

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS LAGES
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Maurício Kiniz Júnior

Comparação de Métodos de Predição de Forças em Estampagem Incremental

LAGES
2022

Maurício Kiniz Júnior

Comparação de Métodos de Predição de Forças em Estampagem Incremental

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. MSc. Rafael Gustavo Schreiber.

Lages

2022

Maurício Kiniz Júnior

Comparação de Métodos de Predição de Forças em Estampagem Incremental

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

Lages, 04 de março de 2022.

Prof. Matheus Fontanelle, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

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

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

Profa. Angela Selau Marques, Dra.
Avaliador(a)
Instituto Federal Sul-Rio-Grandense

Dedico este trabalho à pessoa mais importante na minha vida,
M.E.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus pela oportunidade de cursar Engenharia Mecânica.

Agradeço à M.E. pela paciência e carinho em todos os momentos difíceis.

Agradeço à P. e A. por sempre me apoiarem.

Agradeço ao meu orientador, Rafael Schreiber, pelos ensinamentos, lições e amizade durante esses anos de graduação e pesquisa.

Agradeço ao meu amigo Matheus Goedert por toda ajuda durante essa trajetória.

Agradeço a Lucas Savi pela ajuda em diversas etapas dos experimentos e análise dos resultados.

Agradeço, também, a todos aqueles que me apoiaram nesta jornada.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela ajuda envolvendo o uso do *Simufact Forming*.

Agradeço, por fim, ao IFSC por ser essa instituição acolhedora e pela qual sinto enorme orgulho.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre o método analítico e o método de elementos finitos (FEM) para estimativa da força axial no processo de estampagem incremental. Nesse estudo foram realizados 12 experimentos de estampagem incremental na configuração SPIF (*Single Point Incremental Forming*) variando os parâmetros do processo: raio de ferramenta (R_f), ângulo de parede (θ) e incremento vertical (Δz). Os valores de força axial obtidos nos experimentos foram comparados com métodos analíticos da literatura e com simulações utilizando FEM. A geometria das peças estampadas foi de tronco de cone, o qual possui ângulo de parede constante. Os experimentos e análises foram realizados para alumínio AA1200-H14, com espessura 0,5 mm. Ao final do estudo, concluiu-se que o método de maior precisão foi de elementos finitos, com erro máximo encontrado de 7,63% para a força axial de pico, enquanto o método analítico se destacou pela facilidade de aplicação, apesar de apresentar um erro médio de 29,50% para o modelo mais eficiente. O parâmetro mais influente nos valores de força axial foi o raio de ferramenta, seguido do incremento vertical.

Palavras-chave: Estampagem Incremental. Forças. Alumínio. FEM.

ABSTRACT

The present work presents a comparative analysis between the analytical method and the finite elements method (FEM) to estimate the axial force during the incremental sheet forming process. In this study were realized 12 experiments of incremental sheet forming in the SPIF (Single Point Incremental Sheet Forming) configuration varying the process parameters: tool radius (R_f), wall angle (θ) and step down (Δz). The axial force values obtained in the experiments were compared with literature analytical methods and FEM simulations. Sheet formed geometry was a cone trunk, which has constant wall angle. The experiments and analysis were made for AA1200-H14 aluminium with 0,5 mm thickness. At the end of the study, the conclusion was that the most precise method was finite elements, which found a maximum error of 7,63% for the peak axial force, while the analytical method showed up as easier to apply, though its mean error was 29,50% for the most efficient model. The most influential parameter in axial force was tool radius, followed by step down.

Keywords: Incremental Sheet Forming. Forces. Aluminium. FEM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas de tensão x deformação.....	18
Figura 2 – Efeito do encruamento no limite de escoamento de ligas metálicas.....	21
Figura 3 – a) Elementos da estampagem profunda, antes do processo; b) Peça após processamento.	23
Figura 4 - Proporção de uso de diferentes máquinas em Estampagem Incremental.	31
Figura 5 - Configuração genérica para um processo de Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF).....	32
Figura 6 - Comparativo entre o Diagrama Limite de Conformação (FLD) para estampagem incremental (SPIF) e processos convencionais.	36
Figura 7 - a) Representação esquemática da força vertical de Allwood, Houghton e Jackson; b) Representação esquemática da força horizontal de Allwood, Houghton e Jackson.	39
Figura 8 - Área de contato entre chapa e ferramenta na Estampagem Incremental.	42
Figura 9– Torno CNC empregado nos experimentos.....	46
Figura 10 – Parâmetros do processo de estampagem incremental.	47
Figura 11 - Dispositivo de fixação da chapa no torno CNC.....	48
Figura 12 – Trajetória da ferramenta para um tronco de cone.	49
Figura 13 - Equipamento para gravação eletroquímica das chapas.....	50
Figura 14 – Representação das dimensões da grade de círculos antes e após a deformação. ..	51
Figura 15 – Configuração da Ponte de Wheatstone.	52
Figura 16 – Forma de fixação da célula de carga na ferramenta.	52
Figura 17 - Caixa de refinamento antes da simulação em uma análise FEM do Simufact Forming.	55
Figura 18 – Chapas conformadas após os experimentos.....	57
Figura 19 – Chapa conformada após o experimento 12.	58
Figura 20 - Gráficos força axial x tempo para os experimentos 1,3 e 5.....	59
Figura 21 - Gráficos força axial x tempo para os experimentos 2, 4 e 6.....	60
Figura 22 - Gráficos força axial x tempo para os experimentos 7, 9 e 11.....	60
Figura 23 - Gráficos força axial x tempo para os experimentos 8, 10 e 12.....	61
Figura 24 – Distribuição de espessura para a análise FEM do experimento 1.....	66
Figura 25 - Distribuição de tensão equivalente para a análise FEM do experimento 1.	67
Figura 26 – Distribuição de espessura para a análise FEM do experimento 12.....	67

Figura 27 – Distribuição de tensão equivalente para a análise FEM do experimento 12.....	68
Figura 28 – Comparação entre o gráfico do experimento 1 com a respectiva análise FEM. ...	69
Figura 29 - Comparação entre o gráfico do experimento 12 com a respectiva análise FEM...	70
Figura 30 – Efeitos da variação do ângulo de parede para $R_f = 5$ mm e $\Delta z = 0,5$ mm.	73
Figura 31 - Efeitos da variação do ângulo de parede para $R_f = 5$ mm e $\Delta z = 1,0$ mm.	74
Figura 32 - Efeitos da variação do ângulo de parede para $R_f = 7,5$ mm e $\Delta z = 0,5$ mm.	75
Figura 33 - Efeitos da variação do ângulo de parede para $R_f = 7,5$ mm e $\Delta z = 1,0$ mm.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos e processos de conformação x esforços envolvidos.	20
Tabela 2 - Recomendações para dimensões de elementos de estampagem.	25
Tabela 3 - Valores de referência para relação máxima de estampagem (M).	27
Tabela 4 - Equações dos estados de tensão para SPIF, segundo Martins, <i>et al.</i> (2008).	34
Tabela 5 - Equações do estado de tensão para SPIF, segundo Bhattacharya, <i>et al.</i> (2011).	35
Tabela 6 - Principais materiais usados no processo de Estampagem Incremental.	38
Tabela 7 - Equações empíricas de força vertical (F_z) de Aerens, <i>et al.</i>	40
Tabela 8 – Parâmetros usados para os cálculos do alumínio AA1200-H14.	45
Tabela 9 - Parâmetros dos experimentos.	46
Tabela 10 – Forças obtidas nos experimentos.	62
Tabela 11 - Comparativo entre as forças obtidas nos experimentos e calculadas pelos diferentes métodos analíticos.	64
Tabela 12 - Valor percentual do erro médio obtido em função de cada método analítico para a força média.	65
Tabela 13 – Experimentos escolhidos para serem simulados.	65
Tabela 14 - Erro percentual obtido entre a força média da simulação FEM e os experimentos.	71
Tabela 15 - Erro percentual obtido entre a força de pico da simulação FEM e os experimentos.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD - *Computer Aided Design* (Desenho Assistido por Computador)

CNC - Comando Numérico Computadorizado

EHISF - *Electrical Hot Incremental Sheet Forming* (Estampagem Incremental por Aquecimento Elétrico)

FEM - *Finite Element Method* (Método de Elementos Finitos)

ISF - *Incremental Sheet Forming* (Estampagem Incremental)

IFSC - Instituto Federal de Santa Catarina

SPIF - *Single Point Incremental Forming* (Estampagem Incremental de Ponto Único)

TPIF - *Two Point Incremental Forming* (Estampagem Incremental de Dois Pontos)

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Velocidade de avanço da ferramenta (mm/s)
A_{pc}	Área de contato do prensa-chapas (N)
C	Coefficiente de resistência (MPa)
d	Diâmetro final/instantâneo do corpo de prova ou da grade de círculos (mm)
d_0	Diâmetro inicial do corpo de prova ou grade de círculos (mm)
d_1	Diâmetro do punção na primeira etapa da estampagem convencional (mm)
d_m	Diâmetro da matriz (mm)
d_p	Diâmetro do punção na estampagem convencional (mm)
d_w	Diâmetro interno em que o prensa chapas não atua (mm)
D	Diâmetro inicial da chapa antes da estampagem (mm)
$Erro$	Erro encontrado na simulação ou na análise analítica (%)
F_1	Força de estampagem convencional na primeira etapa (N)
F_Φ	Força meridional da Estampagem Incremental – Bansal (N)
F_h	Força horizontal na Estampagem Incremental – Allwood (N)
F_{max}	Força máxima suportada pelo material (estampagem convencional) (N)

F_{pc}	Força exercida no prensa-chapas (N)
F_r	Força radial na Estampagem Incremental (N)
F_t	Força tangencial na Estampagem Incremental (N)
F_v	Força vertical na Estampagem Incremental – Allwood (N)
F_z	Força vertical na Estampagem Incremental (N)
F_{zp}	Força vertical de pico na Estampagem Incremental – Aereus (N)
F_{zs}	Força vertical estacionária na Estampagem Incremental – Aereus (N)
h	Profundidade estampada (mm)
h_n	Profundidade de estampagem no n-ésimo passe (mm)
h_{n-1}	Profundidade de estampagem no passe imediatamente anterior (mm)
m	Relação de estampagem – Rodrigues e Martins (-)
M	Coefficiente limite de estampagem (-)
n	Coefficiente de encruamento (-)
P_{pc}	Pressão exercida no prensa-chapas (N)
r	Raio final/instantâneo do corpo de prova ou da grade de círculos (mm)
r_0	Raio inicial do corpo de prova ou da grade de círculos (mm)
r_m	Raio de canto – arredondamento – da matriz (mm)

r_p	Raio de canto – arredondamento – do punção (mm)
R_f	Raio da ferramenta (mm)
R_m	Tensão máxima que o material suporta na estampagem convencional (MPa)
s	Espessura final da chapa (mm)
s_0	Espessura inicial da chapa (mm)
S	Rotação da ferramenta (rpm)
S_{ut}	Tensão máxima do material pela curva de engenharia (MPa)
X_{calc}	Valor do resultado/parâmetro encontrado pelo método analítico ou pela simulação (unidade de medida variável, dependendo do parâmetro)
X_{exp}	Valor do resultado/parâmetro encontrado pelo experimento (unidade de medida variável, dependendo do parâmetro)
w	Folga entre punção e matriz na estampagem convencional (mm)

Símbolos gregos:

α	Ângulo de contato entre ferramenta e chapa – Bansal (°)
α	Meio ângulo interior de contato entre peça e ferramenta – Allwood (°)
β	Relação de estampagem - Schaeffer (-)
β_1	Relação de estampagem no primeiro estágio - Schaeffer (-)

β_2	Relação de estampagem no segundo estágio - Schaeffer (-)
β_3	Relação de estampagem no terceiro estágio - Schaeffer (-)
β_{tot}	Relação de estampagem total - Schaeffer (-)
δ	Ângulo de contato entre ferramenta e chapa – Bansal (°)
Δh	Parâmetro para cálculo de forças de Aerens, et al. (2009) (mm)
Δt	Tempo de deslocamento da ferramenta na simulação FEM (s)
Δz	Incremento vertical da ferramenta (mm)
θ	Ângulo de parede (°)
σ_1	Tensão principal 1 (MPa)
σ_2	Tensão principal 2 (MPa)
σ_3	Tensão principal 3 (MPa)
σ_{eq}	Tensão verdadeira equivalente (MPa)
σ_m	Tensão média ou hidrostática (MPa)
σ_{max}	Tensão máxima suportada pelo material (estampagem convencional) (MPa)
σ_{medl}	Tensão média suportada pelo material na primeira etapa da estampagem convencional (MPa)
σ_v	Tensão verdadeira (MPa)

φ_1	Deformação verdadeira principal 1 (-)
φ_2	Deformação verdadeira principal 2 (-)
φ_3	Deformação verdadeira principal 3 (-)
φ_{eq}	Deformação verdadeira equivalente (-)
φ_{max}	Deformação máxima admitida pelo material (-)
φ_r	Deformação verdadeira na direção radial (-)
φ_s	Deformação verdadeira na direção da espessura (-)
φ_t	Deformação verdadeira na direção tangencial (-)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos.....	16
2	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	17
2.1	CONFORMAÇÃO DE MATERIAIS METÁLICOS.....	17
2.2	ESTAMPAGEM CONVENCIONAL.....	22
2.2.1	Ferramentas, dimensões e defeitos do processo.....	23
2.2.2	Forças e Tensões na Estampagem Convencional.....	26
2.3	ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	30
2.3.1	Estados de Tensão e Deformação na Estampagem Incremental.....	33
2.3.2	Forças e Parâmetros na Estampagem Incremental.....	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1	EXPERIMENTOS.....	45
3.2	MÉTODO ANALÍTICO.....	53
3.3	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS (FEM).....	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1	EXPERIMENTOS.....	57
4.2	MÉTODO ANALÍTICO	63
4.3	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS (FEM).....	65
4.4	EFEITO DOS PARÂMETROS.....	72
5	CONCLUSÕES.....	78
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	79
	REFERÊNCIAS.....	80
	APÊNDICE A – Programa CNC para Estampagem Incremental de Tronco de Cone..	85

1 INTRODUÇÃO

A Estampagem Incremental é um método de fabricação de chapas por conformação, possibilitando redução de custos e flexibilidade, sendo ideal para peças customizadas ou em pequenos lotes (FELIPE *et al.*, 2017), (AI; LONG, 2019). O processamento da matéria prima ocorre pela deformação localizada na área próxima ao contato da ferramenta (SIDDIQI *et al.*, 2018), com uso de uma máquina CNC e ferramenta, geralmente, de ponta esférica (AI; LONG, 2019). A variação geométrica da peça obtida é uma das maiores dificuldades (DABWAN *et al.*, 2020). Essa variação ocorre devido ao retorno elástico do material, sendo acentuada nos casos em que não há presença de matriz ou ferramenta no outro lado da chapa.

Esse processo pode ser utilizado em inúmeras aplicações, dentre elas, estruturas arquitetônicas (KALO; NEWSUM, 2014), próteses cranianas (CENTENO *et al.*, 2017), aletas para um coletor solar (SCHREIBER; SCHAEFFER, 2019), elementos estruturais em sistemas de controle de aeronaves, fuselagem, veículos de exposição (carros-conceito), para-choques, capôs em geral e implantes para diversas partes do corpo (KUMAR, S. P. *et al.*, 2021).

A Estampagem Incremental, cuja sigla é ISF (*Incremental Sheet Forming*), possui duas configurações comuns: SPIF (*Single Point Incremental Sheet Forming*) e TPIF (*Two Point Incremental Sheet Forming*). Para a variação SPIF, há uma única ferramenta e não se usa uma matriz durante a conformação; já na TPIF, a diferença encontra-se no uso de matriz, podendo ser positiva ou negativa (ESMAEILPOUR *et al.*, 2017).

Recentemente, alguns métodos foram aplicados para a determinação das forças envolvidas na Estampagem Incremental. Para o cálculo teórico das forças, há métodos envolvendo equações de regressão, após medições experimentais (AERENS *et al.*, 2010), (BANSAL *et al.*, 2017). Ainda, há métodos analíticos, com base em relações geométricas (CHANG; LI; CHEN, 2019). O erro apresentado pelas equações varia muito, dependendo de qual método abordado para sua determinação.

No âmbito das simulações computacionais, há estudos em diversos aspectos envolvendo a ISF. Suresh e Regalla (2014) avaliaram a influência da alteração das configurações da malha usada nos resultados simulados. Li, Li e Zhou (2012) usaram resultados provenientes de análises de elementos finitos para avaliar a distribuição de espessuras da chapa conformada. É possível empregar esse tipo de análise, também, para os casos em que a Estampagem Incremental ocorre a quente (PACHECO; SILVEIRA, 2018).

Em relação aos parâmetros envolvidos em ISF, pode-se citar: dimensões da ferramenta, avanço, atrito, tipo de material e anisotropia (BARUAH; PANDIVELAN; JEEVANANTHAM, 2017), bem como incremento vertical e espessura da chapa (AI; LONG, 2019).

Já para as forças envolvidas no processo, parâmetros influentes são diâmetro da ferramenta, espessura da chapa, velocidade de avanço, incremento vertical (KUMAR, A. *et al.*, 2019), (KALLURI, 2019), além de ângulo de parede e lubrificação (KALLURI, 2019).

Neste trabalho, para análise dos métodos de predição das forças, foram desenvolvidos experimentos analisando três parâmetros do processo: ângulo de parede (θ), incremento vertical (Δz) e raio da ferramenta (R_f). Ao todo, foram executados 12 experimentos em um torno CNC, com 2 simulações correspondentes no software *Simufact Forming*. O material avaliado foi alumínio AA 1200-H14 com espessura de 0,5 mm.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é comparar os métodos analítico e FEM (*Finite Element Method*) de predição de força axial com os resultados experimentais na estampagem incremental de alumínio AA1200-H14.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar 12 experimentos medindo a força axial no processo de estampagem incremental;
- Calcular os valores teóricos de força axial no processo utilizando os métodos analíticos disponíveis na literatura;
- Simular os valores de força axial no software *Simufact Forming*, considerando os mesmos parâmetros em 2 simulações;
- Comparar a variação de força axial obtida pelo método analítico e pelo método de elementos finitos em relação aos valores experimentais;
- Avaliar a influência dos parâmetros variados na força axial de estampagem incremental.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão sobre os principais conceitos envolvidos nos processos de conformação mecânica, além de pormenorizar o processo de estampagem convencional; em seguida, será abordado o tema da estampagem incremental e as forças envolvidas nesse processo.

2.1 CONFORMAÇÃO DE MATERIAIS METÁLICOS

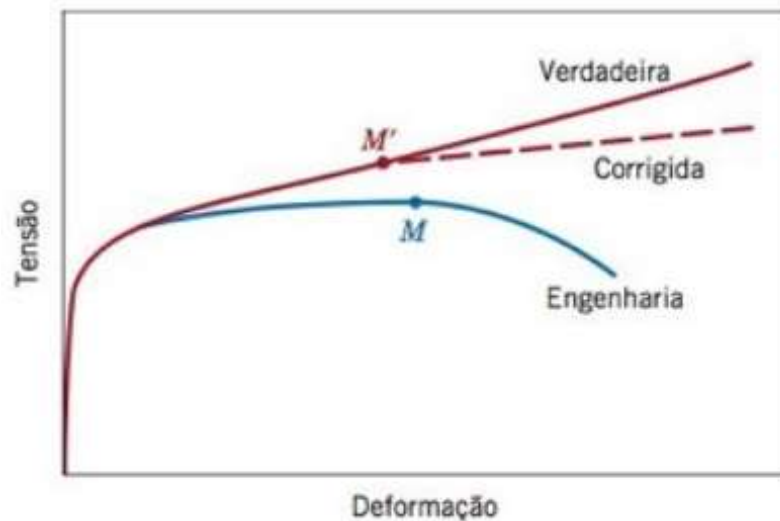
Segundo Chiaverini (1986), o processamento pelo qual os materiais e peças passam para sua fabricação influenciam diretamente nas propriedades, de modo geral, destes componentes.

