

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

LUCAS CLARINDO PEREIRA

ESTUDO DA ESTAMPABILIDADE DO LATÃO C260 E DO COBRE C110 PELO
PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO SIMPLES EM UM
CENTRO DE USINAGEM DE 5 EIXOS

SÃO PAULO

2018

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SÃO PAULO
CAMPUS SÃO PAULO

LUCAS CLARINDO PEREIRA

ESTUDO DA ESTAMPABILIDADE DO LATÃO C260 E DO COBRE
C110 PELO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE
PONTO SIMPLES EM UM CENTRO DE USINAGEM DE 5 EIXOS

Orientador: Prof. Dr. Pedro Roberto Goulart

Coorientador: Prof. Dr. Mário Luiz Nunes da Silva

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
do IFSP para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais e
Processo de Fabricação

São Paulo – SP

2018

Catálogo na fonte
Biblioteca Francisco Montojos - IFSP Campus São Paulo
Dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P436e	<p>Pereira, Lucas Clarindo Estudo da estampabilidade do latão C260 e do cobre C110 pelo processo de Estampagem Incremental de Ponto Simples em um centro de usinagem de 5 eixos / Lucas Clarindo Pereira. São Paulo: [s.n.], 2018. 109 f. il.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Pedro Roberto Goulart Co-orientador: Prof. Dr. Mário Luiz Nunes da Silva</p> <p>Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2018.</p> <p>1. Conformação Mecânica. 2. Estampabilidade. 3. Trabalho A Frio. 4. Centro de Usinagem de 5 Eixos. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo II. Título.</p>
CDD 620.1	

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

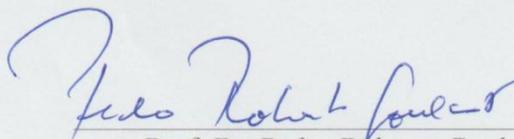
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

“ESTUDO DA ESTAMPABILIDADE DO LATÃO C260 E DO COBRE C110 PELO
PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO SIMPLES EM UM
CENTRO DE USINAGEM DE 5 EIXOS”

Autor: Lucas Clarindo Pereira

Orientador: Prof. Dr. Pedro Roberto Goulart

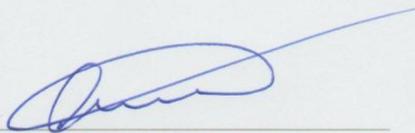
A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou essa dissertação:



Prof. Dr. Pedro Roberto Goulart
IFSP – ITP



Prof. Dr. Givanildo Alves dos Santos
IFSP – SPO



Dr. Leonardo Taborda Sandor
VILLARES METALS S.A.

São Paulo, 13 de agosto de 2018

“Uma pessoa está em paz, quando todas as pessoas que pertencem a sua família tem um lugar em seu coração.”

(Bert Hellinger)

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha mãe.

Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores pelos ensinamentos.

Agradeço ao IFSP – Campus Itapetininga pelas horas disponibilizadas para esta pesquisa.

Agradeço aos professores do IFSP – Campus Itapetininga pelo auxílio no uso de equipamentos.

Agradeço aos amigos e familiares pela paciência e incentivo.

Agradeço à empresa Termomecânica São Paulo S A pela cessão dos materiais para a execução dos ensaios.

Agradeço ao Prof. Dr. Sérgio Tonini Button da Unicamp pelo apoio incondicional e discussões técnicas.

Resumo

A Estampagem Incremental é um processo de conformação utilizado na fabricação de protótipos ou pequenos lotes, realizado normalmente em centros de usinagem e, por ser uma técnica ainda recente, possui muitos limites a serem investigados para se tornar mais presente no meio fabril. Em comparação a outros processos de conformação, a Estampagem Incremental apresenta custo reduzido e ferramental simples; em contrapartida demanda maior tempo de processo de fabricação por peça e apresenta maior desvio geométrico e dimensional. Este trabalho apresenta os resultados da Estampagem Incremental de Ponto Simples (*SPIF*) utilizando-se como materiais de ensaio chapas de latão C260 e de cobre C110, com espessuras de 0,5 mm e de 1,0 mm, com geometrias e ângulos de parede diferentes. Os materiais foram caracterizados por meio do tamanho de grão e por ensaios de dureza, tração e Nakazima, que mostraram que, apesar do latão apresentar maior resistência mecânica, com o cobre foi possível a obtenção de melhor estampabilidade. O processo foi realizado em um centro de usinagem de 5 eixos e os resultados possibilitaram a obtenção do ângulo limite de estampagem e a análise de espessura do perfil obtido. Para as chapas com 0,5 mm de espessura não se obteve o ângulo limite de estampagem devido à fratura precoce do material. Com as chapas de 1,0 mm de espessura se obteve o ângulo limite de estampagem de 66,5° para o latão e de 68° para o cobre e para ambos os materiais uma diferença média de espessura de 7,7% se comparada ao valor previsto matematicamente. Ao se comparar os alongamentos máximos verificou-se que os valores atingidos no processo *SPIF* são muito superiores aos atingidos nos ensaios de tração e de Nakazima.

Palavras chave: Conformação mecânica, estampabilidade, trabalho a frio, centro de usinagem 5 eixos.

Abstract

Incremental Sheet Forming is a metal forming process used to produce prototypes and small batches of parts, usually performed in CNC machining centers and due to the fact of it's a recent technique there are still many limits to be investigated in order to this process become more present in the industry. Incremental Sheet Forming process has lower cost than traditional stamping processes and it uses tools that are easy to produce, however it needs longer production times per part and it presents greater geometric and dimensional deviation than the parts produced by traditional processes. This work shows the results obtained with Single Point Incremental Forming (SPIF) of brass C260 and copper C110 sheets with a thickness of 0.5 and 1.0 mm. Tests were performed with different wall angles. The materials characterization was performed by mean of grain size and hardness, tensile and Nakazima testing. These tests showed that brass has a higher mechanical resistance, but the copper shows better formability. The process was accomplished in a 5 axis machining center and the results allowed the identification of the limit angle and the variation of thickness after forming. For the parts made with sheets with a thickness of 1.0 mm, the maximum formability angle obtained was 66.5 degrees for brass and 68 degrees for copper. For both materials was verified a variation of thickness close to 7.7% when compared to the prediction of a mathematical model. For the sheets with a thickness of 0.5 mm, the formability angle was not obtained due to early fracture of the material. The comparison of the maximum elongations shows that SPIF it is capable to get higher values than tensile and Nakazima testing.

Keywords: Mechanical forming, formability, cold work, 5 axis machining center.

Lista de Figuras

Figura 1 – Esquema de 5 processos de estampagem.	20
Figura 2 – Etapas da estampagem incremental.	21
Figura 3 – Estampagem incremental de ponto simples.	22
Figura 4 – Erros geométricos da estampagem incremental de ponto simples.	23
Figura 5 – Estampagem incremental de dois pontos, com matriz parcial e com matriz completa.	25
Figura 6 – Estampagem incremental de dois pontos, com matriz positiva e com matriz negativa.	26
Figura 7 – Estampagem incremental de duplo ponto.	27
Figura 8 – Estampagem híbrida de duplo ponto auxiliada eletricamente.	27
Figura 9 – Técnicas para minimizar os fatores limitantes na estampagem incremental de ponto simples.	28
Figura 10 – Incrementos verticais.	32
Figura 11 – Formatos feitos por <i>SPIF</i>	35
Figura 12 – Geometrias com ângulo de parede variável (<i>VWA</i>).	37
Figura 13 – Lei do cosseno.	38
Figura 14 – Comportamento da espessura da chapa durante o processo <i>SPIF</i>	40
Figura 15 – Máquina dedicada ao processo <i>SPIF</i> da Universidade de Aveiro.	41
Figura 16 – Máquina dedicada a <i>ISF</i> da Amino Corporation.	42
Figura 17 – Robô utilizado em <i>SPIF</i>	42
Figura 18 – Trajetórias da ferramenta.	43
Figura 19 – Perfis de ferramentas.	44
Figura 20 – Ferramentas para estampagem incremental.	45
Figura 21 – Ferramentas com esferas rolantes.	46

Figura 22 – Métodos para medição de espessura.	49
Figura 23 – Gravação eletroquímica para análise da deformação.	49
Figura 24 – Diagrama limite de conformação.	50
Figura 25 – Métodos de avaliação da superfície.	51
Figura 26 – Fluxograma para experimentos com <i>SPIF</i>	52
Figura 27 – Medidas dos corpos de prova para o ensaio de tração.	54
Figura 28 – Direção dos corpos de prova para o ensaio de tração.	54
Figura 29 – Corpos de prova para o ensaio de Nakazima.	57
Figura 30 – Dispositivo para o ensaio de Nakazima.	58
Figura 31 – Medição das deformações no ensaio de Nakazima.	59
Figura 32 – Diagrama limite de conformação (Nakazima).	60
Figura 33 – Posição do embutimento.	61
Figura 34 – Micrografias do latão.	63
Figura 35 – Micrografias do cobre.	64
Figura 36 – Ferramenta com esfera rolante.	66
Figura 37 – Centro de Usinagem utilizado nos ensaios	66
Figura 38 – Base utilizada nos ensaios preliminares.	67
Figura 39 – Geometrias dos ensaios preliminares.	68
Figura 40 – Base dividida em 4 setores.	69
Figura 41 – Geometria com parede variável.	70
Figura 42 – Geometria com ângulo fixo.	71
Figura 43 – Chapas estampadas nos ensaios iniciais.	72
Figura 44 – Chapas estampadas nos ensaios iniciais.	73
Figura 45 – Medição dos ângulos nos ensaios com ângulo de parede variável.	74

Figura 46 – Chapa de latão estampada com ângulo de parede variável.	75
Figura 47 – Chapa de cobre estampada com ângulo de parede variável.	76
Figura 48 – Relação profundidade x ângulo do latão (ângulo fixo).	78
Figura 49 – Relação profundidade x ângulo do cobre (ângulo fixo).	79
Figura 50 – Fratura das chapas.	79
Figura 51 – Chapa estampada com ângulo de parede fixo.	80
Figura 52 – Perfil cortado e posições para medição das espessuras.	81
Figura 53 – Espessura medida x prevista para o latão.	83
Figura 54 – Espessura medida x prevista para o cobre.	84
Figura 55 – Efeito de casca de laranja em chapa de cobre.	85
Figura 56 – Diagrama limite de conformação (<i>SPIF</i>).	86
Figura 57 – Diagrama limite de conformação (Nakazima x <i>SPIF</i>).	87

Lista de tabelas

Tabela 1 - Parâmetros obtidos da literatura.	33
Tabela 2 - Composição química nominal das chapas.	53
Tabela 3 - Durezas das chapas.	53
Tabela 4 – Valores médios obtidos para o latão no ensaio de tração.	55
Tabela 5 – Valores médios obtidos para o cobre no ensaio de tração.	56
Tabela 6 – Cálculo da anisotropia média e planar.	56
Tabela 7 – Tamanho de grão do latão.	65
Tabela 8 – Tamanho de grão do cobre.	65
Tabela 9 - Parâmetros utilizados nos ensaios iniciais.	68
Tabela 10 - Parâmetros utilizados nos ensaios com ângulo de parede variável.	75
Tabela 11 - Parâmetros utilizados nos ensaios com ângulo fixo.	77
Tabela 12 – Espessuras das chapas de latão após estampagem.	81
Tabela 13 – Espessuras das chapas de cobre após estampagem.	82
Tabela 14 – Comparativo dos alongamentos médios do latão.	88
Tabela 15 – Comparativo dos alongamentos médios do cobre.	88

Lista de Abreviaturas e Siglas

<i>AISF</i>	<i>Asymmetric Incremental Sheet Forming</i>
<i>ASM</i>	<i>American Society For Metals</i>
<i>ASTM</i>	<i>American Society For Testing And Materials</i>
<i>CAD</i>	<i>Computer Aided Design</i>
<i>CAM</i>	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
<i>CNC</i>	Comando Numérico Computadorizado
<i>DSIF</i>	<i>Double-sided Incremental Forming</i>
<i>E-MDSIF</i>	<i>Electrically-assisted Mixed Double-sided Incremental Forming</i>
<i>FCF</i>	<i>Fluid Cell Forming</i>
<i>FFL</i>	<i>Fracture Forming Limit</i>
<i>FLC</i>	<i>Forming Limit Curve</i>
<i>FLD</i>	<i>Forming Limit Diagram</i>
<i>IFSP</i>	Instituto Federal de São Paulo
<i>ISF</i>	<i>Incremental Sheet Forming</i>
<i>RPM</i>	Rotações por minuto
<i>SPF</i>	<i>Superplastic Forming</i>
<i>SPIF</i>	<i>Single Point Incremental Forming</i>
<i>TPIF</i>	<i>Two Points Incremental Forming</i>
<i>VWA</i>	<i>Variable Wall Angle</i>
<i>VWACF</i>	<i>Variable Wall Angle Conical Frustum</i>
<i>VWAST</i>	<i>Variable Wall Angle Step Test</i>

Lista Símbolos

e_i	espessura inicial
e_f	espessura final
l_i	largura inicial do corpo de prova
l_f	largura final do corpo de prova
c_i	comprimento inicial do corpo de prova
C_i	comprimento inicial do círculo
c_f	comprimento final do corpo de prova
C_f	comprimento final da elipse
C_L	comprimento da linha
C_m	comprimento médio do intercepto linear
G	tamanho de grão ASTM
HV	dureza Vickers
L_i	largura inicial círculo
L_f	largura final da elipse
M	ampliação utilizada
N_i	número de grãos interceptados pela linha
N_L	número de grãos interceptados por unidade de comprimento
r_0	anisotropia na direção 0°
r_{45}	anisotropia na direção 45°
r_{90}	anisotropia na direção 90°
r	índice de anisotropia
r_m	anisotropia média
R	raio
Δ_r	anisotropia planar
Φ	ângulo de parede
ε_1	deformação maior
ε_2	deformação menor
\emptyset	diâmetro
\square	quadrado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
2. OBJETIVOS.....	18
2.1. Objetivo geral	18
2.2. Objetivos específicos.....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1. Processos de conformação	19
3.2. Estampagem Incremental.....	20
3.3. Estampagem Incremental de Ponto Simples.....	22
3.4. Estampagem incremental de dois pontos.....	24
3.5. Variantes da estampagem incremental	26
3.6. Principais parâmetros do processo <i>SPIF</i>	29
3.6.1. Velocidade de rotação da ferramenta	29
3.6.2. Velocidade de avanço da ferramenta.....	30
3.6.3. Incremento vertical	31
3.6.4. Lubrificação.....	33
3.6.5. Geometria da peça e ângulo de parede	34
3.6.6. Espessura da chapa	38
3.7. Equipamentos e ferramentas.....	40
3.8. Medições e análises	47
4. MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1. Caracterização das chapas	53
4.1.1. Ensaio de tração	54
4.1.2. Ensaio de Nakazima	57
4.1.3. Tamanho de grão.....	61
4.2. Ferramental dos ensaios	66
4.3. Ensaios preliminares	67

4.4. Ensaio de estampagem incremental em chapas de latão e de cobre.....	69
4.4.1. Ângulo de parede variável.....	70
4.4.2. Ângulo de parede fixo	71
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72
5.1. Resultados dos ensaios preliminares	72
5.2. Ensaio com ângulo de parede variável.....	73
5.3. Ensaio com ângulo de parede fixo.....	76
5.4. Medição das espessuras.....	80
5.5. Medição das deformações	85
5.6. Comparação dos alongamentos.....	87
6. CONCLUSÕES.....	89
REFERÊNCIAS.....	91
APÊNDICE I.....	98
APÊNDICE II.....	99
APÊNDICE III.....	106

1. INTRODUÇÃO

Para atender altas demandas de produção, baixos custos e tempos mínimos de fabricação, a indústria estampa grandes lotes de produtos em prensas com o uso de matrizes. Para pequenos lotes ou desenvolvimento de protótipos, nos quais o uso de uma matriz se torna inviável devido ao seu alto custo, foram desenvolvidos processos alternativos como a estampagem incremental (BERTOL et al., 2012).

Apesar do processo de estampagem incremental existir há 50 anos, sua patente data de 1967 por Lezak, os estudos foram impulsionados pela evolução tecnológica dos equipamentos CNC na década de 90 (FRITZEN et al., 2016). Sua aplicação ainda é limitada devido a razões como estampabilidade insatisfatória, imprecisão geométrica e dimensional, longo tempo de conformação e acabamento superficial ruim. Para contornar estas dificuldades, os diversos trabalhos realizados na área têm se concentrado na mecânica do processo, avaliando parâmetros como: espessura da chapa, ângulos de conformação, tipo e formato da ferramenta, incremento vertical, avanço e rotação da ferramenta, entre outros (MCANULTY; JESWIET; DOOLAN, 2017).

Muitos tipos de materiais têm sido investigados para o uso nos processos de estampagem incremental, por exemplo: ligas de alumínio, aços, titânio e polímeros (JESWIET et al., 2015) (MCANULTY; JESWIET; DOOLAN, 2017).

Fritzen et al. (2011) (2016) analisaram os limites de estampabilidade de ligas de latão com diferentes teores de zinco, Jawale et al. (2016) analisaram diferentes lubrificantes na estampagem incremental do cobre, Lehtinen, Väisänen e Salmi (2015) utilizaram aquecimento por meio de *laser* em seus experimentos com chapas de cobre e Jackson e Allwood (2009) estudaram os mecanismos de deformação e variação de espessura em chapas de cobre ao comparar dois processos de estampagem incremental com a estampagem convencional. Contudo o cobre e suas ligas ainda possuem um número reduzido de estudos, principalmente em comparação às ligas de alumínio. O presente trabalho visa acrescentar novos conhecimentos à esta área, como o uso de uma ferramenta com esfera rolante em um centro de usinagem de 5 eixos e o comportamento das deformações envolvidas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Estudar o comportamento de chapas de latão ASTM B36 C260 e de cobre ASTM B152 C110 no processo de estampagem incremental de ponto simples utilizando um centro de usinagem de 5 eixos, parâmetros de processo idênticos para os dois materiais e diferentes geometrias.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar o limite de estampabilidade pela obtenção do ângulo máximo de parede.
- Verificar a variação de espessura do material ao longo dos perfis estampados.
- Realizar comparação entre as deformações obtidas nos experimentos e as obtidas no ensaio de Nakazima.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A importância dos metais na tecnologia moderna se deve, em grande parte, à facilidade com que podem ser conformados em geometrias úteis por meio de processos de deformação plástica. A capacidade de processamento do metal sem apresentar defeitos ou fraturas na peça trabalhada pelo processo de deformação plástica é definida como conformabilidade plástica e está diretamente relacionada ao processo de conformação. Uma das características da conformação é a estampabilidade, expressa como a capacidade de uma chapa metálica poder ser estampada profundamente (BRESCIANI et al., 2011).

3.1. Processos de conformação

Os principais processos de conformação de metais foram classificados por Bresciani et al. (2011), destacando-se: laminação, trefilação, extrusão, forjamento, estampagem profunda, estiramento, dobramento, calandragem e corte. Também são indicados os principais esforços atuantes: compressão (direta ou indireta), tração, flexão e cisalhamento; além da metalurgia e mecânica dos processos.

Cooper, Rossie e Gutowski (2017) analisaram o gasto energético e o impacto ambiental de cinco processos: estampagem convencional (*hydraulic drawing*), estiramento (*stretch forming*), hidroconformação: conformação em célula de fluido (*hydroforming: fluid cell forming - FCF*), conformação de ligas com superplasticidade (*superplastic forming - SPF*) e estampagem incremental (*incremental sheet forming - ISF*); os processos são mostrados na Figura 1. Esses pesquisadores ainda dão uma breve explicação sobre os processos, destacando os custos iniciais, aplicações principais e características básicas.

Microconformação, manufatura de componentes leves, estampagem incremental, conformação em altas temperaturas e teste e modelagem de materiais em resposta à deformação foram as áreas abordadas por Jeswiet et al. (2008) em um estudo que discutiu as mudanças que ocorreram nestes processos no início do século 21, entre elas: a maior demanda de peças pequenas, a produção de componentes com menor impacto ambiental, a aplicação de novas ferramentas nos

processos de conformação, a redução de peso nos equipamentos e o uso de programas de simulação mais versáteis e confiáveis. O trabalho em questão destaca o crescente aumento na produção de peças conformadas e a aplicação de novos materiais e técnicas.

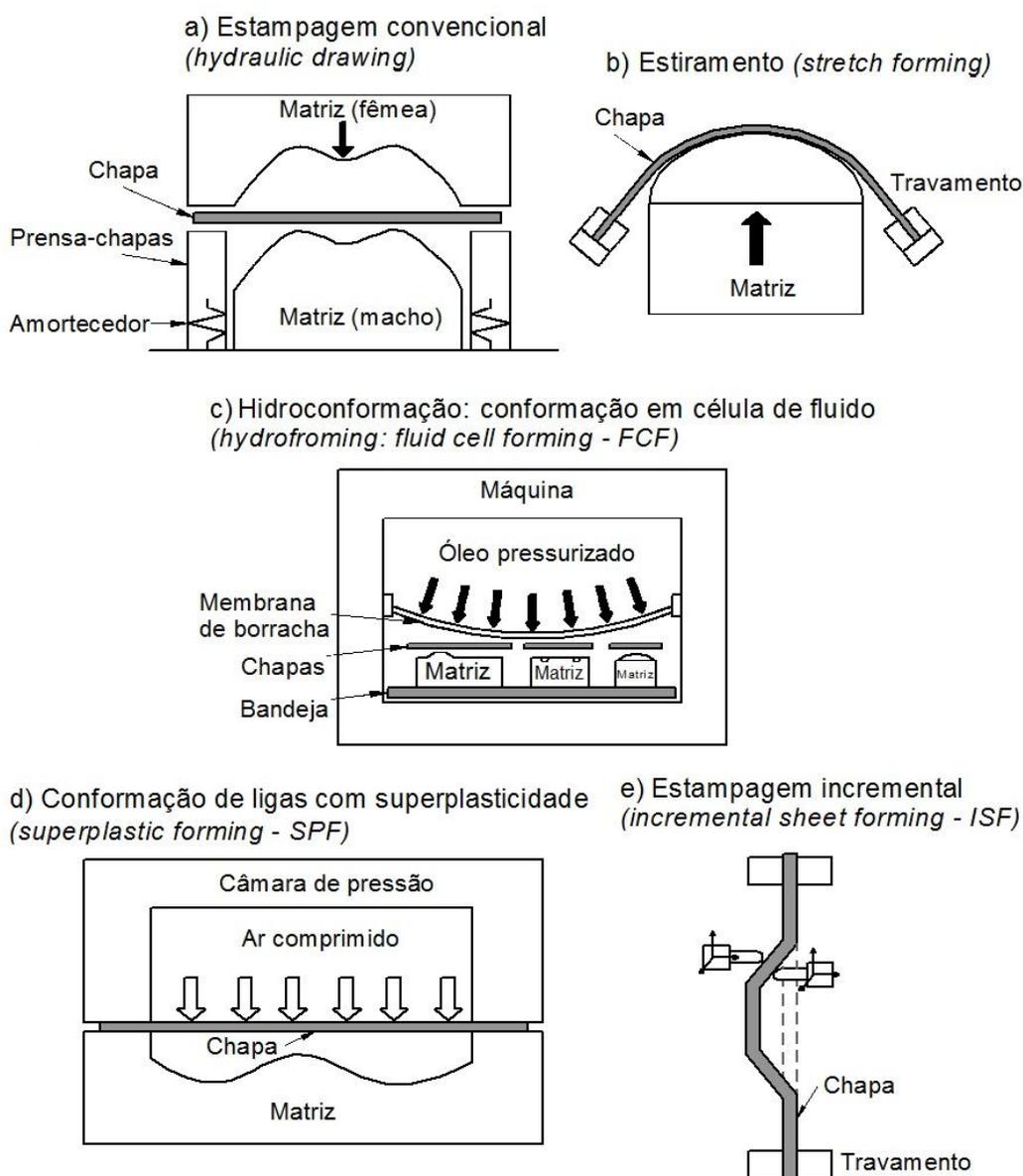


Figura 1 – Esquema de 5 processos de estampagem.

Adaptado de Cooper, Rossie e Gutowski (2017).

3.2. Estampagem Incremental

A Estampagem Incremental (*ISF – incremental sheet forming*) engloba uma série de processos em que durante a conformação apenas uma pequena parte do

material está sendo deformada a cada momento (EMMENS; SEBASTIANI; BOOGAARD, 2010).

No processo *ISF* a peça a ser produzida, partindo-se de uma chapa, é fixada em uma base e um punção produz pequenas deformações, que são incrementadas verticalmente a cada passe, até se obter o formato desejado. A trajetória do punção é constituída por uma sequência de linhas de contorno geradas normalmente por programas *CAD/CAM* (FRITZEN et al., 2016).

