderia ser destinada a outros materiais em novos experimentos, com o objetivo de expandir sua aplicação.

A inclusão dos parâmetros de incremento vertical, rotação e velocidade de avanço na equação de regressão permitiria a criação de um modelo ainda mais preciso e abrangente para estimar a força axial máxima.

Experimentos medindo a força axial em peças no formato de tronco de cone com diferentes ângulos de parede também poderiam ser realizados, a fim de estimar a força axial máxima em função do ângulo de parede.

REFERÊNCIAS

- [1] Amino M, Mizoguchi M, Terauchi Y, Maki T. Current status of “Dieless” Amino’s incremental forming. *Procedia Eng* 2014;81:54–62. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.128>.
- [2] Li Y, Chen X, Liu Z, Sun J, Li F, Li J, et al. A review on the recent development of incremental sheet-forming process. *Int J Adv Manuf Technol* 2017;92:2439–2462. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0251-z>.
- [3] Lu H, Liu H, Wang C. Review on strategies for geometric accuracy improvement in incremental sheet forming. *Int J Adv Manuf Technol* 2019;102:3381–417. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03348-3>.
- [4] Ambrogio G, Filice L, Gagliardi F. Improving industrial suitability of incremental sheet forming process. *Int J Adv Manuf Technol* 2012;58:941–7. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3448-6>.
- [5] Castelan J, Schaeffer L, Daleffe A, Fritzen D, Salvaro V, Da Silva FP. Manufacture of custom-made cranial implants from DICOM® images using 3D printing, CAD/CAM technology and incremental sheet forming. *Rev Bras Eng Biomed* 2014;30:265–73. <https://doi.org/10.1590/rbeb.2014.024>.
- [6] Ambrogio G, Palumbo G, Sgambitterra E, Guglielmi P, Piccininni A, De Napoli L, et al. Experimental investigation of the mechanical performances of titanium cranial prostheses manufactured by super plastic forming and single-point incremental forming. *Int J Adv Manuf Technol* 2018;98:1489–503. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2338-6>.
- [7] De Lucca GDS, 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). *J Mater Res Technol* 2021;15:2633–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.059>.
- [8] de Arruda RP, Baroni A, Schaeffer L. Sheet metal forming: new technologies applied to the fabrication of solar energy collector panels. *Int J Mechatronics Manuf Syst* 2008;1:254–63. <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2008.02051>.
- [9] Schreiber RG, Schaeffer L. Manufacture of absorber fins for solar collector using incremental sheet forming. *J Mater Res Technol* 2019;8 (1):1132–40. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.018>.
- [10] Schreiber RG, Teixeira AR, Pereira RSF, da Silva Osório F, Schaeffer L. Prototyping of absorber plate for solar collector by ISF and FSW processes. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 2021;43:1–12. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03083-5>.
- [11] Scheffler S, Pierer A, Scholz P, Melzer S, Weise D, Rambousek Z. Incremental sheet metal forming on the example of car exterior skin parts. *Procedia Manuf* 2019;29:105–11. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.112>.
- [12] Peter I, Fracchia E, Canale I, Maiorano R. Incremental sheet forming for prototyping automotive modules. *Procedia Manuf* 2019;32:50–8. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.182>.