Nesse sentido, uma das formas mais comuns de obtenção das principais propriedades mecânicas é pelo uso de um ensaio de tração, no qual o corpo de prova é tracionado até a ruptura, enquanto avalia-se a força e o alongamento sofrido (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018).

A partir das informações obtidas nesse ensaio, pode-se obter dois gráficos. O gráfico tensão x deformação de engenharia considera que a área do corpo de prova mantém-se constante; já o gráfico tensão x deformação verdadeiros leva em consideração a variação na área da seção transversal do corpo de prova (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018).

A Figura 1 ilustra a diferença entre as curvas mencionadas, sendo a curva de engenharia extremamente parecida com as demais curvas até o limite escoamento – a partir desse instante, ocorre a diferenciação, sendo evidente a baixa fidelidade desta à curva verdadeira. A partir do ponto M' , em que ocorre a estricção, a curva corrigida perde a proximidade com a curva verdadeira.

Figura 1 – Curvas de tensão x deformação.



Fonte: Callister Jr e Rethwisch (2018).

Ambas as curvas são semelhantes, desde que a deformação seja pequena, ou seja, quando o material se mantém no regime elástico – abaixo do escoamento (HIBBELER, 2010).

O regime elástico é definido como a região do gráfico tensão x deformação no qual existe uma proporcionalidade linear entre a tensão aplicada e a tensão apresentada pelo corpo de prova – relação válida para a maioria dos metais (HIBBELER, 2010).

Quando a tensão excede o valor limite de escoamento, adentra-se a região de deformação plástica, na qual não há linearidade entre os valores de deformação e tensão (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018).

Portanto, as operações de conformação mecânica são processos de trabalho dentro da fase plástica do material (CHIAVERINI, 1986).

Alguns tipos de processos de conformação de metais, os quais possuem subdivisões e especificidades, são: laminação, trefilação, extrusão e estampagem (SCHAEFFER, 2004).

Para os processos de conformação, é importante conhecer-se a deformação verdadeira ocorrida no material. Seu cálculo é feito conforme a equação (1), trazida por (SCHAEFFER; ROCHA, 2007), tomando como exemplo a direção radial:

$$\varphi_r = \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) = \ln\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (1)$$

Já para o cálculo da tensão equivalente, na região plástica, pode-se empregar a equação de Hollomon, trazida por (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018):

$$\sigma_{eq} = C \cdot \varphi_{eq}^n \quad (2)$$

Sendo os coeficientes C e n parâmetros do próprio material, definidos experimentalmente.

É importante ressaltar que essa relação é válida desde o início da região plástica até o momento em que se inicia a estricção, no qual ocorre um estado extremamente complexo de tensões, e, assim, a equação (2) perde a validade (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018).

Além do que já foi apresentado, outro conceito é importante para a determinação da tensão equivalente: as tensões principais. Tensões principais são os valores máximos e mínimos que a tensão normal (ou de cisalhamento) pode atingir, geralmente analisado no plano (HIBBELER, 2010).

De um modo geral, pode-se considerar que existem três tensões, σ_1 , σ_2 e σ_3 , que corresponderiam ao caso onde não há aplicação de tensões cisalhantes, somente tensões nas três direções cartesianas – x , y e z (SCHAEFFER, 2004).

Pode-se calcular uma tensão equivalente, tomando como base as tensões principais. Existem dois modos comuns de análise, o método de Tresca, a qual considera a tensão máxima de cisalhamento e o método de von Mises, que leva em conta a energia de distorção máxima no elemento (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

Para o método de Tresca, têm-se, segundo (HIBBELER, 2010) que:

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3)$$

Enquanto, para o método de von Mises, (BUDYNAS; NISBETT, 2016) define que:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (4)$$

Vale ressaltar que essas equações são aplicadas para algumas situações específicas. No caso da equação (3), $\sigma_1 > \sigma_3$ e $\sigma_3 < 0$. Já para a equação (4), há necessidade de que $\sigma_1 \geq \sigma_2 > \sigma_3$, ou, ainda, $\sigma_1 > \sigma_2 \geq \sigma_3$, sendo, em ambas as possibilidades, $\sigma_3 < 0$. Se $\sigma_2 = 0$, os métodos são equivalentes.

Outro conceito relevante aos processos de conformação é a lei de constância de volume. Ela define que, para um processo de conformação com elevadas deformações, o volume do material não sofre alteração, permanecendo o mesmo até o final do processo (SCHAEFFER, 2004).

Aplicando a definição de deformação verdadeira, demonstrada pela equação (1), e a definição de volume, pode-se obter a relação trazida por (DIETER, 1981), na forma da equação (5):

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (5)$$

Sendo, nesse caso, as deformações principais verdadeiras. Como consideração matemática, deve-se lembrar que em alguns casos a deformação pode ser menor que zero, como no caso em que a dimensão final em análise é menor que a inicial.

Por fim, quanto à classificação, pode-se agrupar os processos de conformação com base na força aplicada para execução da operação, classificados em: compressivos diretamente, compressivos indiretamente, trativos (tração), de dobramento e cisalhantes (DIETER, 1981).

Tabela 1 – Exemplos e processos de conformação x esforços envolvidos.

Processo de Conformação	Principal Esforço Envolvido
Dobramento	Dobramento
Corte	Cisalhamento
Laminação	Compressão Direta
Forjamento	Compressão Direta
Trefilação	Compressão Indireta
Extrusão	Compressão Indireta
Estampagem Profunda (Convencional)	Compressão Indireta

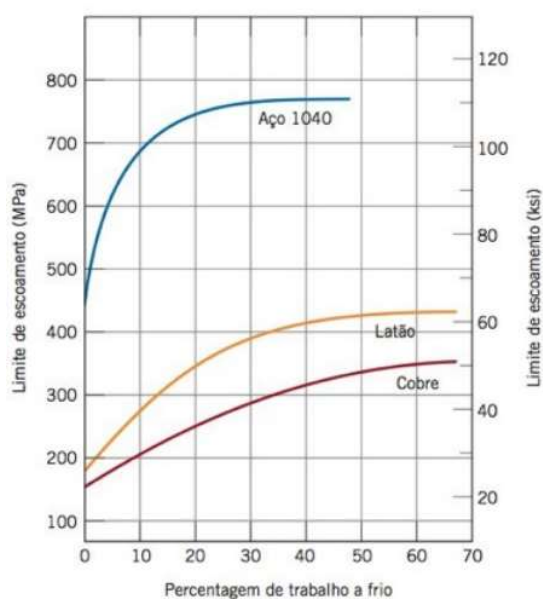
Fonte: Chiaverini (1986).

Ainda, pode-se dividir os métodos de conformação mecânica em trabalho a quente e trabalho a frio. Trabalho a quente é quando a operação ocorre acima da temperatura de recristalização (na qual são formados novos grãos no material) (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018). A principal vantagem do trabalho a quente é reduzir o esforço necessário para uma mesma deformação; porém, sua principal desvantagem é necessitar de ferramental especial para temperaturas elevadas, tornando a operação mais cara (CHIAVERINI, 1986).

Já o trabalho a frio, também chamado de encruamento, é o aumento da resistência do material pela deformação plástica; esse processo ocorre à temperatura ambiente para grande parte dos metais (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018). Como vantagem, pode-se citar o melhor acabamento superficial e precisão dimensional; como desvantagem, encontra-se o maior esforço necessário para executar a operação (CHIAVERINI, 1986).

A Figura 2 ilustra o efeito do encruamento, em relação ao percentual de deformação (trabalho a frio), para algumas ligas metálicas. Com isso, é possível observar que tanto o tipo do material quanto a deformação influenciam no limite de escoamento aumentado pelo encruamento – para a figura, o aço 1040 possui maior limite de escoamento, enquanto o cobre possui menor limite de escoamento, mesmo com o efeito do encruamento.

Figura 2 – Efeito do encruamento no limite de escoamento de ligas metálicas.



Fonte: Callister e Rethwich (2018).

Vale notar que a equação (2) descreve o efeito do encruamento, devendo ser realizado um ensaio de tração para obtenção dos parâmetros do material.

Assim, um dos objetivos centrais da análise dos processos de conformação, é determinar os esforços necessários que devem ser aplicados, de modo que a matéria prima consiga passar pelas etapas de processamento até atingir suas características (dimensões) finais (HELMAN; CETLIN, 2005).

2.2 ESTAMPAGEM CONVENCIONAL

Com relação à fabricação de chapas metálicas, a estampagem é um dos processos mais importantes (SCHAEFFER, 2006). Esse método de conformação mecânica costuma ser realizado a frio, tendo como objetivo gerar formas planas ou ocas a partir de chapas planas (CHIAVERINI, 1986).

Ainda, a estampagem pode ser dividida em três grupos de operações: corte, dobramento ou encurvamento e, ainda, estampagem profunda (CHIAVERINI, 1986). Na análise feita no presente trabalho, será analisada a estampagem profunda, aqui chamada de estampagem convencional.

Devido a necessidade de elevadas deformações plásticas no processo de estampagem convencional, costuma-se usar materiais dúcteis. Esse tipo de material é conhecido por poder submeter-se a elevadas deformações antes de sofrer ruptura – um exemplo comum é o aço doce (aço baixo carbono) (HIBBELER, 2010).

Quanto às aplicações do processo, pode-se citar as aplicações a área automobilística (portas, capôs, tampas de válvulas), aeroespacial (fuselagem, apoios), eletrodomésticos (painéis metálicos), utensílios domésticos (taças, panelas, copos, entre outros) e embalagens metálicas no geral (SCHAEFFER, 2004) (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Outra forma de classificar as aplicações do processo de estampagem, diz respeito à geometria final da peça. Dieter (1981) separa os produtos de estampagem em: peças simplesmente curvas; peças flangeadas; seções curvas; peças com embutimentos profundos; peças com embutimentos rasos.

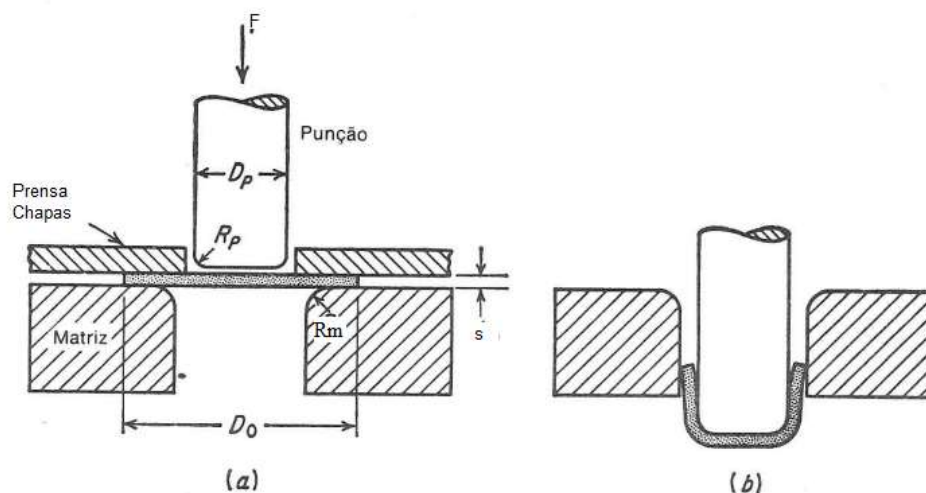
2.2.1 Ferramentas, dimensões e defeitos do processo

No tocante da nomenclatura das ferramentas usadas no processo de estampagem convencional, Polack (1974) afirma que o molde é qualquer matriz capaz de dar forma por pressão a um material metálico, possuindo a geometria da peça a ser fabricada.

O caso mais comum é aquele em que o punção (elemento móvel) possui a mesma forma da matriz (elemento fixo), porém, com dimensão reduzida, referente à espessura da chapa (POLACK, 1974). Ainda, é importante instalar no processo um equipamento chamado prensa-chapas, o qual tem por função a fixação das extremidades da chapa, evitando a ocorrência dos defeitos típicos dessa região (SCHAEFFER, 2006).

A Figura 3 mostra esquematicamente como funciona o processo. Na figura 3-a) a chapa de diâmetro inicial D_0 e espessura inicial s é fixada entre o prensa chapas e a matriz por meio de uma força externa, enquanto o punção de diâmetro D_p desloca-se perpendicularmente à superfície da chapa. Na figura 3-b) o punção cessou sua movimentação e a chapa foi conformada em um copo com diâmetro interno igual ao do punção e espessura de parede igual à da chapa não conformada.

Figura 3 – a) Elementos da estampagem profunda, antes do processo; b) Peça após processamento.



Fonte: adaptado de Dieter (1981).

Iniciando pelo prensa-chapas, sua área de atuação pode ser calculada pela equação (6), trazida por Schaeffer e Rocha (2007):

$$A_{pc} = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d_w^2) \quad (6)$$

Sendo D o diâmetro inicial da chapa a ser conformada e d_w o diâmetro interno, no qual o prensa-chapas não atua.

Acerca das dimensões do punção e da matriz, Rodrigues e Martins (2010) definem que deve existir uma folga radial, w , entre a matriz e o punção, sendo essa, geralmente, maior que a espessura inicial da chapa – podendo, em alguns casos, ser inferior.

Para o cálculo do valor da folga radial, pode-se usar a equação (7), conforme enunciada por Schaeffer e Rocha (2007):

$$w = s_0 \cdot \sqrt{\frac{D}{d_p}} \quad (7)$$

Em que s_0 é a espessura inicial da chapa e d_p é o diâmetro do punção (diâmetro estampado).

Ainda, é necessário empregar arredondamentos tanto na matriz quanto no punção, denominados raios de canto (RODRIGUES; MARTINS, 2010). Sua denominação é de r_m e r_p , respectivamente. Pode-se determinar o valor de r_m conforme mostra Schaeffer (2006):

$$r_m = 0,6 \cdot \sqrt{(D - d_p) \cdot s_0} \quad (8)$$

Tendo as variáveis sido identificadas anteriormente. Vale ressaltar que essa equação é usada para estampagens com somente uma etapa (SCHAEFFER, 2006). Para a presente análise, não se justifica entrar em detalhes sobre operações com mais de uma etapa.

Polack (1974) faz algumas recomendações referentes às dimensões do maquinário usado na estampagem, transcritas para a Tabela 2:

Tabela 2 - Recomendações para dimensões de elementos de estampagem.

Dimensão	Recomendação
Folga entre punção e matriz	10 a 20% da espessura
Raio de arredondamento das bordas da matriz	8 a 10 vezes a espessura (aços) 4 a 5 vezes a espessura (alumínio) 6 a 8 vezes a espessura (latão)
Folga entre punção e prensa-chapas	0,5 a 1mm

Fonte: Polack (1974).

Outra necessidade do processo de estampagem, é conhecer quais as dimensões iniciais da chapa a ser conformada. Para saber o diâmetro da geratriz, baseia-se na lei da constância de volume (SCHAEFFER, 2006). Para saber o diâmetro da chapa a ser estampada, pode-se usar a relação definida por Schaeffer e Rocha (2007):

$$D = \sqrt{d_p^2 + 4 \cdot d_p \cdot h} \quad (9)$$

Sendo, as variáveis definidas anteriormente. Ressalta-se, contudo, que essa equação é usada em casos em que há fabricação de um copo sem flange (aba) nas extremidades (SCHAEFFER, 2006). Esse tipo de peça foi mostrado na Figura 3.

Outra necessidade, inerente aos processos de conformação, diz respeito à determinação do retorno elástico. Isso ocorre porque após a liberação da carga aplicada durante o processo, uma parte da deformação total aplicada é recuperada, sob a forma de deformação elástica (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018).

A deformação recuperada com o retorno elástico é a mesma que teria ocorrido caso o material fosse deformado, de modo elástico, à tensão em que o material se encontra (SCHAEFFER, 2006). Com isso, aplica-se a equação trazida por Hibbeler (2010) para a Lei de Hooke, relacionando deformação e tensão na região elástica:

$$\varepsilon_{el} = \frac{\sigma_v}{E} \quad (10)$$

Sendo ε_{el} a deformação elástica recuperada, σ_v a deformação verdadeira no ponto analisado e E o módulo de elasticidade do material (valor tabelado). Deve-se ressaltar que,

considerando que essa deformação está no regime elástico, ela é representada como deformação percentual, não como deformação verdadeira, haja vista a pequena diferença entre estas no regime elástico de deformação.

Por fim, deve-se observar os defeitos que ocorrem no processo de estampagem convencional. Schaeffer (2004) afirma que pode ocorrer ruptura no canto do fundo do copo estampado, devido à força de conformação transmitida por essa região. Esse problema pode ser reduzido pelo aumento do raio do punção ou redução da força necessária à conformação (DIETER, 1981).

Outro defeito comum no processo de estampagem convencional, diz respeito a formação de rugas e ondulação na orla (borda) do copo, resultado de altas tensões compressivas desenvolvidas nessa região da chapa (DIETER, 1981). Para evitar esse tipo de defeito indesejado, usa-se prensa-chapas (SCHAEFFER, 2004); esse equipamento foi mencionado e descrito anteriormente.

2.2.2 Forças e Tensões na Estampagem Convencional

Um dos principais valores empregados no cálculo das forças envolvidas na estampagem, diz respeito à relação de estampagem (β). Schaeffer e Rocha (2007) define essa relação como:

$$\beta = \frac{D}{d_p} \quad (11)$$

Sendo as variáveis explicadas anteriormente. Vale a pena ressaltar que, de modo geral, é a razão do diâmetro da chapa antes da conformação e o diâmetro da “taça” estampada.

Outra forma de escrever a equação (12) é trazida por Rodrigues e Martins (2010), também denominada relação de estampagem (m):

$$m = \frac{d_p}{D} \quad (12)$$

As equações (11) e (12) são muito semelhantes, mudando somente qual o referencial.

De modo geral, a relação de estampagem depende de fatores como qualidade do material, tipo de lubrificação e condições da superfície da ferramenta, como a rugosidade. ((SCHAEFFER, 2006).

Além disso, existem casos em que não há possibilidade de efetuar a estampagem em uma única etapa, devendo ocorrer fabricação em múltiplos estágios (SCHAEFFER, 2006). Uma maneira de saber se há possibilidade de conformar a chapa em uma única operação ou se são necessárias múltiplas etapas, é comparar a relação de estampagem desejada com o coeficiente limite de estampagem (M), sendo, geralmente, tabelado para os mais variados materiais (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Valores comuns para o coeficiente limite de estampagem (M), em função do material estampado, são trazidos por Rodrigues e Martins (2010):

Tabela 3 - Valores de referência para relação máxima de estampagem (M).

Material	1ª Fase – M₁	Fases Seguintes – M₂
Aço para estampagem	0,60 – 0,65	0,80
Aço para estampagem profunda	0,55 – 0,60	0,75 – 0,80
Aço para carroceria de automóvel	0,52 – 0,58	0,75 – 0,80
Aço inoxidável	0,50 – 0,55	0,80 – 0,85
Folha de flandres	0,50 – 0,55	0,75 – 0,80
Cobre	0,55 – 0,60	0,85
Latão	0,50 – 0,55	0,75 – 0,80
Zinco	0,65 – 0,70	0,85 – 0,90
Alumínio	0,53 – 0,60	0,80
Duralumínio	0,55 – 0,60	0,90
Níquel; Monel; Inconel	0,60 – 0,65	0,80

Fonte: Rodrigues e Martins (2010).

Para múltiplas etapas, a relação de estampagem total pode ser definida com base nas relações para cada etapa individual. Para um caso de três etapas de estampagem, Schaeffer (2006) traz que:

$$\beta_{tot} = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \quad (13)$$

Sendo β_{tot} a relação de estampagem total para o processo.

Além disso, é importante definir quais são as três deformações envolvidas na estampagem, tanto convencional, quanto incremental. De maneira geral, são descritas por Schaeffer (2006) nas equações (14), (15) e (16):

$$\varphi_3 = \varphi_s = \ln\left(\frac{s}{s_0}\right) \quad (14)$$

$$\varphi_2 = \varphi_t = \ln\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (15)$$

$$\varphi_1 = \varphi_r = \ln\left(\frac{s_0 \cdot d_0}{s \cdot d}\right) \quad (16)$$

Sendo, respectivamente, as deformações nas direções da espessura (φ_s), tangencial (φ_t) ou radial (φ_r).