Na Figura 2 são mostradas as quatro etapas do processo *ISF*, sendo que a etapa 1 mostra a preparação da máquina e indica as principais partes do sistema: o prensa-chapas, que é um dispositivo que fixa e sustenta a chapa a ser conformada e o punção, que é uma ferramenta sólida, com dureza superior à dureza da chapa a ser conformada e com o qual são executadas as trajetórias programadas a fim de se conformar a chapa na geometria desejada. A etapa 2 mostra o início da trajetória do punção sobre a chapa causando uma pequena deformação. A etapa 3 mostra o deslocamento do punção sobre a chapa e a etapa 4, a peça acabada após o punção ter executado todas as trajetórias programadas.

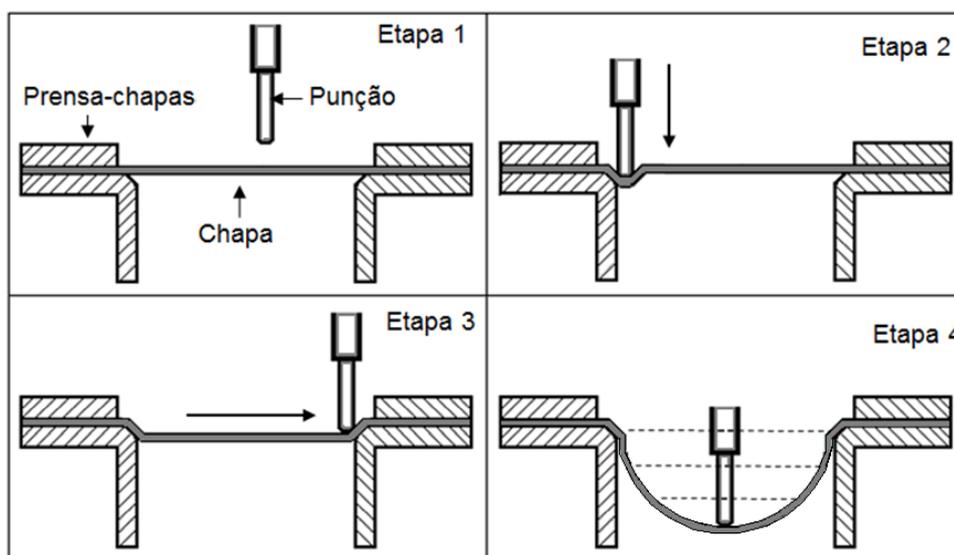


Figura 2 – Etapas da estampagem incremental.

Adaptado de Bertol et al. (2012).

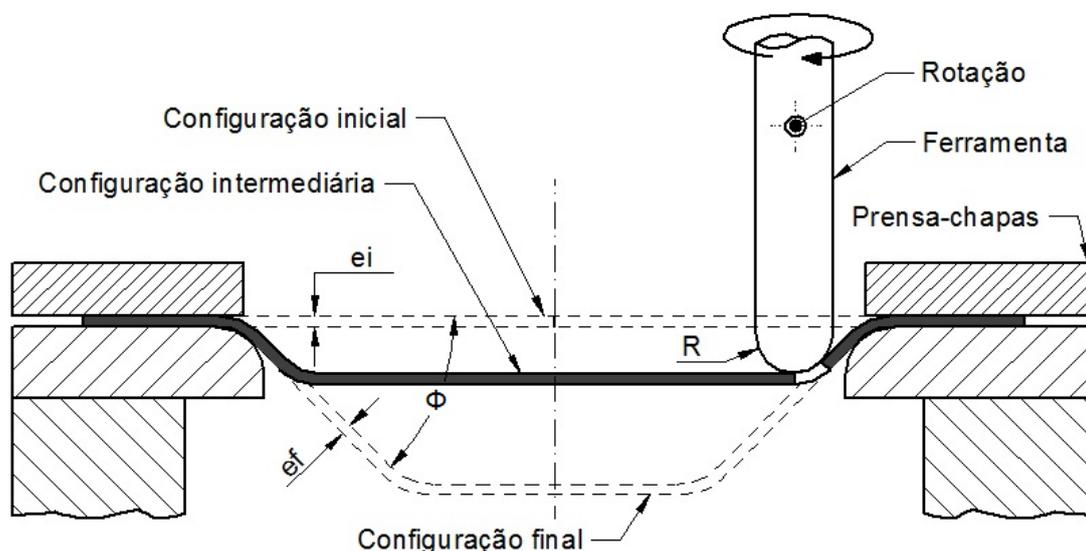
De acordo com Silva e Martins (2014), os processos de estampagem incremental podem ser divididos em dois tipos: Estampagem Incremental de Ponto Simples (*SPIF – single point incremental forming*) e Estampagem Incremental de

Dois Pontos (*TPIF – two points incremental forming*). Os mesmos processos também são conhecidos como estampagem negativa (*SPIF*) e estampagem positiva (*TPIF*) (ARFA; BAHLOUL; BELHADJSALAH, 2012).

3.3. Estampagem Incremental de Ponto Simples

Na Estampagem Incremental de Ponto Simples não são usadas matrizes ou apoios, tornando o processo mais flexível (SILVA e MARTINS, 2014). Segundo Jeswiet et al. (2015), a sigla *SPIF* tem sido usada para diferenciar este processo de outras técnicas e o mesmo faz parte de um grupo de processos conhecidos como estampagem incremental assimétrica (*AISF – asymmetric incremental sheet forming*), devido à capacidade de se obter peças com perfis assimétricos.

O esquema mostrado na Figura 3 ilustra o processo *SPIF* e apresenta algumas variáveis do processo: espessuras inicial e final, ângulo de parede e raio da ferramenta.



R: raio da ferramenta ei: espessura inicial ef: espessura final ϕ : ângulo de parede

Figura 3 – Estampagem incremental de ponto simples.

Figura Adaptado de Cruz et al. (2015).

O processo *SPIF* é descrito como um dos mais indicados para a produção de pequenos lotes de peças e protótipos, principalmente quando os mesmos apresentam geometrias complexas. O processo tem custo reduzido, dispensa o uso

de matrizes específicas, utiliza ferramental simples e pode ser executado em centros de usinagem com o auxílio de programas *CAD/CAM*. A estampabilidade no processo *SPIF* é elevada, quando comparada com a estampagem convencional, pois a deformação é localizada no ponto de contato da ferramenta com a chapa. Contudo, o processo apresenta redução de espessura acentuada, imprecisão dimensional e geométrica devido ao retorno elástico, acabamento superficial ruim, dificuldade de se obter ângulos de paredes elevados e longos tempos de execução quando comparado aos processos convencionais com matrizes (ZIRAN et al., 2009) (DURANTE; FORMISANO; LANGELLA, 2010) (ARFA; BAHLOUL; BELHADJSALAH, 2012) (LI et al., 2014) (SALEM et al., 2016). As desvantagens do processo *SPIF* são compensadas pelo menor custo de ferramental, a aplicação em pequenos lotes e a possibilidade de se realizar operações de correção das irregularidades.

A Figura 4 mostra dois tipos de erros geométricos que ocorrem no processo *SPIF*, o dobramento da chapa, ou seja, a perda da geometria objetivada na região inicial da parede do perfil e o retorno elástico que ocorre quando o trabalho com o punção é finalizado.

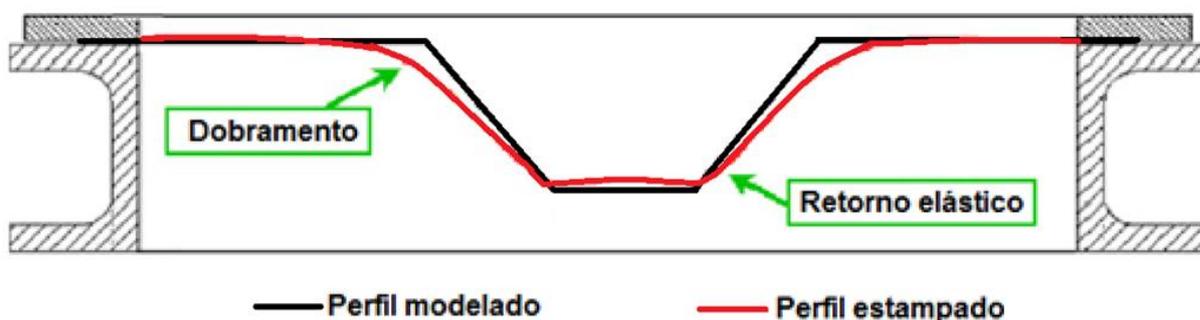


Figura 4 – Erros geométricos da estampagem incremental de ponto simples.

Adaptado de Micari, Ambrogio e Filice (2007).

Devido à sua flexibilidade e o crescente desenvolvimento do processo, as peças produzidas pela estampagem incremental de ponto simples têm sido aplicadas nas indústrias automotiva, aeroespacial, arquitetônica, de bens de consumo, médica e similares (JESWIET et al., 2008) (MARTÍNEZ-ROMERO et al., 2014). As principais vantagens e desvantagens do processo *SPIF* foram descritas nos trabalhos de Jeswiet et al. (2005) e Micari, Ambrogio e Filice (2007).

VANTAGENS:

- Equipamentos de baixo custo;
- Controle da trajetória da ferramenta por CNC;
- Processo indicado para prototipagem rápida;
- Alta estampabilidade;
- Dispensa o uso de matrizes;
- Mudanças são implementadas com relativa facilidade;
- As forças exigidas da máquina são reduzidas;
- Operação silenciosa.

DESVANTAGENS:

- Processo lento;
- Imprecisão na geometria do perfil final;
- Requer múltiplos passes para atingir ângulos específicos;
- Sofre grande influência do retorno elástico.

Segundo Jeswiet et al. (2015), para se obter uma peça pelo processo *SPIF* deve-se criar um modelo em *CAD*, gerar o caminho da ferramenta e produzir a peça desejada. A criação do modelo deve seguir as seguintes regras: verificar se a peça é adequada ao prensa-chapas; desenhar a peça com uma superfície côncava, mantendo sobremetal para fixação no prensa-chapas; definir os ângulos de parede a partir do plano da chapa. O autor ainda destaca que o tempo de execução aumenta conforme o ângulo de parede aumenta.

3.4. Estampagem incremental de dois pontos

Na estampagem incremental de dois pontos, o punção trabalha em conjunto com uma matriz (parcial ou completa) que fica posicionada sob a chapa. Esta matriz pode ser fabricada em madeira, resina ou polímeros e o processo apresenta boa precisão geométrica apesar de ser menos flexível que a estampagem de ponto simples. Conforme o punção percorre sua trajetória e são aplicados os incrementos verticais, o prensa-chapas se move para baixo, para que a geometria seja

adequadamente executada (SILVA e MARTINS, 2014). Uma representação deste processo, com matriz parcial e matriz completa, pode ser vista na Figura 5.

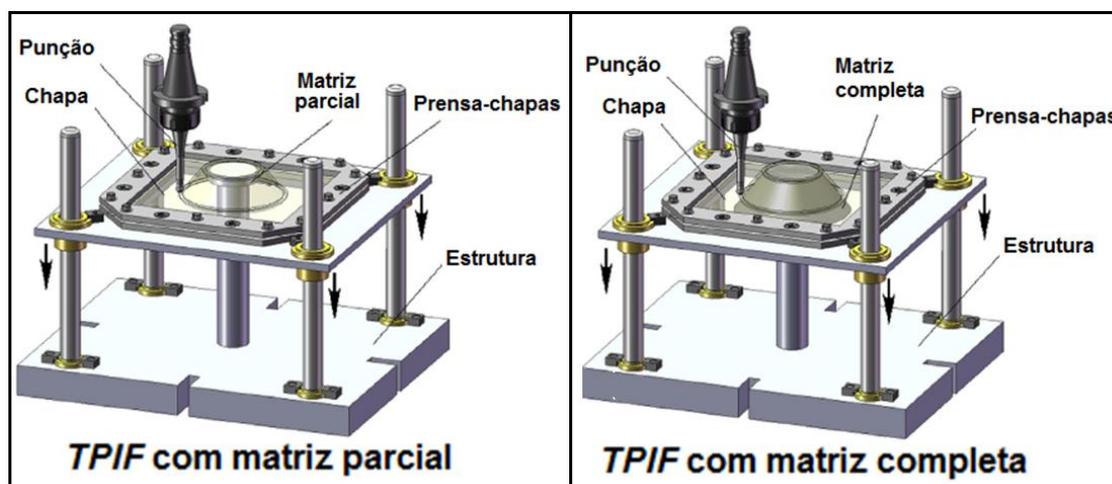


Figura 5 – Estampagem incremental de dois pontos, com matriz parcial e com matriz completa.

Adaptado de Silva e Martins (2014).

Segundo Emmens, Sebastiani e Boogaard (2010), o processo *TPIF* foi patenteado por Matsubara em 1994, em um período no qual a estampagem incremental foi objeto de muitos desenvolvimentos. Em 1999, Amino e Matsubara desenvolveram um equipamento dedicado ao processo *TPIF*; em 2003 Okada e colaboradores da Hitachi Ltd agregaram um dispositivo de aquecimento para minimizar o retorno elástico decorrente do processo; em 2002 Tuominen propôs o uso de robôs industriais na estampagem incremental; em 2004 Amino e Matsubara utilizaram o processo de estampagem incremental em peças previamente deformadas por estiramento; empresas do setor automotivo também lançaram patentes relacionadas ao processo, como: Honda (2002), BMW (2004) e Daimler-Chrysler (2006). O processo *TPIF* pode ser classificado como positivo ou negativo. Quando a modalidade é positiva o prensa-chapas se move acompanhando os incrementos do punção (ATTANASIO et al., 2008).

Na Figura 6 é mostrado um esquema com matriz positiva, evidenciando o deslocamento vertical do prensa-chapas e matriz negativa, onde não há o deslocamento do prensa-chapas. O processo com matriz positiva apresenta menor desvio geométrico, porém necessita de prensa-chapa móvel para acompanhar o deslocamento do punção, o que aumenta a complexidade do ferramental.

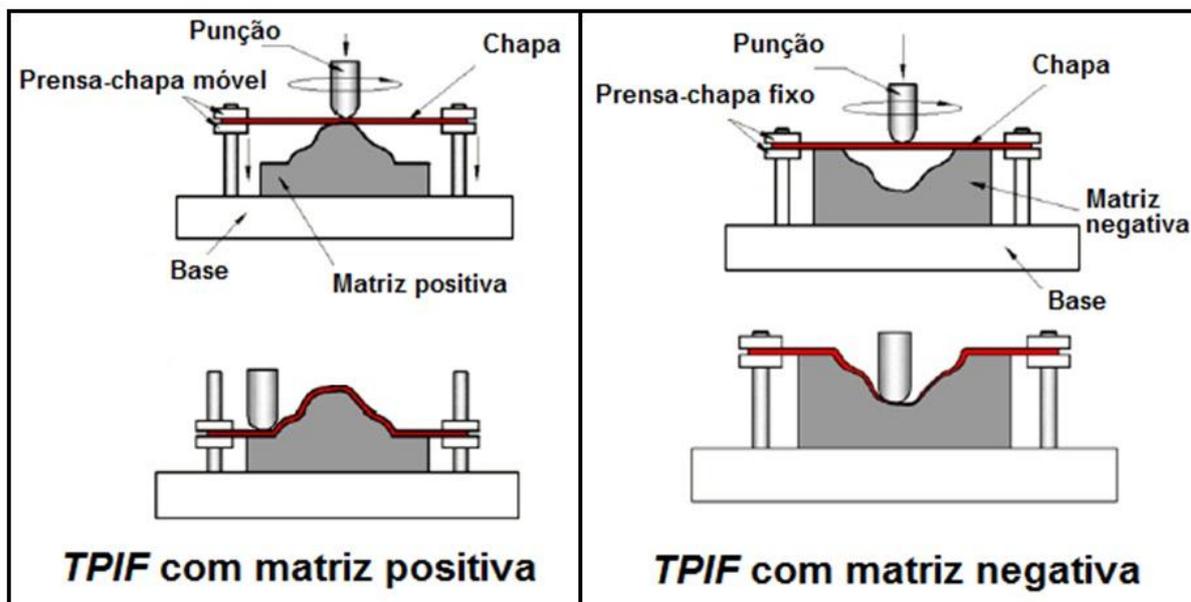


Figura 6 – Estampagem incremental de dois pontos, com matriz positiva e com matriz negativa.

Adaptado de Fritzen et al. (2011).

3.5. Variantes da estampagem incremental

Outros processos são descritos na literatura como variantes da estampagem incremental, nos quais são utilizados equipamentos ou técnicas para melhorar a estampabilidade e diminuir o retorno elástico ou vencer qualquer outra limitação.

Na estampagem incremental de duplo lado (*DSIF – double-sided incremental forming*), dois punções, um de cada lado da chapa, atuam em conjunto dando maior flexibilidade ao processo e permitindo a produção mais precisa de geometrias complexas sem a necessidade do uso de matrizes, como ocorre no processo *TPIF* (LU et al., 2015). Na Figura 7 pode ser vista uma representação do processo *DSIF*, indicando as ferramentas e os esforços atuantes.

Valoppi et al. (2016) propõe um processo híbrido de estampagem incremental de duplo lado auxiliada eletricamente (*E-MDSIF – electrically-assisted mixed double-sided incremental forming*), no qual uma corrente elétrica circula entre as duas ferramentas com a finalidade de aumentar a temperatura da chapa e conseqüentemente melhorar sua estampabilidade, conforme esquema mostrado na Figura 8.

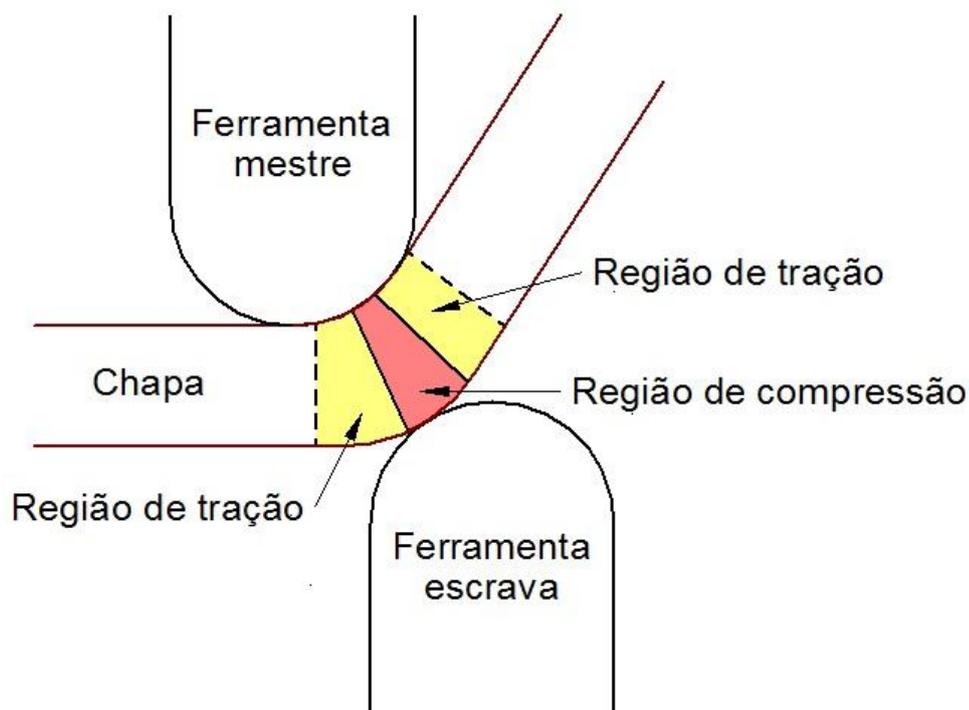


Figura 7 – Estampagem incremental de duplo ponto.
Adaptado de Lu et al. (2015).

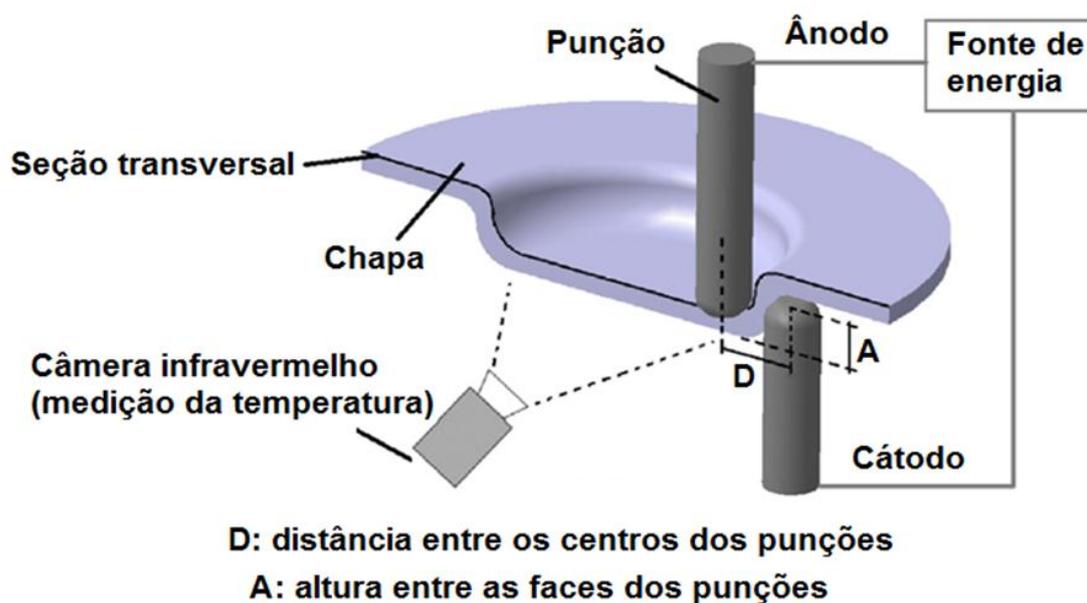


Figura 8 – Estampagem híbrida de duplo ponto auxiliada eletricamente.
Adaptado de Valoppi et al. (2016).

Lehtinen, Väisänen e Salmi (2015) utilizaram um *laser* localizado sob da chapa como fonte de aquecimento, para aumentar a ductilidade do material de modo a obter uma melhor estampabilidade.

Ambrogio e Gagliardi (2014) destacam a importância do aquecimento para conformação de materiais classificados como ligas leves, especialmente as ligas de titânio. Os autores citam que o aquecimento pode ser obtido por meio de um *laser* ou de um circuito elétrico e analisam o aquecimento por meio do aumento das velocidades de rotação e avanço do processo, dispensando equipamentos externos. O aquecimento da chapa aumenta a estampabilidade e ajuda a reduzir o retorno elástico, mas dependendo da temperatura também pode provocar recuperação, recristalização e crescimento de grãos no material (PALUMBO; BRANDIZZI, 2012).

Segundo Lu et al. (2014), muitos esforços foram feitos ao longo dos anos para superar os fatores limitantes da estampagem incremental, como o desenvolvimento de um processo híbrido de estiramento e estampagem incremental assimétrica, o uso do processo *DSIF* e o aquecimento por *laser*.

Outras técnicas podem ser usadas para minimizar os desvios decorrentes da estampagem incremental de ponto simples, por exemplo: um suporte elástico sob a chapa; um sistema de água pressurizada para suportar a chapa; múltiplas ferramentas atuando simultaneamente nos dois lados da chapa; estampagem intercalada do lado superior e inferior da chapa com o auxílio de um eixo rotativo (MICARI; AMBROGIO; FILICE, 2007). Algumas técnicas utilizadas para minimizar os fatores limitantes do processo *SPIF* são mostradas na Figura 9.

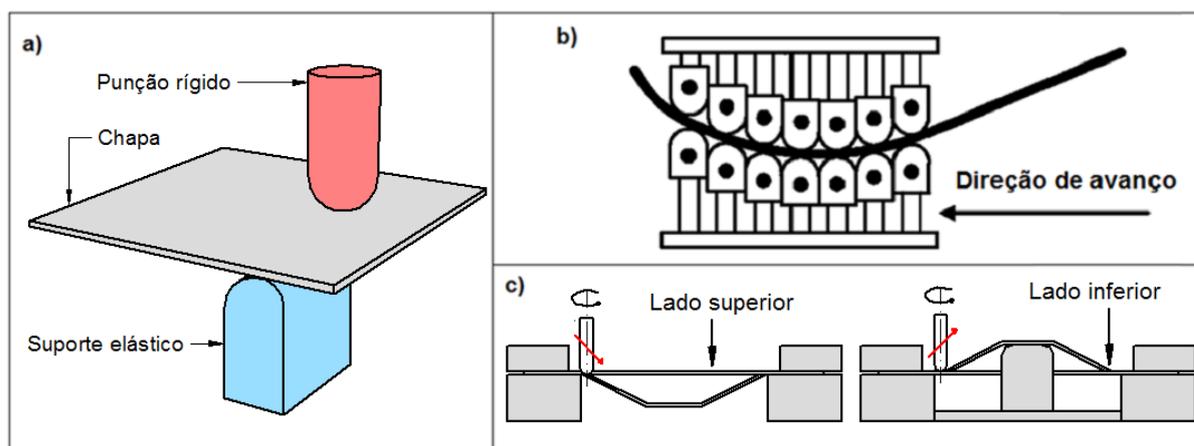


Figura 9 – Técnicas para minimizar os fatores limitantes na estampagem incremental de ponto simples.