- [13] Trzepiecinski T, Krasowski B, Kubit A, Wydrzynski D. Possibilities of Application of Incremental Sheet-Forming Technique in Aircraft Industry. *Sci Lett Rzesz Univ Technol - Mech* 2018;87–100.
- [14] Barimani-Varandi A, Nasrabadi MK, Ravan BA, Javadi M. Rapid prototyping of aircraft canopy based on the incremental forming process. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 2021;43:1–15. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02811-1>.
- [15] Leszak E. Apparatus and process for incremental dieless forming. US3342051A, 19 set, 1967.
- [16] Berghahn WG, Murray JGF. Method of dielessly forming surfaces of revolution. US3316745, 1967.
- [17] Mason B. Sheet metal forming for small batches. University of Nottingham. Nottingham, UK., 1978.
- [18] Iseki H, Kato K, Sakamoto. S. Flexible and incremental sheet metal forming using a spherical roller. *Proc 40th JJCTP* 41 1989;41:44.
- [19] Han HN, Kim KH. A ductile fracture criterion in sheet metal forming process. *J Mater Process Technol* 2003;142:231–8. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00587-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00587-9).
- [20] Gatea S, Lu B, Chen J, Ou H, McCartney G. Investigation of the effect of forming parameters in incremental sheet forming using a micromechanics based damage model. *Int J Mater Form* 2019;12:553–74. <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1434-3>.
- [21] Huang Y, Smith S, Ziegert J, Cao J, Woody B, Li M. Studies of size effect on the formability of a domed part in incremental forming. *Proc ASME Int Manuf Sci Eng Conf MSEC2008* 2009;1:645–54. https://doi.org/10.1115/MSEC_ICMP2008-72545.
- [22] Wu R, Hu Q, Li M, Cai S, Chen J. Evaluation of the forming limit of incremental sheet forming based on ductile damage. *J Mater Process Technol* 2021;287. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116497>.
- [23] Silva MB, Skjoedr M, Atkins AG, Bay N, Martins PAF. Single-point incremental forming and formability-failure diagrams. *J Strain Anal Eng Des* 2008;43:15–35. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA340>.
- [24] Neto DM, Martins JMP, Oliveira MC, Menezes LF, Alves JL. Evaluation of strain and stress states in the single point incremental forming process. *Int J Adv Manuf Technol* 2016;85:521–34. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7954-9>.
- [25] Meier H, Smukala V, Dewald O, Zhang J. Two Point Incremental Forming with Two Moving Forming Tools. *Key Eng Mater* 2007;344:599–605. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.344.599>.
- [26] Ceretti E, Giardini C, Attanasio A. Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines. *J Mater Process Technol* 2004;152:176–84. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.03.024>.

- [27] Araghi BT, Manco GL, Bambach M, Hirt G. Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2009;58:225–8. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.101>.
- [28] Gohil A, Modi B. Review of the effect of process parameters on performance measures in the incremental sheet forming process. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2021;235:303–32. <https://doi.org/10.1177/0954405420961215>.
- [29] Meier H, Magnus C, Smukala V. Impact of superimposed pressure on dieless incremental sheet metal forming with two moving tools. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2011;60:327–30. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.134>.
- [30] Peng W, Ou H, Becker A. Double-Sided Incremental Forming: A Review. *J Manuf Sci Eng* 2019;141:050802.1-050802.12. <https://doi.org/10.1115/1.4043173>.
- [31] Park JJ, Kim YH. Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique. *J Mater Process Technol* 2003;140:447–53. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00768-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00768-4).
- [32] Cao T, Lu B, Xu D, Zhang H. An efficient method for thickness prediction in multi-pass incremental sheet forming. *Int J Adv Manuf Technol* 2015:469–83. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6489-9>.
- [33] Xu D, Malhotra R, Reddy NV, Chen J, Cao J. Analytical prediction of stepped feature generation in multi-pass single point incremental forming. *J Manuf Process* 2012;14:487–94. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2012.08.003>.
- [34] Kitazawa K, Nakajima A. Cylindrical Incremental Drawing of Sheet Metals by CNC Incremental Forming Process. 6th ITCP, 1999, p. 1495–500.
- [35] Ismail NA, Ismail MIS, Radzman MAM, Ariffin MKAM, As'arry A. Parametric optimization of robot-based single point incremental forming using Taguchi method. *Int J Integr Eng* 2019;11:217–24. <https://doi.org/10.30880/ijie.2019.11.01.023>.
- [36] Ford Media. Ford's Advanced Prototyping, Personalization and Low-Volume Production Technology 2013. https://www.youtube.com/watch?time_continue=62&v=Wl5_wUVxRvw (accessed August 22, 2019).
- [37] Filice L, Fratini L, Micari F. Analysis of material formability in incremental forming. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2002;51:199–202. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61499-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61499-1).
- [38] Baruah A, Pandivelan C, Jeevanantham AK. Optimization of AA5052 in incremental sheet forming using grey relational analysis. *Measurement* 2017;106:95–100. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.04.029>.
- [39] Emmens WC, Sebastiani G, Boogaard AHVD, van den Boogaard AH. The technology of Incremental Sheet Forming-A brief review of the history. *J Mater Process Technol* 2010;210:981–97. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.02.014>.