Na estampagem convencional, a ruptura costuma ocorrer num estreito pedaço de metal, localizado na parede do copo, logo acima do raio de curvatura do punção, a qual sofre essencialmente esforços de tração (DIETER, 1981).

Para a força máxima possível de ser suportada pela chapa nesses casos, sem que ocorra ruptura, Dieter (1981) afirma que pode ser calculada por:

$$F_{max} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_{max} \cdot \pi \cdot d_p \cdot s \quad (17)$$

Sendo σ_{max} a tensão máxima suportada pelo material; as demais variáveis foram descritas anteriormente.

As equações para cálculos da força de estampagem convencional costumam ser empíricas (SCHAEFFER, 2006). Uma equação muito empregada na prática, para operações com apenas um estágio é trazida por Schaeffer (2006):

$$F_1 = 5 \cdot d_1 \cdot s \cdot \sigma_{méd1} \cdot \ln(\beta_1) \quad (18)$$

Em que F_1 é a força exercida sobre o material durante a estampagem convencional na primeira etapa, $\sigma_{méd1}$ é a tensão média sofrida nessa etapa e d_1 é o diâmetro do punção na primeira etapa de estampagem convencional.

Já para determinar a força no prensa-chapas, pode-se empregar a equação abaixo, trazida por Schaeffer (2006):

$$F_{pc} = P_{pc} \cdot A_{pc} \quad (19)$$

Sendo essas variáveis a força, a pressão e a área de contato do prensa-chapas, respectivamente.

Para o cálculo da pressão do prensa-chapas, pode-se observar o disposto por Schaeffer (2006):

$$P_{pc} = \frac{R_m}{400} \cdot [(\beta_1 - 1)^3 + \frac{d_1}{200 \cdot s}] \quad (20)$$

Em que a única variável não descrita até agora é R_m , a tensão máxima que o material suporta.

Ainda, é necessário definir a área de contato do prensa-chapas. Para tanto, usa-se a equação (6), associada à equação (21), trazida por Schaeffer e Rocha (2007) para cálculo do diâmetro interno em que o prensa-chapas não atua:

$$d_w = d_p + 2 \cdot w + 2 \cdot r_m \quad (21)$$

Sendo todas as variáveis definidas anteriormente.

Por fim, prossegue-se a análise, adentrando os estados de tensão e deformação da estampagem convencional. Nesse tipo de processo, ocorre deformação por estiramento bi-axial (MARTINS *et al.*, 2008).

A condição desse tipo de deformação é trazida por Schaeffer (2004), para estiramento bi-axial:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad (22)$$

Sendo, nesse caso, as deformações principais na direção 1 ou direção 2.

Ainda, para os casos em que está ocorrendo o fenômeno de embutimento profundo, comentado anteriormente, Schaeffer (2004) define que:

$$\varphi_1 = -\varphi_2 \quad (23)$$

Sendo essa equação resultante da constância de volume e, ainda, considera que a deformação na espessura será nula, posto que ela se mantém constante nesse processo.

Para as equações de tensão na estampagem convencional, Martins, et al. (2008) define-as com o formato:

$$\sigma_r = \sigma_t = \sigma_1 = \frac{\sigma_{eq}}{1 + \left(\frac{2s}{d_p}\right)} > 0 \quad (24)$$

$$\sigma_s = \sigma_3 = \sigma_{eq} \cdot \frac{s}{\left(s + \frac{d_p}{2}\right)} < 0 \quad (25)$$

Ainda, é possível definir uma tensão média ou tensão hidrostática. Para o processo de estampagem convencional, Martins, *et al.* (2008) apresenta essa equação no formato:

$$\sigma_{méd} = \frac{2 \cdot \sigma_{eq}}{3} \cdot \left[\frac{d_p - s}{d_p + 2s} \right] \quad (26)$$

Com isso, foi possível observar as principais características do processo de estampagem convencional, bem como referências para o dimensionamento desse processo. Além disso, constatou-se os esforços desenvolvidos e as formas de analisá-lo, fornecendo subsídios para compreensão da estampagem incremental, tratada posteriormente.

2.3 ESTAMPAGEM INCREMENTAL

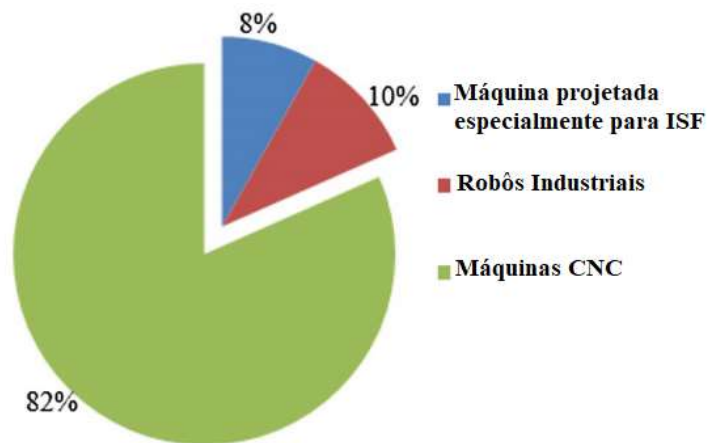
Processos com deformação plástica incremental vêm se destacando devido à sua capacidade de adequar-se às novas exigências do mercado, como fabricação de pequenos lotes, prototipagem rápida e peças com geometrias difíceis (RODRIGUES; MARTINS, 2010). A estampagem incremental é um desses processos.

É relativamente recente, sendo aplicada industrialmente em peças com geometrias complexas em pequenos lotes ou unitárias e em fabricação rápida de protótipos (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

De modo geral, costuma-se aplicar máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado) para o processo de estampagem incremental, por possuir características favoráveis, como rigidez, grande área possível de trabalho e altas velocidades (KUMAR, A. *et al.*, 2019).

Contudo, pode-se empregar tanto braços robóticos (robôs industriais) quanto máquinas projetadas especificamente para usos de ISF, as quais tendem a consumir menos energia, porém, perdem a principal vantagem associada às máquinas CNC: a versatilidade (KUMAR, A. *et al.*, 2019). A Figura 4 mostra a proporção do uso desses equipamentos nas pesquisas com estampagem incremental; a partir dessa comparação fica evidente que na maioria dos casos são empregadas máquinas CNC para execução do processo.

Figura 4 - Proporção de uso de diferentes máquinas em Estampagem Incremental.



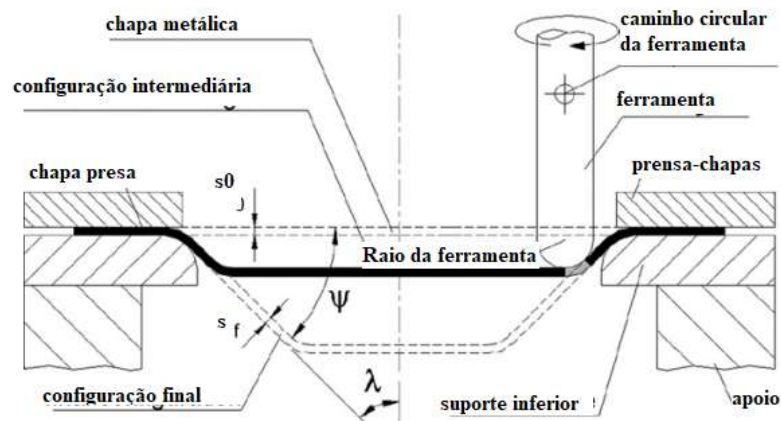
Fonte: adaptado de Kumar, et al. (2019).

Quanto às aplicações da estampagem incremental, pode-se citar o uso de materiais poliméricos para próteses cranianas (CENTENO *et al.*, 2017), próteses cranianas e faciais em titânio conformadas com altos ângulos de parede (DUFLOU, J. R. *et al.*, 2013), peças para aplicações aeroespaciais, utilizando materiais específicos para tais condições como alumínio AA-2024 (HUSSAIN *et al.*, 2013), coberturas arquitetônicas, visando otimização do tempo e versatilidade (KALO; NEWSUM, 2014), aletas absorvedoras para coletores solares (SCHREIBER; SCHAEFFER, 2019), além de personalização de veículos automotores, demais aplicações biomédicas, aplicações estruturais e outras aplicações envolvendo customização de peças ou equipamentos (KUMAR, S. P. *et al.*, 2021).

Quanto às configurações possíveis do processo, Martins, *et al.* (2008) dá enfoque ao SPIF (*Single Point Incremental Forming*), o qual constitui-se do uso de apenas uma ferramenta e não emprega matriz para conformar a chapa.

A Figura 5 ilustra a configuração de um processo de SPIF. Nessa configuração, uma ferramenta, geralmente de ponta esférica, é deslocada sobre a chapa enquanto executa incrementos verticais. A chapa possui espessura inicial s_0 e, durante a conformação, forma um ângulo θ com a horizontal, enquanto a sua espessura é reduzida para o valor final s_f . A chapa é presa entre o prensa chapas e o suporte inferior, o qual, diferentemente do processo convencional, não atua como matriz.

Figura 5 - Configuração genérica para um processo de Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF).



Fonte: adaptado de Martins, et al. (2008).

Além do SPIF, existem, ainda, as configurações Estampagem Incremental de Dois Pontos (TPIF – *Two Point Incremental Forming*), o qual consiste em usar duas ferramentas ou uma ferramenta e uma matriz (KUMAR, S. P. *et al.*, 2021); Estampagem Incremental com Aquecimento por Eletricidade (EHISF – *Electrical Hot Incremental Sheet Forming*), o qual consiste em usar eletricidade para esquentar a chapa a ser conformada (PACHECO; SILVEIRA, 2018); sendo algumas das principais configurações desse processo de estampagem.

2.3.1 Estados de Tensão e Deformação na Estampagem Incremental

Na estampagem incremental existe, basicamente, três deformações: deformação radial, deformação circunferencial e deformação de espessura. De modo geral, as deformações na estampagem incremental se aproximam das deformações presentes na estampagem convencional.

A principal diferença consiste em o material, ao ser submetido à estampagem incremental, possuir maiores limites de deformação do que outros métodos convencionais (SCHREIBER; SCHAEFFER, 2019). Assim, é importante entender como determinar as deformações envolvidas no processo.

A determinação das deformações envolvidas no processo costuma ser feita de modo semelhante ao apresentado por Schreiber e Schaeffer (2019), em que são gravados círculos de raios variáveis, os quais alteram suas dimensões enquanto o material é conformado.

Após isso, basta medir as variações apresentadas pela grade de círculos para, deste modo, calcular as deformações, de acordo com as equações (15) e (16). Vale ressaltar que, para a estampagem incremental, é difícil medir a espessura da chapa após o processo – seria necessário cortá-la ou utilizar equipamentos de medição mais elaborados – por isso, costuma-se calcular a deformação φ_s com base nas demais.

Esse cálculo pode ser feito como demonstra Schaeffer e Rocha (2007):

$$s = s_0 \cdot e^{\varphi_s} \quad (27)$$

Em que s é a espessura instantânea da chapa, s_0 é a espessura inicial da chapa e φ_s é a espessura na direção da chapa.

Ainda, é possível prever analiticamente o valor da espessura, empregando equações disponíveis na literatura. Uma delas é trazida por Rodrigues e Martins (2010):

$$s = s_0 \cdot \cos\theta \quad (28)$$

Em que as variáveis foram descritas anteriormente. Ressalta-se a importância da predição da espessura, pois, na maioria dos casos, é a deformação mais importante nos cálculos de Estampagem Incremental.

Contudo, é necessário conhecer, também, os estados de tensões possíveis na Estampagem Incremental. Eles influenciam em como serão calculadas as deformações, bem como elas se relacionam.

Dentre os métodos para análise dos estados de tensão possíveis, destaca-se os trazidos por Martins, *et al.* (2008) e Bhattacharya, *et al.* (2011). A diferença entre eles consiste, basicamente, no critério empregado no desenvolvimento das equações.

Usando uma análise de membrana e o critério de tensão equivalente de Tresca, é possível obter equações para dois estados de tensão: deformação plana (ocorre nas superfícies em geral no SPIF) e estiramento bi-axial (ocorre nos cantos/quinas da chapa) (MARTINS *et al.*, 2008).

A Tabela 4 mostra as equações para o método trazido por Martins, *et al.* (2008) para análise de tensões na Estampagem Incremental de Ponto Único:

Tabela 4 - Equações dos estados de tensão para SPIF, segundo Martins, *et al.* (2008).

Tipo de Deformação	Estado de Deformações	Estado de Tensões
deformação plana	$\varphi_2 = 0$ $\varphi_1 = -\varphi_3$	$\sigma_1 = \frac{\sigma_{eq}}{1 + \left(\frac{s_0}{R_f}\right)} > 0$
		$\sigma_2 = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 + \sigma_3)$
		$\sigma_3 = -\sigma_{eq} \cdot \frac{s_0}{(s_0 + R_f)} < 0$
estiramento bi-axial	$\varphi_1 = \varphi_2$ $\varphi_3 < 0$	$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{\sigma_{eq}}{1 + \left(2 \cdot \frac{s_0}{R_f}\right)} > 0$
		$\sigma_3 = -2 \cdot \sigma_{eq} \cdot \frac{s_0}{(s_0 + R_f)} < 0$

Fonte: Martins, *et al.* (2008).

Já Bhattacharya, *et al.* (2011), emprega uma análise com base no critério de von Mises, o qual se baseia na energia de distorção máxima de um elemento. Na prática, isso significa que o método é menos conservativo.

Contudo, foi observada somente a hipótese de deformação plana, tendo como base que é o modo de deformação predominante no processo de SPIF (BHATTACHARYA *et al.*, 2011). A Tabela 5 apresenta as equações para esse estado de tensões e deformações:

Tabela 5 - Equações do estado de tensão para SPIF, segundo Bhattacharya, *et al.* (2011).

Tipo de Deformação	Estado de Deformações	Estado de Tensões
deformação plana	$\varphi_2 = 0$ $\varphi_1 = -\varphi_3$	$\sigma_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_{eq} \cdot \left(\frac{R_f}{R_f + s_0}\right)$ $\sigma_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_{eq} \cdot \left(\frac{R_f - s_0}{R_f + s_0}\right)$ $\sigma_3 = -\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_{eq} \cdot \left(\frac{s_0}{R_f + s_0}\right)$ $\sigma_m = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_{eq} \cdot \left(\frac{R_f - s_0}{R_f + s_0}\right)$

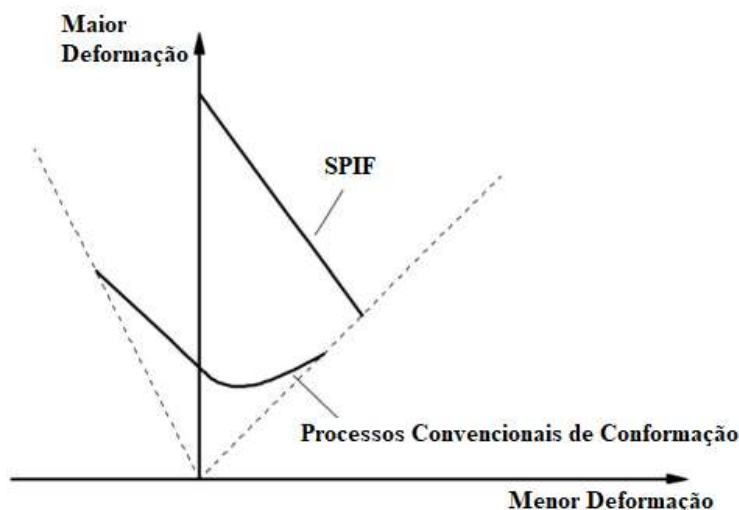
Fonte: Bhattacharya, *et al.* (2011).

Por fim, além de compreender os estados de tensão à que o material está submetido durante o processo, é importante conhecer formas de prever qual o limite de deformação que o material suporte antes de romper – muitas vezes, esse método, ainda que aproximado, pode ser mais rápido que outros, como as simulações computacionais; assim, sua imprecisão é compensada pela sua rapidez e facilidade de aplicação.

Uma das formas de medir quanta deformação um material suporta, é aplicar um gráfico denominado FLD (*Forming Limit Diagram* – Diagrama Limite de Conformação), o qual apresenta grandes diferenças ao comparar o processo de estampagem convencional com a estampagem incremental (AI; LONG, 2019).

A Figura 6 mostra um comparativo entre o FLD para processos convencionais e para SPIF. Fica evidente que os valores de deformação limites para a estampagem incremental são maiores que para os processos convencionais, principalmente no estado em que a menor deformação (eixo horizontal) é nula.

Figura 6 - Comparativo entre o Diagrama Limite de Conformação (FLD) para estampagem incremental (SPIF) e processos convencionais.



Fonte: adaptado de Ai e Long (2019).

A curva varia de acordo com o material, o que requer a execução de experimentos, para obter parâmetros que descrevam o comportamento do material – porém, sendo construído o FLD, pode-se prever o processo com erros máximos de 4%, o que é extremamente satisfatório para a maioria das aplicações de engenharia (AI; LONG, 2019).

2.3.2 Forças e Parâmetros na Estampagem Incremental

Antes de abordar as forças da estampagem incremental, é importante conhecer quais os principais parâmetros envolvidos no processo. Kumar, *et al.* (2019) afirma que os parâmetros de processamento são essenciais para escolher o equipamento adequado, garantir a execução de forma segura e, ainda, otimizar o processo.

Os principais parâmetros que influenciam no processo são: raio da ferramenta, espessura da chapa, lubrificação, temperatura de realização, ângulo de parede, incremento vertical, rotação da ferramenta e velocidade de avanço (SCHREIBER; SCHAEFFER, 2019). Porém, para fins da pesquisa realizada, serão descritos somente o incremento vertical, raio da ferramenta, ângulo de parede, rotação da ferramenta, velocidade de avanço e espessura da chapa.

O incremento vertical (Δz) é a distância entre cada passe executado pela máquina no eixo Z, isto é, a dimensão de profundidade da peça, sendo extremamente importante para a estampabilidade da chapa (PRADELLA; FOLLE, 2016). Esse parâmetro está intimamente relacionado ao tempo de processo – reduzir o incremento vertical implica aumentar o número de passes e, deste modo, o tempo para executar a operação (ZHANG *et al.*, 2020).

O raio da ferramenta (R_f) é um dos parâmetros mais influentes no processo. Geralmente, as ferramentas usadas na estampagem incremental possuem ponta semi-esférica. A influência desse parâmetro relaciona-se com a área de contato ferramenta-chapa, pois com pequenos raios, há uma deformação localizada que favorece a estabilidade do processo – quanto maior o diâmetro da ferramenta, mais o processo se aproxima de uma estampagem convencional, perdendo suas características (AI; LONG, 2019).

O ângulo de parede (θ) é o ângulo medido entre a chapa e o plano horizontal. É, muitas vezes, usado como parâmetro para determinar qual a estampabilidade do material (FORMISANO *et al.*, 2017). Costuma-se variar o ângulo de parede continuamente em um experimento, formando um hiperbolóide, até romper a amostra – o ângulo no momento da ruptura determina o quão deformável ele é sob as condições do processo (KUMAR, N.; SINGH; AGRAWAL, 2020).

Já a rotação da ferramenta (S) é a rotação que a ferramenta pode realizar em torno de seu próprio eixo. Sua influência no processo é relacionada principalmente ao atrito – baixas rotações possuem maior atrito, enquanto maiores rotações reduzem o atrito com aumento da temperatura da chapa na região do contato (AI; LONG, 2019).

Por outro lado, a velocidade de avanço (a) é a velocidade com que a ferramenta se desloca sobre a chapa, tanto no movimento de profundidade (eixo Z) quanto nos demais deslocamentos (plano XY). Seu impacto está relacionado, assim como a rotação da ferramenta, às condições de atrito do processo, bem como a taxa de deformação do material (AI; LONG, 2019).

Por fim, encerrando os parâmetros analisados, está a espessura da chapa (s_0). Quanto maior a espessura, maior o volume de metal presente na zona de deformação e, com isso, altera-se as condições no local de deformação (KUMAR, A. *et al.*, 2019).