- a) Uso de suporte elástico, b) Múltiplas ferramentas, c) Estampagem intercalada. Adaptado de Micari, Ambrogio e Filice (2007).

3.6. Principais parâmetros do processo SPIF

Os parâmetros do processo e o caminho da ferramenta (percurso realizado pelo punção) são os pontos principais da estampagem incremental, estando intimamente ligados à estampabilidade obtida neste. (JESWIET et al., 2005).

Segundo Micari, Ambrogio e Filice (2007), diversos parâmetros influenciam a mecânica do processo e afetam a sua precisão, tais como:

- Diâmetro da ferramenta;
- Velocidade de rotação da ferramenta;
- Velocidade de avanço da ferramenta;
- Incremento vertical entre passes;
- Uso de lubrificação;
- Material da chapa;
- Encruamento do material;
- Anisotropia do material;
- Geometria da peça;
- Ângulo de parede e
- Espessura da chapa.

Nos tópicos a seguir têm-se conclusões de estudos sobre alguns destes parâmetros, principalmente os que são abordados nesta pesquisa.

3.6.1. Velocidade de rotação da ferramenta

Durante et al. (2009) analisaram a influência da velocidade de rotação da ferramenta na estampagem incremental utilizando como geometria das peças troncos de pirâmide, em chapas de alumínio de 1,0 mm de espessura, punção hemisférico e rotações de 0, 200, 600 e 800 rotações por minuto (rpm). Os resultados mostraram que as rotações utilizadas não influenciaram significativamente no aquecimento e no acabamento superficial da chapa. Palumbo e Brandizzi (2012) utilizaram uma liga de titânio em seus experimentos para avaliar a rotação da ferramenta, combinando o processo com aquecimento elétrico. Uma

chapa com espessura de 1,0 mm foi utilizada, as rotações variaram entre 800 e 1600 rpm e incrementos verticais entre 0,5 e 1,0 mm. De acordo com os autores, a precisão final e a qualidade superficial foram afetadas pela variação das rotações, os valores máximos das deformações aumentaram de acordo com o aumento da rotação e a redução de espessura praticamente não se alterou.

Valores de rotação de até 15000 rpm são encontrados no trabalho de Uheida, Oosthuizen e Dimitrov (2017), no qual os autores fizeram uma investigação da influência da temperatura, gerada pela rotação da ferramenta, na estampagem de chapas de titânio com 0,8 mm de espessura. Foram obtidas as seguintes conclusões: o aumento da temperatura e a redução das forças de conformação estão associados ao aumento da rotação; rotações de até 2500 rpm facilitam a deformação; rotações acima de 4000 rpm não indicam melhoria de estampabilidade, mas podem levar ao surgimento de defeitos como: superfície mais rugosa, falha precoce e deterioração da ferramenta e da chapa no ponto de contato.

Visando determinar o estado da arte, Mcanulty, Jeswiet e Doolan (2017) analisaram oito trabalhos sobre a influência da velocidade de rotação. Ligas de alumínio, aços e polímeros foram testadas com rotações variando entre 0 e 25000 rpm. A análise dos resultados mostra, em geral, que o aumento de rotação provoca uma melhor estampabilidade da chapa e algumas conclusões falam em otimizar a rotação para se obter melhoria da estampabilidade. Nos trabalhos em que a qualidade superficial foi investigada, notou-se uma piora desta com o aumento da rotação.

3.6.2. Velocidade de avanço da ferramenta

A influência da velocidade de avanço da ferramenta na estampabilidade do material não é conclusiva, com resultados que indicam que o avanço pode melhorar ou piorar a estampabilidade. Este parâmetro parece variar conforme o material, exigindo análises mais específicas e se conclui em todos os casos que o tempo de processo depende diretamente do avanço (MCANULTY; JESWIET; DOOLAN, 2017).

No trabalho de Cruz et al. (2015), o avanço teve pouca influência na variação da espessura da chapa e a melhor rugosidade obtida se deu com uso de lubrificante e menores avanços. Segundo Ambrogio e Gagliardi (2014), a otimização do avanço e do incremento vertical são importantes para a produtividade, a qualidade superficial e a melhora da estampabilidade.

Para Golabi e Khazaali (2014) o avanço da ferramenta não teve efeito considerável na capacidade de deformação de chapas de aço inoxidável 304. Uheida, Oosthuizen e Dimitrov (2017) concluíram que mudanças no avanço não influenciam consideravelmente o calor gerado pela ferramenta ou a estampabilidade da chapa.

3.6.3. Incremento vertical

O incremento vertical representa o quanto a ferramenta deforma a chapa em cada passe, sendo responsável, em conjunto com o avanço, pela taxa de deformação do material. Diversos trabalhos indicam que menores valores de incremento vertical favorecem o aumento dos limites de estampagem, em contrapartida o tempo de processo cresce consideravelmente (MCANULTY; JESWIET; DOOLAN, 2017).

Em sua pesquisa, Attanasio et al. (2008) trataram da otimização do caminho da ferramenta, utilizando duas estratégias: incremento vertical constante e incremento vertical variável. O incremento constante tem a desvantagem de marcar a chapa a cada transição, além de produzir uma qualidade superficial ruim para valores de incremento superiores a 0,5 mm. No incremento variável, é definida uma altura de crista (distância entre dois passes) e o incremento é recalculado para evitar que este valor seja excedido, fazendo com que o tempo do processo cresça consideravelmente.

Na Figura 10 pode-se ver a altura de crista descrita e um exemplo das trajetórias com incremento constante e variável.

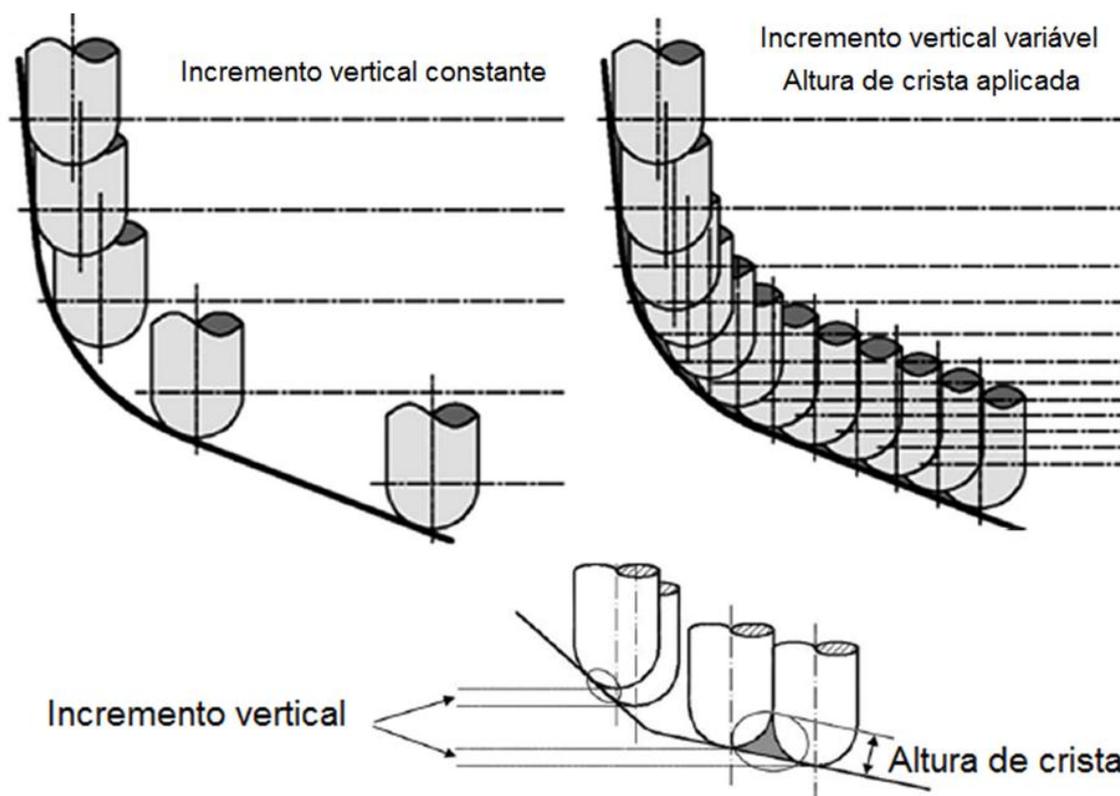


Figura 10 – Incrementos verticais.
Adaptado de Attanasio et al. (2008).

Cavaler et al. (2010) utilizaram aço inoxidável 304 com 0,5 mm de espessura em seus experimentos e incrementos verticais de 0,4 mm, 0,6 mm e 0,8 mm e diferentes ferramentas. Seus resultados mostraram uma redução da rugosidade com o aumento do incremento. Golabi e Khazaali (2014) também conduziram experimentos com chapas de aço inoxidável 304 com 0,5 mm de espessura e incrementos de 1,0 mm, 1,5 mm e 2,0 mm e concluíram que o aumento do incremento vertical reduz a profundidade máxima estampada e aumenta a rugosidade da chapa, esta conclusão é contraditória com os resultados de Cavaler et al. (2010), contudo pode ter havido influência de outros parâmetros, como ângulo de parede, velocidade de avanço e diâmetro da ferramenta, que eram diferentes.

O desenvolvimento de um modelo preditivo para a rugosidade em chapas de aço no processo de estampagem profunda foi proposto por Kurra et al. (2015), considerando três valores distintos para cada um dos parâmetros: diâmetro da ferramenta, ângulo de parede, avanço da ferramenta, tipo de lubrificante e incrementos. Uma tabela com a configuração ideal dos fatores para se obter a menor rugosidade indicou o menor valor de incremento como o mais adequado.

Chapas de latão com espessuras de 0,5 mm, 0,7 mm e 1,0 mm foram utilizadas por Fritzen et al. (2017) e duas ferramentas distintas, duas geometrias diferentes e incrementos de 0,1 mm, 0,5 mm e 1,0 mm foram testados, formando diferentes configurações. Os resultados mostraram que incrementos menores conduzem a ângulos e profundidades de estampagem maiores.

Os valores de avanço da ferramenta e incremento vertical encontrados na literatura são bem distintos, assim como os valores de rotação da ferramenta. A Tabela 1 mostra os valores destes parâmetros descritos por Mcanulty, Jeswiet e Doolan (2017) em um estudo que avaliou 35 trabalhos sobre o processo *SPIF*, nos quais se utilizaram principalmente ligas de alumínio e polímeros e também aços, titânio e cobre.

Tabela 1 - Parâmetros obtidos da literatura.

Parâmetro	Menores valores	Valores intermediários	Maiores valores
Avanço (mm/min)	373 / 600	2100 / 2437	4000 / 4500
	1000 / 1200	2540 / 2600	5000 / 500000
	1270 / 1500	3000 / 3674	
Rotação (rpm)	0 / 40 / 100	1000 / 1250 / 2000	6000 / 7000
	200 / 250 / 500	2500 / 3000	8000 / 10000
	600 / 700	4000 / 5000	20000 / 25000
Incremento (mm)	0,0508 / 0,08	0,5 / 0,6	1,3 / 1,4 / 1,48
	0,127 / 0,1 / 0,2	0,75 / 0,78 / 0,8	1,5 / 1,8 / 2
	0,3 / 0,36 / 0,4	0,9 / 1,0 / 1,2	2,54 / 3

3.6.4. Lubrificação

A utilização de lubrificantes tais como óleos e graxas diminuem o atrito da ferramenta com a chapa e conseqüentemente os desgastes dos materiais. Porém nem sempre podem ser utilizados, pois há processos em que o calor gerado pelo atrito é suficiente para inflamar estes lubrificantes, gerando problemas ambientais e de segurança (JESWIET et al., 2005).

Segundo Jawale et al. (2016), alguns estudos mostram que a lubrificação pode melhorar a qualidade superficial e que em outros pode piorar a estampabilidade. Em seus estudos, cinco lubrificantes de diferentes composições e viscosidades foram usados no processo *SPIF* com chapas de cobre e todos apresentaram menor rugosidade em comparação a um ensaio realizado sem lubrificação.

A análise da influência da lubrificação em chapas de alumínio foi realizada em um estudo de Cawley, Adams e Jeswiet (2013) no qual foi utilizado um óleo sintético em conjunto com ferramentas de diferentes perfis e dimensões. No início de alguns ensaios houve desprendimento de pequenos fragmentos da chapa, gerados pelo atrito com a ferramenta e prejudicando a superfície; porém, nos passes seguintes uma distribuição mais uniforme do óleo lubrificante ajudou a minimizar o desgaste e melhorar a qualidade superficial.

Na ausência de lubrificantes ou ainda associado a estes pode-se utilizar ferramentas com esferas rolantes em sua extremidade, com o objetivo de reduzir o atrito. Experimentos com estas ferramentas mostraram bons resultados no acabamento superficial da chapa nos estudos feitos por Lu et al. (2014) e Durante et al. (2010).

3.6.5. Geometria da peça e ângulo de parede

Na estampagem incremental de ponto de simples é possível produzir peças simétricas ou assimétricas, geometrias com linhas retas ou curvas e perfis multifacetados. Exemplos destas várias geometrias podem ser vistos na Figura 11.

A determinação de ângulos máximos de parede é o foco de muitos estudos e para isso geometrias simples são utilizadas nos ensaios, como um tronco de cone ou um tronco de pirâmide. Outras geometrias, um pouco mais complexas, porém muito utilizadas são as que apresentam ângulo de parede variável (*VWA – variable wall angle*), nas quais o ângulo aumenta conforme a profundidade e nestes casos troncos de cone ou pirâmide também são utilizados como geometria de referência (JESWIET et al., 2015) (MCANULTY; JESWIET; DOOLAN, 2017).

Fritzen et al. (2011) utilizaram chapas de latão (70%Cu – 30%Zn), com espessura de 0,5 mm. A geometria de um tronco de pirâmide foi adotada para avaliar o comportamento dos diferentes ângulos para uma mesma altura, mostrando que o material fratura em menores profundidades conforme o aumento do ângulo de parede.



Figura 11 – Formatos feitos por SPIF.

Adaptado de Jeswiet et al. (2005).

Oleksik (2014) estudou a influência dos ângulos de parede e da geometria da peça na redução de espessura de chapas de aço com 0,4 mm de espessura para estampagem profunda. O autor utilizou a geometria de troncos de pirâmide com ângulos de parede de 45°, 55° e 60° concluindo que os valores máximos de redução de espessura ocorrem depois de uma profundidade crítica e o valor desta depende fortemente do ângulo de parede.

Simulações por elementos finitos e investigação experimental em liga de alumínio foram conduzidas por Arfa, Bahloul e Belhadjsalah (2012), com o intuito de analisar a influência dos parâmetros do processo. Os autores utilizaram geometria de troncos de pirâmide e de cone com ângulos de 50° , 60° e 70° e concluíram que: i) quanto maior for o ângulo de parede maior será a redução da espessura; ii) com o aumento do ângulo a espessura atinge um valor mínimo e poderá ocorrer a fratura e iii) existe um ângulo máximo limite que pode ser estampado em um único passe.

Hussain, Gao e Dar (2007) realizaram dois experimentos distintos com uso do processo *SPIF*, para avaliar a estampabilidade de chapas de alumínio. Inicialmente, uma série de geometrias de troncos de cone e de pirâmide foram produzidas com ângulos de parede fixos. Avaliaram também geometrias de troncos de cone com ângulo de parede variável (*VWACF* – *variable wall angle conical frustum*), desenhadas a partir de quatro diferentes geratrizes. A estampabilidade dos experimentos com ângulos de parede fixos foi menor do que a obtida com ângulos de parede variáveis.

Nos experimentos de Cawley, Adams e Jeswiet (2013), o programa *CAM* utilizado para criar as trajetórias não foi capaz de gerar as posições corretamente, pois os perfis das ferramentas eram diferentes dos comumente utilizados e o programa se baseia na compensação do raio de ferramentas com perfil hemisférico ou plano. Os autores utilizaram uma geometria baseada nos testes com *VWACF* e a nomearam como ângulo de parede variável em degrau (*VWAST* – *variable wall angle step test*). O perfil consiste de pequenas seções de ângulos constantes, mas que variam e crescem conforme a profundidade, conforme pode ser visto na Figura 12a.

A geometria utilizada por Jawale et al. (2016) é do tipo *VWACF*, mas com um ângulo de entrada de 30° seguido por um perfil variável que atinge 90° na base. Nesta pesquisa foram utilizadas chapas de cobre e os ângulos foram calculados pela comparação da profundidade da fratura com o modelo criado em *CAD*, atingindo ângulos máximos superiores a 75° , conforme pode ser visto na Figura 12b.

Uheida, Oosthuizen e Dimitrov (2017) também utilizaram uma geometria *VWACF* com ângulo de entrada de 30° , porém com ângulo final de 75° (Figura 12d)

e chapas de liga de titânio. O prensa-chapas utilizado dividiu a chapa em quatro setores, proporcionando melhor aproveitamento do material.

Fritzen et al. (2016 e 2017) realizaram experimentos com chapas de latão (65%Cu – 35%Zn) utilizando geometria de troncos de cone e de pirâmide, ambos com ângulos de parede variável (Figura 12c). Foram feitas 15 combinações variando a espessura da chapa, o diâmetro da ferramenta e os incrementos verticais. Para a maior parte dos experimentos, os maiores ângulos e profundidades foram obtidos com a geometria de tronco de pirâmide e com os menores valores de incrementos verticais. Diferentes geometrias do tipo VWA são mostradas na Figura 12.

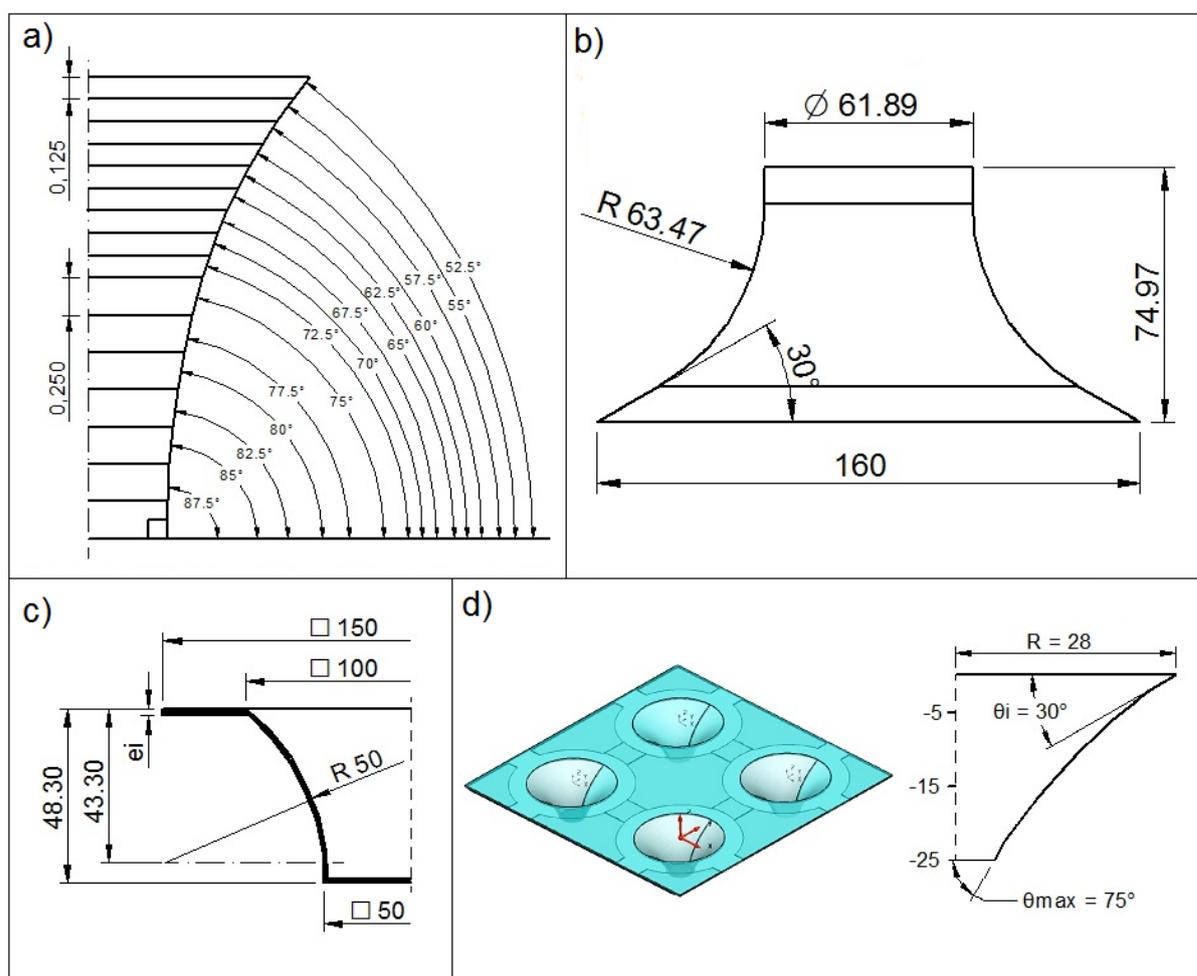


Figura 12 – Geometrias com ângulo de parede variável (VWA).

Adaptado de a) Cawley, Adams e Jeswiet (2013), b) Jawale et al. (2016), c) Fritzen et al. (2016), d) Uheida, Oosthuizen e Dimitrov (2017).

3.6.6. Espessura da chapa

Uma das maneiras de se prever a redução de espessura que a chapa sofrerá durante a estampagem incremental é utilizar a chamada “lei do seno” ou sua equivalente “lei do cosseno”, que relacionam a espessura inicial e a espessura final com o ângulo de parede (HIRT et al., 2004) (SILVA et al., 2009a). Contudo, este cálculo não é preciso e aplicável a todas as situações, pois a chapa sofre um dobramento no início da geometria seguido de uma redução de espessura (JESWIET et al., 2005) (MICARI; AMBROGIO; FILICE, 2007). A lei do cosseno é dada pela Equação 1.

$$e_f = e_i \cdot \cos\Phi \quad (1)$$

Onde:

e_f = espessura final

e_i = espessura inicial

Φ = ângulo de parede

A fim de uma melhor compreensão dos parâmetros da Equação 1, tem-se a Figura 13.

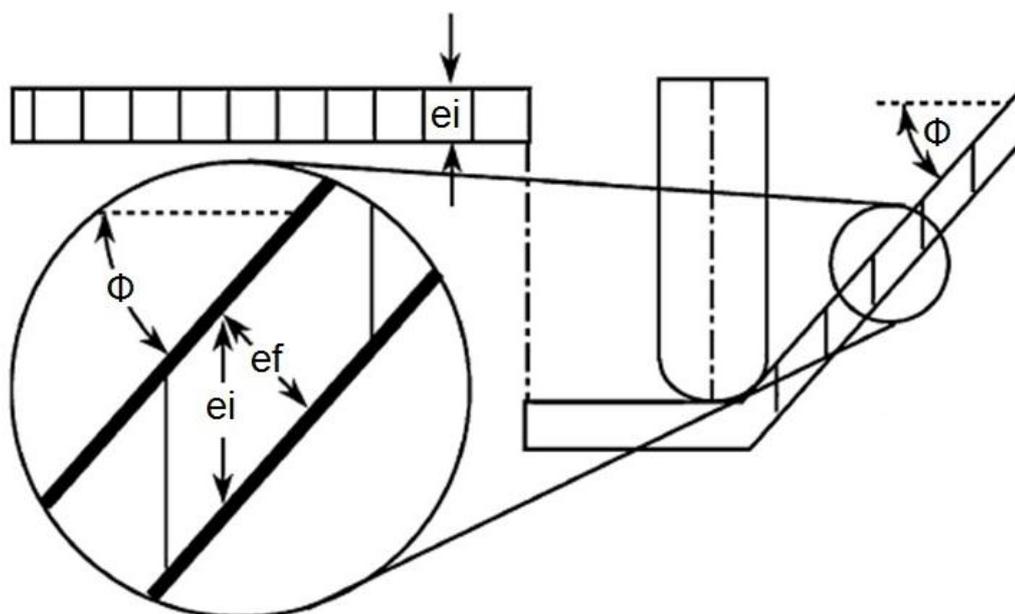


Figura 13 – Lei do cosseno.
Adaptado de Jeswiet et al. (2015).