- [40] Jeswiet J, Micari F, Hirt G, Bramley A, Duflou J, Allwood J. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2005;54:88–114. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60021-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60021-3).
- [41] Jeswiet J, Duflou JR, Szekeres A, Lefebvre P. Custom manufacture of a solar cooker - A case study. *Adv Mater Res* 2005;6–8:487–92. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.6-8.487>.
- [42] Tisza M. General overview of sheet incremental forming. *J Achiev Mater Manuf Eng* 2012;55:113–20.
- [43] Al-Ghamdi KA, Hussain G. Threshold tool-radius condition maximizing the formability in SPIF considering a variety of materials: Experimental and FE investigations. *Int J Mach Tools Manuf* 2015;88:82–94. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.09.005>.
- [44] Duflou JR, Verbert J, Belkassam B, Gu J, Sol H, Henrard C, et al. Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2008;57:253–6. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.030>.
- [45] Ham M, Jeswiet J. Forming limit curves in single point incremental forming. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2007;56:277–80. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.064>.
- [46] Martins PAF, Bay N, Skjoedt M, Silva MB. Theory of single point incremental forming. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2008;57:247–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.047>.
- [47] Fan G, Gao L, Hussain G, Wu Z. Electric hot incremental forming: A novel technique. *Int J Mach Tools Manuf* 2008;48:1688–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.07.010>.
- [48] Centeno G, Bagudanch I, Martínez-Donaire AJ, García-Romeu ML, Vallellano C. Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming. *Mater Des* 2014;63:20–9. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.066>.
- [49] Duflou J, Tunçkol Y, Szekeres A, Vanherck P. Experimental study on force measurements for single point incremental forming. *J Mater Process Technol* 2007;189:65–72. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.01.005>.
- [50] Kim Y. H, Park J. J. Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal. *J Mater Process Technol* 2002;130–131:42–6. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00788-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00788-4).
- [51] Rauch M, Hascoet JY, Hamann JC, Plenel Y. Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications. *CAD Comput Aided Des* 2009;41:877–85. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2009.06.006>.
- [52] Bhattacharya A, Maneesh K, Reddy N V., Cao J. Formability and Surface Finish Studies in Single Point Incremental Forming. *J Manuf Sci Eng* 2011;133:061020.1-061020.8. <https://doi.org/10.1115/1.40054.58>.
- [53] Ham M, Jeswiet J. Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2006;55:241–4. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60407-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60407-7).