Com relação aos principais materiais usados no processo de estampagem incremental, é possível montar a Tabela 6, contendo alguns exemplos de autores e materiais usados em suas pesquisas.

Tabela 6 - Principais materiais usados no processo de Estampagem Incremental.

Material	Autor(es)
Ligas de alumínio	(AERENS <i>et al.</i> , 2010), (BANSAL <i>et al.</i> , 2017), (KUMAR, N.; SINGH; AGRAWAL, 2020), (PACHECO; SILVEIRA, 2018), (SCHREIBER; SCHAEFFER, 2019), (TORSAKUL; KUPTASTHIEN, 2019)
Aço carbono	(AERENS <i>et al.</i> , 2010), (LI; LI; ZHOU, 2012),
Aço inoxidável	(AERENS <i>et al.</i> , 2010)
PVC	(PRADELLA; FOLLE, 2016)
Latão	(TORSAKUL; KUPTASTHIEN, 2019)
Cobre	(TORSAKUL; KUPTASTHIEN, 2019)
Magnésio	(ZHANG <i>et al.</i> , 2020)
Titânio	(DUFLOU, J. R. <i>et al.</i> , 2013)
Policarbonatos (PC)	(CENTENO <i>et al.</i> , 2017)

Fonte: Autor.

A partir da análise da tabela 6, fica evidente que as pesquisas se concentram no uso de ligas de alumínio, por conta de suas propriedades. De modo geral, não é necessário o emprego de uma máquina muito robusta, o que facilita a sua estampagem.

Partindo para a análise dos métodos analíticos para determinação das forças de estampagem incremental, é importante ressaltar a importância da força vertical (F_z) atuante na ferramenta, pois é a maior dentre as oriundas do processo. Além da força F_z , costuma-se, ainda, representar as demais forças como força radial (F_r) e força tangencial (F_t). Com isso, o foco do trabalho será analisar a componente vertical da força, dada sua importância.

Pode-se iniciar com a análise trazida por Allwood, Houghton e Jackson (2005), os quais definiram duas equações para as forças vertical e horizontal, respectivamente, envolvidas no processo:

$$F_v = \pi \cdot R_f \cdot s \cdot \sigma_{eq} \cdot \text{sen} \alpha \quad (29)$$

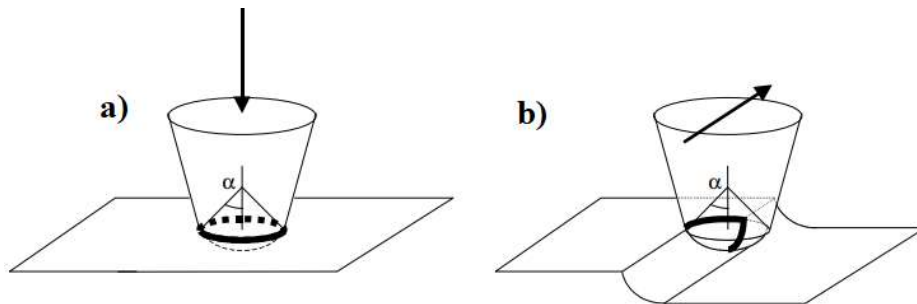
Sendo F_v a força vertical exercida sobre a ferramenta e α o meio ângulo interno de contato entre ferramenta e chapa.

$$F_h = R_f \cdot s \cdot \sigma_{eq} \cdot (\text{sen}\alpha + 1 - \text{cos}\alpha) \quad (30)$$

Sendo F_h a força horizontal exercida sobre a ferramenta.

A Figura 7 ilustra como funciona a abordagem do método analítico apresentado por Allwood, Houghton e Jackson (2005). Nesse caso, os autores consideraram a existência de um meio-ângulo de contato (α), o qual seria usado para determinar a área de contato entre a ferramenta e a chapa. Além disso, na Figura 7-a) está representada a componente vertical (axial) agindo sobre a ferramenta, enquanto a Figura 7-b) representa a componente horizontal.

Figura 7 - a) Representação esquemática da força vertical de Allwood, Houghton e Jackson; b) Representação esquemática da força horizontal de Allwood, Houghton e Jackson.



Fonte: Adaptado de Allwood, Houghton e Jackson (2005).

Seguindo uma ordem cronológica, pode-se observar, na sequência, os experimentos de Aerens, *et al.* (2010). Com uso análises computacionais e experimentos, determinou equações empíricas para diferentes materiais, incluindo ligas de alumínio e aço próprios para estampagem (AERENS *et al.*, 2010).

Nos experimentos, para a força vertical (F_z) foram obtidos dois valores, os de pico (F_{zp}) e os estacionários (F_{zs}), sendo, em alguns casos, encontrados valores estacionários somente (AERENS *et al.*, 2010). Algumas das equações, para força no eixo Z, são mostradas na tabela abaixo:

Tabela 7 - Equações empíricas de força vertical (F_z) de Aerens, *et al.*

Material	Equação de Força (F_z)	Erro (%)
Alumínio	$F_{zs} = 8,35 \cdot s_0^{1,58} \cdot (2 \cdot R_f)^{0,35} \cdot \Delta Z^{0,09} \cdot \alpha \cdot \cos\alpha$	12,2
AA3003	$F_{zp} = 19,1 \cdot s_0^{1,63} \cdot (2 \cdot R_f)^{0,36} \cdot \Delta Z^{0,09} \cdot \alpha^{0,65}$	9,6
Liga Alumínio e Magnésio	$F_{zs} = F_{zp} = 15,86 \cdot s_0^{1,72} \cdot (2 \cdot R_f)^{0,40} \cdot \Delta Z^{0,08} \cdot \alpha \cdot \cos\alpha$	14,9
AA5754		
Aço DC01	$F_{zs} = 16,26 \cdot s_0^{1,35} \cdot (2 \cdot R_f)^{0,48} \cdot \Delta Z^{0,12} \cdot \alpha^{1,11} \cdot \cos\alpha$	13,4
	$F_{zp} = 40,7 \cdot s_0^{1,42} \cdot (2 \cdot R_f)^{0,48} \cdot \Delta Z^{0,12} \cdot \alpha^{0,73}$	15,9
Aço inoxidável	$F_{zs} = 35,7 \cdot s_0^{1,61} \cdot (2 \cdot R_f)^{0,42} \cdot \Delta Z^{0,08} \cdot \alpha^{0,99}$	27,1
AISI 304	$F_{zp} = 40,7 \cdot s_0^{1,63} \cdot (2 \cdot R_f)^{0,39} \cdot \Delta Z^{0,07} \cdot \alpha^{0,97}$	28,3
Aço 65Cr2		
(somente com $s_0 = 0,5\text{mm}$)	$F_{zp} = F_{zs} = 11,8 \cdot (2 \cdot R_f)^{0,75} \cdot \Delta Z^{0,14} \cdot \alpha \cdot \cos\alpha$	6,7

Fonte: Aerens, *et al.* (2010).

Nos casos em que a força de pico é igual à força estacionária ($F_{zp} = F_{zs}$) não há pico na força, ou seja, ela mantém-se somente em conformidade com a curva estacionária para o material analisado (AERENS *et al.*, 2010).

Analisado a Tabela 7, é importante ressaltar que os grandes valores percentuais dos erros encontrados se devem ao método empírico de obtenção dessas equações, ou seja, as equações usam pontos encontrados experimentalmente para aproximar uma formulação à disposição encontrada nos experimentos.

Além disso, Aerens, *et al.* (2009) conseguiu desenvolver uma expressão geral para a força axial na estampagem incremental. Sua equação obteve o formato a seguir:

$$F_z = 0,0716 \cdot \sigma_{rup} \cdot s_0^{1,57} \cdot (2 \cdot R_f)^{0,41} \cdot \Delta h^{0,09} \cdot \alpha \cdot \cos\alpha \quad (31)$$

Sendo a variável Δh um parâmetro dependente de Δz definido por Aereens, et al. (2009).

Para as análises feitas, o desvio máximo (erro) encontrado a partir da equação (31) foi de 44,8%, em um caso específico da análise efetuada (BANSAL *et al.*, 2017). Esse valor de erro é elevado, ainda que ocorra em apenas uma das diversas condições analisadas pelo pesquisador.

Já na análise desenvolvida por Bansal, et al. (2017), foi encontrada a seguinte equação para a força axial durante a estampagem incremental:

$$F_z = F_\phi \cdot \text{sen}\alpha + F_\phi \cdot \text{sen}\delta + F_t \cdot \cos\left(\frac{\alpha - \delta}{2}\right) \quad (32)$$

Sendo F_z a força axial, F_ϕ a força meridional, F_t a força na direção da espessura, α e δ são ângulos de contato entre a ferramenta e chapa.

Ainda, Bansal, et al. (2017) empregou outros equacionamentos complementares à equação (32), porém, devido à complexidade, não serão discorridos no presente trabalho.

Por fim, um dos métodos analíticos de cálculo mais recente é o elaborado por Chang, Li e Chen (2019), o qual apresenta formulações para inúmeras configurações de Estampagem Incremental; contudo, devido aos experimentos planejados na sessão de metodologia, será abordada as equações somente para a configuração SPIF.

A análise é dividida em duas etapas – a primeira, calcular a área de contato entre ferramenta e chapa, com o emprego de relações geométricas; enquanto a segunda, consiste em fazer uma análise de membrana, a qual usa de elementos infinitesimais (parte minúsculas de material) para definir o comportamento do estado de tensões nessa porção de matéria (CHANG; LI; CHEN, 2019).

Deste modo, a equação (33) representa a força vertical (F_z) para Estampagem Incremental, conforme proposto por Chang, Li e Chen (2019):

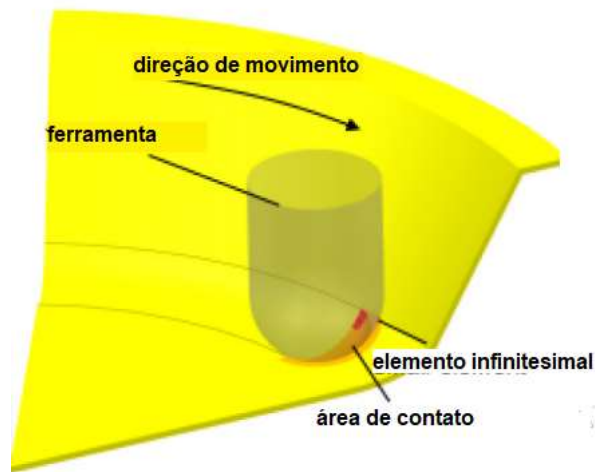
$$F_z = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2 \cdot s}{R_f + 2,5 \cdot s} \cdot \sigma_{eq} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [R_f^2 - (R_f^2 - h_1^2)] \cdot \left(1 + \frac{R_f \cdot \text{sen}\left(\theta + \arccos\frac{R_f - h_s}{R_f}\right)}{\sqrt{R_f^2 - (R_f - h_1)^2}}\right) \quad (33)$$

Sendo algumas das variáveis já descritas anteriormente, enquanto outras são próprias da análise dos autores, como h_1 e h_s . Para definição do que são essas grandezas, h_1 é a altura

da camada de chapa pressionada pela ferramenta, enquanto h_s é a altura da calota (hemisfério) formado na região de contato entre ferramenta e chapa (CHANG; LI; CHEN, 2019).

A Figura 8 mostra esquematicamente como a área de contato é formada. A análise feita pelos autores levou em conta um elemento infinitesimal, pertencente à área de contato (em laranja), e, a partir dos esforços sofridos por essa porção do material, deduziram equações gerais para a força axial.

Figura 8 - Área de contato entre chapa e ferramenta na Estampagem Incremental.



Fonte: Adaptado de Chang, Li e Chen (2019).

Para calcular h_1 e h_s , são usadas as equações (34) e (35), abaixo, sendo, posteriormente, aplicadas à equação (32) e, assim, calculando-se a força vertical.

$$h_1 = h_1' + h_1'' = \frac{s \cdot (1 - \cos \theta)}{\theta \cdot (3 - \frac{\pi}{2}) + 1} + \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta z \cdot s}{R_f}} \quad (34)$$

Sendo as variáveis definidas anteriormente – porém, vale ressaltar que, especialmente na expressão (33), o valor de θ deve ser utilizado em radianos (rad), para poder concordar com as demais unidades apresentadas na equação.

$$h_s = R_f - \sqrt{R_f^2 - \left(\frac{\Delta z}{2 \cdot \sin \theta}\right)^2} \quad (35)$$

Em que as variáveis já foram definidas anteriormente.

Para o equacionamento da força na configuração SPIF, o erro máximo encontrado foi de 42,3% em uma seção específica, em que o ângulo de parede empregado foi próximo à 10°, sendo considerado elevado também; nos demais casos, houve boa concordância entre os valores experimentais e os valores calculados, com desvio variando de 1,7% a 18% (CHANG; LI; CHEN, 2019).

Contudo, é necessário definir o modo de medição das forças envolvidas. Torsakul e Kuptasthien (2019) empregam células de carga (*strain gauges*), acoplados à um conversor de sinal, permitindo a determinação dos valores de força no experimento.

Com isso, pode-se partir para a última análise a ser feita sobre as forças: os métodos computacionais ou métodos de elementos finitos (FEM). A partir da evolução dos computadores, esse método está se tornando cada vez mais rápido e eficaz, permitindo, inclusive, prever situações que ocorrerão na experimentação.

Dentre as inúmeras pesquisas efetuadas com o uso de elementos finitos, pode-se destacar as observações efetuadas por Li, Li e Zhou (2012), em que se comparou os resultados obtidos com experimentos e por FEM de um processo SPIF com formato de tronco de pirâmide.

Com essa pesquisa, foi possível determinar regiões em que a Lei do Seno, equação (28), pode ser aplicada com poucos erros, bem como avaliar métodos de tornar a espessura mais uniforme – o que seria difícil sem a ajuda de métodos computacionais (LI; LI; ZHOU, 2012).

Além disso, existem pesquisas concentradas nos efeitos da variação do parâmetro *mesh* (malha) das simulações de elementos finitos em processos de Estampagem Incremental, especialmente na modalidade SPIF (SURESH; REGALLA, 2014).

A partir dessa análise, é possível definir parâmetros que otimizem o tempo de simulação e permitam obter resultados confiáveis, ou seja, tornar ainda mais viável o emprego de FEM para previsão e avaliação de processos de Estampagem Incremental (SURESH; REGALLA, 2014).

Portanto, foi possível compreender os princípios gerais da conformação de materiais metálicos, bem como noções acerca do processo de estampagem convencional, o qual serve de ponto de partida para a estampagem incremental.

Além disso, evidenciou-se algumas das principais aplicações acadêmicas e comerciais, características específicas e parâmetros envolvidos no processo de estampagem incremental, dando-se ênfase à Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF), bem como entender os principais métodos de predição de forças na ferramenta e chapa estampadas, sejam eles experimentais, analíticos ou computacionais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo é dividido em três partes. Na primeira é descrito o método de realização dos experimentos de estampagem incremental; na segunda são apresentadas as equações utilizadas na previsão da força axial pelo método analítico; e na terceira são apresentadas as configurações para realização do método de elementos finitos para previsão da força axial.

3.1 EXPERIMENTOS

Para o presente estudo foram realizados 12 experimentos de estampagem incremental, devido ao número de combinações possíveis para as variáveis analisadas. Todos os experimentos realizaram a geometria de tronco de cone. Para tanto, foram variados os parâmetros raio de ferramenta (R_f) para 5,0mm e 7,5mm; incremento vertical (Δz) para 0,5mm e 1,0mm; e ângulo de parede (θ) para 30°, 40° e 50°.

Os materiais selecionados para os testes foram chapas de alumínio AA1200-H14 com espessura inicial 0,5mm. As propriedades do material, como o coeficiente de resistência (C), coeficiente de encruamento (n) e tensão máxima (S_{ut}) são apresentados na Tabela 8, obtidas a partir dos estudos de Schreiber, *et al.* (2021).

Tabela 8 – Parâmetros usados para os cálculos do alumínio AA1200-H14.

Parâmetro do Material	Valor
Coeficiente de Resistência - C	181,45 (MPa)
Coeficiente de Encruamento - n	0,108 (-)
Alongamento	3,6 (%)
Tensão Máxima - S_{ut}	117 (MPa)

Fonte: Schreiber, *et al.* (2021).

Para estampar a geometria de tronco de cone dos experimentos, foi empregado um torno CNC, modelo Logic 195VS, da marca Nardini, com comando GE FANUC, series Oi-TC. Na Figura 9 é apresentado o torno utilizado nos experimentos, equipamento pertencente ao campus Lages do IFSC (Instituto Federal de Santa Catarina).

Figura 9– Torno CNC empregado nos experimentos.



Fonte: Autor.

Quanto aos parâmetros usados para os experimentos, eles seguiram a ordem apresentada na Tabela 9, sendo h a profundidade estampada.

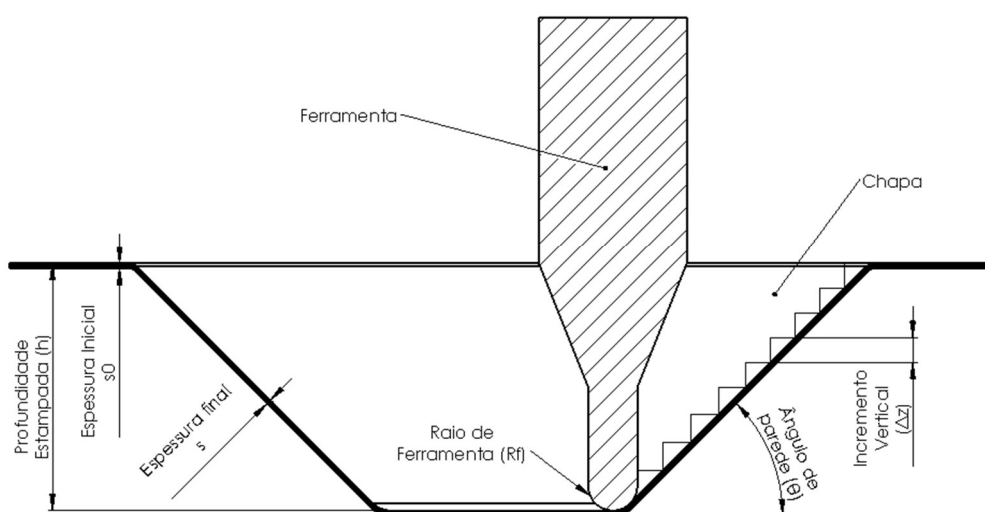
Tabela 9 - Parâmetros dos experimentos.

Experimento	θ (°)	R_f (mm)	Δz (mm)	h (mm)
1	30	5	0,5	20
2	40	5	1,0	30
3	50	5	0,5	40
4	30	5	1,0	20
5	40	5	0,5	30
6	50	5	1,0	40
7	30	7,5	0,5	20
8	40	7,5	1,0	30
9	50	7,5	0,5	40
10	30	7,5	1,0	20
11	40	7,5	0,5	30
12	50	7,5	1,0	40

Fonte: Autor.

A representação dos parâmetros durante o processo é feita de forma mais detalhada na Figura 10. Nela, é possível observar que a ferramenta de ponta esférica com raio R_f é pressionada contra a chapa e, após sucessivos incrementos verticais, forma uma parede aproximadamente reta com ângulo de parede θ com a horizontal – nessa parede, a espessura da chapa é reduzida do valor inicial s_0 até o valor final s_f ; além disso, a profundidade estampada (h) é a soma de todos os incrementos verticais (Δz) realizados.