A partir da lei do cosseno fica evidente que quanto maior o ângulo menor será a espessura e um ângulo de 90 graus resultará, teoricamente, numa espessura igual a zero. Para se aumentar o ângulo máximo de parede é necessário partir de chapas com espessuras maiores (ARFA; BAHLOUL; BELHADJSALAH, 2012).

Com base em seus experimentos, Oleksik (2014) concluiu que no processo *SPIF* a lei do seno só é respeitada com relação ao máximo valor de redução de espessura e que este valor não é alcançado no início, mas apenas em uma determinada profundidade. O autor ainda cita que tanto a distribuição da redução de espessura ao longo do perfil quanto o valor máximo desta redução são dependentes do diâmetro da ferramenta e do incremento vertical, e o aumento da complexidade da trajetória da ferramenta também implica no aumento da redução de espessura.

Diversos estudos concluíram que o cisalhamento ao longo da espessura da chapa, o mecanismo de deformação que atua na redução da espessura da chapa, e o dobramento localizado ao redor da ferramenta são fatores que contribuem para a fratura do material. No processo *SPIF* a redução da espessura é resultado de uma carga progressiva, deformações acumuladas e tensões irregulares geradas pelo contato do punção com a chapa (SALEM et al., 2016) (ARFA; BAHLOUL; BELHADJSALAH, 2012).

Três regiões distintas são identificadas nas peças estampadas: uma região de dobramento que ocorre próxima à fixação do prensa-chapas, uma região de grande redução de espessura que pode ocasionar fratura em ângulos acentuados e uma região de estabilidade de espessura que apresenta valores mais próximos aos obtidos pela lei do cosseno (JACKSON; ALLWOOD, 2009) (SALEM et al., 2016). Na Figura 14 é mostrado o comportamento de uma chapa durante o processo *SPIF*, indicando as regiões de dobramento, redução e estabilidade da espessura.

Silva et al. (2009b) utilizaram em seus experimentos com processo *SPIF* chapas unidas por soldagem por fricção e mistura. Neste processo de soldagem uma ferramenta rotativa se move ao longo da junta a ser soldada provocando aquecimento, deformação plástica e mistura dos materiais, unindo-os. Com este processo pode-se produzir peças a partir de chapas com diferentes espessuras e materiais dissimilares reduzindo desta forma o peso dos conjuntos. O comportamento apresentado por estas chapas no processo *SPIF* foi similar ao de

chapas com espessura constante, não apresentando predominância de falha na região soldada.

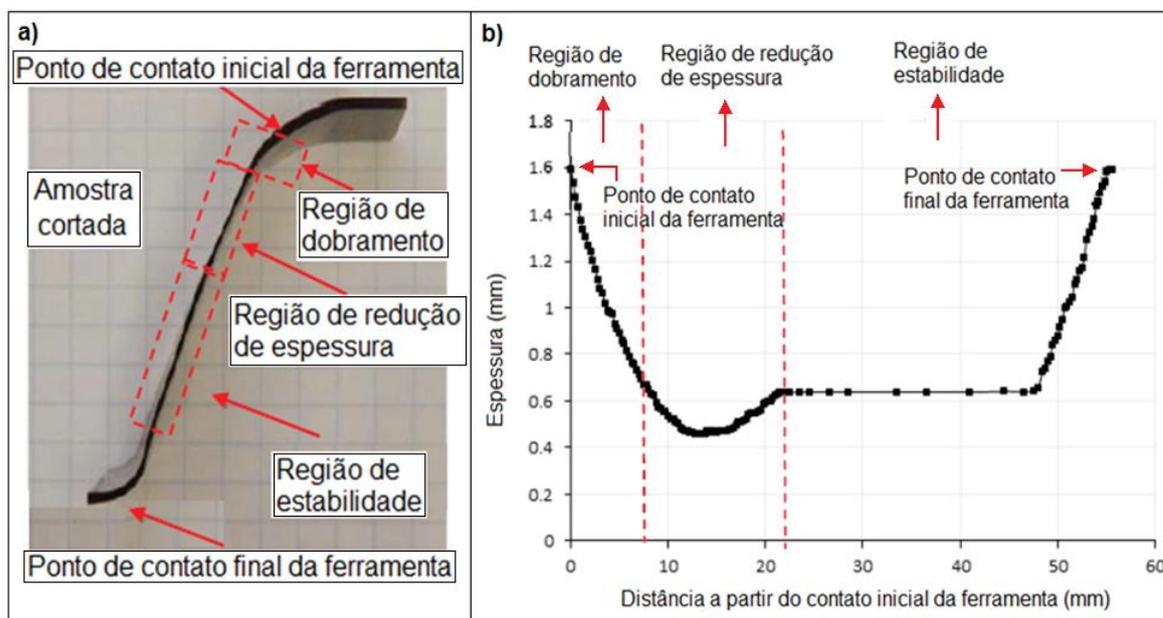


Figura 14 – Comportamento da espessura da chapa durante o processo *SPIF*.

a) Amostra de um tronco de cone, b) Variação da espessura ao longo do perfil.

Adaptado de Salem et al. (2016).

3.7. Equipamentos e ferramentas

Uma das vantagens da estampagem incremental é a possibilidade de se utilizar centros de usinagem convencionais de 3 eixos para realizar o processo, sendo este equipamento o mais utilizado no processo *SPIF* (EMMENS; SEBASTIANI; BOOGAARD, 2010). Máquinas com um maior número de eixos são citadas nos trabalhos de Jawale et al. (2016), que utilizaram um centro de usinagem de 5 eixos, e Cooper, Rossie e Gutowski (2017), que utilizaram um centro de usinagem de 8 eixos.

Os principais motivos que viabilizaram o uso de centros de usinagem no processo *SPIF* estão diretamente ligados às características das próprias máquinas: altas velocidades (JESWIET et al., 2005) (MICARI; AMBROGIO; FILICE, 2007); geração do caminho da ferramenta por CNC (SILVA et al., 2009a); rigidez considerável (SOUSA et al., 2014); planejamento e execução com auxílio de programas CAD/CAM (ARFA; BAHLOUL; BELHADJSALAH, 2012).

Apesar da grande aplicabilidade dos centros de usinagem no processo *SPIF* existe limitação no uso destes equipamentos, especialmente os de 3 eixos, na produção de geometrias complexas. Alguns equipamentos dedicados ao processo foram desenvolvidos para contornar esta limitação, enquanto que outros estudos foram conduzidos com o uso de robôs com 6 graus de liberdade (SOUSA et al., 2014).

Sousa et al. (2014) desenvolveram um equipamento dedicado à estampagem incremental de ponto simples, chamado de SPIF-A (A de Aveiro - Universidade de Aveiro em Portugal), com as seguintes características: rigidez, flexibilidade, com 6 graus de liberdade, sistema para medição de esforços e deformações e uma grande área de trabalho para atender pesquisas acadêmicas e componentes industriais. Os experimentos de Fritzen et al. (2017) foram realizados neste equipamento (SPIF-A), como pode ser visto na Figura 15.

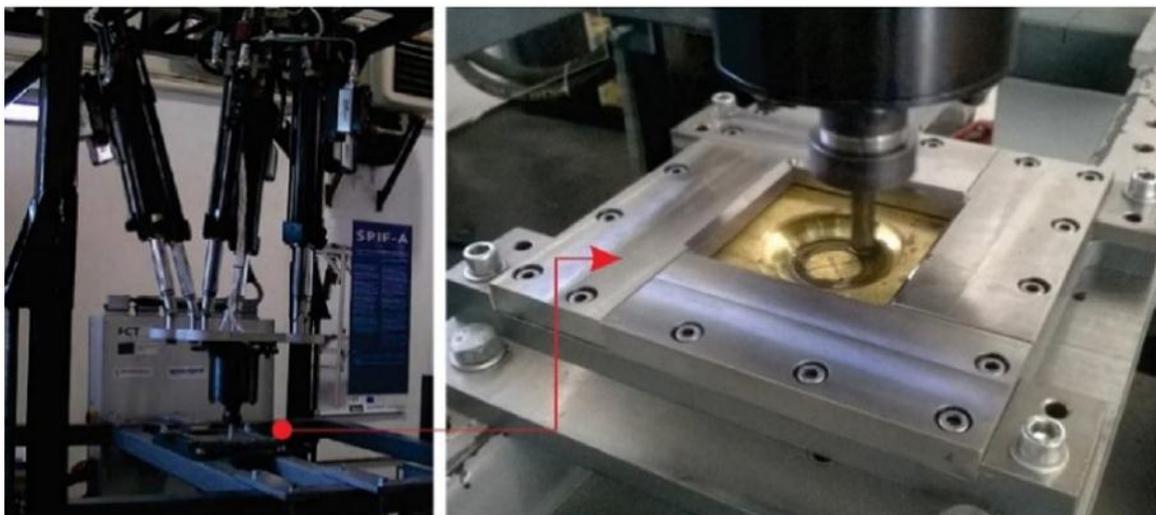


Figura 15 – Máquina dedicada ao processo *SPIF* da Universidade de Aveiro.
Adaptado de Fritzen et al. (2017).

Na Figura 16 pode ser vista uma máquina dedicada à estampagem incremental desenvolvida pela Amino Corporation e utilizada por Li et al. (2014). A máquina tem capacidade de estampagem em uma área de 2100x550 mm e utiliza um sistema de controle numérico.

Oleksik (2104) escolheu um robô com seis graus de liberdade para conduzir seus experimentos; o robô em questão pode indicar, em qualquer momento do processo, os deslocamentos, as deformações e a redução da espessura, dados que

só poderiam ser obtidos após o processo caso fosse utilizado um centro de usinagem convencional. O robô citado e a montagem do experimento podem ser vistos na Figura 17.



Figura 16 – Máquina dedicada a *ISF* da Amino Corporation.
(LI et al., 2014).



Figura 17 – Robô utilizado em *SPIF*.
(OLEKSIK, 2014).

A programação do caminho da ferramenta (trajetória percorrida pelo punção) na estampagem incremental de ponto simples é equivalente ao passe de acabamento vertical de um processo de usinagem, porém sem a remoção de material (MCANULTY; JESWIET; DOOLAN, 2017).

A ferramenta pode percorrer uma trajetória descontínua (contorno convencional) ou contínua (espiral) e associada ao incremento vertical influencia a geometria final. A definição desta trajetória pode se tornar difícil em geometrias complexas ou com pequenos valores de incremento vertical, e o uso de programas *CAD/CAM* se faz necessário (ARFA; BAHLOUL; BELHADJSALAH, 2012). As trajetórias contínua e descontínua podem ser vistas na Figura 18.

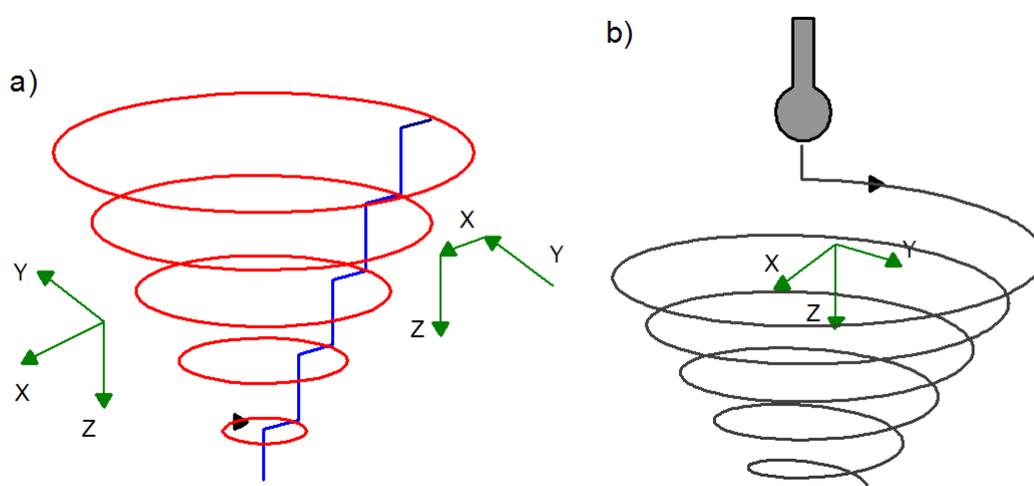


Figura 18 – Trajetórias da ferramenta.

a) Descontínua, b) Contínua.

Adaptado de Arfa, Bahloul e Belhadjsalah (2012).

Na estratégia contínua, o contato da ferramenta com a chapa é constante e o incremento vertical é incrementado ao longo do passe. Esta estratégia foi utilizada nos trabalhos de: Fritzen et al. (2011), resultando em maior ângulo de parede em comparação com a descontínua; Oleksik (2014), com a justificativa de apresentar melhor distribuição das deformações principais; Golabi e Khazaali (2014), em sua revisão obtendo distribuição de espessura mais suave que outros métodos; Cruz et al. (2015), apresentando aumento de rugosidade em comparação com a descontínua, mas tendo melhor continuidade no uso sem lubrificação. É possível mesclar as características destas trajetórias e obter métodos mais adequados, contudo diversos autores não citam a estratégia adotada em seus experimentos.

O trabalho de Lu et al. (2013) apresentou um algoritmo para gerar o caminho da ferramenta de acordo com limites específicos do processo. Os autores citam que existe pouco desenvolvimento na estratégia de geração do caminho da ferramenta e comparam o algoritmo proposto com três casos de estudo do processo *ISF*. Os resultados sugerem que o caminho proposto deforma a chapa de forma diferente, causando uma nova distribuição de espessura e melhores resultados na precisão geométrica, qualidade superficial e no tempo do processo.

A estampagem incremental, em comparação ao processo de estampagem convencional com matrizes, utiliza ferramentas pequenas e de baixo custo (JESWIET et al., 2015), com diâmetros variando entre 2,5 mm e 50 mm (MCANULTY; JESWIET; DOOLAN, 2017). As ferramentas são normalmente feitas em aço com durezas superiores ao material a ser conformado (SILVA et al., 2009b) (CAVALER et al., 2010) (SILVA e MARTINS, 2014) (KURRA et al., 2015) (VALOPPI et al., 2016) (FRITZEN et al., 2017). Os perfis mais comuns das extremidades das ferramentas (Figura 19) são: a hemisférica, a com esfera rolante e a plana com cantos arredondados. O tamanho e o formato da ferramenta influenciam a mecânica do processo, pois a área de contato com a chapa afeta o atrito e os esforços. (MCANULTY; JESWIET; DOOLAN, 2017).

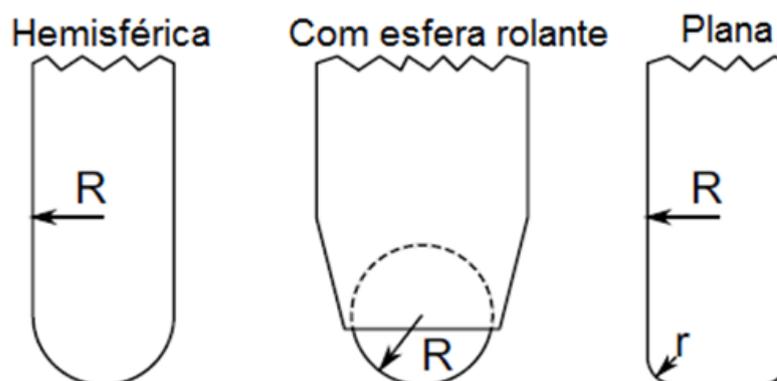


Figura 19 – Perfis de ferramentas.

Adaptado de Mcanulty, Jeswiet e Doolan (2017)

Ziran et al. (2009) estudaram o efeito do formato da ferramenta no perfil estampado, comparando uma hemisférica e uma plana. A ferramenta plana produziu um perfil mais preciso com melhoria da estampabilidade da chapa, além de requerer menores esforços de conformação e podendo ser aplicada a sulcos com cantos mais agudos. O estudo ainda cita que pequenos raios em ferramentas planas melhoram a

estampabilidade e que o aumento do diâmetro da ferramenta não causa piora da estampabilidade.

Cawley, Adams e Jeswiet (2013) realizaram testes com ferramentas de vários perfis (Figura 20a), sendo que os perfis plano e hemisférico apresentaram resultados já encontrados em trabalhos de outros pesquisadores e o perfil parabólico resultou em piora da estampabilidade, porém com aumento da qualidade superficial. Por meio dos resultados, os autores identificaram que uma área de contato reduzida ocasiona uma tensão mais localizada permitindo maior resistência à fratura. Por outro lado, este efeito resulta em maior reposicionamento de material, provocando um pior acabamento superficial. Alguns dos perfis de ferramentas utilizados na estampagem incremental podem ser vistos na Figura 20.

Na estampagem de chapas finas, Jeswiet et al. (2015) citam, com base na experiência adquirida nos últimos anos, que tem sido recomendado o uso de ferramentas maiores, esféricas com diâmetro de 12,7 mm ou maior ou planas. Para alumínio, aço galvanizado e aço inoxidável, os autores recomendam o uso de ferramentas planas que oferecem boa combinação de estampabilidade e baixa rugosidade. O estudo também aponta a diminuição do ângulo de parede com o aumento do diâmetro da ferramenta.

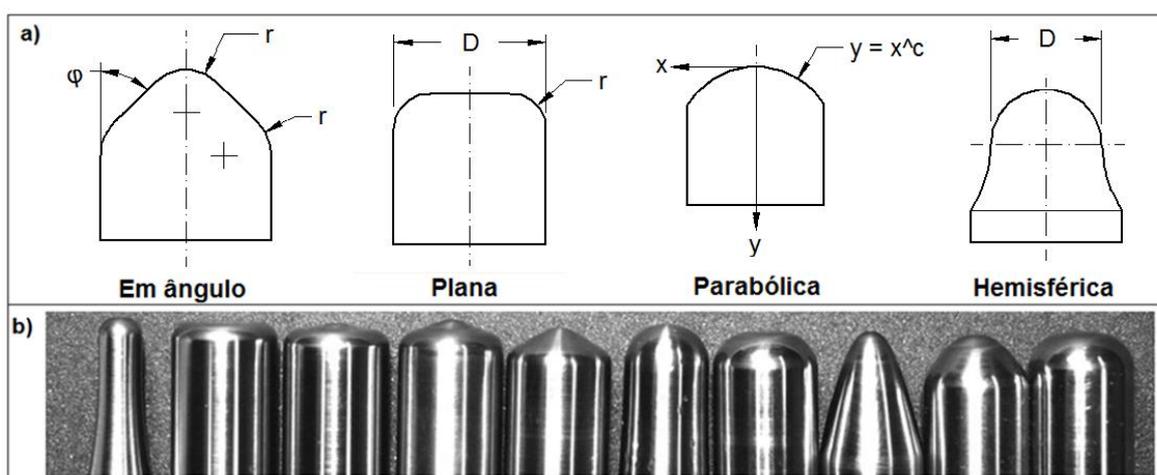


Figura 20 – Ferramentas para estampagem incremental.

Adaptado de a) Cawley, Adams e Jeswiet (2013), b) Jeswiet et al.(2015).

Li et al. (2014) utilizaram uma ferramenta com esfera rolante de 25,4 mm de diâmetro e ferramentas hemisféricas de 10, 20 e 30 mm de diâmetro, concluindo que a ferramenta com esfera rolante produz uma melhor qualidade de superfície do que

as demais e que existe um aumento da profundidade para ocorrência da fratura com o aumento dos diâmetros das ferramentas hemisféricas.

Um problema crítico no uso de ferramentas com esferas rolantes é a limitação do ângulo máximo de parede, causado pela interferência do corpo da ferramenta com a peça, especialmente quando utilizada em máquina de 3 eixos (Figura 21a). Para contornar este problema, Lu et al. (2014) desenvolveram uma nova ferramenta com esfera rolante oblíqua combinada com um algoritmo para geração do caminho da ferramenta (Figura 21b). Neste mesmo estudo os autores analisaram o atrito de uma ferramenta rolante e uma rígida, obtendo como resultados: melhor superfície, menor esforço de conformação, menor cisalhamento na espessura e melhor estampabilidade com a ferramenta com esfera rolante. Ferramentas com esferas rolantes e uma ferramenta rígida podem ser vistas na Figura 21c.

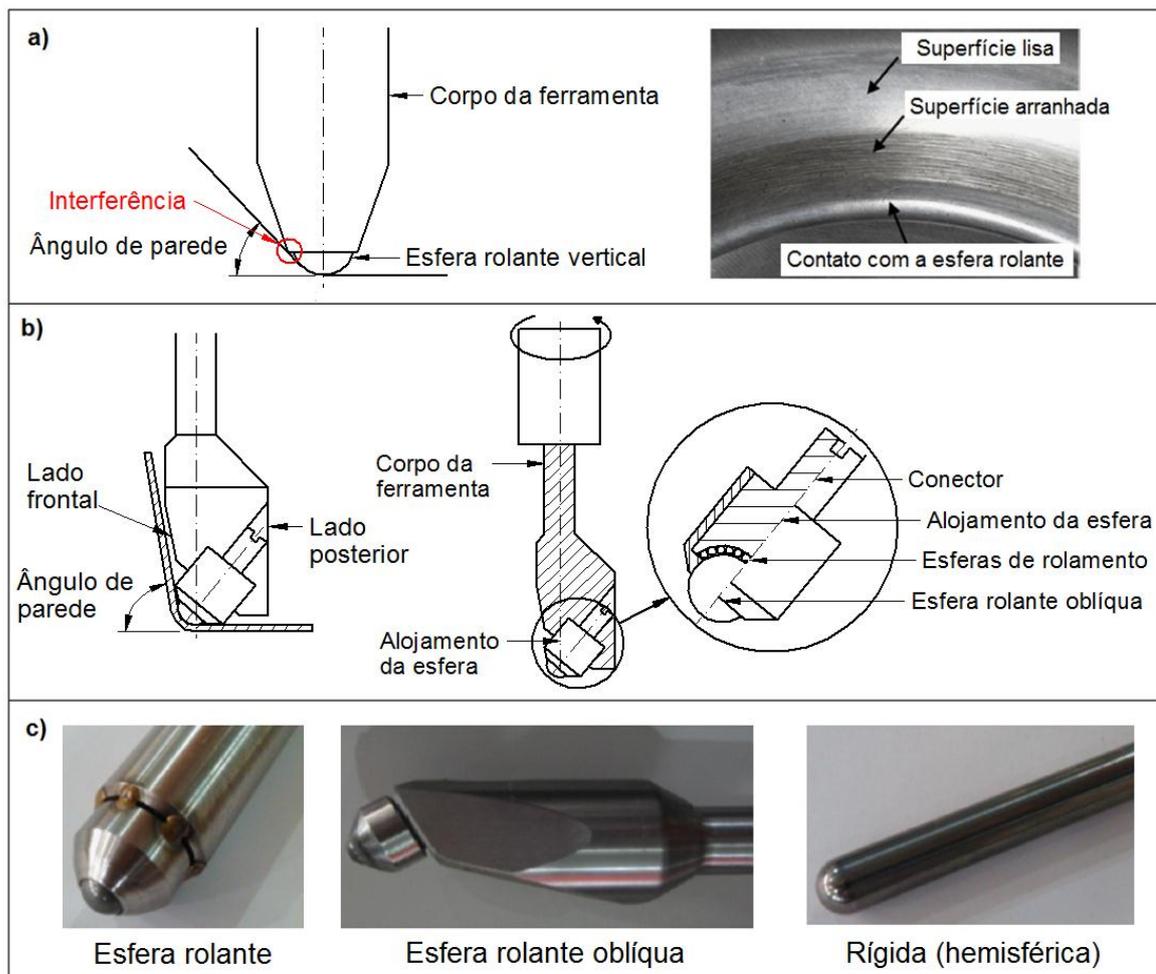


Figura 21 – Ferramentas com esferas rolantes.

- a) Contato da ferramenta com a superfície, b) Montagem oblíqua da esfera, c) Ferramentas rolante e rígida. Adaptado de Lu et al. (2014).

3.8. Medições e análises

Medir os erros da geometria estampada é o ponto de partida na busca de um processo mais preciso. Alguns dos métodos utilizados para este propósito foram descritos por Micari, Ambrogio e Filice (2007):

- Escaneamento por *laser*: uma nuvem de pontos é obtida por meio de feixes de *laser* e comparada com a geometria projetada. O sistema é rápido e não requer contato com a peça, mas tem alto custo e depende de uma superfície com opacidade adequada;
- Sistema de sondagem: dispositivos capazes de medir as coordenadas de um ponto no espaço. Possuem um menor custo, porém a precisão é menor;
- Máquinas de medição de coordenadas: sistemas avançados de medição. São muito precisas, tem alto custo e requerem o posicionamento correto da peça.