- [54] Khazaali H, Fereshteh-Saniee F. A comprehensive experimental investigation on the influences of the process variables on warm incremental forming of Ti-6Al-4V titanium alloy using a simple technique. *Int J Adv Manuf Technol* 2016;87:2911–23. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8665-6>.
- [55] Xu D, Wu W, Malhotra R, Chen J, Lu B, Cao J. Mechanism investigation for the influence of tool rotation and laser surface texturing (LST) on formability in single point incremental forming. *Int J Mach Tools Manuf* 2013;73:37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.06.007>.
- [56] Torsakul S, Kuptasthien N. Effects of three parameters on forming force of the single point incremental forming process. *J Mech Sci Technol* 2019;33:2817–23. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0528-2>.
- [57] Durante M, Formisano A, Langella A, Minutolo FMC. Technology The influence of tool rotation on an incremental forming process. *J Mater Process* 2009;209:4621–6. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.11.028>.
- [58] Teixeira AR, Schreiber RG, Schaeffer L. Influência das velocidades de Avanço e rotação na Estampagem Incremental de Alumínio. *Rev Ferram* 2018:22–6.
- [59] Al-Obaidi A, Kräusel V, Landgrebe D. Hot single-point incremental forming assisted by induction heating. *Int J Adv Manuf Technol* 2016;82:1163–71. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7439-x>.
- [60] Buffa G, Campanella D, Fratini L. On the improvement of material formability in SPIF operation through tool stirring action. *Int J Adv Manuf Technol* 2013;66:1343–51. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4412-9>.
- [61] Daleffe A. Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de alumínio puro. Porto Alegre: Dissertação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); 2008.
- [62] Azevedo NG, Farias JS, Bastos RP, Teixeira P, Davim JP, Sousa RJA, et al. Lubrication aspects during Single Point Incremental Forming for steel and aluminum materials. *Int J Precis Eng Manuf* 2015;16:589–95. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0079-0>.
- [63] Jawale K, Duarte JF, Reis A, Silva MB. Microstructural investigation and lubrication study for single point incremental forming of copper. *Int J Solids Struct* 2018;151:145–51. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.09.018>.
- [64] Ai S, Long H. A review on material fracture mechanism in incremental sheet forming. *Int J Adv Manuf Technol* 2019;104:33–61. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03682-6>.
- [65] Do V-C, Pham Q-T, Kim Y-S. Identification of forming limit curve at fracture in incremental sheet forming. *Int J Adv Manuf Technol* 2017;92:4445–55. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0441-8>.
- [66] Malhotra R, Xue L, Belytschko T, Cao J. Mechanics of fracture in single point incremental forming. *J Mater Process Technol* 2012;212:1573–90. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.021>.
- [67] Ai S, Lu B, Chen J, Long H, Ou H. Evaluation of deformation stability and fracture mechanism in incremental sheet forming. *Int J Mech Sci* 2017;124–125:174–84. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.03.012>.

- [68] Micari F. Single Point Incremental Forming: recent results. Semin. Increm. Form., Cambridge University; 2004.
- [69] Gouveia B, Rodrigues J, Martins P. Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica - Volume III. Lisboa: Escolar Editora; 2011.
- [70] Chang Z, Li M, Chen J. Analytical modeling and experimental validation of the forming force in several typical incremental sheet forming processes. *Int J Mach Tools Manuf* 2019;140:62–76. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.03.003>.
- [71] Haag J, Ferranti GO. Estampabilidade De Aços De Baixo Carbono. 54º Semin Laminação e Conform 2017;54:308–19. <https://doi.org/10.5151/1983-4764-30515>.
- [72] Maximiliano G, Schaeffer L, Daleffe A, Fritzen D, Americo R. Estampagem Incremental de Múltiplos Passes em Chapa de Latão C268. 36º SENAFOR /19ª Conferência Nac Conform Chapas / 6ª Conferência Int Conform Chapas /3º Congr Do BrDDRG 2016.
- [73] Duflou JR, Tunckol Y, Aereens R. Force Analysis for Single Point Incremental Forming. *Key Eng Mater* 2007;344:543–50. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.344.543>.
- [74] Bansal A, Lingam R, Yadav SK, Venkata Reddy N. Prediction of forming forces in single point incremental forming. *J Manuf Process* 2017;28:486–93. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.04.016>.
- [75] Aereens R, Eyckens P, Van Bael A, Duflou JR. Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations. *Int J Adv Manuf Technol* 2010;46:969–82. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2160-2>.
- [76] Petek A, Kuzman K, Kopač J. Deformations and forces analysis of single point incremental sheet metal forming. *Arch Mater Sci Eng* 2009;35:107–16.
- [77] Kumar A, Gulati V, Kumar P, Singh H. Forming force in incremental sheet forming: a comparative analysis of the state of the art. vol. 41. Springer Berlin Heidelberg; 2019. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1755-2>.
- [78] Fernandes FAO, Marques C, Castelan J, Fritzen D, de Sousa RJA. Learning processes in mechanics of structures: Allying analytical and numerical approaches. *Educ Sci* 2020;10. <https://doi.org/10.3390/educsci10040114>.
- [79] Castelan J, Milanez A, Fritzen D. Aprendizagem em engenharia utilizando métodos analíticos e numéricos. *Rev Ensino Eng* 2016;35:37–43. <https://doi.org/10.15552/2236-0158/abenge.v35n2p37-43>.