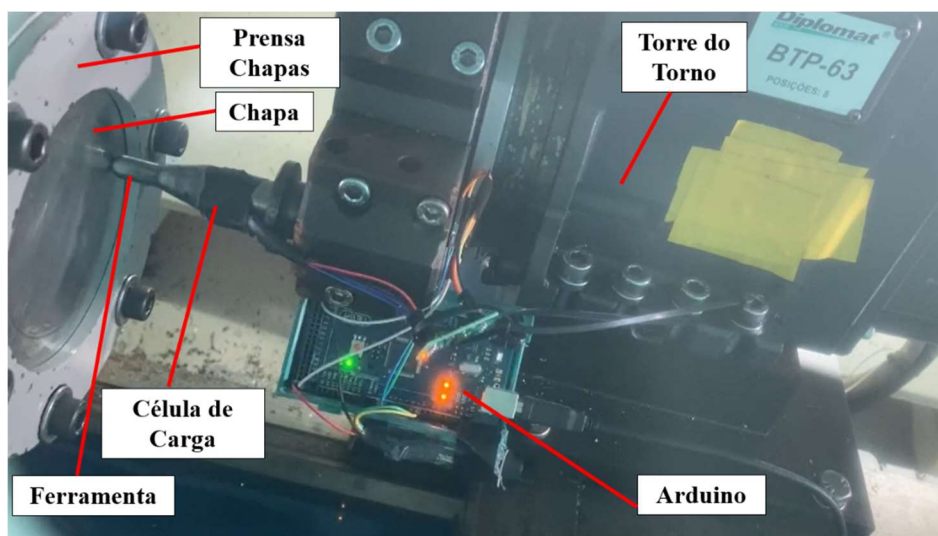
Figura 10 – Parâmetros do processo de estampagem incremental.



Fonte: Autor.

Já em relação à fixação da chapa no torno CNC, utilizou-se um dispositivo de fixação específico. Os movimentos lineares, isto é, de incremento vertical e de movimentação radial foram realizados pela torre do torno, no qual a ferramenta foi fixada; já os movimentos rotacionais foram executados pela placa do torno. A Figura 11 ilustra o funcionamento do dispositivo.

Figura 11 - Dispositivo de fixação da chapa no torno CNC.

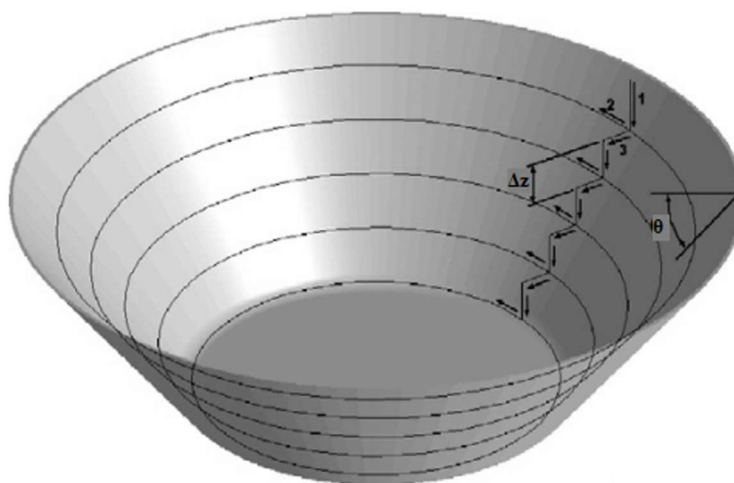


Fonte: Autor.

Para determinar a trajetória percorrida pela ferramenta, foi inserido um programa com as movimentações na memória do torno, em conformidade com a linguagem Código G. O apêndice A apresenta um modelo de programa para movimentar durante a estampagem de um tronco de cone, com ângulo de parede de 30°.

A trajetória definida pela ferramenta é a mesma empregada por Duflou, *et al.* (2007) para troncos de cone, conforme mostrado na Figura 12. Existem três movimentos envolvidos: o incremento vertical em si, representado pela seta 1, a trajetória circular, representada pela seta 2, retornando ao ponto inicial, e o movimento radial, responsável por diminuir o raio da trajetória circular e definir a cada passe o formato cônico, representado pela seta 3 (DUFLOU, J. *et al.*, 2007).

Figura 12 – Trajetória da ferramenta para um tronco de cone.



Fonte: adaptado de Duflou, *et al.* (2007).

O avanço da ferramenta empregado foi de 100mm/min, sendo os movimentos lineares, representados pelo incremento vertical, realizados pela torre do torno. Já as trajetórias circulares foram realizadas pela rotação da placa do torno com velocidade de 4 rpm.

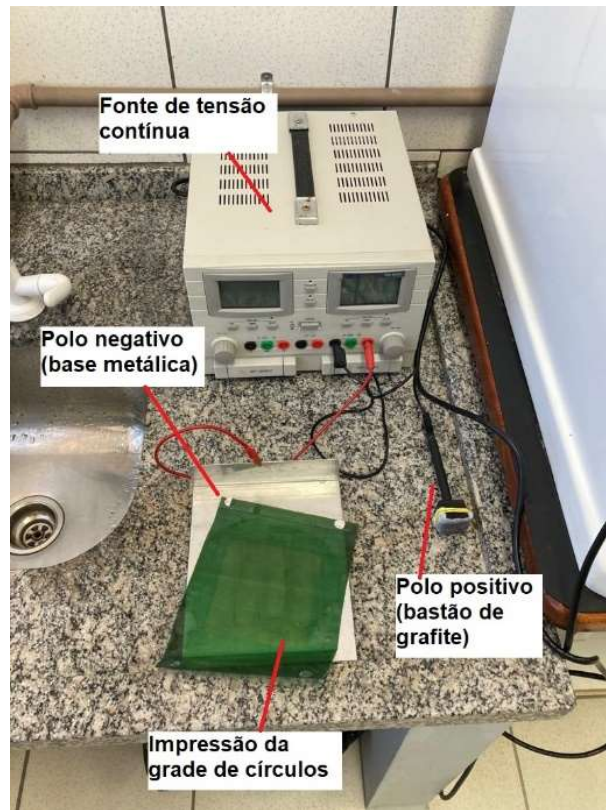
As ferramentas foram usinadas em aço SAE 1045; os diâmetros empregados foram de 10mm e 15mm, possuindo uma forma cilíndrica em seu corpo, com uma ponta semi-esférica, região em que ocorre o contato com a chapa.

Quanto à lubrificação, aplicou-se uma fina camada de óleo VG 100, com auxílio de um pincel, com o objetivo de tornar o mais homogênea possível sua distribuição sobre a peça estampada.

Para determinar as deformações na chapa, foi realizada a gravação eletroquímica dessa. Esse procedimento consistiu em aplicar uma solução de eletrólito e uma diferença de potencial elétrico sobre o material, surgindo uma corrente elétrica responsável por gravar a grade de círculos na chapa.

A Figura 13, abaixo, ilustra os materiais empregados no procedimento. Na parte superior, há uma fonte de tensão contínua, responsável por fornecer a energia necessária ao processo; dessa fonte, saem dois fios, um vermelho e um preto, os quais conectam a fonte ao elemento a ser gravado. Na ponta do fio preto, há um bastão de grafite, o qual foi empregado para pressionar a impressão da grade de círculos (folha verde) na chapa de alumínio.

Figura 13 - Equipamento para gravação eletroquímica das chapas.



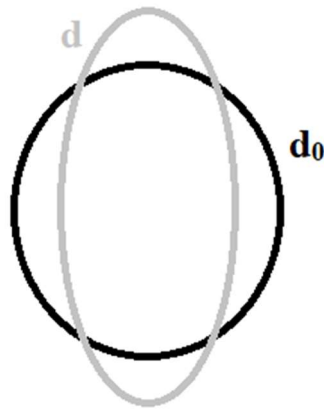
Fonte: Autor.

Assim, marcou-se uma grade de círculos sobre a chapa, todos com diâmetro 1 mm. A equação (1), representada abaixo, depende da variação dos diâmetros da grade de círculos para ser aplicada. Após a conformação da chapa, houve alteração nas dimensões, permitindo que fossem calculadas as deformações envolvidas:

$$\varphi_r = \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) = \ln\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (1)$$

As dimensões d e d_0 estão exemplificadas na Figura 14. A grade antes de ser deformada possui círculos com diâmetro inicial d_0 (representados em preto), os quais são deformados, após o processo, até se tornarem elipses (representadas em cinza) com dimensão maior d .

Figura 14 – Representação das dimensões da grade de círculos antes e após a deformação.



Fonte: Autor.

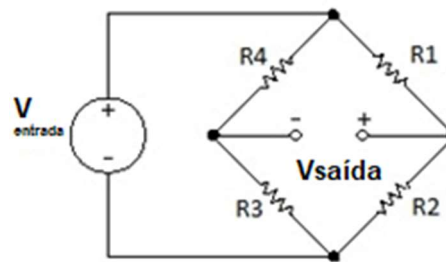
A fim de medir as forças envolvidas, foram fixados quatro extensômetros PA06250BA350L com resistência de 350 ohms, da marca Excel, na configuração de ponte completa, formando uma célula de carga.

Paixão, Sauthier e Reibold (2016) explicam que o funcionamento de um extensômetro baseia-se na variação do valor de sua resistência elétrica quando deformado, gerando um sinal elétrico proporcional a essa variação.

A configuração mais usual para os extensômetros é a chamada Ponte de Wheatstone. Esse tipo de configuração é usado para medir a diferença de potencial entre dois nós e usa quatro resistências iguais com mesmo valor (PAIXÃO; SAUTHIER; REIMBOLD, 2016)

A Figura 15 mostra o esquema construtivo de uma Ponte de Wheatstone, em que as resistências R_1 , R_2 , R_3 e R_4 representam os extensômetros usados na célula de carga, $V_{entrada}$ é a tensão elétrica que alimenta o sistema e $V_{saída}$ é a tensão elétrica (sinal) de saída.

Figura 15 – Configuração da Ponte de Wheatstone.



Fonte: Paixão, Sauthier e Reibold (2016).

A fixação do extensômetro à ferramenta foi feita com o uso de uma cola própria para esse fim, auxiliada por fitas adesivas, de modo a fixar os fios ao corpo da ferramenta. A Figura 16 mostra a célula de carga (retângulo em tom dourado) anexada ao corpo cilíndrico da ferramenta, bem como os fios que transmitem o sinal oriundo do sensor.

Figura 16 – Forma de fixação da célula de carga na ferramenta.



Fonte: Autor.

3.2 MÉTODO ANALÍTICO

Para determinação analítica dos valores das forças na direção “z” (forças axiais – F_z) foram empregadas as equações (28), (31), (32), (33) e (34), as quais dependem dos principais parâmetros envolvidos no processo.

Vale ressaltar que para o presente estudo, empregou-se a equação de Hollomon – equação (2) - para caracterizar a deformação plástica do material; contudo, Chang, Li e Chen (2019) usam a equação de Voce (não transcrita para o presente trabalho), a qual apresenta parâmetros adicionais, se comparado ao modelo da equação (2).

Por fim, para os cálculos, foram determinadas 12 forças, calculadas com base nas formulações definidas anteriormente. A espessura (s_0) de todas as chapas era de 0,5 mm. Os parâmetros empregados para os cálculos são os mesmos da tabela 8.

Com esses dados, foi possível determinar a força na direção Z para todos os experimentos.

3.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS (FEM)

Referente ao uso do método de elementos finitos, o software empregado para as simulações foi o *Simufact Forming*, específico para análise de processos de conformação. Para simular os experimentos, usou-se o modo “*Forming General*”, na opção 3D (três dimensões), com a opção de três matrizes.

As dimensões do modelo obedeceram a escala de 1:2, isto é, o modelo computacional terá grandeza 50% menor que o experimento físico. Contudo, a espessura da chapa foi mantida a mesma que real, isto é, 0,5 mm em alumínio AA1200-H14, bem como os parâmetros de incremento vertical (Δz), raio da ferramenta (R_f) e ângulo de parede (θ), sendo os mesmos para simulações e experimentos.

Além disso, foi importante caracterizar os parâmetros do material, retirados do diagrama tensão-deformação do alumínio AA1200-H14. Para tanto, utilizou-se os valores apresentados na Tabela 8 ($C = 181,45$ MPa; $n = 0,108$) (SCHREIBER *et al.*, 2021).

Em função do tempo disponível para simulações, foi necessário selecionar somente as situações mais representativas para serem simuladas. Para tanto, foram escolhidos os experimentos com os menores e maiores parâmetros, pois esperava-se que no primeiro caso fosse gerada a menor força axial, enquanto no segundo, a maior força axial.

O formato final da chapa (geometria final) é de um tronco de cone, com profundidade 10mm e ângulo de parede de 30° para o experimento 1, e profundidade de 20 mm e ângulo de parede 50° para o experimento 12, o qual define o percurso da ferramenta, pois este é usado para determinar a posição do ponto de contato.

A fim de determinar qual é a posição da ferramenta com o passar do tempo, é necessário elaborar a planilha de movimentação da ferramenta. No processo físico, a chapa rotaciona enquanto a ferramenta efetua somente os movimentos lineares; deste modo, foi recriada essa situação nas simulações.

Assim, foi utilizada uma velocidade de avanço $a = 100$ mm/min, a qual é empregada para calcular o tempo decorrido entre as movimentações conforme equações (36) e (37):

$$\Delta t = \frac{\Delta_{x-y}}{a} \quad (36)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta z}{a} \quad (37)$$

Em que Δt é o tempo entre um deslocamento e outro, Δ_{x-y} é a variação da posição na direção do plano x-y e Δz é a variação da posição na direção z.

Para determinar a posição em z da ferramenta, basta adicionar, a cada volta completa em torno da chapa, mais um incremento (Δz); pode-se descrever matematicamente essa situação pela equação (37):

$$h_n = h_{n-1} + \Delta z \quad (38)$$

Em que h_n é a profundidade de estampagem no n-ésimo passe e h_{n-1} é a profundidade de estampagem no passe imediatamente anterior.

Para determinar as variações da posição da ferramenta no plano x-y, foi considerado que o percurso seria um círculo com raio variável em relação ao centro. Esse valor é alterado a cada passe, haja vista que se deseja obter um ângulo de parede pré-definido em relação à horizontal.

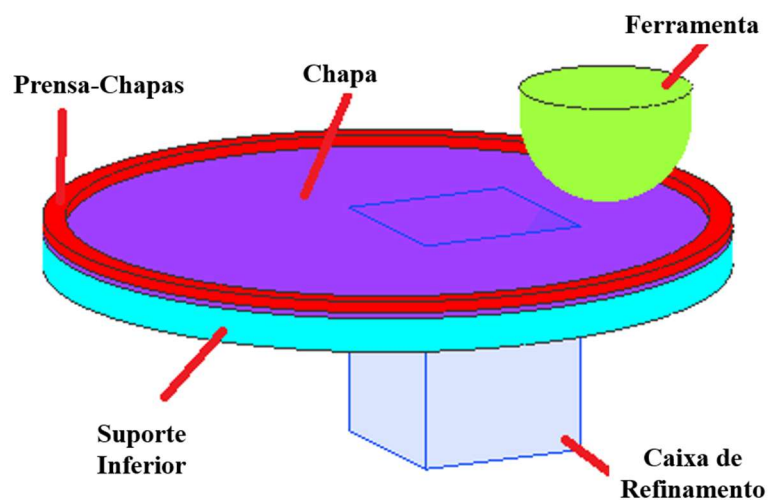
Com isso, foram calculados 90 pontos para cada círculo desenvolvido pela ferramenta, com uma diferença de 4° entre cada ponto, dispostos no plano x-y. Assim, simulase o movimento de rotação da chapa.

Para definir a precisão da simulação, foi necessário definir qual a malha, que define quantos elementos são usados para dividir a peça em questão. Para as simulações do presente trabalho, empregou-se 3 elementos na espessura. O software requer, também, que seja definido um tamanho máximo, em milímetros, para o elemento, sendo o valor aplicado às simulações como 1 mm.

Além disso, foram empregadas caixas de refinamento, as quais concentram o número de elementos em sua região, permitindo maior precisão de resultados nesse volume e reduzindo tempo de simulação, evitando o cálculo excessivo em porções com pouca influência no resultado. Para o tronco de cone, o mais interessante foi escolher a geometria cartesiana, a qual gerou uma caixa retangular próxima à ferramenta; as dimensões da caixa de refinamento variaram de acordo com o raio da ferramenta, porém, sua altura foi a mesma.

A Figura 17 mostra como ficou a disposição da caixa de refinamento antes da simulação. A chapa está representada em roxo, fixa entre o prensa-chapas (vermelho) e o suporte inferior (azul); já a ferramenta foi representada em verde, próxima à caixa de refinamento (azul mais escuro).

Figura 17 - Caixa de refinamento antes da simulação em uma análise FEM do Simufact Forming.



Fonte: Autor.

Quanto ao atrito, aplicou-se o coeficiente de Coulomb de valor 0,1. Em relação ao contato entre os elementos da estampagem, foi definido como *touching* (tocando) entre todas as geometrias, com exceção do prensa-chapas e a chapa, cujo contato foi definido como *glued* (colado).

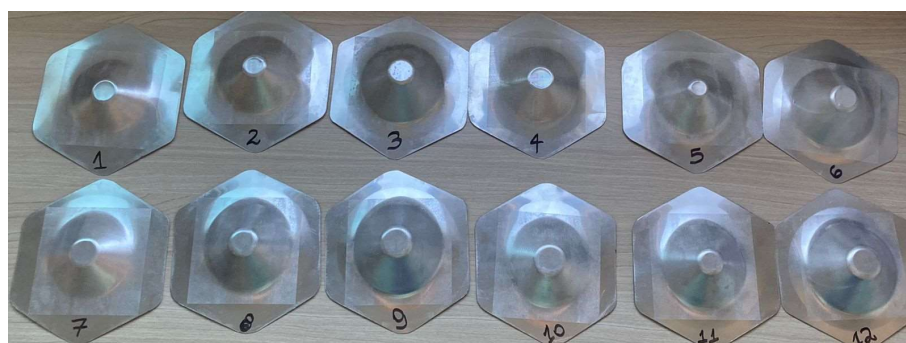
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 EXPERIMENTOS

Aplicando a metodologia descrita na seção anterior, foram obtidos gráficos de forças verticais na ferramenta (ocorridas na direção do eixo da ferramenta). Foram variados os parâmetros de raio da ferramenta, ângulo de parede e incremento vertical.

A Figura 18 mostra os corpos de prova após a realização dos experimentos. Foi possível observar que para os experimentos de maior ângulo de parede, a inclinação da parede foi maior; além disso, ficaram nítidas as regiões em que há deformação, evidenciado pela existência da grade de círculos não deformada (área externa com formato retangular) mais escura em torno da área estampada.

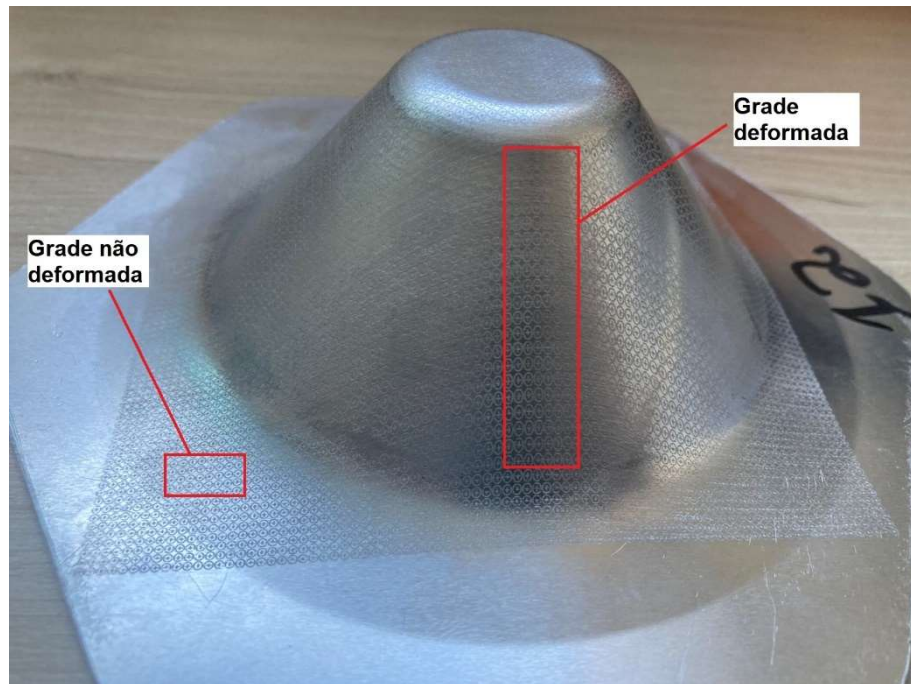
Figura 18 – Chapas conformadas após os experimentos.