Máquinas de medição de coordenadas foram citadas nos trabalhos de: Attanasio et al. (2008), para avaliar a precisão dimensional e a qualidade superficial de suas peças; Jackson e Allwood (2009), para medir pontos na superfície e a deformação de uma grade de linhas; Ziran et al. (2009), para medir o perfil estampado; Emmens, Sebastiani e Boogaard (2010), ao citar a medição de peças existentes para criação do modelo em *CAD* e produção pelo processo *ISF* de peças de reposição da empresa Honda; Lehtinen, Väisänen e Salmi (2015), para medir o ângulo de parede; Fritzen et al. (2017), para analisar as dimensões, o perfil geométrico e determinar a profundidade da fratura de seus experimentos.

O uso de um *scanner a laser* é descrito nos trabalhos de: Bertol et al. (2012) para avaliar o retorno elástico das chapas; Martínez-Romero et al. (2014), para obter um modelo computadorizado de uma peça estampada; Valoppi et al. (2016), para medir a precisão geométrica das peças estampadas.

Lehtinen, Väisänen e Salmi (2015) citam outro método para se avaliar o ângulo de parede, em que uma foto é tirada da peça estampada e exportada para um programa de modelamento (*CAD*), no qual são traçadas linhas paralelas aos lados da peça e o ângulo é obtido com os recursos do *CAD*.

Para a medição da espessura da chapa estampada diversos métodos são descritos na literatura. Hussain, Gao e Dar (2007) utilizaram um relógio comparador montado em uma base para medir a espessura da chapa (Figura 22a). Jackson e Allwood (2009) mediram a espessura, ao longo do perfil, com um paquímetro. Palumbo e Brandizzi (2012) utilizaram um sistema digital de correlação de imagem, que monitorou todo o experimento por meio de duas câmeras, e compararam o valor obtido com os adquiridos por meio de um microscópio ótico e uma ferramenta de análise de imagem. As medições foram realizadas em vários pontos do perfil estampado, apresentando boa conformidade entre os dois métodos. Lu et al. (2013) fizeram um escaneamento com um sensor de deslocamento a *laser* para obter o perfil da geometria e analisar as espessuras de suas amostras. Cruz et al. (2015) embutiram uma amostra cortada e analisaram a espessura da chapa por meio de micrografia (Figura 22b). Salem et al. (2016) cortaram amostras das peças e analisaram a espessura da chapa usando um sistema ótico, o perfil foi obtido com o programa ImageJ[®] e aferido com a chapa original para evitar erros de posicionamento da câmera. Al-Ghamdi e Hussain (2016) utilizaram um relógio comparador com resolução de 0,01 mm para medir a espessura das amostras e determinar os limites de fratura. Fritzen et al. (2017) utilizaram um micrômetro com resolução de 0,01 mm em suas medições. Dois métodos utilizados para a medição de espessura, por meio de um instrumento de medição e por micrografia, podem ser vistos na Figura 22.

Para validar a deformação e os mecanismos de fratura pode-se utilizar a gravação eletroquímica de uma grade de círculos (BORREGO et al., 2015) e após a estampagem a deformação do material é obtida pela medição das elipses formadas a partir destes círculos (LU et al., 2015). Esta técnica de gravação é realizada na parte inferior da chapa, sem contato com a ferramenta, e citada nos trabalhos de Silva et al. (2009a), Bertol et al. (2012), Al-Ghamdi e Hussain (2016), Jawale et al. (2016) e Fritzen et al. (2017). A medição das elipses pode ser feita com uma escala graduada (BERTOL et al., 2012) ou por meio de um estereoscópio (FRITZEN et al., 2017), de modo similar aos procedimentos adotados no ensaio de Nakazima.

Pode ser vista na Figura 23 a grade de círculos gravada em uma chapa, com destaque para as elipses formadas pela deformação e a fratura do material.

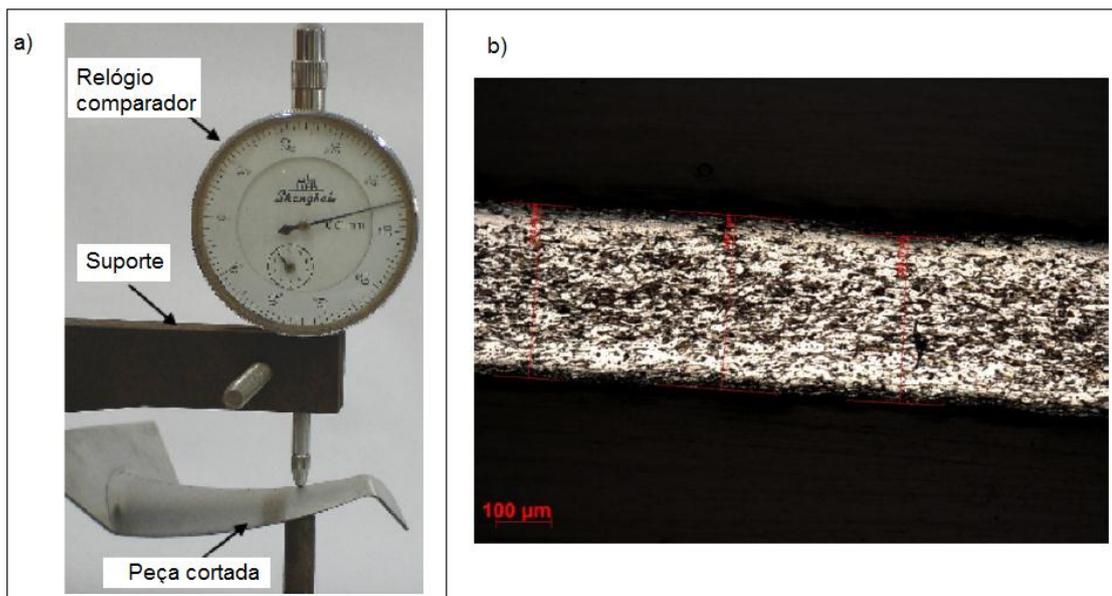


Figura 22 – Métodos para medição de espessura.

- a) Instrumento de medição, adaptado de Hussain, Gao e Dar (2007),
 b) Micrografia (CRUZ et al., 2015).

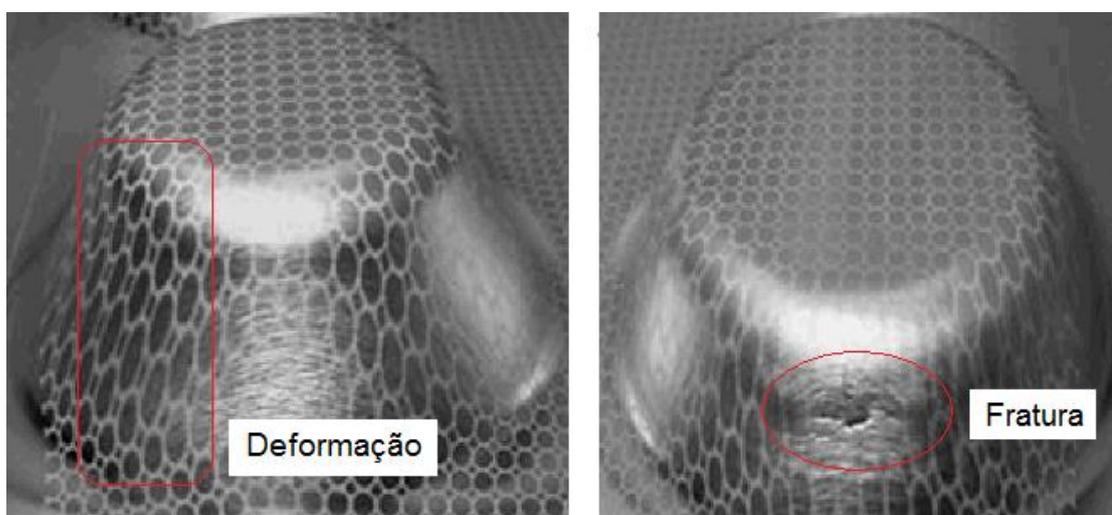


Figura 23 – Gravação eletroquímica para análise da deformação.

Adaptado de Fratini et al. (2004).

No ensaio de Nakazima também se utiliza a gravação eletroquímica para análise das deformações e confecção do diagrama limite de conformação (*FLD - forming limit diagram*). Este diagrama relaciona as deformações maior e menor dos círculos e permite que se plote a curva limite de conformação (*FLC - forming limit curve*), que auxilia na previsão de falhas em processos de estampagem (BORREGO et al., 2015) (FRITZEN et al., 2017). A deformação maior do círculo é aquela que

apresenta maior alongamento em um dado local da chapa e a deformação menor é aquela obtida na direção perpendicular à deformação maior (ASTM E2218, 2015). Análises envolvendo limites de conformação foram realizadas nos trabalhos de Park e Kim (2003), Fratini et al. (2004), Hirt et al. (2004) e Jeswiet et al. (2005).

Em geral, materiais dúcteis produzidos por processos convencionais de estampagem começam a falhar pelo início do empescoçamento localizado. Na estampagem incremental a deformação plástica do material ocorre ao redor do ponto de contato da ferramenta, por meio do dobramento e do cisalhamento. Estes efeitos localizados aumentam a estabilidade de deformação do material e suprimem o desenvolvimento do empescoçamento (BORREGO et al., 2015) (LU et al., 2015).

A curva limite de conformação tem aplicação inegável na estampagem convencional, mas se apresenta ineficiente na estampagem incremental por causa do comportamento do empescoçamento. Por isso para validar a estampabilidade no processo *SPIF* o uso de um limite de fratura de conformação (*FFL – fracture forming limit*) é recomendado (SILVA et al., 2009a) (FRITZEN et al., 2017).

Um diagrama limite de conformação pode ser visto na Figura 24, com a curva limite de conformação (*FLC*) obtida pelo ensaio de Nakazima e o limite de fratura de conformação (*FFL*) obtido pela estampagem incremental de ponto simples.

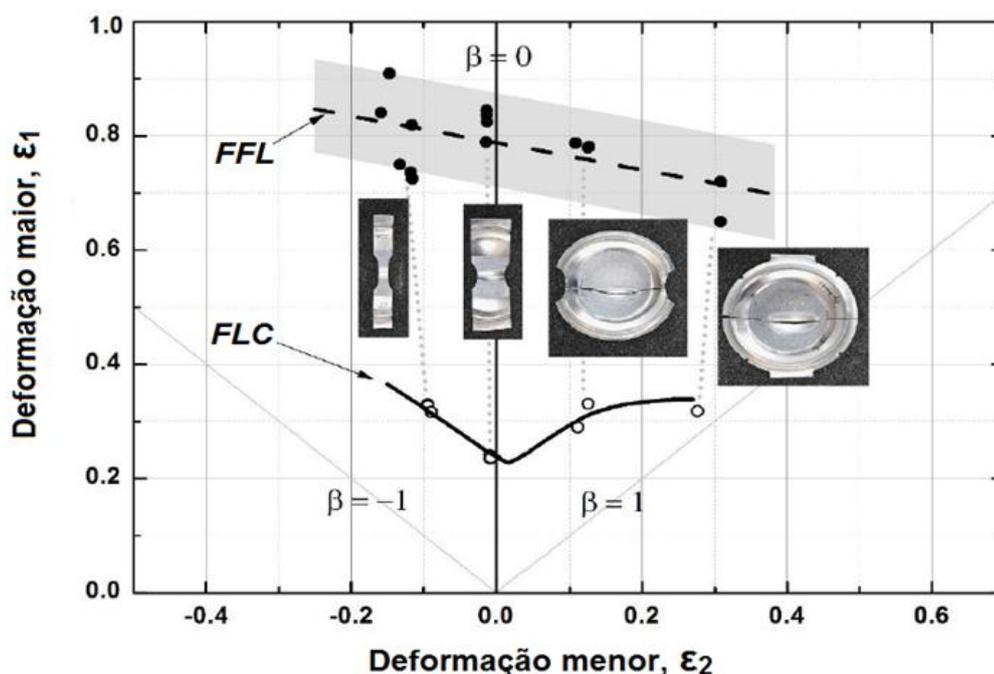


Figura 24 – Diagrama limite de conformação.

Adaptado de Borrego et al. (2015).

A avaliação da qualidade superficial da peça estampada pode ser feita numericamente por meio dos parâmetros de rugosidade ou por análise visual por comparação de imagens. Para a análise numérica da rugosidade muitos pesquisadores utilizaram rugosímetros (Figura 25a), por exemplo: Durante, Formisano e Langella (2010), Cavaler et al. (2010), Palumbo e Brandizzi (2012), Radu et al. (2013), Kurra et al. (2015) e Cruz et al. (2015). Para a análise visual da superfície, Li et al. (2014) e Al-Ghamdi e Hussain (2016) utilizaram um microscópio de varredura eletrônica (Figura 25b). Métodos menos usuais como o uso de um microscópio de força atômica (RADU et al., 2013), mostrado na Figura 22c e um perfilômetro ótico de superfície (VALOPPI et al., 2016) também são descritos.

Na Figura 25 podem ser vistos alguns dos métodos usados na avaliação da superfície.

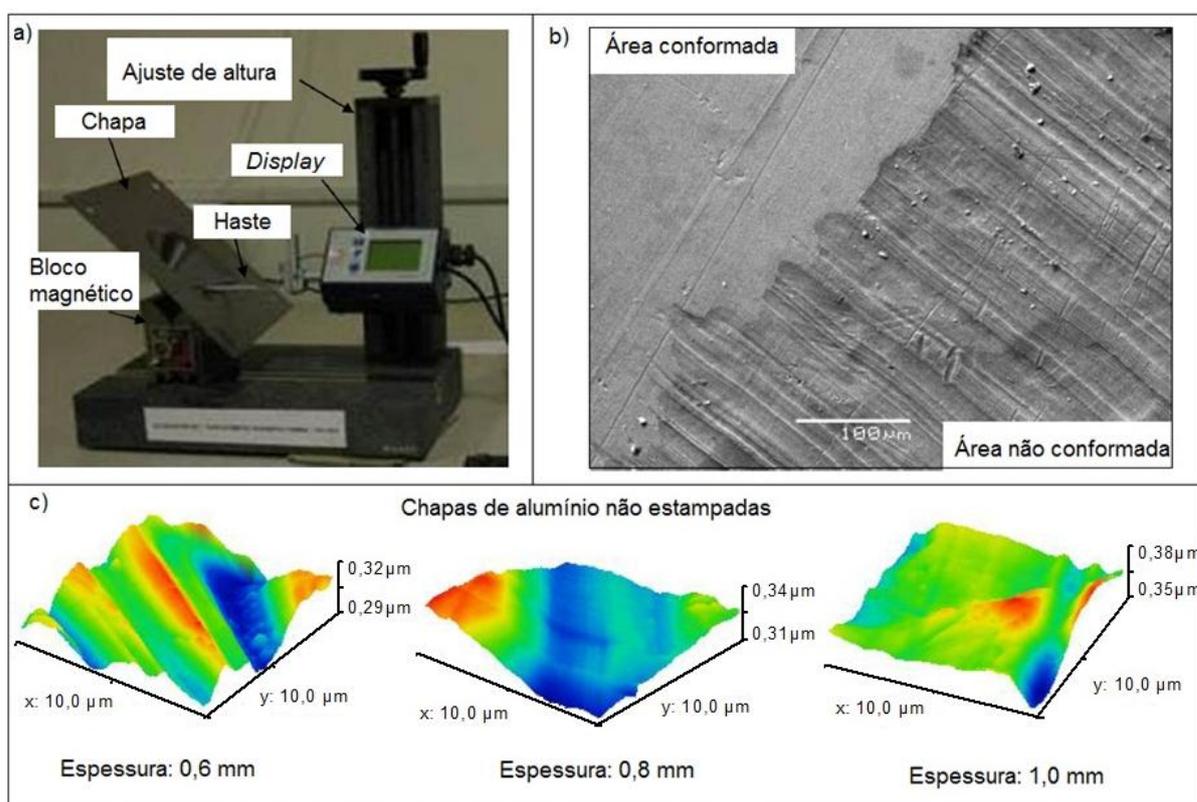


Figura 25 – Métodos de avaliação da superfície.

a) Rugosímetro, adaptado de Kurra et al. (2015),

b) Microscópio eletrônico de varredura, adaptado de Li et al. (2014),

c) Microscópio de força atômica, adaptado de Radu et al. (2013).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma a seguir (Figura 26) mostra as etapas de trabalho adotadas para os experimentos com o processo *SPIF*. O início do processo se dá com a seleção e preparação do material a ser utilizado, que envolve o corte e a furação para fixação, em seguida monta-se a base (prensa-chapas) e a ferramenta (punção) na máquina. Em paralelo define-se a geometria desejada para gerar o modelo em *CAD*, executar a programação em *CAM* e gerar o código *CNC*. Após montar e fixar a chapa na base, o processo é iniciado e executado até que haja fratura do material ou que se atinja o perfil desejado. Em ambos os casos deve-se coletar os dados fornecidos pela máquina: tempo decorrido e profundidade atingida. Os experimentos prosseguem enquanto há material disponível, caso contrário iniciam-se as análises das geometrias produzidas, que necessitam da desmontagem e do corte da chapa estampada.

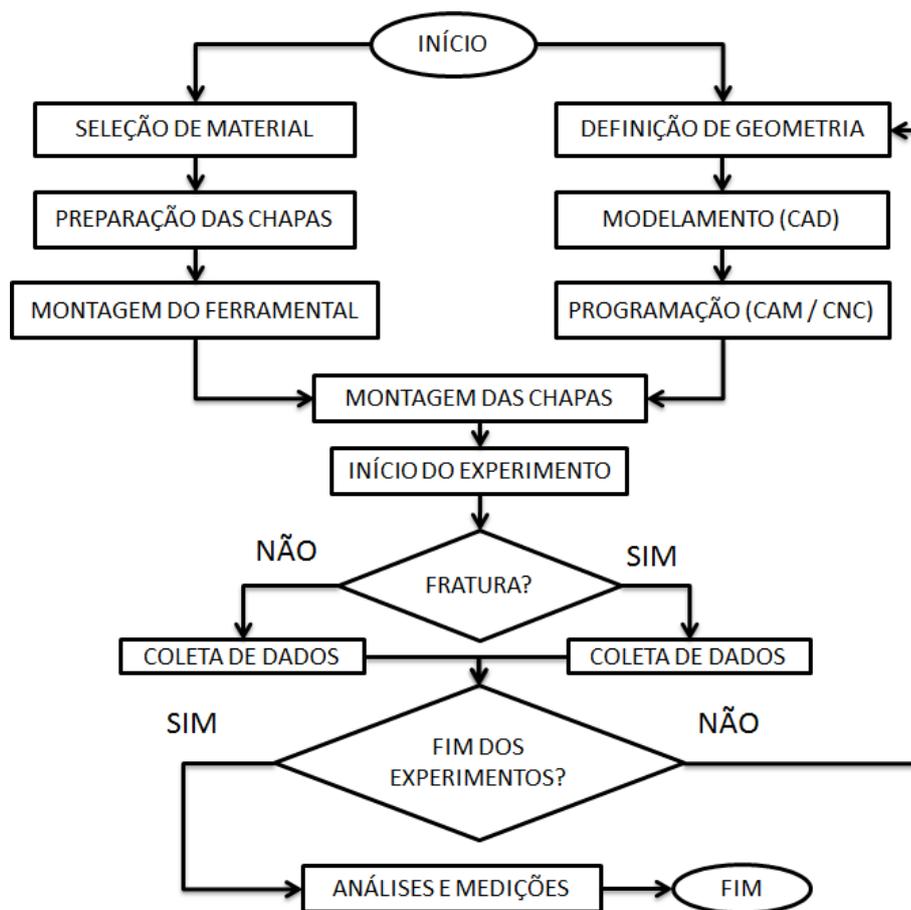


Figura 26 – Fluxograma para experimentos com *SPIF*.

Fonte: Próprio autor.

4.1. Caracterização das chapas

As chapas de latão ASTM B36 C260 e de cobre ASTM B152 C110, laminadas e recozidas, nas espessuras de 0,5 mm e 1,0 mm foram fornecidas pela empresa Termomecânica São Paulo S A.

Devido à pequena quantidade de material disponível, para caracterizar as chapas de latão e de cobre com espessura de 0,5 mm foi utilizado apenas o ensaio de dureza, escala Vickers (ASTM E92, 2017). As chapas de latão e de cobre com espessura de 1,0 mm foram caracterizadas por meio de ensaio de dureza, escala Vickers, ensaio de tração (ASTM E8, 2016), ensaio de Nakazima (ASTM E2218, 2015) e tamanho de grão (ASTM E112, 2013).

As composições químicas nominais do latão (ASTM B36, 2013) e do cobre (ASTM B152, 2013) são indicadas na Tabela 2 e as durezas medidas das chapas na Tabela 3.

Tabela 2 - Composição química nominal das chapas.

Adaptado de ASTM B36, 2013 e ASTM B152, 2013.

Material	Código	Cobre (%)	Zinco (%)	Outros elementos (%)
Latão	C260	68,5 – 71,5	Restante	Chumbo 0,07 (máx.) Ferro 0,05 (máx.)
Cobre	C110	99,90	Não especificado	Não especificado

Tabela 3 - Durezas das chapas.

Material	Dureza média
Latão 0,5 mm	64 HV
Latão 1,0 mm	71 HV
Cobre 0,5 mm	46 HV
Cobre 1,0 mm	63 HV

4.1.1. Ensaio de tração

Para o ensaio de tração foram utilizados 9 corpos de prova com medidas padronizadas (Figura 27) de cada material, sendo três em cada direção, conforme mostrado na Figura 28.

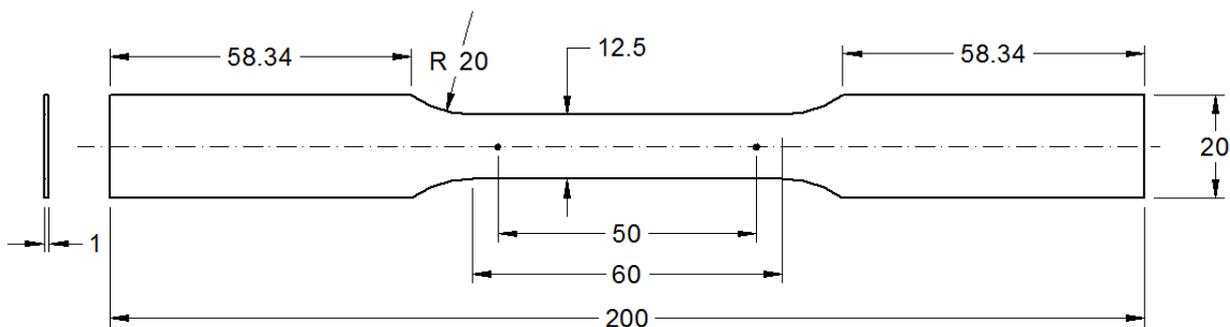


Figura 27 – Medidas dos corpos de prova para o ensaio de tração.

Adaptado de ASTM E8, 2016.

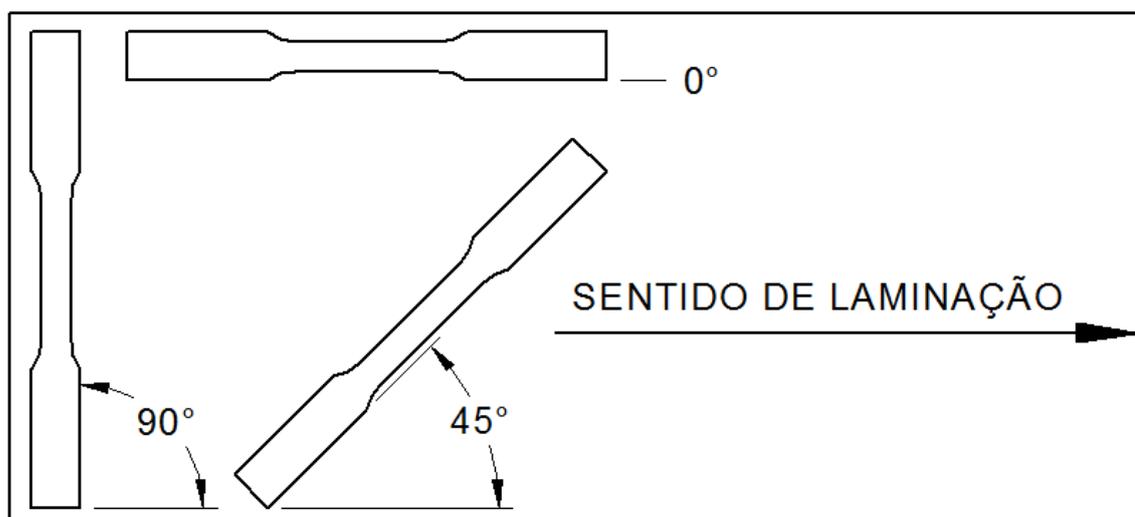


Figura 28 – Direção dos corpos de prova para o ensaio de tração.

Fonte: Próprio autor.

Os ensaios foram realizados numa máquina de ensaio de tração EMIC DL – 30000, com capacidade máxima de 300 kN. As curvas tensão x deformação foram geradas para todos os ensaios a fim de se obter os valores médios do limite de resistência à tração, da tensão de escoamento e do alongamento.

Os índices de anisotropia (r), para cada direção (0° , 45° e 90°), a anisotropia média (r_m) e a anisotropia planar (Δ_r) foram calculados com base na ASTM E517 (2018), conforme as Equações 2, 3 e 4:

$$r = \frac{\ln\left(\frac{l_i}{l_f}\right)}{\ln\left(\frac{c_f l_f}{c_i l_i}\right)} \quad (2)$$

$$r_m = \frac{(r_0 + 2r_{45} + r_{90})}{4} \quad (3)$$

$$\Delta_r = \frac{(r_0 + r_{90} - 2r_{45})}{2} \quad (4)$$

Onde:

l_i = largura inicial do corpo de prova (mm)

l_f = largura final do corpo de prova (mm)

c_i = comprimento inicial do corpo de prova (mm)

c_f = comprimento final do corpo de prova (mm)

r_0 , r_{45} , r_{90} = anisotropia conforme a direção

Os valores médios de limite de resistência à tração, tensão de escoamento e alongamento são mostrados na Tabela 4 (latão) e na Tabela 5 (cobre), para as chapas de 1,0 mm de espessura nas direções 0° (sentido de laminação), 45° (oblíquo à laminação) e 90° (transversal à laminação).

Tabela 4 – Valores médios obtidos para o latão no ensaio de tração.

Material	Direção	Tensão de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%)
Latão	0°	79	334	60
	45°	115	347	76
	90°	92	337	65

Tabela 5 – Valores médios obtidos para o cobre no ensaio de tração.

Material	Direção	Tensão de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%)
Cobre	0°	92	226	43
	45°	80	201	52
	90°	88	201	56

Considerando os valores médios, o latão apresentou na direção 45° os maiores valores de tensão de escoamento (115 MPa), limite de resistência à tração (347 MPa) e alongamento (76%). O cobre apresentou os maiores valores de tensão de escoamento (92 MPa) e limite de resistência à tração (226 MPa) na direção 0°, mas o maior alongamento (56%) se deu na direção 90°.

Utilizando-se as Equações 2, 3 e 4 foram calculados os valores de anisotropia para cada direção, anisotropia média e anisotropia planar, que podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 – Cálculo da anisotropia média e planar.

Material	Direção	l_i (mm)	l_f (mm)	c_i (mm)	c_f (mm)	r	r_m	Δ_r
Latão	0°	13,28	11,38	50,0	69,56	0,875	0,803	0,025
	45°	12,60	10,29	50,0	79,08	0,790		
	90°	13,05	11,28	50,0	70,14	0,756		
Cobre	0°	13,61	12,47	50,0	61,62	0,725	0,748	-0,147
	45°	13,66	12,09	50,0	65,52	0,822		
	90°	13,11	11,62	50,0	68,42	0,624		

O latão apresentou anisotropia média (r_m) de 0,803 e anisotropia planar (Δ_r) de 0,025. Para o cobre os valores obtidos foram 0,748 para a anisotropia média (r_m) e -0,147 para a anisotropia planar (Δ_r).

A anisotropia planar mede a variação do índice de anisotropia (r) conforme a direção no plano da chapa e um alto valor deste índice (r) indica que o material oferece grande resistência à deformação plástica na direção da espessura. Um

material totalmente isotrópico apresenta $r_m = 1$ e $\Delta_r = 0$ e materiais que combinam alto valor de r_m e baixo valor de Δ_r possuem ótima conformabilidade (DIETER, 1981) (ASM, 1996). De acordo com estas observações os materiais apresentaram valores de anisotropia adequados para processos de conformação.

4.1.2. Ensaio de Nakazima

O ensaio de Nakazima foi realizado na máquina de ensaio de tração EMIC DL-30000 e os procedimentos se basearam na ASTM E2218 (2015). O dispositivo e os corpos de prova utilizados estão conforme o trabalho de Araújo (2017) e a medição das deformações foi realizada com auxílio do programa ImageJ[®].

Para cada material foram utilizados 5 corpos de prova, mostrados na Figura 29, com espessuras de 1,0 mm, diâmetros de 100 mm e raios de alívio variando até 45 mm, respeitando as direções de laminação. O dispositivo de ensaio possui prensa-chapas para travamento do corpo de prova, sistema de fixação dos componentes e punção de raio 25 mm. Círculos de diâmetro 2,5 mm foram gravados na parte inferior dos corpos de prova e o óleo ISO VG 68 foi utilizado para lubrificação.

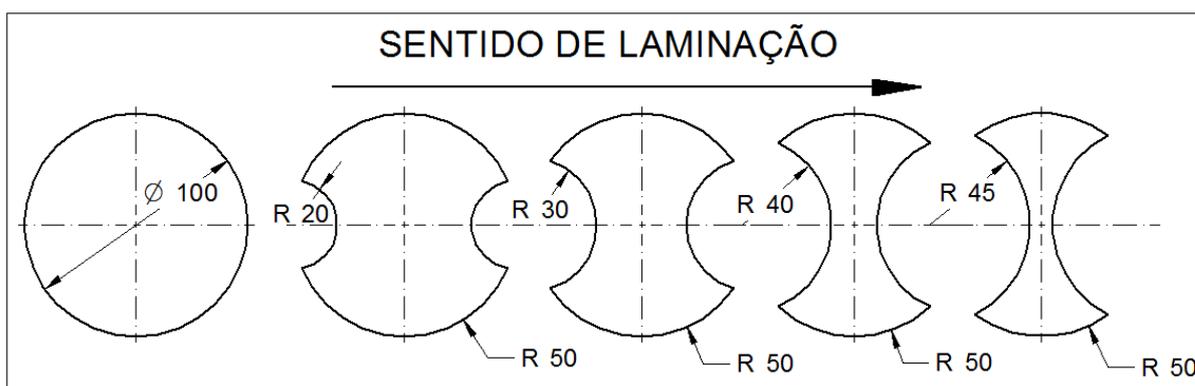


Figura 29 – Corpos de prova para o ensaio de Nakazima.

Fonte: Próprio autor.

A gravação dos círculos foi realizada com o gravador eletroquímico RB-200 Super da empresa Tecnigrav conforme as instruções do próprio fabricante.

O ensaio de Nakazima foi realizado com uma velocidade de deslocamento do punção constante de 5 mm/min até o momento da fratura do material. Para detecção da fratura foi programada uma queda de força de 40% no programa de controle da máquina como parâmetro. O aumento da força é constante durante o ensaio e quando ocorre a fratura existe uma variação desta força, quando a queda é de 40% do valor atual o controle da máquina encerra o ensaio. Na Figura 30 é mostrada a montagem do dispositivo e os corpos de prova ensaiados.

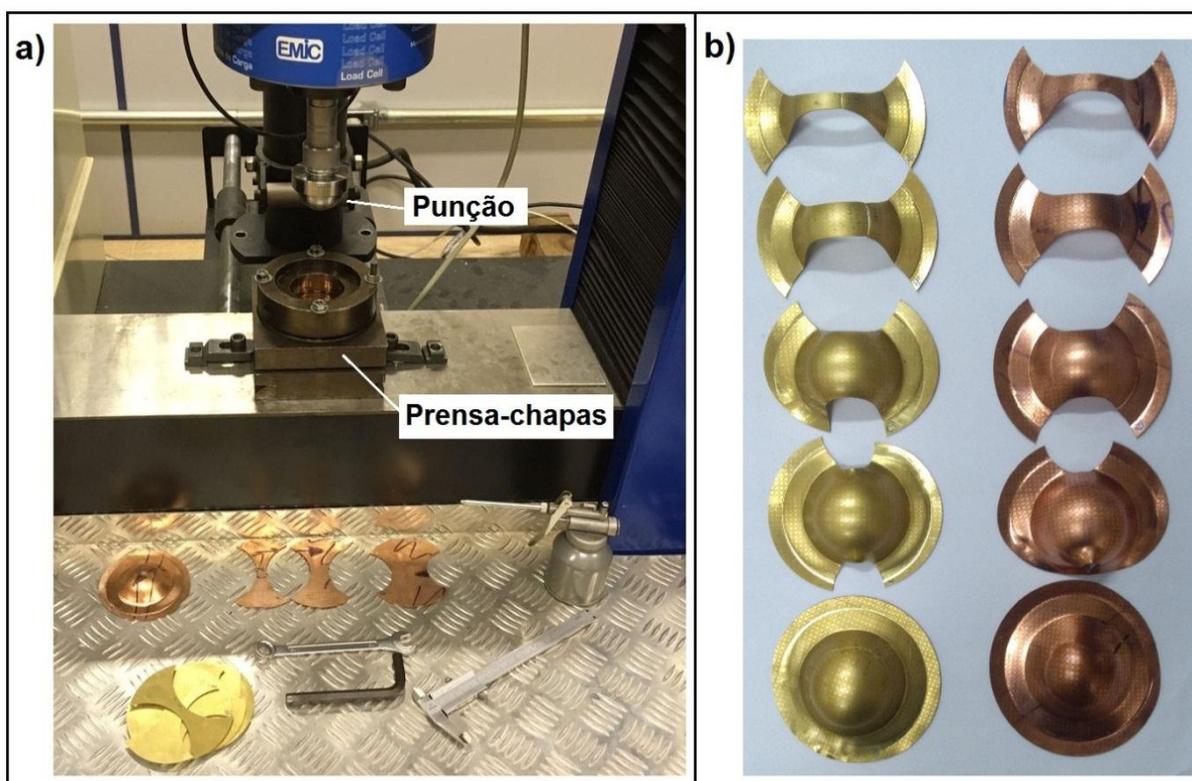


Figura 30 – Dispositivo para o ensaio de Nakazima.

a) Montagem do dispositivo, b) Corpos de provas ensaiados.

Fonte: Próprio autor.

Para a construção do diagrama limite de conformação e da curva limite de conformação as elipses criadas pela deformação dos círculos gravados foram medidas conforme os critérios da ASTM E2218 (2015) e de acordo com sua localização:

- Falha: elipses situadas no local da fratura do material;
- Margem: elipses situadas próximas ao local da fratura;
- Bom: elipses situadas distante do local de fratura.

As deformações maior (ε_1) e menor (ε_2) foram calculadas conforme as Equações 5 e 6:

$$\varepsilon_1 (\%) = \frac{(C_f - C_i)}{C_i} \times 100 \quad (5)$$

$$\varepsilon_2 (\%) = \frac{(L_f - L_i)}{L_i} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

C_i = comprimento inicial do círculo (mm)

C_f = comprimento final da elipse (mm)

L_i = largura inicial círculo (mm)

L_f = largura final da elipse (mm)

Devido ao tamanho das elipses geradas pela deformação dos círculos gravados a medição do comprimento e da largura finais de cada uma delas foi feita com o auxílio de imagens. Nestas uma escala foi adicionada próxima da elipse considerada para, com o auxílio do programa ImageJ[®], averiguar as dimensões finais. Na Figura 31 pode se ver uma das imagens usadas para medição, com a escala posicionada, a indicação das dimensões e os três tipos de elipses consideradas (falha, margem e bom).

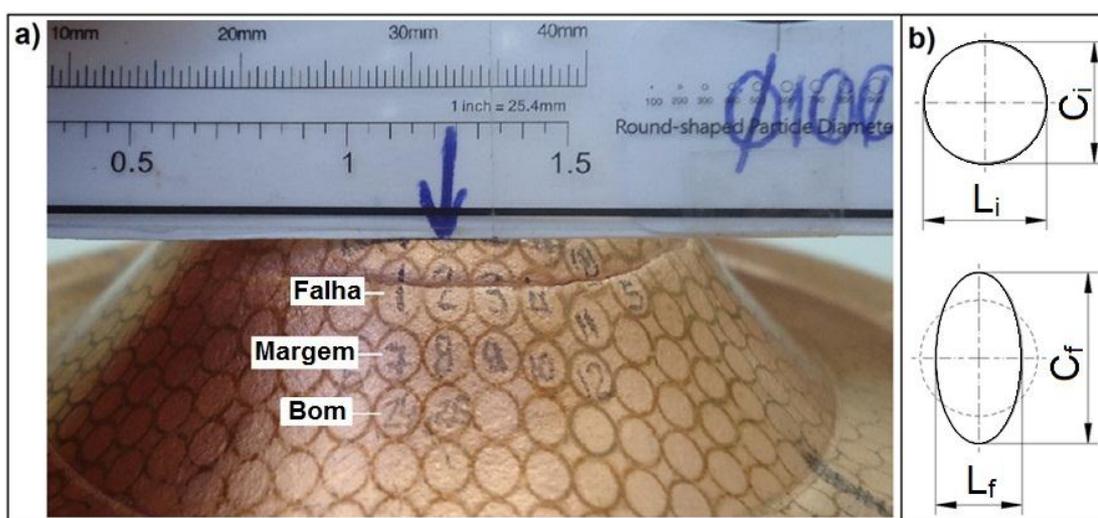


Figura 31 – Medição das deformações no ensaio de Nakazima.

a) Corpo de prova para medição, b) Dimensões iniciais e finais.

Fonte: Próprio autor.

Os corpos de prova de latão com raio de alívio R20 e R30 e o corpo de prova de cobre com raio de alívio R20 sofreram escorregamento e não fraturaram, por isso foram desconsiderados.

Na Figura 32 são mostrados os diagramas limite de conformação para o latão e para o cobre, gerados a partir da medição das elipses. Todas as medidas das deformações maior (ϵ_1) e menor (ϵ_2) (Equações 5 e 6) do ensaio de Nakazima são mostradas no Apêndice II. Foram geradas linhas de tendência para indicar os limites de conformação para cada tipo de elipse medida (falha, margem e bom).

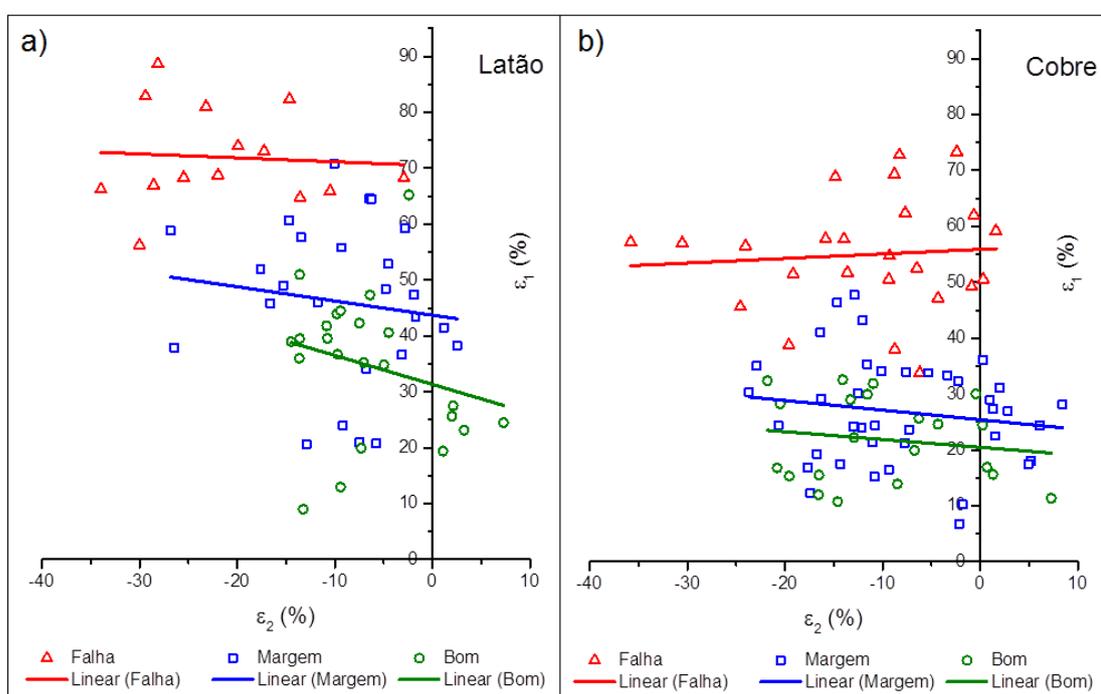


Figura 32 – Diagrama limite de conformação (Nakazima).

a) Latão, b) Cobre.

Fonte: Próprio autor.

Os pontos “falha” dos dois materiais mostraram um comportamento similar, com predominância de valores positivos para deformação maior e negativos para deformação menor. Para os pontos “bom” e “margem” as linhas de tendência do latão apresentaram patamares mais afastados, enquanto que para o cobre as linhas estão mais próximas e os pontos menos dispersos. O latão atingiu deformações superiores às do cobre para os três tipos de elipses, indicando que o material possui maior estampabilidade segundo os critérios do ensaio de Nakazima.

4.1.3. Tamanho de grão

Para medição do tamanho de grão e análise metalográfica foram produzidas imagens dos materiais nas ampliações de 100x, 200x e 500x. Duas amostras de cada material foram embutidas em baquelite, uma evidenciando a face e outra a espessura (Figura 33).

A preparação das amostras foi realizada na seguinte ordem: lixamento com lixas d'água de 400, 600, 800 e 1200 *mesh*; limpeza da amostra com ultrassom durante 30 segundos; polimento com pastas diamantadas de 6 μm , 3 μm e 1 μm , com limpeza das amostras em ultrassom durante 30 segundos e limpeza do pano de polimento entre cada uma das pastas; ataque químico com uma solução de 1 parte de água oxigenada a 3% e 1 parte de amoníaco, aplicada com algodão por esfregamento durante 8 segundos no cobre e 4 segundos no latão.

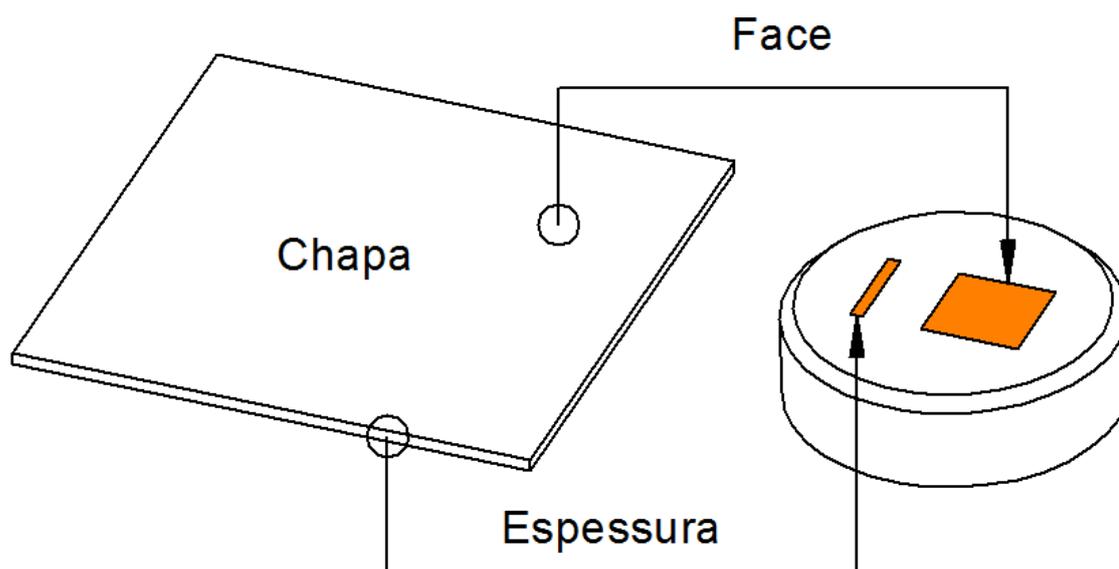


Figura 33 – Posição do embutimento.

Fonte: Próprio autor.

O tamanho médio de grão foi medido com base na ASTM E112 (2013), por meio do método do intercepto linear. Foram contados os grãos interceptados por quatro linhas de tamanho conhecido, sendo uma linha na horizontal, uma na vertical, uma inclinada à direita (45°) e uma inclinada à esquerda (135°).

O programa ImageJ[®] foi utilizado para medir o comprimento das linhas e, a fim de se obter valores mais precisos, os cálculos foram realizados em cinco micrografias de latão e sete de cobre, todas com uma ampliação de 100x, conforme as equações 7, 8 e 9:

$$N_L = \frac{N_i}{C_L/M} \quad (7)$$

$$C_m = \frac{1}{N_L} \quad (8)$$

$$G = (-6,643846 \log C_m) - 3,288 \quad (9)$$

Onde:

N_L = número de grãos interceptados por unidade de comprimento

N_i = número de grãos interceptados pela linha

C_L = comprimento da linha (μm)

M = ampliação utilizada

C_m = comprimento médio do intercepto linear (μm)

G = tamanho de grão ASTM

Na Figura 34 pode-se ver as micrografias do latão nas ampliações de 100x, 200x e 500x, evidenciando a face e a espessura do material. O latão apresentou grãos de tamanhos relativamente homogêneos e grande quantidade de maclas de recozimento.

Na Figura 35 tem-se as micrografias do cobre nas ampliações de 100x, 200x e 500x, evidenciando a face e a espessura do material. O cobre também apresentou grande quantidade de maclas de recozimento, mas com os grãos bem heterogêneos e com grandes diferenças de tamanho. Materiais com granulação grosseira apresentam menor resistência mecânica (DIETER, 1981).

A presença de maclas de recozimento nos dois materiais era esperada, por ser típica de materiais com estrutura cúbica de face centrada que foram deformados mecanicamente antes do processo de recozimento (DIETER, 1981).

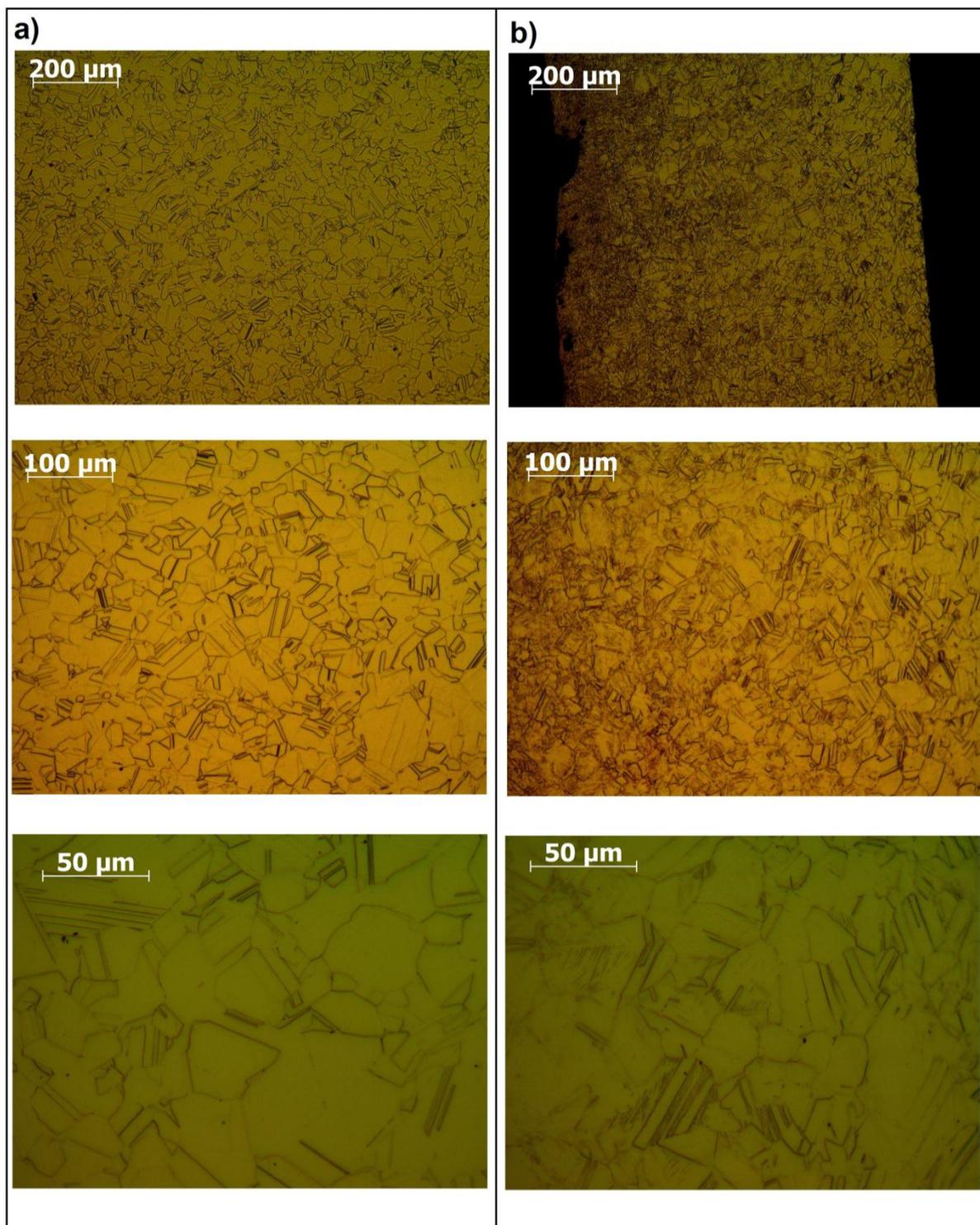


Figura 34 – Micrografias do latão.

a) Face: 100x, 200x e 500x, b) Espessura: 100x, 200x e 500x.