Fonte: Autor.

Como definido na metodologia, a equação (1) depende da variação dos diâmetros da grade de círculos para ser aplicada. A Figura 19 mostra como ficou a grade de círculos após a estampagem incremental para a chapa do experimento 12. A porção não deformada da chapa possui círculos com raio inalterado de 1mm, enquanto a porção deformada alterou as dimensões, transformando os círculos em elipses, ou seja, houve aumento do raio em um sentido e diminuição do raio em outro, conforme mostrado na Figura 14 da metodologia.

Figura 19 – Chapa conformada após o experimento 12.

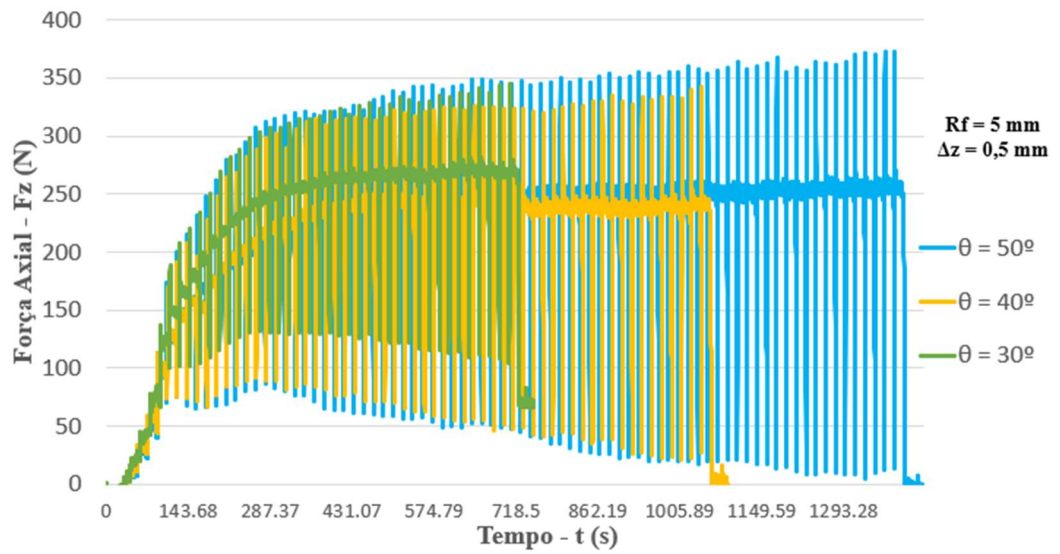


Fonte: Autor.

Além disso, foram obtidos gráficos força axial x tempo para os experimentos. Os resultados foram agrupados de acordo com a variação dos parâmetros, facilitando a comparação.

A Figura 20 mostra três gráficos de força axial x tempo, referente aos experimentos de número 1, 3 e 5. Os parâmetros raio de ferramenta (R_f) e incremento vertical (Δz) foram mantidos constantes em 5 mm e 0,5 mm respectivamente. Com isso, foi possível observar a diferença entre as curvas, para variação do parâmetro ângulo de parede (θ).

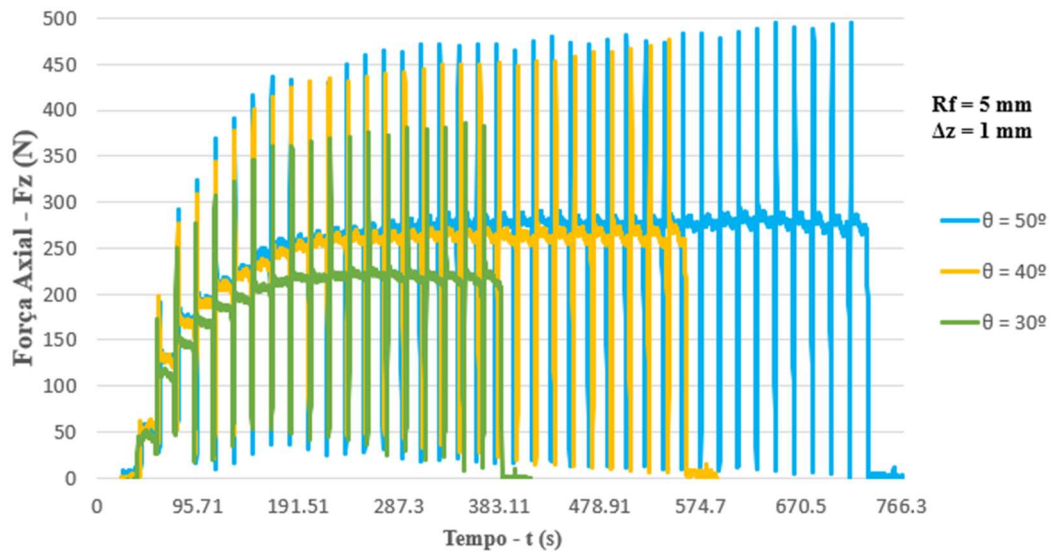
Figura 20 - Gráficos força axial x tempo para os experimentos 1,3 e 5.



Fonte: Autor.

A Figura 21 mostra os gráficos de força axial x tempo para os experimentos 2, 4 e 6, mantendo os parâmetros raio de ferramenta (R_f) e incremento vertical (Δz) constantes em 5 mm e 1 mm, respectivamente. Foi possível evidenciar os efeitos da variação do ângulo de parede sobre os valores de força axial.

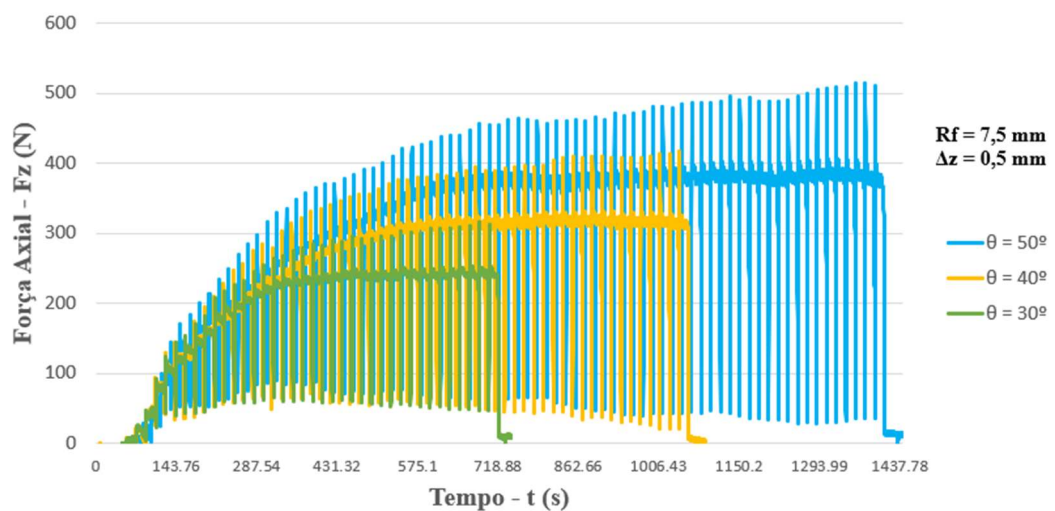
Figura 21 - Gráficos força axial x tempo para os experimentos 2, 4 e 6.



Fonte: Autor.

A Figura 22 apresenta, assim como as anteriores, os gráficos de força axial x tempo para os experimentos 7,9 e 11, mantendo, mais uma vez, os parâmetros raio de ferramenta (R_f) e incremento vertical (Δz) constantes em 7,5 mm e 0,5 mm, respectivamente. O ângulo de parede (θ) variou de acordo com cada curva, sendo a coloração mostrada na legenda.

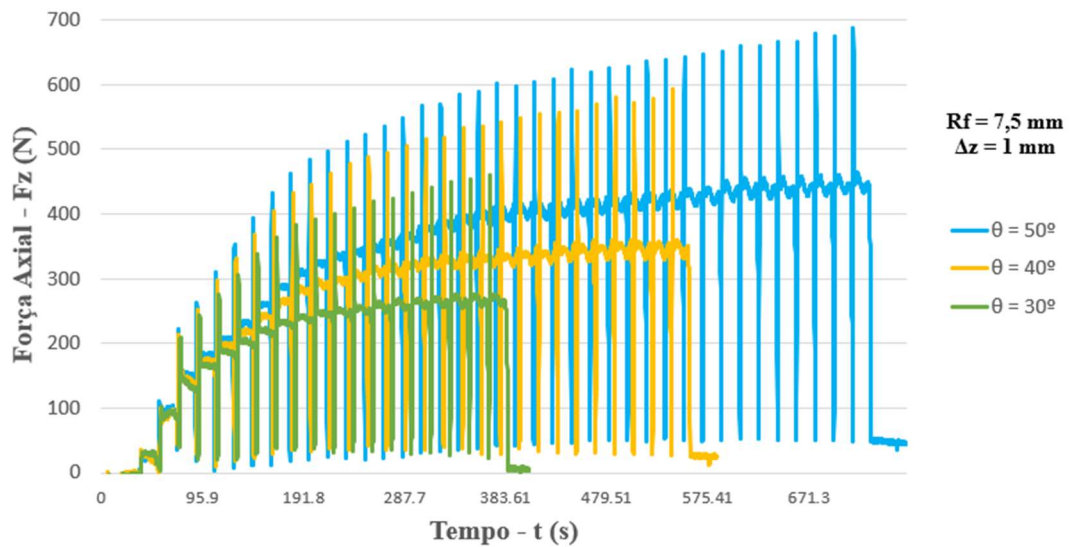
Figura 22 - Gráficos força axial x tempo para os experimentos 7, 9 e 11.



Fonte: Autor.

Já a Figura 23, por sua vez, mostra os efeitos do parâmetro ângulo de parede sobre a força axial nos experimentos 8, 10 e 12, sendo mantidos constantes os parâmetros raio de ferramenta (R_f) e incremento vertical (Δz) em 7,5 mm e 1,0 mm respectivamente. A coloração para cada valor de ângulo de parede é mostrada na legenda da figura.

Figura 23 - Gráficos força axial x tempo para os experimentos 8, 10 e 12.



Fonte: Autor.

A partir da análise da Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23, foi possível observar um comportamento semelhante para todas as curvas, independentemente de quais parâmetros apresentava. A força inicia crescente até, após certo ponto, estabilizar-se e sofrer poucas oscilações ou pequenos incrementos na sua magnitude.

Foi observado que os gráficos para força axial com ângulo de parede $\theta = 30^\circ$ terminam antes daqueles com $\theta = 40^\circ$ e os gráficos com ângulo $\theta = 50^\circ$ são os mais longos, independentemente de quais parâmetros foram mantidos constantes. Isso se justifica com base na profundidade estampada, haja vista que o valor de h para 50° foi maior que para o ângulo de 40° o qual, por sua vez, foi maior que para o ângulo de 30° (ver Tabela 9).

Constatou-se, também, semelhança com informações encontradas na literatura. Com o aumento do ângulo de parede, a diferença entre a magnitude das forças axiais de pico e média tornaram-se cada vez maiores, sendo um indício de que o ângulo limite de conformação está se aproximando (DUFLOU, J. *et al.*, 2007).

Ficou evidente também, a influência do parâmetro incremento vertical no tempo de processo, haja vista que na Figura 20 o gráfico tem como tempo máximo aproximadamente 1.400 segundos, enquanto para a Figura 21 encerra-se em aproximadamente 770 segundos.

Ainda, foi observada a sobreposição de duas curvas, uma com valores praticamente constantes após determinado ponto e outra com variações em torno da anterior, na qual ocorrem os valores de pico.

Tal comportamento condiz com o observado por Aereus, *et al.* (2009) e Duflou, *et al.* (2007), sendo denominadas força média (para o valor aproximadamente constante) e força e pico (para os valores máximos atingidos em torno dos valores médios).

Portanto, as análises seguirão a metodologia de análise definida por Duflou, *et al.* (2007) e Aereus, *et al.* (2009). A Tabela 10 mostra os valores obtidos de força axial média e força axial de pico para cada experimento, conforme ordem definida na Tabela 9.

Tabela 10 – Forças obtidas nos experimentos.

Experimento	Força Vertical Média (N)	Força Vertical de Pico (N)
1	266,42	344,50
2	267,42	476,10
3	250,70	372,76
4	220,35	385,12
5	240,49	342,66
6	276,52	494,73
7	237,50	312,46
8	331,77	593,00
9	374,41	509,30
10	245,98	454,33
11	314,92	417,48
12	435,77	686,79

Fonte: Autor.

4.2 MÉTODO ANALÍTICO

Aplicando a equação (31), desenvolvida por Aerens, et al. (2009), a equação (32), apresentada por Bansal, *et al.* (2017) e a equação (33), obtida por Chang, et al. (2019), foi desenvolvida a Tabela 11, com os valores da força calculados pelos métodos analíticos, comparando-os ao valor obtido pelos experimentos.

Ainda, foi efetuada a comparação entre os valores de força encontrados pelos diferentes métodos analíticos e força experimental. Para tanto, o principal critério é o erro, definido como:

$$Erro = \frac{X_{calc} - X_{exp}}{X_{exp}} \quad (39)$$

Sendo X_{calc} o valor do resultado encontrado na simulação ou calculado pelo método analítico e X_{exp} o valor observado no experimento.

Contudo, a comparação foi feita somente para os valores de força média, haja vista que Aerens, *et al.* (2009), Bansal, *et al.* (2017) e Chang, *et al.* (2019) aplicam seus métodos para os valores estáveis de força, isto é, a força média.

Tabela 11 - Comparativo entre as forças obtidas nos experimentos e calculadas pelos diferentes métodos analíticos.

Exp.	Força Média Exp. (N)	Força Calc. Aerens (N)	Erro Aerens (%)	Força Calc. Bansal (N)	Erro Bansal (%)	Força Calc. Chang (N)	Erro Chang (%)
1	266,42	135,19	-49,26	120,71	-54,69	161,45	-39,40
2	267,42	172,65	-35,44	161,05	-39,78	221,23	-17,27
3	250,70	154,88	-38,22	108,94	-56,55	167,49	-33,19
4	220,35	153,16	-30,49	170,11	-22,80	215,39	-2,25
5	240,49	152,40	-36,63	117,68	-51,07	173,11	-28,02
6	276,52	175,46	-36,55	144,90	-47,60	208,25	-24,69
7	237,50	153,92	-35,19	154,44	-34,97	169,68	-28,56
8	331,77	196,57	-40,75	204,34	-38,41	233,39	-29,65
9	374,41	176,33	-52,90	145,02	-61,27	182,55	-51,24
10	245,98	174,37	-29,11	213,30	-13,29	221,03	-10,14
11	314,92	173,51	-44,90	153,97	-51,11	186,36	-40,82
12	435,77	199,76	-54,16	185,94	-57,33	223,06	-48,81

Fonte: Autor.

Em uma análise preliminar, foi possível observar que o menor erro encontrado foi para o método de Chang, *et al.* (2019), com erro mínimo de -2,25%, seguido pelo método de Bansal, *et al.* (2017), com erro mínimo de -13,29%, e, por último Aerens, *et al.* (2009), com erro mínimo de -29,11%.

Contudo, além de conhecer os valores de erro para os métodos analíticos, foi importante avaliar qual o erro médio e quais são as dispersões destes em torno desses valores centrais, o que permitiu compreender se o método foi bem-sucedido ou não.

Tabela 12 - Valor percentual do erro médio obtido em função de cada método analítico para a força média.

Erro Médio – Aerens (%)	Variação – Aerens (%)	Erro Médio – Bansal (%)	Variação – Bansal (%)	Erro Médio – Chang (%)	Variação – Chang (%)
-40,30	8,23	-44,07	14,72	-29,50	14,71

Fonte: Autor.

A partir da análise da Tabela 12 foi possível perceber que dentre os métodos analíticos, o método de Chang, *et al.* (2019) possui menor erro médio; contudo, o método de Aerens, *et al.* (2009) possui menor erro médio se comparado ao método de Bansal, *et al.* (2017), apesar de em uma análise preliminar o método de Bansal possuir o menor valor de erro, quando avaliado conjuntamente ao método de Aerens.

Relativo à variação do erro, ficou nítido não ser um bom parâmetro para abordagem da eficiência dos métodos analíticos, haja vista que o método de Chang, *et al.* (2019) possui uma das maiores variações, sendo, todavia, o método mais preciso dentre os modelos analíticos abordados no presente estudo.

4.3 MÉTODO COMPUTACIONAL (FEM)

Aplicando a metodologia descrita para as simulações computacionais, foram selecionados dois experimentos. Foram escolhidos os experimentos de número 1 e 12, com parâmetros indicados na Tabela 13.

Tabela 13 – Experimentos escolhidos para serem simulados.

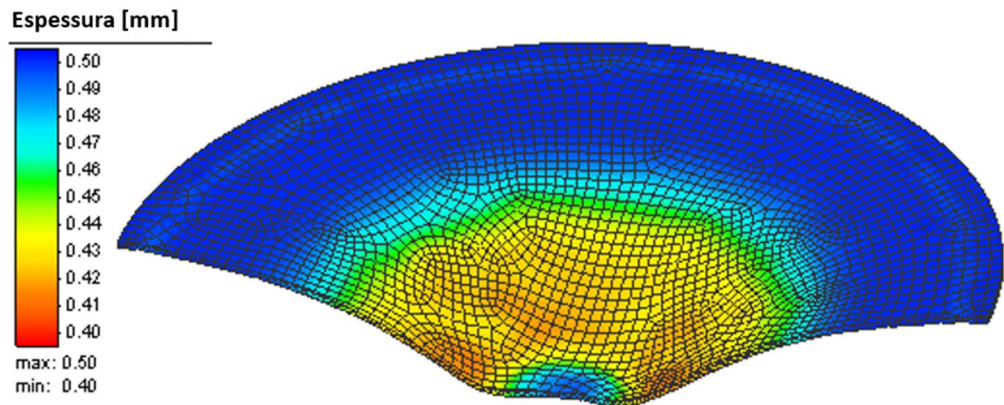
Experimento	R_f (mm)	θ (°)	Δz (mm)	h (mm)
1	5,0	30	0,5	10
12	7,5	50	1,0	20

Fonte: Autor.

Para as referidas simulações, foram obtidos dados de vários parâmetros, incluindo a espessura final da chapa, tensão equivalente e força vertical na ferramenta. A Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27 mostram a forma como essas informações são apresentadas pelo software para a análise FEM dos experimentos 1 e 12, respectivamente.

A Figura 24 mostra a distribuição de espessura para a análise FEM do experimento 1. A escala de cores varia de azul escuro (maior espessura) até vermelho (menor espessura). Por fim, foi evidenciado, abaixo da legenda, os valores de máximo (0,5 mm) e de mínimo (0,4 mm) para a espessura.

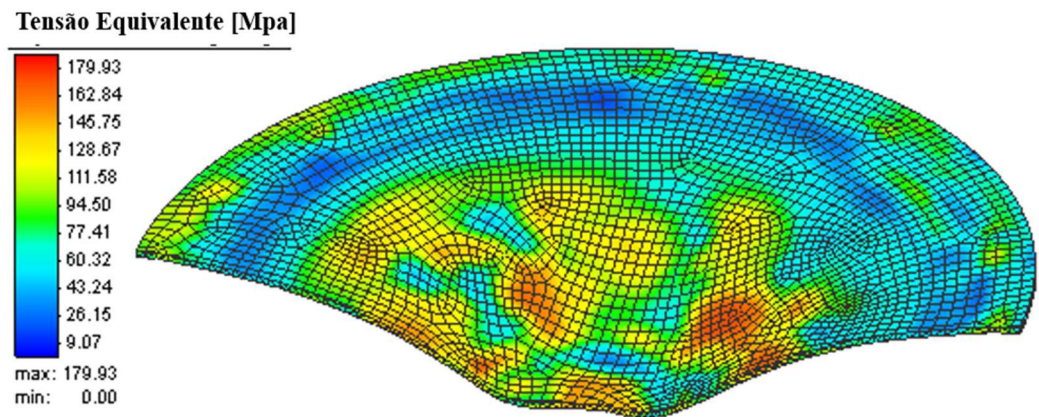
Figura 24 – Distribuição de espessura para a análise FEM do experimento 1.