Fonte: Próprio autor.

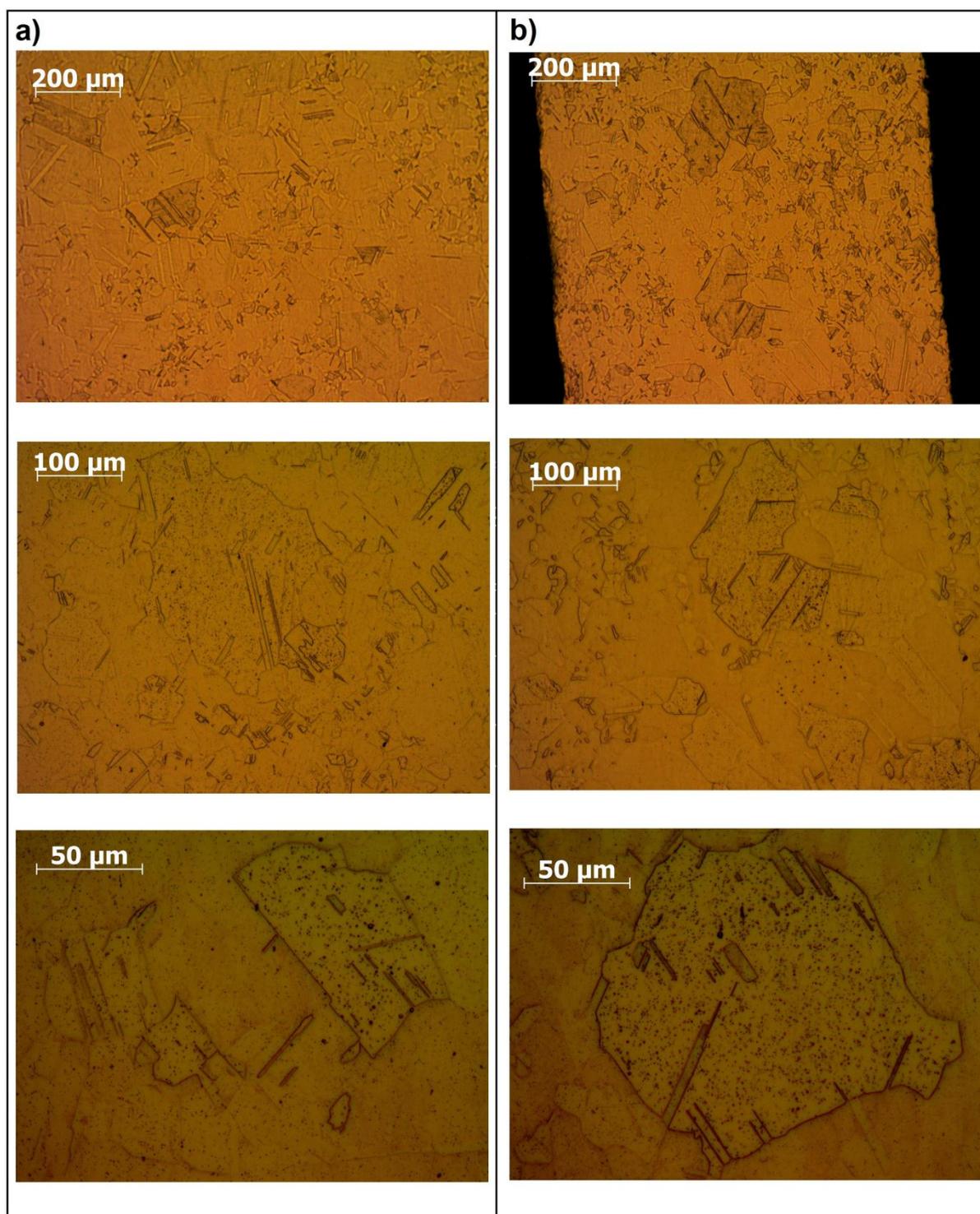


Figura 35 – Micrografias do cobre.

a) Face: 100x, 200x e 500x, b) Espessura: 100x, 200x e 500x.

Fonte: Próprio autor.

Os tamanhos médios de grãos medidos (Equações 7, 8 e 9) são mostrados na Tabela 7 (latão) e na Tabela 8 (cobre).

Tabela 7 – Tamanho de grão do latão.

Material	Imagem	Comprimento médio do intercepto linear (μm)	Tamanho de grão ASTM (G)
Latão	1	31,88	6,66
	2	30,32	6,80
	3	32,55	6,62
	4	26,99	7,14
	5	29,38	6,90
	Média	30,22	6,82

Tabela 8 – Tamanho de grão do cobre.

Material	Imagem	Comprimento médio do intercepto linear (μm)	Tamanho de grão ASTM (G)
Cobre	1	71,98	4,33
	2	58,77	4,91
	3	60,61	4,82
	4	58,56	4,92
	5	57,43	4,98
	6	61,09	4,96
	7	58,71	4,96
	Média	61,02	4,84

O comprimento médio do intercepto linear encontrado para o latão foi de 30,22 μm e o tamanho médio de grão de 6,82, que equivale ao tamanho de grão ASTM 7. Para o cobre o comprimento médio do intercepto linear encontrado foi de 61,02 μm e o tamanho médio de grão de 4,84, equivalente ao tamanho de grão ASTM 5. Como esperado, os valores obtidos de resistência mecânica no ensaio de tração do latão foram superiores aos do cobre. Porém, os valores de alongamento do cobre foram inferiores aos do latão contrariando as expectativas. Isto pode ser explicado pela heterogeneidade dos grãos observada nas micrografias do cobre.

4.2. Ferramental dos ensaios

A ferramenta utilizada nos ensaios (Figura 36) possui em sua extremidade uma esfera de rolamento de aço SAE 52100, capaz de girar livremente, de diâmetro 8 mm e dureza 499 HV, fixada por interferência em um corpo de aço carbono. Este tipo de ferramenta foi escolhido por proporcionar, segundo a literatura, melhor acabamento superficial, devido ao menor atrito, em comparação com ferramentas rígidas. Detalhes da construção desta ferramenta são apresentados no Apêndice I.



Figura 36 – Ferramenta com esfera rolante.

Fonte: Próprio autor.

Os ensaios foram realizados em um Centro de Usinagem de 5 eixos da empresa Pinnacle Machine Tool Co., Ltd., modelo AX450, com as seguintes características: eixo A que possibilita uma rotação de até 220° e eixo C com possibilidade de rotação de até 360°. Na Figura 37 é mostrada a máquina em que foram realizados os ensaios e a indicação dos eixos de trabalho.



Figura 37 – Centro de Usinagem utilizado nos ensaios

Fonte: Próprio autor.

Esta máquina permite que se façam variações nos parâmetros programados de rotação de 50% a 120% e na velocidade de avanço de até 120%, facilitando a alteração destes parâmetros sem a necessidade de refazer a programação.

A base utilizada mostrada na Figura 38 possui o formato quadrado de lado 300 mm e altura de 102 mm, com uma área útil para estampagem 240 mm de lado. A fixação da chapa na base foi feita por meio de 4 barras retangulares presas por parafusos tipo Allen.

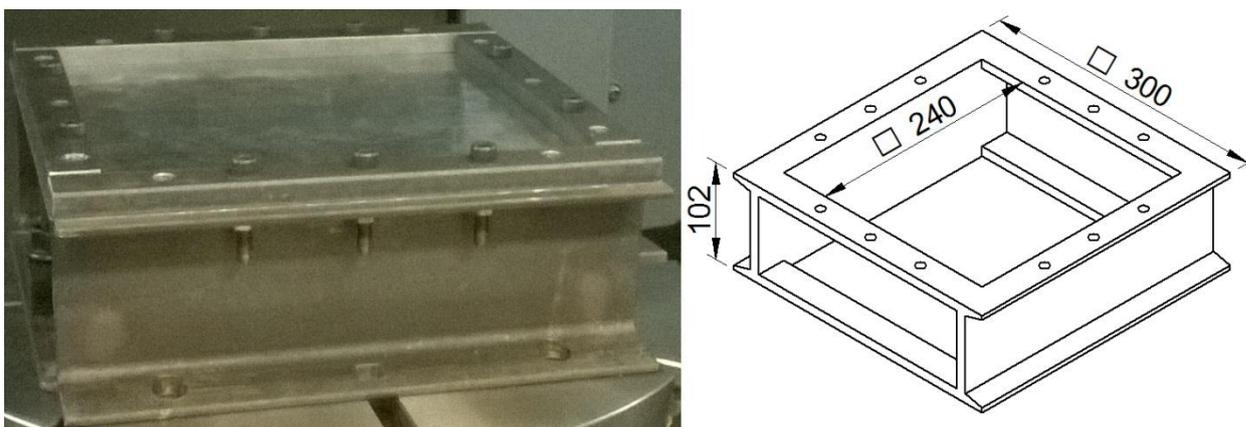


Figura 38 – Base utilizada nos ensaios preliminares.

Fonte: Próprio autor.

4.3. Ensaios preliminares

Para se adquirir um conhecimento prático do processo, testar alguns parâmetros e validar o ferramental disponível foram realizados 5 ensaios variando-se geometria, material e parâmetros. Foi utilizado um incremento vertical constante de 0,5 mm, o óleo utilizado nos ensaios 1 e 4 foi o ISO VG 68 e os parâmetros de cada ensaio são mostrados na Tabela 9, juntamente com o tempo aproximado do processo e a profundidade do perfil estampado.

Foram utilizadas três chapas de aço galvanizado utilizado para confecção de calhas e duas chapas de uma liga de alumínio (43,5%Zn, 1,5%Si, Al balanço), todas com espessura de 0,5 mm.

Nos ensaios 1 e 4 foi estampada uma geometria de um tronco de pirâmide e em suas faces foram adicionadas novas geometrias. Os valores dos ângulos e profundidades destes ensaios estão indicados na Tabela 9, sendo que nas colunas

“ângulo” e “profundidade” o primeiro número diz respeito à geometria do tronco de pirâmide inicial e o segundo número diz respeito às geometrias estampadas nas faces.

Tabela 9 - Parâmetros utilizados nos ensaios iniciais.

Ensaio	Chapa	Ângulo	Óleo	Avanço (mm/min)	Rotação (rpm)	Profundidade (mm)	Tempo (min)
1	Aço	30°/ 30°	Sim	1000	250	30 / 5	46
2	Aço	45°	Não	2000	50	75	35
3	Alumínio	40°	Não	2000	25	10	11
4	Alumínio	30° / 45°	Sim	2000	500	40 / 10	27
5	Aço	35°	Não	2000	25	50	18

Para modelar as geometrias utilizou-se o programa Solid Edge[®] e o percurso da ferramenta foi obtido no Esprit[®]. Todas as geometrias foram criadas em uma área de um quadrado de 200 mm de lado e com diferentes profundidades. Na Figura 39 podem ser vistas as geometrias utilizadas nos ensaios preliminares.



Figura 39 – Geometrias dos ensaios preliminares.

Fonte: Próprio autor.

4.4. Ensaio de estampagem incremental em chapas de latão e de cobre

Os ensaios em latão e cobre foram realizados em 10 chapas, sendo 5 chapas de latão (duas com 0,5 mm e três com 1,0 mm de espessura) e 5 chapas de cobre (duas com 0,5 mm e três com 1,0 mm de espessura). As chapas foram cortadas em quadrados de 300 mm de lado e furadas conforme as medidas da base. Para otimizar o uso das chapas a área de estampagem foi dividida em 4 setores com 105 mm de lado cada um deles (Figura 40).



Figura 40 – Base dividida em 4 setores.

Fonte: Próprio autor.

Com a divisão da base em setores realizou-se um total de 40 ensaios, variando-se geometria e ângulo de parede. A ferramenta e óleo utilizados foram os mesmos dos ensaios preliminares e este em quantidade suficiente para cobrir a superfície da chapa antes do início do processo.

Para a programação da trajetória, realizada no Esprit[®], utilizou-se um posicionamento da mesa com inclinação de 25°, evitando-se deste modo o contato do corpo da ferramenta com a chapa. O início de cada passe foi feito em pontos alternados para evitar a marcação da chapa e a cada passe a ferramenta se afasta da chapa, permitindo visualização e parada do processo. Desse modo, a trajetória da ferramenta pode ser considerada como uma estratégia descontínua em espiral.

Os ensaios em chapas de latão e de cobre foram realizados de duas maneiras, com ângulo de parede variável e com ângulo de parede fixo. Para análise da deformação foram gravados círculos de diâmetro 2,5 mm na parte inferior das chapas, conforme descrito no ensaio de Nakazima (Item 4.1.2).

4.4.1. Ângulo de parede variável

As geometrias de referência mostradas na Figura 41 foram um tronco de cone de diâmetro inicial 90 mm e um tronco de pirâmide quadrada de 90 mm de lado inicial, ambos com altura de 25 mm e um raio de 25 mm na parede. Nesta configuração o ângulo da parede torna-se variável, partindo de 0° no topo e chegando a 90° na base.

Os parâmetros adotados foram: rotação de 50 rpm, avanço de 1500 mm/min e incremento vertical constante de 0,1 mm por passe. Foram usadas chapas de latão e de cobre, nas espessuras de 0,5 mm e 1,0 mm e cada ensaio foi realizado duas vezes.

Na literatura não há consenso a respeito dos parâmetros ideais a serem utilizados com os materiais e o ferramental adotados nesta pesquisa. Desta forma, optou-se por utilizar os valores dos parâmetros testados nos ensaios preliminares, a exceção do incremento vertical. Golabi e Khazaali (2014), Jeswiet et al. (2015), Mcanulty, Jeswiet e Doolan (2017), Fritzen et al. (2017), entre outros autores, citam que menores incrementos verticais proporcionam maiores profundidades de estampagem.

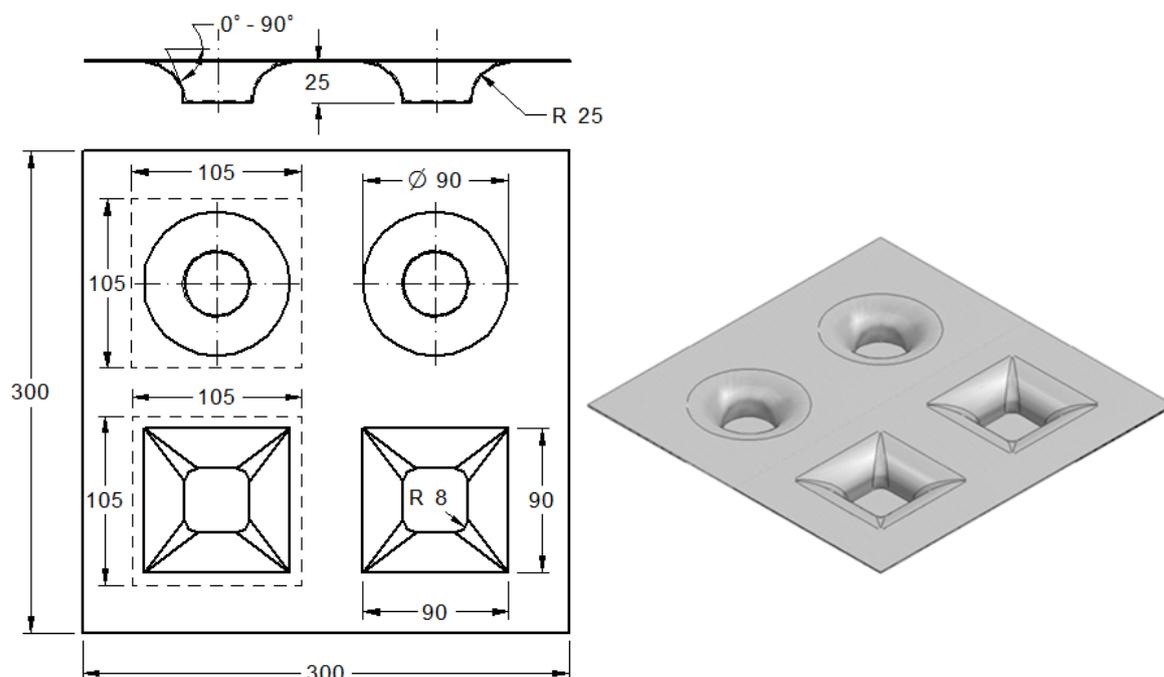


Figura 41 – Geometria com parede variável.

Fonte: Próprio autor.

4.4.2. Ângulo de parede fixo

A geometria de referência foi um tronco de cone de diâmetro inicial de 90 mm com altura de 40 mm e os parâmetros foram: rotação de 50 rpm, avanço de 1500 mm/min e incremento vertical constante de 0,1 mm por passe. A escolha dos parâmetros se deu pelos mesmos motivos citados anteriormente.

Foram utilizadas chapas de latão e de cobre com espessuras de 0,5 mm e 1,0 mm e ângulos variando entre 65° e 80° (cada setor com um ângulo diferente), conforme pode ser visto na Figura 42.

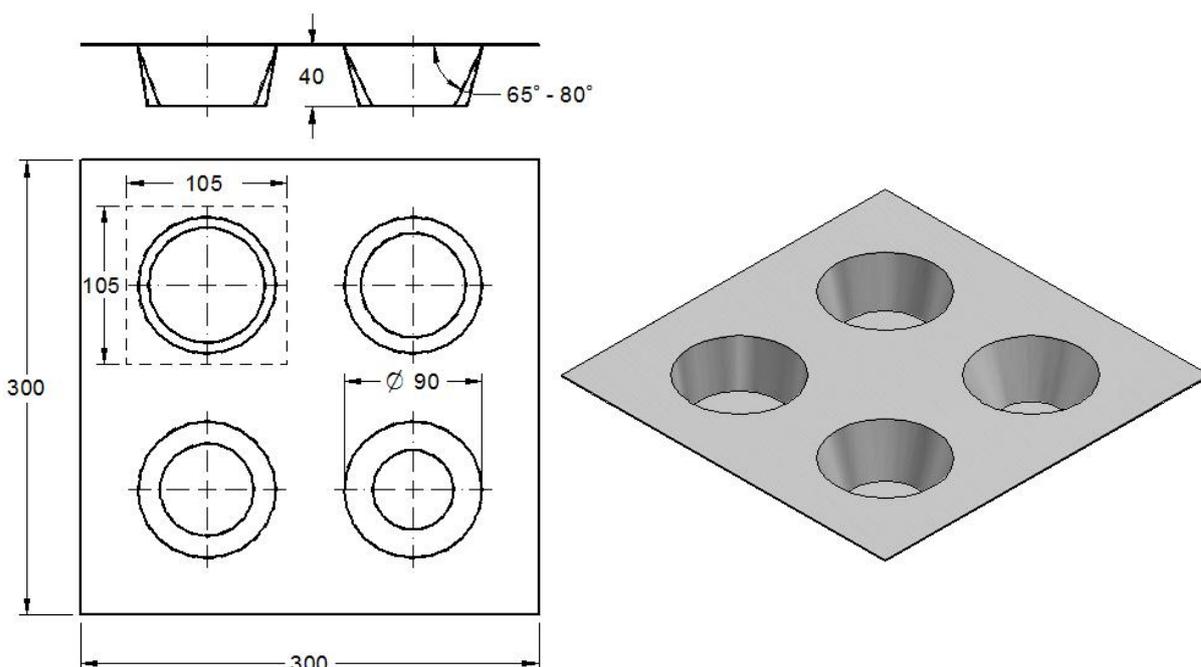


Figura 42 – Geometria com ângulo fixo.

Fonte: Próprio autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Resultados dos ensaios preliminares

Os ensaios preliminares foram importantes para uma melhor compreensão do processo e algumas informações obtidas auxiliaram a definição dos demais ensaios.

Com relação às velocidades notou-se que mudanças bruscas na trajetória da ferramenta, causadas por valores de avanço próximos a 2000 mm/min, fazem com que a máquina sofra alguns solavancos durante movimentos curtos na entrada e na saída dos passes. Como a ferramenta possui uma esfera rolante, diferentes valores de rotação (50 rpm ou 500 rpm) não influenciaram significativamente os resultados dos ensaios, pois a esfera gira conforme o atrito com a chapa.

Nos ensaios sem lubrificação, notou-se o desprendimento de pequenos fragmentos da chapa, o que ocasionou um pequeno desgaste superficial que foi reduzido com o uso do óleo lubrificante. Em ângulos e profundidades maiores, como no ensaio 2 com ângulo de 45° e profundidade máxima de 70 mm, houve contato do corpo da ferramenta com a chapa, conforme é mostrado na Figura 43, prejudicando a qualidade superficial e limitando o ângulo de estampagem.



Figura 43 – Chapas estampadas nos ensaios iniciais.

Fonte: Próprio autor.

Observou-se retorno elástico do material durante a saída e entrada da ferramenta, principalmente nos ensaios com geometrias adicionais estampadas nas faces dos troncos de pirâmide (ensaios 1 e 4). A fixação no prensa chapas se mostrou efetiva, pois não foi notada deformação nas regiões de contato com os parafusos e nestes ensaios as chapas não sofreram fraturas. Na Figura 44 podem ser vistas as chapas estampadas nos ensaios preliminares.

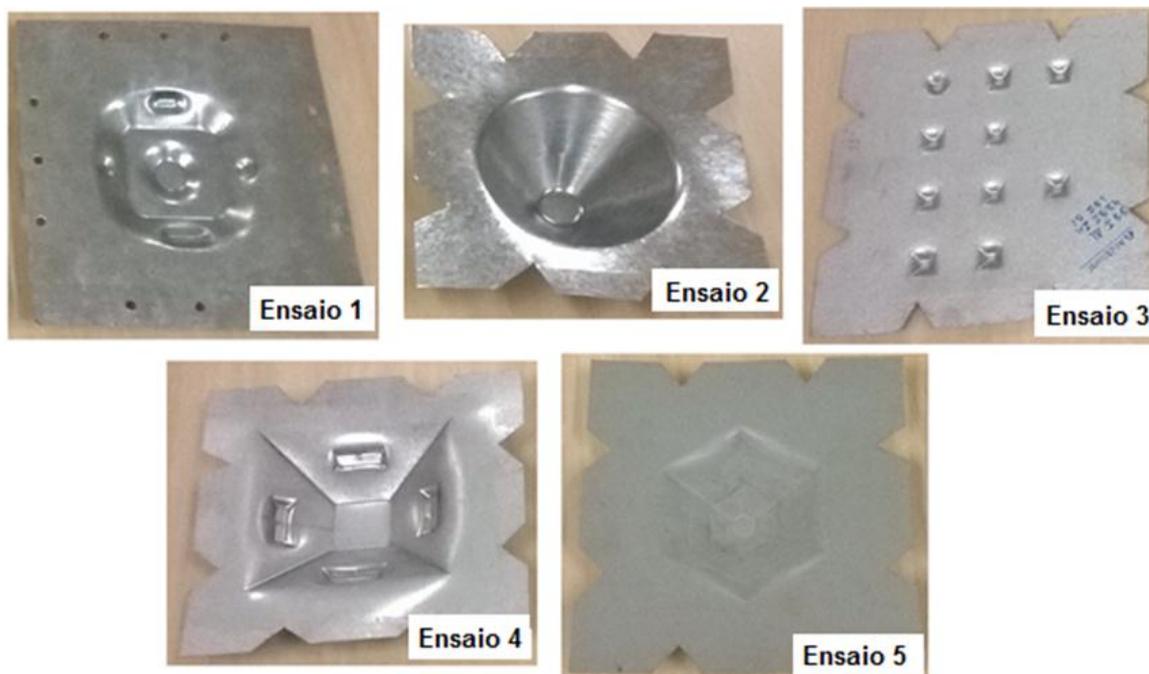


Figura 44 – Chapas estampadas nos ensaios iniciais.