Fonte: Autor.

Já a Figura 25 mostra a distribuição de tensão sobre a chapa usada na análise FEM do experimento 1. Na legenda (mostrada na própria figura), os tons de vermelho representam os maiores valores de tensão, enquanto os tons de azul escuro representam os menores valores de tensão. Ainda, abaixo da legenda são apresentados os valores de máximo (179,93 MPa) e de mínimo (0 MPa) encontrados para a tensão equivalente durante a simulação.

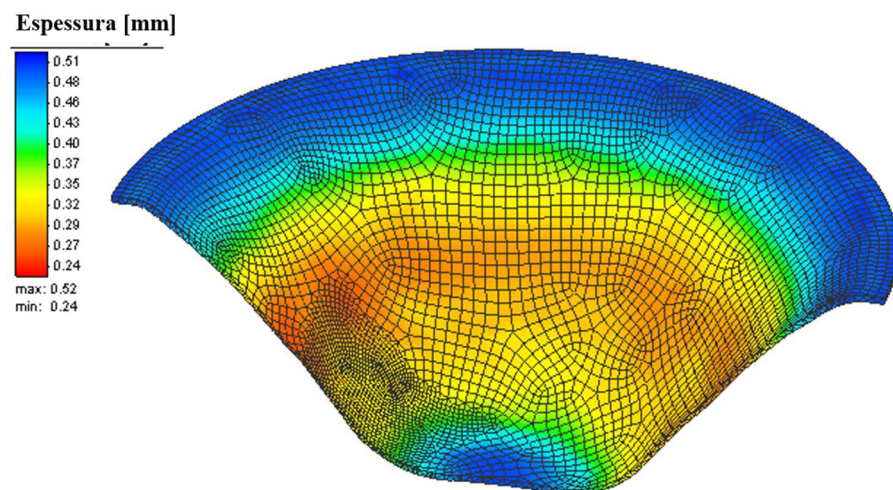
Figura 25 - Distribuição de tensão equivalente para a análise FEM do experimento 1.



Fonte: Autor.

A Figura 26, por sua vez, mostra a distribuição de espessura para a chapa utilizada no experimento 12. A escala de cores, apresentada na legenda da figura, ficou entre os tons de azul escuro para valores maiores de espessura e tons de vermelho para valores menores. Ainda, foi evidenciado abaixo da legenda os valores de máximo (0,52 mm) e de mínimo (0,24 mm) para a espessura.

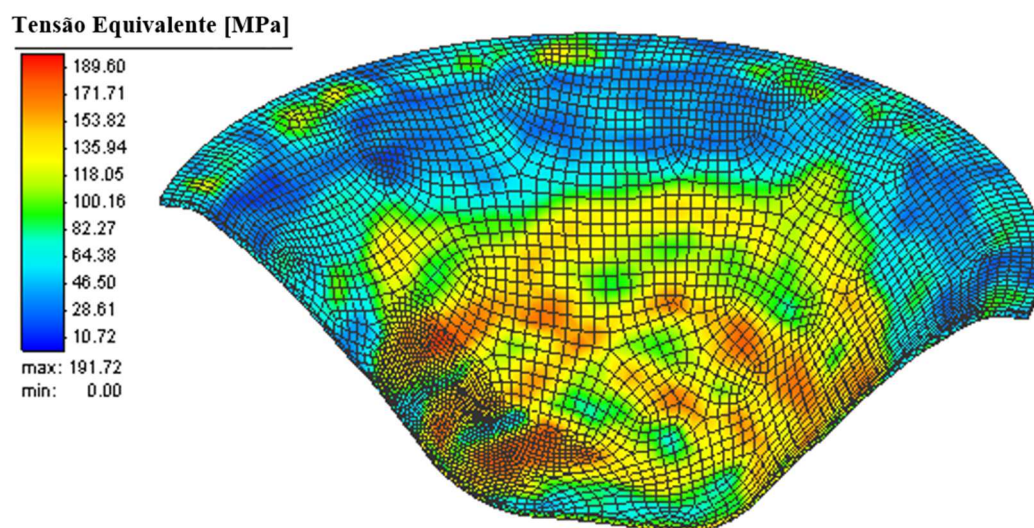
Figura 26 – Distribuição de espessura para a análise FEM do experimento 12.



Fonte: Autor.

Já a Figura 27 traz a distribuição de tensão para a análise FEM do experimento 12. Nela, evidenciou-se que os tons avermelhados representam maiores valores de tensão equivalente, enquanto tons de azul escuro representam valores menores para tensão. Ainda, foi evidenciada a malha usada, representada pelos retângulos, denominados elementos da malha. Em uma seção da chapa há uma concentração de elementos menores, pois ocorreu o refinamento da malha nessa região. Por fim, a tensão equivalente variou entre 0 MPa (tensão equivalente mínima) e 191,72 MPa (tensão equivalente máxima).

Figura 27 – Distribuição de tensão equivalente para a análise FEM do experimento 12.



Fonte: Autor.

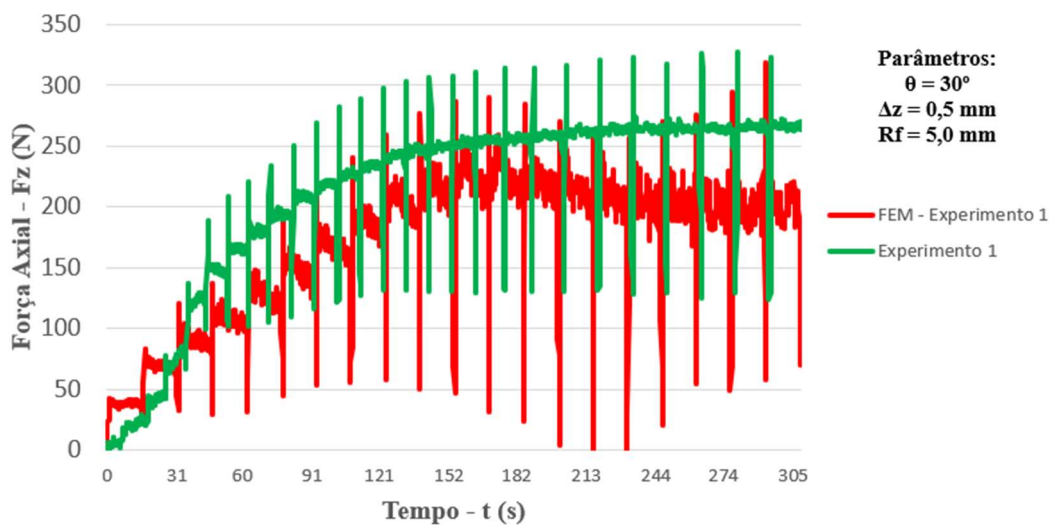
Comparando a Figura 24 e a Figura 26, ficou evidente que ocorreu uma redução de espessura muito mais significativa para o experimento 12 ($\theta = 50^\circ$ com espessura mínima de 0,24 mm) do que para o experimento 1 ($\theta = 30^\circ$ com espessura mínima de 0,40 mm).

Já para as tensões equivalentes, ocorreu um comportamento semelhante ao observado para a espessura – na análise FEM com ângulo de parede $\theta = 30^\circ$ a tensão (179,93 MPa) foi menor do que a encontrada para o ângulo de parede $\theta = 50^\circ$ (191,72 MPa).

Além da distribuição de espessura e de tensões equivalentes, foi obtido o gráfico força axial x tempo para a simulação. A partir desses valores, foi realizada a comparação entre os valores simulados e obtidos com os experimentos.

A Figura 28 mostra o gráfico força axial versus tempo para a análise FEM do experimento 1, o qual tinha como parâmetros $R_f = 5 \text{ mm}$, $\Delta z = 0,5 \text{ mm}$ e $\theta = 30^\circ$. Em vermelho evidenciou-se a variação da força axial durante a simulação, enquanto em verde são mostrados os valores experimentais.

Figura 28 – Comparação entre o gráfico do experimento 1 com a respectiva análise FEM.



Fonte: Autor.

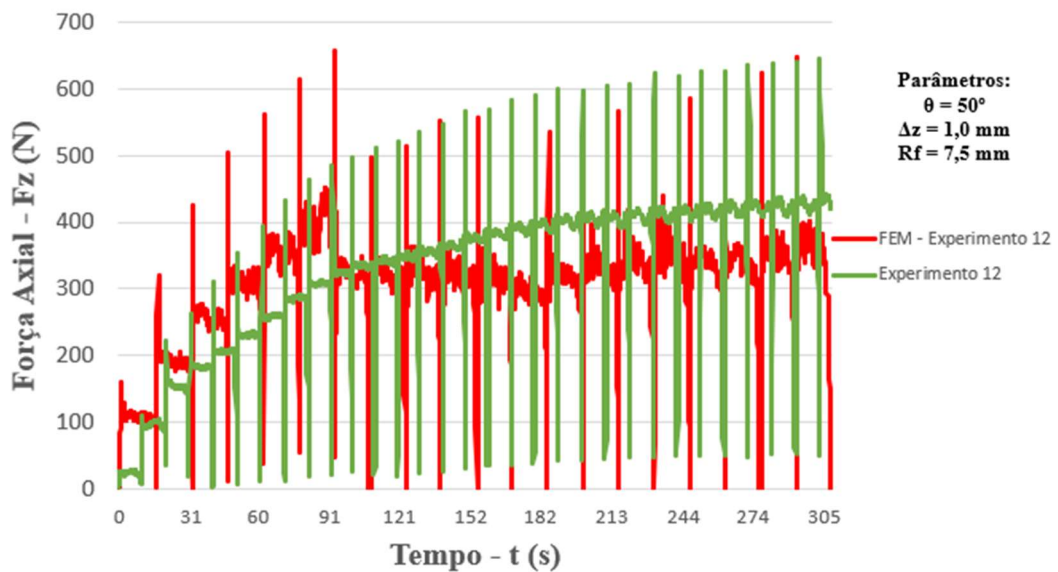
A partir das informações verificadas na Figura 28, verificou-se que tanto o experimento quanto o modelo computacional possuem a mesma tendência de existir um valor aproximadamente constante (força média) e os valores de pico (força de pico) oscilando em torno da curva média.

Com relação à magnitude das forças, ficou evidente que os valores médios das curvas ficaram diferentes, ainda que próximos. Contudo, a força de pico obtida computacionalmente foi a mais próxima dos valores obtidos nos experimentos.

Quanto ao tempo empregado no gráfico, houve um ajuste para que ambos terminassem no mesmo instante, haja vista que o experimento real foi executado com uma profundidade total estampada (h) de 20 mm, enquanto na simulação foi empregado um valor $h = 10 \text{ mm}$, devido à escala empregada para o modelo.

Já Figura 29 mostra a comparação entre os valores da análise FEM (em vermelho) com os experimentais (em verde) para o experimento 12, o qual tinha como parâmetros $R_f = 7,5\text{mm}$, $\Delta z = 1,0\text{ mm}$ e $\theta = 50^\circ$.

Figura 29 - Comparação entre o gráfico do experimento 12 com a respectiva análise FEM.



Fonte: Autor.

A partir do comparativo da Figura 29, ficou evidente que tanto a curva experimental quanto a obtida pela análise FEM são semelhantes, ainda que a computacional possua uma divergência durante os primeiros 90 segundos.

Essa variação pode ser decorrente das dimensões empregadas para o suporte inferior e o prensa-chapas na simulação, as quais geraram um efeito acentuado de flexão, distorcendo inicialmente a curva.

Contudo, a partir do momento em que ocorre a estabilização de ambos os gráficos, a tendência ficou próxima e semelhante ao observado para o experimento 1. Os valores de força média possuem pequena diferença, entretanto, o que realmente se destaca é a proximidade entre a força de pico, especialmente próximo ao final da simulação, em que ocorre o menor erro para a força de pico.

Ainda, foi possível empregar a equação (39) para determinar o erro relativo entre a simulação FEM e os valores experimentais, tanto para os valores de força média quanto para a força de pico. Assim, foram obtidas a Tabela 14 e a Tabela 15:

Tabela 14 - Erro percentual obtido entre a força média da simulação FEM e os experimentos.

Experimento	Força Média - Experimento	Força Média – FEM	Erro (%)
1	266,42	223,97	-15,97
12	435,77	374,45	-14,07

Fonte: Autor.

Analisando os dados da Tabela 14, foi possível perceber que os erros foram expressivos, considerando-se que ficaram próximos de valores encontrados para os métodos analíticos. Todavia, para a aplicação da mensuração de forças para o projeto de processos mais eficientes e mais produtivos de estampagem incremental, a força axial de maior importância prática se torna a força de pico, pois seria o valor empregado para projetar e validar o funcionamento de uma máquina, equipamento ou ferramenta voltado para esse tipo de processo.

Tabela 15 - Erro percentual obtido entre a força de pico da simulação FEM e os experimentos.

Erro Relativo Experimentos x Simulação FEM – Força de Pico			
Experimento	Força de Pico – Experimento	Força de Pico – FEM	Erro (%)
1	344,50	318,23	-7,63
12	686,79	657,67	-4,2

Fonte: Autor.

Já a Tabela 15 mostra o erro obtido para a força de pico, analisada por meio de simulação computacional. Ficou evidente que o erro encontrado foi baixo, especialmente se

comparado ao método analítico – o erro médio encontrado com as análises FEM foi de apenas 5,92%.

Em suas análises FEM, Xiao, et al. (2019) encontrou erros de 4,35%, além de observar que as tendências encontradas nas simulações numéricas se aproximaram muito das verificadas nos experimentos.

Quanto ao tempo de simulação, foi contabilizado de acordo com cada experimento simulado. Para o experimento 1, o tempo total de simulação foi de 25 horas, enquanto para o experimento 12 foram necessárias 36 horas.

Esse resultado se justifica pois a condição mais importante para determinar o tempo de simulação é o número de elementos envolvidos na análise FEM, pois requer mais interações (KIM *et al.*, 2018). Essa informação foi importante à medida que a análise FEM do experimento 1, com profundidade total de estampagem 10mm gerou menos interações do que a análise FEM do experimento 12, com profundidade de 20mm.

Ainda, segundo Kim, et al. (2018), o aumento das dimensões da chapa e do prensa-chapas aumentam o tempo de simulação, pois necessitam de mais elementos para ser analisados; além disso, existem dimensões mínimas de chapa para que os resultados converjam para os encontrados nos experimentos – abaixo dessas dimensões, podem ocorrer distorções nos valores obtidos.

Assim, os resultados encontrados no presente trabalho são condizentes com os valores usualmente encontrados na literatura, além de possuir valores de erro pequenos, sendo aceitáveis para o processo em questão.

4.4 EFEITOS DOS PARÂMETROS

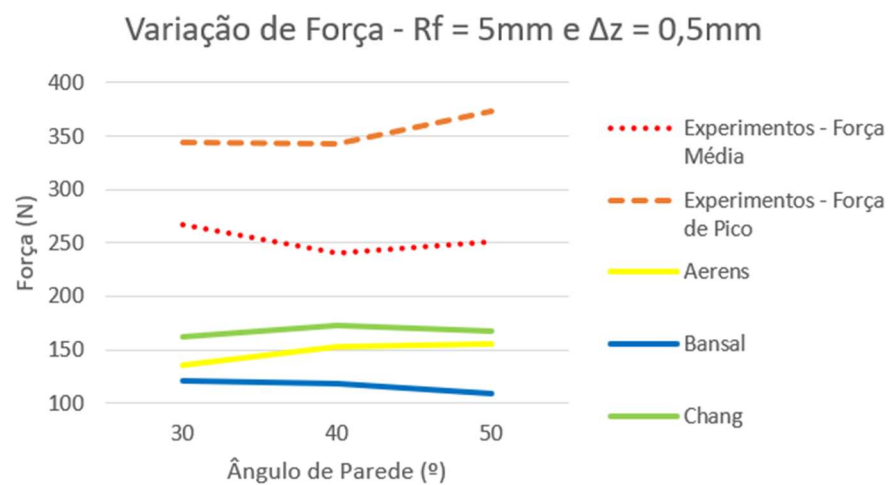
Para analisar o efeito dos parâmetros sobre as forças, tanto média quanto de pico, foram organizados gráficos em que os parâmetros raio de ferramenta (R_f) e incremento vertical (Δz) foram mantidos constantes, variando-se somente o ângulo de parede (θ).

Apesar de os métodos analíticos não serem empregados para descrever a força de pico, foram incluídos nos gráficos de variação dos parâmetros, para avaliar se as tendências descritas para a força média também seriam observadas nos valores de máximo.

Portanto, os gráficos foram elaborados levando em conta os efeitos dos parâmetros na força axial média, na força axial de pico e nas forças determinadas pelos métodos analíticos de Aerens, Bansal e Chang.

A Figura 30 mostra os valores de força axial média e de pico, bem como os valores encontrados pelos métodos analíticos avaliados no presente trabalho quando os parâmetros de raio de ferramenta e incremento vertical são mantidos constantes em 5 mm e 0,5 mm respectivamente e o ângulo de parede varia de 30° a 50°.

Figura 30 – Efeitos da variação do ângulo de parede para $R_f = 5 \text{ mm}$ e $\Delta z = 0,5 \text{ mm}$.



Fonte: Autor.

Nos experimentos avaliados pela Figura 30, evidenciou-se uma tendência diferente para as forças de axiais média e de pico, haja vista que os valores máximos foram crescentes conforme o ângulo de parede variou, enquanto para os valores médios houve um decréscimo quando θ passou de 30° para 40°, voltando a crescer ao atingir 50°.

Já os valores obtidos por métodos analíticos apresentaram tendências esparsas: enquanto a equação de Chang forneceu uma curva aproximadamente parabólica, os valores de Aerens foram somente crescentes e, todavia, Bansal gerou uma curva somente decrescente.

Na literatura, foram observadas duas tendências diferentes para o ângulo de parede (θ): uma para a força média e outra para a força de pico. Para a força média, geralmente os valores crescem até um ponto máximo para então começar a decrescer (SAIDI *et al.*, 2015). Esse fenômeno é observado em apenas alguns casos dos experimentos do presente trabalho; a

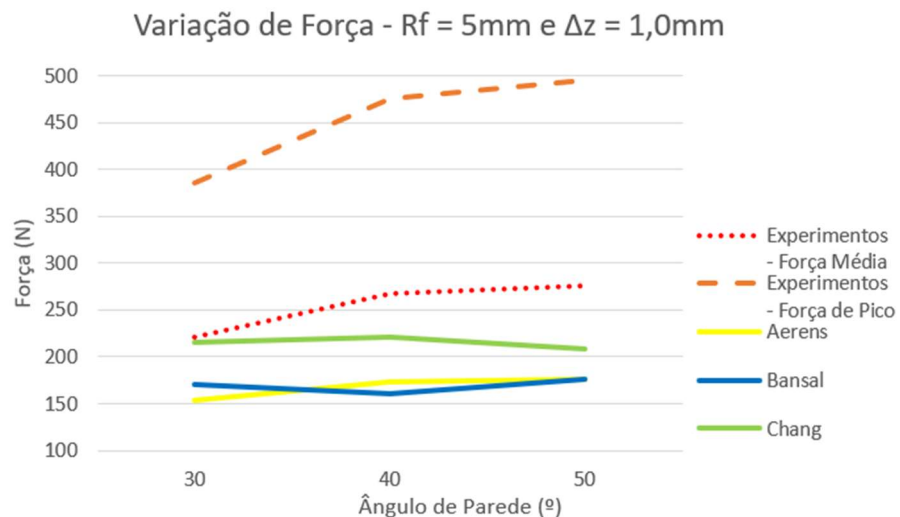
maioria dos valores médios elencados para os 12 experimentos seguiu a mesma tendência da força de pico.

Para a força máxima, ou de pico, há um aumento progressivo da força axial de estampagem conforme aumenta-se o ângulo de parede (KUMAR, A. *et al.*, 2019). Contudo, ao ultrapassar o ângulo limite de conformação, ocorre uma diminuição das forças envolvidas, devido à ruptura precoce nas configurações experimentais com esses ângulos (PETEK; KUZMAN; KOPAČ, 2009).

Para a maioria dos experimentos evidenciou-se um aumento das forças envolvidas no processo com o aumento do ângulo de parede. Não foi observada a diminuição dos valores de pico observados por Petek, Kuzman e Kopac (2009) pois a variação de ângulos de parede foi relativamente pequena (30° a 50°) e a ruptura tende a acontecer somente após os 60° para alumínio (KUMAR, A. *et al.*, 2019).

A Figura 31 mostra as forças axial média e de pico, bem como para os modelos analíticos de Aerens, Bansal e Chang para $R_f = 5 \text{ mm}$ e $\Delta z = 1,0 \text{ mm}$ mantidos constantes, enquanto o ângulo de parede pôde variar.

Figura 31 - Efeitos da variação do ângulo de parede para $R_f = 5 \text{ mm}$ e $\Delta z = 1,0 \text{ mm}$.



Fonte: Autor.

Comparando a Figura 30 e a Figura 31 foi possível observar os efeitos do incremento vertical sobre a força axial, tanto de pico quanto média, seguindo uma tendência semelhante à

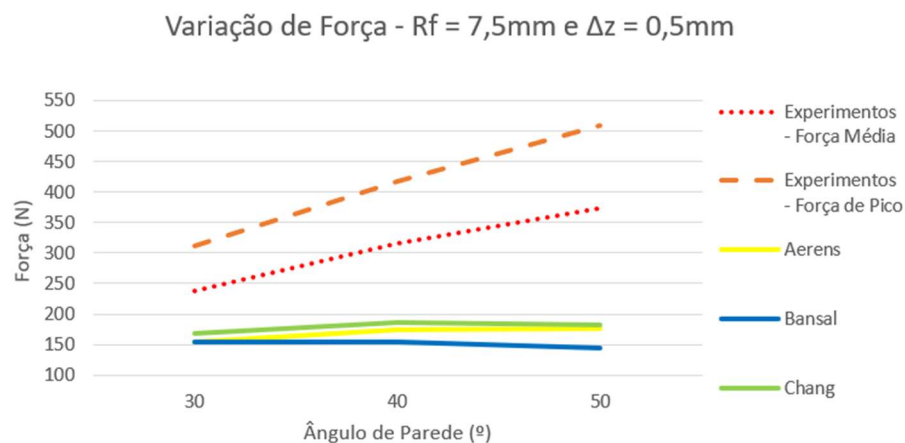
observada para os valores de pico da força axial ao variar o ângulo de parede; o aumento do incremento vertical ocasiona um aumento da força axial necessária para conformar a chapa (XIAO *et al.*, 2019) (SAIDI *et al.*, 2015).

Existem casos em que o incremento vertical é extremamente alto, o que pode levar a forças altíssimas de estampagem – para um incremento de 3mm foi observada uma força de 4200N para um aço DC05 (PETEK; KUZMAN; KOPAČ, 2009). Contudo, ainda que possua forte influência no processo, o incremento vertical é o segundo parâmetro mais influente na força, ficando atrás somente do raio de ferramenta (KUMAR, A. *et al.*, 2019).

Essa tendência foi observada para os experimentos, haja vista que o aumento do incremento vertical gerou maiores valores de força axial, independentemente da divisão observada. Além disso, para os métodos analíticos ocorreu a mesma tendência, condizendo com as observações encontradas na literatura.

Já a Figura 32 mostra os valores de força axial tanto média quanto de pico, bem como das forças calculadas pelos métodos analíticos quando os parâmetros R_f e Δz são mantidos constantes em 7,5 mm e 0,5 mm, respectivamente. O parâmetro ângulo de parede variou entre 30° e 50° .

Figura 32 - Efeitos da variação do ângulo de parede para $R_f = 7,5$ mm e $\Delta z = 0,5$ mm.



Fonte: Autor.

Comparando a Figura 30 e a Figura 32, ficou evidente a influência do raio de ferramenta sobre os valores de força axial. de modo geral, a força média e força de pico seguem as mesmas tendências, excetuando-se os casos em que $\theta = 30^\circ$ com $R_f = 5$ mm e $\theta =$

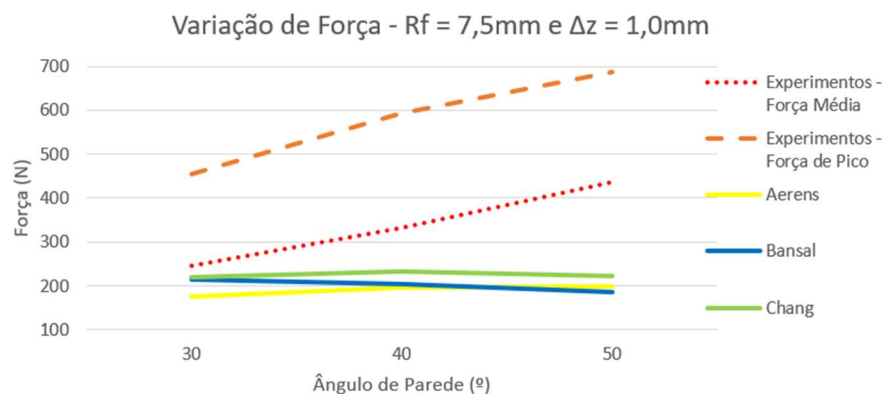
30° com $R_f = 7,5\text{mm}$, em que há uma queda abrupta dos valores de força quando aumenta-se o raio da ferramenta.

Esse resultado pode ter sido um erro de processo ou de medição, considerando-se que todos os demais experimentos evidenciam que o aumento do raio de ferramenta tende a aumentar a força de estampagem.

Há muitos estudos que apontam a tendência de aumento na força axial quando há um aumento no raio de ferramenta, sendo um dos parâmetros mais influentes no processo de Estampagem Incremental (KUMAR, A. *et al.*, 2019). Isso ocorre pois com o aumento do parâmetro R_f , há um aumento significativo da área de contato entre ferramenta e peça, o que gera o aumento proporcional na força de estampagem (PETEK; KUZMAN; KOPAČ, 2009). Ao aumentar o raio de ferramenta de 10mm para 16mm, Petek, Kuzman e Kopac (2009) notaram um aumento de 16% no valor de força axial.

De forma semelhante às figuras anteriores, a Figura 33 mostra os valores das forças axiais média, de pico e obtidas analiticamente pelos três métodos abordados quando os parâmetros raio de ferramenta (R_f) e incremento vertical (Δz) foram mantidos constantes em 7,5 mm e 1,0 mm respectivamente, enquanto o parâmetro ângulo de parede foi mantido constante.

Figura 33 - Efeitos da variação do ângulo de parede para $R_f = 7,5\text{ mm}$ e $\Delta z = 1,0\text{ mm}$.



Fonte: Autor.

Portanto, ao comparar a Figura 30, Figura 31, Figura 32 e Figura 33 foi possível concluir que, de forma geral, tanto os experimentos, métodos analíticos e análise FEM registraram a mesma tendência em relação ao raio de ferramenta, tanto para a força de pico quanto para a força média, ainda que esse aumento tenha sido estimado em proporções diferenciadas para cada forma de predição de forças.

Bem como foi observado para o raio de ferramenta, o incremento vertical segue mesma tendência descrita pela literatura foi observada nos experimentos, análise FEM e métodos analíticos, seja para força média, seja para força de pico, ressaltando as diferenças na proporção em que estimam esse aumento da força com o aumento do incremento vertical.

A proporção de variação encontrada para cada parâmetro é condizente com a literatura, haja vista que o parâmetro mais influente nas forças de estampagem incremental foi o raio de ferramenta (aumento máximo de 57,60% para a força média), seguido de incremento vertical (aumento máximo de 45,40% para a força média) e, por fim, o ângulo de parede (aumento máximo de 31,35% para a força média).

Além disso, uma preocupação importante diz respeito a formas de otimização do processo. Nguyen, et al. (2010) observaram que para geometrias complexas, a redução do raio de ferramenta e do incremento vertical são formas de otimizar o processo e diminuir os esforços envolvidos.

Para otimizar o tempo de processo e a qualidade da peça conformada, o parâmetro mais influente é o incremento vertical (ISMAIL *et al.*, 2019). Isso se deve ao fato de o incremento vertical determinar o número de passes necessários para atingir a profundidade estampada e, por consequência, o tempo de estampagem (PRADELLA; FOLLE, 2016).

Quanto à magnitude das forças, ficou visível a redução desta se comparada aos modos convencionais de estampagem – isso pode ser explicado pela deformação localizada, a qual reduz a área de contato entre ferramenta e peça (KUMAR, Y.; KUMAR, 2018).

Além disso, o aumento das forças costuma ser acompanhado de redução da estampabilidade (deformabilidade) do material, como foi observado pela redução do ângulo limite de estampagem ao ocorrer um aumento da força necessária para estampá-la (XIAO *et al.*, 2019). Isso é justificado a medida que o ângulo de parede máximo atingido é uma das formas de avaliar a estampabilidade do material (ZHANG *et al.*, 2020).

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho definiu uma metodologia e a aplicou para realizar 12 experimentos com chapas de alumínio AA1200-H14 de 0,5 mm de espessura, nos quais foi medida a força axial atuante sobre a ferramenta. Os parâmetros variados para os experimentos foram raio de ferramenta, incremento vertical e ângulo de parede. Os resultados foram comparados com modelos analíticos definidos por Aereens, *et al.* (2009), Bansal, *et al.* (2017) e Chang, *et al.* (2019) bem como com 2 análises FEM empregando o software *Simufact Forming*. Ainda, foi definido o erro encontrado para cada método, bem como os efeitos que a variação de cada parâmetro gerou sobre os valores de força axial. Portanto, foi possível concluir que:

1. O método mais preciso foi a análise FEM, com erro máximo de 15,97% para a força média e 7,63% para a força de pico;
2. O método mais rápido para determinar as forças foi o método analítico, embora seja menos preciso que o método FEM, pois possui erro médio de 29,50% para o modelo com maior eficiência, desenvolvido por Chang, *et al.* (2019);
3. O parâmetro de estampagem incremental mais influente foi o raio de ferramenta, seguido do incremento vertical e, por último, o ângulo de parede.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho analisou apenas um material, o alumínio AA1200-H14, e os parâmetros raio de ferramenta (R_f), incremento vertical (Δz) e ângulo de parede (θ), totalizando 12 experimentos. Além disso, foram realizadas duas simulações utilizando o método FEM.

Assim, seria possível aprimorar o presente estudo pelo aumento do número de simulações desenvolvidas, realizando uma simulação FEM para cada experimento. Com isso, seria possível gerar mais dados acerca do erro médio para o método computacional e possíveis distorções com a aplicação dessa forma de predição de forças.

Outra possibilidade de expansão da análise efetuada seria o emprego de chapas de diferentes materiais, como aço e latão, os quais possuem propriedades mecânicas diferentes das observadas para o alumínio.

Por fim, poderiam ser adicionados à análise outros parâmetros de estampagem incremental, por meio da variação da espessura da chapa, variar os valores de rotação da ferramenta (mantida nula nos experimentos), além de variar a velocidade de avanço da ferramenta (mantida constante).

REFERÊNCIAS

- AERENS, R. *et al.* Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 46, n. 9–12, p. 969–982, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2160-2>
- AI, Sheng; LONG, Hui. A review on material fracture mechanism in incremental sheet forming. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 104, n. 1–4, p. 33–61, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03682-6>
- BANSAL, Ankush *et al.* Prediction of forming forces in single point incremental forming. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 28, p. 486–493, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.04.016>
- BARUAH, Angshuman; PANDIVELAN, C.; JEEVANANTHAM, A. K. Optimization of AA5052 in incremental sheet forming using grey relational analysis. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, [s. l.], v. 106, p. 95–100, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.04.029>
- BHATTACHARYA, A. *et al.* Formability and surface finish studies in single point incremental forming. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, [s. l.], v. 133, n. 6, p. 1–7, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4005458>
- BUDYNAS, Richard D.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquina de Shigley**. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- CALLISTER JR, William D; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 9ªed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- CENTENO, G. *et al.* Recent Approaches for the Manufacturing of Polymeric Cranial Prostheses by Incremental Sheet Forming. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 183, p. 180–187, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.059>
- CHANG, Zhidong; LI, Ming; CHEN, Jun. Analytical modeling and experimental validation of the forming force in several typical incremental sheet forming processes. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 140, n. December 2018, p. 62–76, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.03.003>
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: processos de fabricação e tratamento**. 2ªed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- DABWAN, Abdulmajeed *et al.* Study of the Effect of Process Parameters on Surface Profile Accuracy in Single-Point Incremental Sheet Forming of AA1050-H14 Aluminum Alloy. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 2020, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2020/7265941>

- DIETER, George E. **Metalurgia Mecânica**. 2ªed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- DUFLOU, Joost *et al.* Experimental study on force measurements for single point incremental forming. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 189, n. 1–3, p. 65–72, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.01.005>
- DUFLOU, Joost R. *et al.* Manufacture of accurate titanium cranio-facial implants with high forming angle using single point incremental forming. **Key Engineering Materials**, [s. l.], v. 549, p. 223–230, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.549.223>
- ESMAEILPOUR, Rasoul *et al.* Comparison of 3D yield functions for finite element simulation of single point incremental forming (SPIF) of aluminum 7075. **International Journal of Mechanical Sciences**, [s. l.], v. 133, p. 544–554, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.09.019>
- FELIPE, José *et al.* Desenvolvimento de ferramenta para estampagem incremental de aços inoxidáveis austeníticos. **Tese de Doutorado**, [s. l.], p. 75–85, 2017.
- FORMISANO, A. *et al.* Negative and positive incremental forming: Comparison by geometrical, experimental, and FEM considerations. **Materials and Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 32, n. 5, p. 530–536, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1232810>
- HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo Roberto. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**. 2ªed. São Paulo: Artliber, 2005.
- HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. 7ªed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- HUSSAIN, G. *et al.* Guidelines for tool-size selection for single-point incremental forming of an aerospace alloy. **Materials and Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 28, n. 3, p. 324–329, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10426914.2012.700151>
- ISMAIL, Nazarul Abidin *et al.* Parametric optimization of robot-based single point incremental forming using Taguchi method. **International Journal of Integrated Engineering**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 217–224, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.30880/ijie.2019.11.01.023>
- KALLURI, Maheshwar Dwivedy and Vinayak. ScienceDirect ScienceDirect ScienceDirect The effect of process parameters on forming forces in single point incremental International forming incremental forming Costing models for capaci. **Procedia Manufacturing**, [s. l.], v. 29, p. 120–128, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.116>
- KALO, Ammar; NEWSUM, Michael Jake. Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014. **Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014**, [s. l.], p. 33–49, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04663-1>

KIM, H. *et al.* Numerical Study of Incremental Sheet Forming Processes. **Journal of Physics: Conference Series**, [s. l.], v. 1063, n. 1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1063/1/012017>

KUMAR, Ajay *et al.* **Forming force in incremental sheet forming: a comparative analysis of the state of the art**. [S. l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2019. ISSN 18063691.v. 41 Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1755-2>

KUMAR, Narinder; SINGH, Arshpreet; AGRAWAL, Anupam. Formability Analysis of AA1200 H14 Aluminum Alloy Using Single Point Incremental Forming Process. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, [s. l.], v. 73, n. 7, p. 1975–1984, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02014-7>

KUMAR, S. Pratheesh *et al.* Real-time applications and novel manufacturing strategies of incremental forming: An industrial perspective. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], n. xxxx, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.109>

KUMAR, Yogesh; KUMAR, Santosh. Analysis of incremental sheet forming process through simulation. **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 145–152, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.24247/ijmperdjun201816>

LI, Jun Chao; LI, Chong; ZHOU, Tong Gui. Thickness distribution and mechanical property of sheet metal incremental forming based on numerical simulation. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, [s. l.], v. 22, n. SUPPL. 1, p. s54–s60, 2012. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61683-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61683-5)

MARTINS, P. A.F. *et al.* Theory of single point incremental forming. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 57, n. 1, p. 247–252, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.047>

PACHECO, P. A.P.; SILVEIRA, M. E. Numerical simulation of electric hot incremental sheet forming of 1050 aluminum with and without preheating. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 94, n. 9–12, p. 3097–3108, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0879-8>

PAIXÃO, Elisiane Pelke; SAUTHIER, Luis Fernando; REIMBOLD, Manuel Martin Pérez. **Ensaio de Células de Carga**. Ijuí: [s. n.], 2016.

PETEK, A.; KUZMAN, K.; KOPAČ, J. Deformations and forces analysis of single point incremental sheet metal forming. **Archives of Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 107–116, 2009.

POLACK, Antonio Valenciano. **Manual Prático de Estampagem**. 1ªed. São Paulo: Hemus, 1974.

PRADELLA, Marcelo Pinto; FOLLE, Luis Fernando. Estudo dos parâmetros de estampagem incremental para PVC TT - Study of incremental sheet forming process of PVC. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 1094–1104, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620160004.0100>

RODRIGUES, Jorge; MARTINS, Paulo. **Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica - Vol. II**. 2ªed. Forte da Casa: Escolar Editora, 2010.

SAIDI, Badreddine *et al.* Experimental force measurements in single point incremental sheet forming SPIF. **Mechanics and Industry**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 7–11, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/meca/2015018>

SCHAEFFER, Lírio. **Conformação Mecânica**. 2ªed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SCHAEFFER, Lírio. **Manufatura por Conformação Mecânica**. 1ªed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2006.

SCHAEFFER, Lírio; ROCHA, Alexandre da Silva. **Conformação Mecânica: cálculos aplicados em processos de fabricação**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2007.

SCHREIBER, Rafael Gustavo *et al.* Prototyping of absorber plate for solar collector by ISF and FSW processes. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [s. l.], v. 43, n. 7, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03083-5>

SCHREIBER, Rafael Gustavo; SCHAEFFER, Lirio. Manufacture of absorber fins for solar collector using incremental sheet forming. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 1132–1140, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.018>

SIDDIQI, Muftooh Ur Rehman *et al.* Design and validation of a fixture for positive incremental sheet forming. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [s. l.], v. 232, n. 4, p. 629–643, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0954405417703423>

SURESH, Kurra; REGALLA, Srinivasa Prakash. Effect of Mesh Parameters in Finite Element Simulation of Single Point Incremental Sheet Forming Process. **Procedia Materials Science**, [s. l.], v. 6, n. Icmpe, p. 376–382, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.048>

TORSAKUL, Sirichai; KUPTASTHIEN, Natha. Effects of three parameters on forming force of the single point incremental forming process. **Journal of Mechanical Science and Technology**, [s. l.], v. 33, n. 6, p. 2817–2823, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0528-2>

XIAO, Xiao *et al.* Formability and forming force in incremental sheet forming of AA7075-T6 at different temperatures. **Journal of Mechanical Science and Technology**, [s. l.], v. 33, n. 8, p. 3795–3802, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0722-2>

ZHANG, San *et al.* Evaluation and optimization on the formability of an AZ31B Mg alloy during warm incremental sheet forming assisted with oil bath heating. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, [s. l.], v. 157, p. 107673, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107673>

APÊNDICE A – Programa CNC para Estampagem Incremental de Tronco de Cone

Devido à complexidade e extensão desse tipo de programa, o exemplo aqui exposto será para somente dois passes (dois incrementos verticais). Para uma quantidade maior de passes, basta repetir a lógica empregada.

Serão considerados os parâmetros $R_f = 5\text{mm}$; $\Delta z = 1,0\text{mm}$; $\theta = 30^\circ$; $a = 100\text{mm/min}$ e $n = 4\text{ rpm}$.

Planilha 1 – Exemplo de Programa CNC para Estampagem de Tronco de Cone
O0501 (Tronco de cone 30deg);

N10 G21 G40 G90 G94;

N20 G0 X100 Z100;

N30 T0404 (ferramenta de raio 5mm);

N40 G97 S4 (rotação constante);

N50 G0 G54 X85 Z10;

N60 G1 Z-1 F100 (rotação em mm/min);

N70 M4;

N80 G4 X16.5;

N90 M5;

N100 G1 X83.268;

N110 Z-2;

N120 M4;

N130 G4 X16.5;

N140 M5;

N150 G1 Z0;

N160 G0 Z100;

N170 X200;

N180 M30;