Fonte: Próprio autor.

5.2. Ensaios com ângulo de parede variável

Os valores das profundidades obtidas nos ensaios com ângulo de parede variável são referentes ao deslocamento vertical da ferramenta no término do ensaio e estes são obtidos no painel do centro de usinagem. Em todos os ensaios houve fratura dos materiais e o processo foi interrompido no momento de sua detecção.

Por meio dos valores de profundidade atingidos, o ângulo correspondente foi obtido com o auxílio do programa Solid Edge[®]. Para isto traça-se uma linha tangente à curva (raio de 25 mm) até a distância da profundidade atingida e mede-se o ângulo entre a parede e esta linha; este procedimento é mostrado na Figura 45 para um dos ensaios realizados.

Estes valores correspondem ao ponto em que o material foi estampado até se romper e não necessariamente às profundidades máximas atingidas, pois o material sofre retorno elástico quando o punção deixa de exercer esforço.

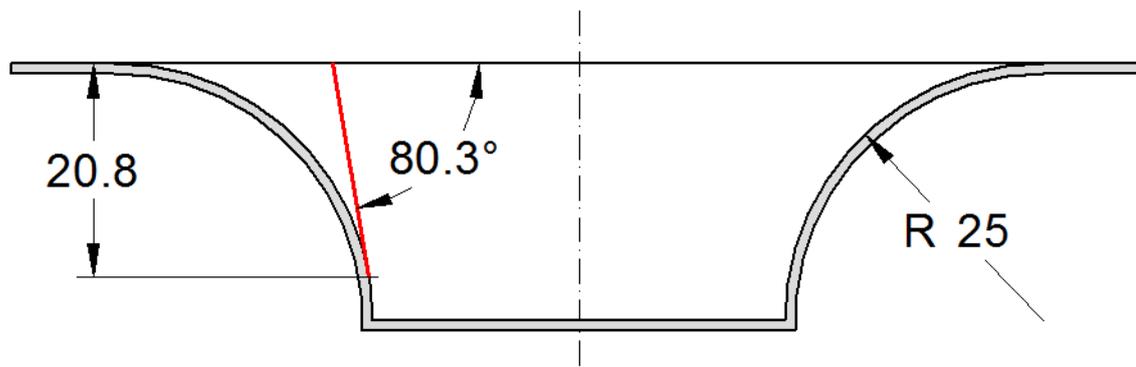


Figura 45 – Medição dos ângulos nos ensaios com ângulo de parede variável.

Fonte: Próprio autor.

Para cada material variaram-se a espessura (0,5 mm e 1,0 mm) e a geometria (circular e quadrada) e para cada uma das situações foram executados dois ensaios. Para todos os ensaios nas mesmas condições os valores de profundidade atingidos foram muito próximos à exceção do latão de 1,0 mm (geometria quadrada). As chapas de 0,5 mm se romperam com uma profundidade menor que as chapas de 1,0 mm (independentes do perfil) e com relação ao tempo do processo, a geometria quadrada demandou maior tempo, devido ao seu maior perímetro e ao trajeto executado pela ferramenta necessitar de passes de transição nos cantos. Considerando-se as geometrias, a circular apresentou valores maiores de profundidade em todos os ensaios, à exceção do ensaio 7 com geometria quadrada que atingiu o maior valor entre todos os ensaios.

Visualmente a geometria circular apresentou melhor acabamento superficial, devido à trajetória da ferramenta. Na geometria quadrada a ferramenta executou um movimento similar a um laço ao passar de uma face à outra o que causou marcações nos cantos da peça.

As profundidades obtidas nos ensaios com ângulo de parede variável estão indicadas na Tabela 10, juntamente com o tempo do processo. Na Figura 46 (latão) e na Figura 47 (cobre) pode-se ver chapas após a estampagem com ângulo de parede variável.

Tabela 10 - Parâmetros utilizados nos ensaios com ângulo de parede variável.

Ensaio	Material	Geometria	Ângulo	Profundidade (mm)	Tempo (min)
1	Latão 0,5 mm	Circular	80,3°	20,8	32,5
2	Latão 0,5 mm	Circular	79,6°	20,5	32
3	Latão 0,5 mm	Quadrada	73,7°	18	54
4	Latão 0,5 mm	Quadrada	74,2°	18,2	53
5	Latão 1,0 mm	Circular	84,3°	22,5	34
6	Latão 1,0 mm	Circular	85°	22,8	35
7	Latão 1,0 mm	Quadrada	89°	24,6	67
8	Latão 1,0 mm	Quadrada	80,3°	20,8	59
9	Cobre 0,5 mm	Circular	79,4°	20,4	32
10	Cobre 0,5 mm	Circular	79,2°	20,3	31,5
11	Cobre 0,5 mm	Quadrada	75,6°	18,8	54
12	Cobre 0,5 mm	Quadrada	76,4°	19,1	55
13	Cobre 1,0 mm	Circular	89,3°	24,7	37
14	Cobre 1,0 mm	Circular	87°	23,7	36
15	Cobre 1,0 mm	Quadrada	86°	23,3	64
16	Cobre 1,0 mm	Quadrada	83,3°	22,1	63

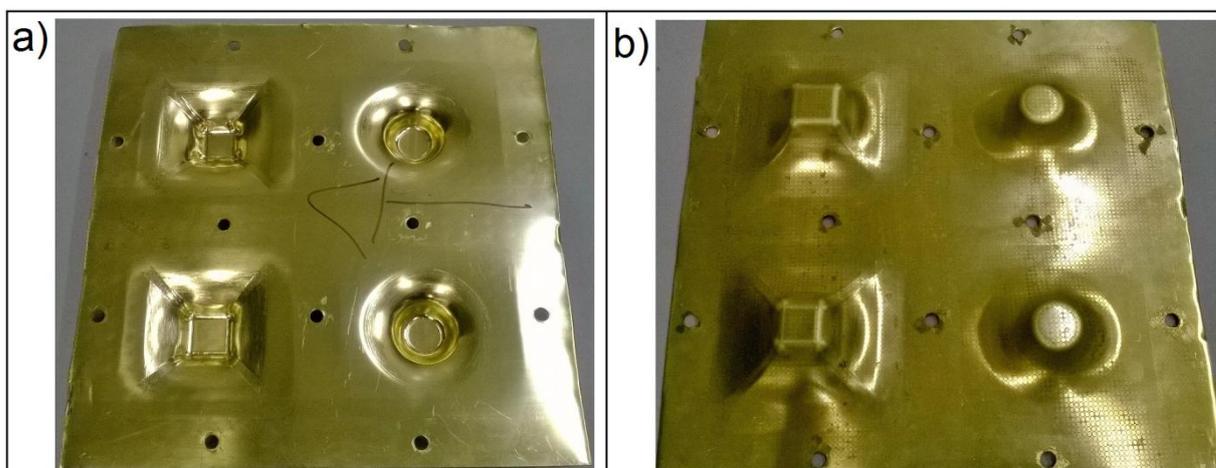


Figura 46 – Chapa de latão estampada com ângulo de parede variável.

a) Parte superior, b) Parte inferior.

Fonte: Próprio autor.

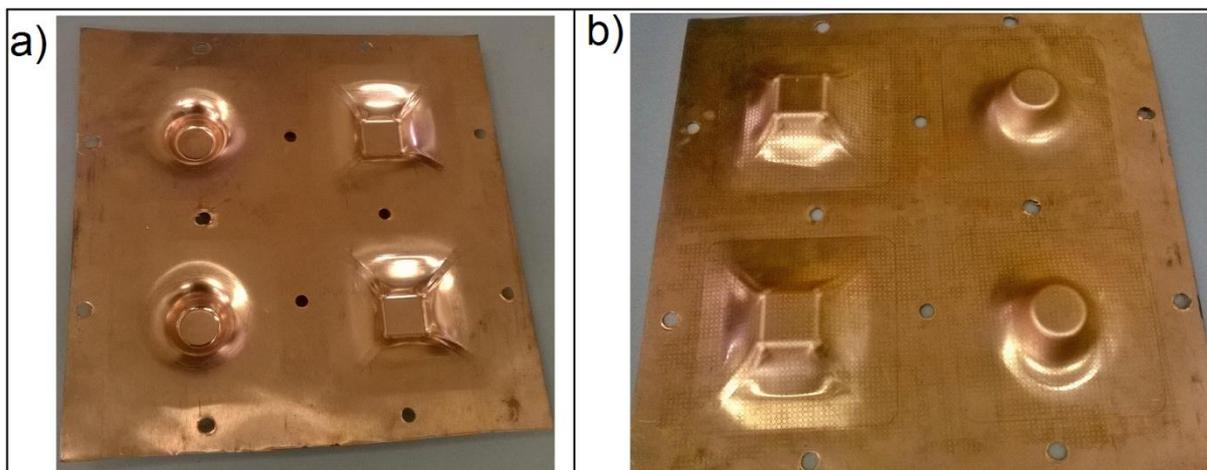


Figura 47 – Chapa de cobre estampada com ângulo de parede variável.

a) Parte superior, b) Parte inferior.

Fonte: Próprio autor.

5.3. Ensaio com ângulo de parede fixo

Na Tabela 11 são mostrados o material, a espessura da chapa, o ângulo, a profundidade atingida e o tempo de cada ensaio realizado com ângulo de parede fixo. É indicada também a ocorrência ou não de fratura da chapa.

Em todos os ensaios realizados com ângulo de parede fixo as profundidades obtidas com as chapas de cobre foram sempre maiores do que as do latão. Para os dois materiais as chapas com 1,0 mm de espessura apresentaram maior resistência à deformação, pois nos primeiros passes a região que não estava em contato com a ferramenta não se deformou. Da mesma forma, para os dois materiais com as chapas de 1,0 mm de espessura foram obtidas maiores profundidades de estampagem em todos os ângulos ensaiados. As chapas de 0,5 mm de espessura se romperam antes de se atingir a profundidade planejada e as chapas com 1,0 mm de espessura que não sofreram fratura e atingiram a profundidade de 40 mm demandaram os maiores tempos de processo.

Com as chapas de 0,5 mm de espessura de latão a maior profundidade de estampagem obtida foi de 10,5 mm com ângulo de 65° e a menor de 8,9 mm com ângulo de 80°. Para o cobre, com esta mesma espessura, a maior profundidade obtida foi de 10,8 mm com ângulo de 65° e a menor de 9,2 mm com ângulo de 80°.

Tabela 11 - Parâmetros utilizados nos ensaios com ângulo fixo.

Ensaio	Material	Espessura (mm)	Ângulo	Profundidade (mm)	Tempo (min)	Fratura
1	Latão	0,5	65°	10,5	23	Sim
2	Latão	0,5	70°	9,4	20,5	Sim
3	Latão	0,5	75°	9,2	20	Sim
4	Latão	0,5	80°	8,9	19,5	Sim
5	Latão	1,0	65°	40	76,5	Não
6	Latão	1,0	66°	40	76,5	Não
7	Latão	1,0	66,5°	40	76,5	Não
8	Latão	1,0	67°	15,2	32,5	Sim
9	Latão	1,0	68,5°	14,9	32	Sim
10	Latão	1,0	70°	12,9	28	Sim
11	Latão	1,0	75°	12,2	26,5	Sim
12	Latão	1,0	80°	11,6	25,5	Sim
13	Cobre	0,5	65°	10,8	23	Sim
14	Cobre	0,5	70°	10,2	22	Sim
15	Cobre	0,5	75°	9,7	21	Sim
16	Cobre	0,5	80°	9,2	20	Sim
17	Cobre	1,0	65°	40	77	Não
18	Cobre	1,0	67°	40	77	Não
19	Cobre	1,0	68°	40	77	Não
20	Cobre	1,0	69°	17,9	38	Sim
21	Cobre	1,0	69,5°	19	40,5	Sim
22	Cobre	1,0	70°	14,2	22	Sim
23	Cobre	1,0	75°	13,3	21	Sim
24	Cobre	1,0	80°	12,1	20	Sim

O gráfico relacionando a profundidade atingida com o ângulo ensaiado para o latão é mostrado na Figura 48 e para o cobre na Figura 49.

Para as chapas de latão de 1,0 mm de espessura a maior profundidade de estampagem obtida sem ruptura foi de 40 mm com ângulo limite de 66,5°. Com o cobre de mesma espessura a maior profundidade também foi de 40 mm, porém com um com ângulo limite de 68°.

Constatou-se uma queda brusca da profundidade máxima de estampagem entre os ângulos 66,5° e 67° para o latão e entre os ângulos 68° e 69° para o cobre. Os ângulos maiores que o ângulo limite de estampagem (em que não houve fratura do material) indicam diminuição da profundidade em função do aumento do ângulo de parede.

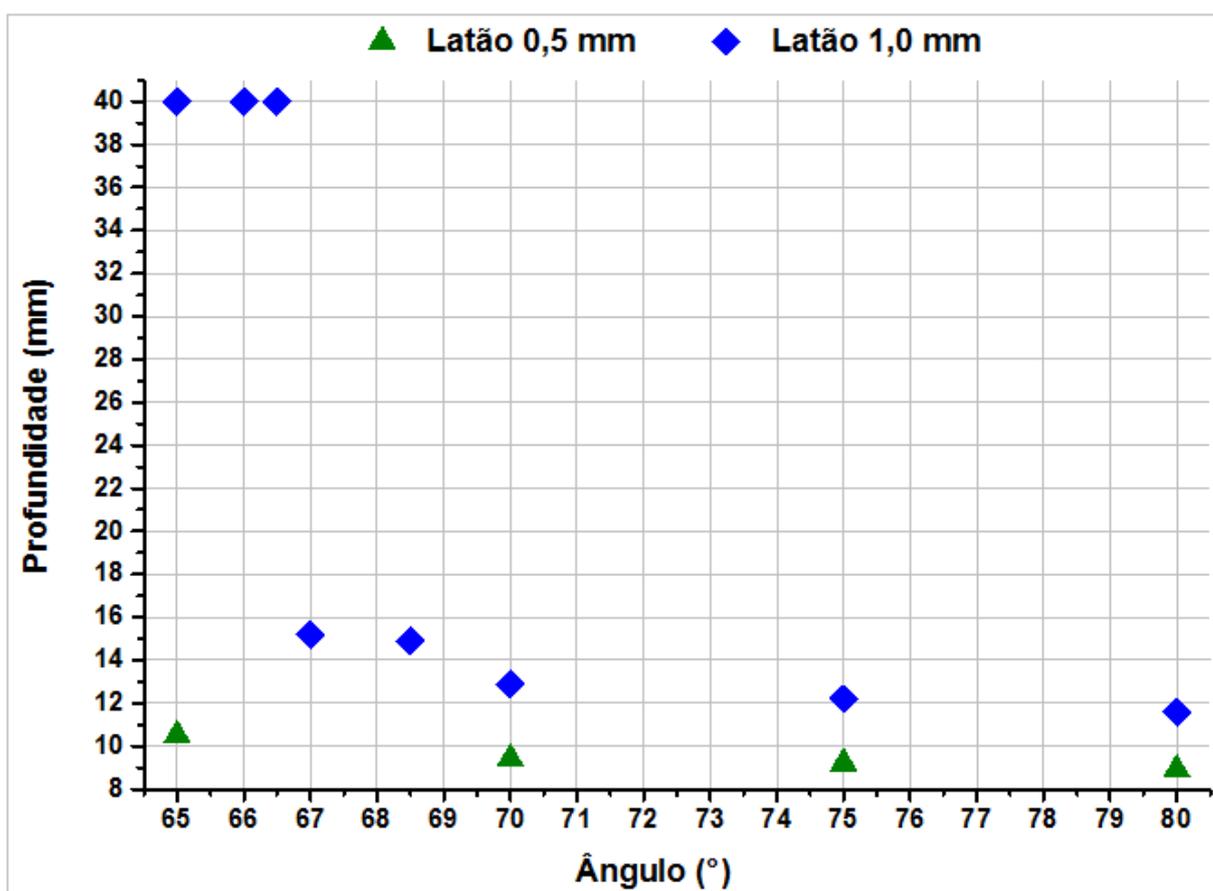


Figura 48 – Relação profundidade x ângulo do latão (ângulo fixo).

Fonte: Próprio autor.

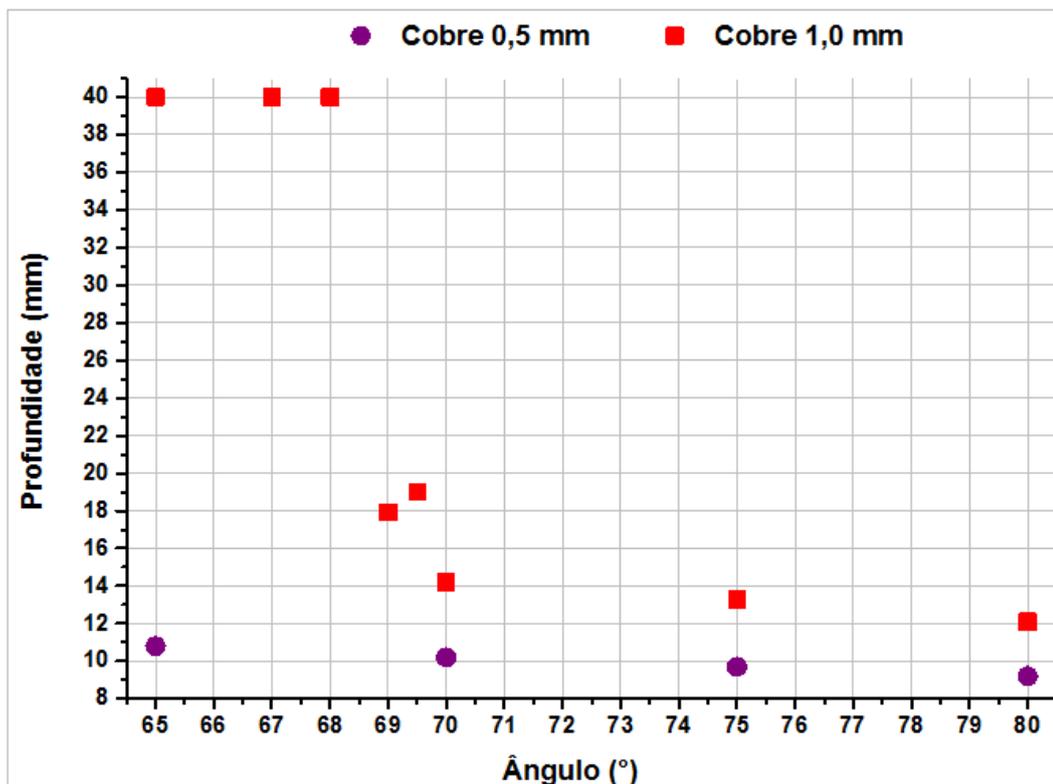


Figura 49 – Relação profundidade x ângulo do cobre (ângulo fixo).

Fonte: Próprio autor.

As fraturas dos dois materiais ocorreram sempre na região imediatamente acima do contato da ferramenta com a chapa. O latão produziu um leve estalo ao se romper, o que facilitou a percepção da fratura, enquanto que o cobre por ser mais dúctil apresentou, gradativamente, redução de espessura e surgimento de pequenos pontos de fratura. As fraturas de cada um dos materiais são destacadas na Figura 50 e chapas estampadas com ângulo de parede fixo na Figura 51.

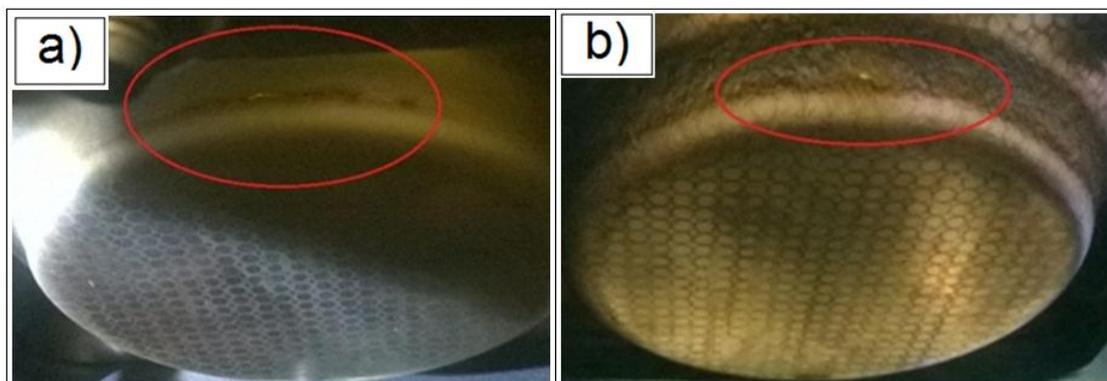


Figura 50 – Fratura das chapas.

a) Latão, b) Cobre.

Fonte: Próprio autor.

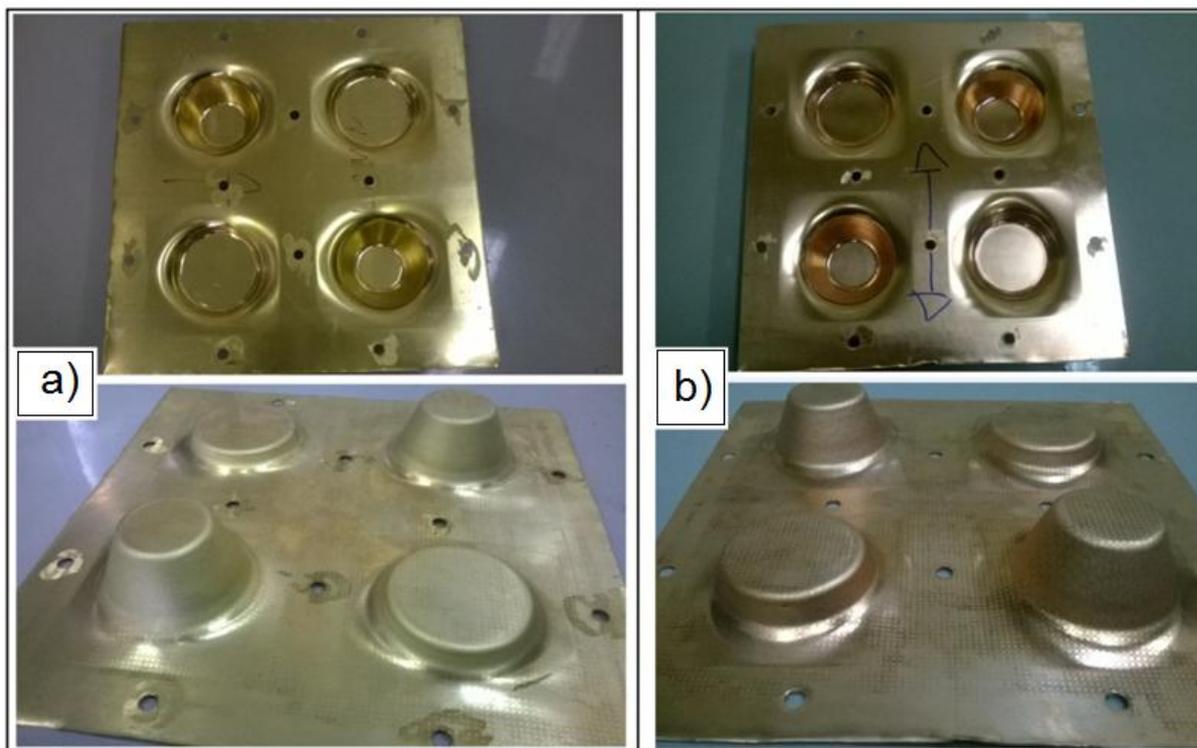


Figura 51 – Chapa estampada com ângulo de parede fixo.

a) Latão, b) Cobre.

Fonte: Próprio autor.

5.4. Medição das espessuras

Para medição das espessuras foram considerados os ensaios com chapas com 1,0 mm de espessura e ângulos de parede fixo 65° , 66° e $66,5^\circ$ para o latão e 65° , 67° e 68° para o cobre, sendo estes os únicos que atingiram a profundidade de 40 mm. Foram realizadas 9 medições, distanciadas entre si em aproximadamente 4 mm, utilizando um micrômetro analógico de ponta arredondada de precisão igual a 0,01 mm. As posições usadas para medição de espessura e o perfil da chapa cortada são mostrados na Figura 52.

Os valores medidos da espessura final (e_f) foram comparados com os valores previstos pela lei do cosseno (Equação 1) a fim de se calcular a variação entre eles e são apresentados na Tabela 12 para o latão e na Tabela 13 para o cobre.

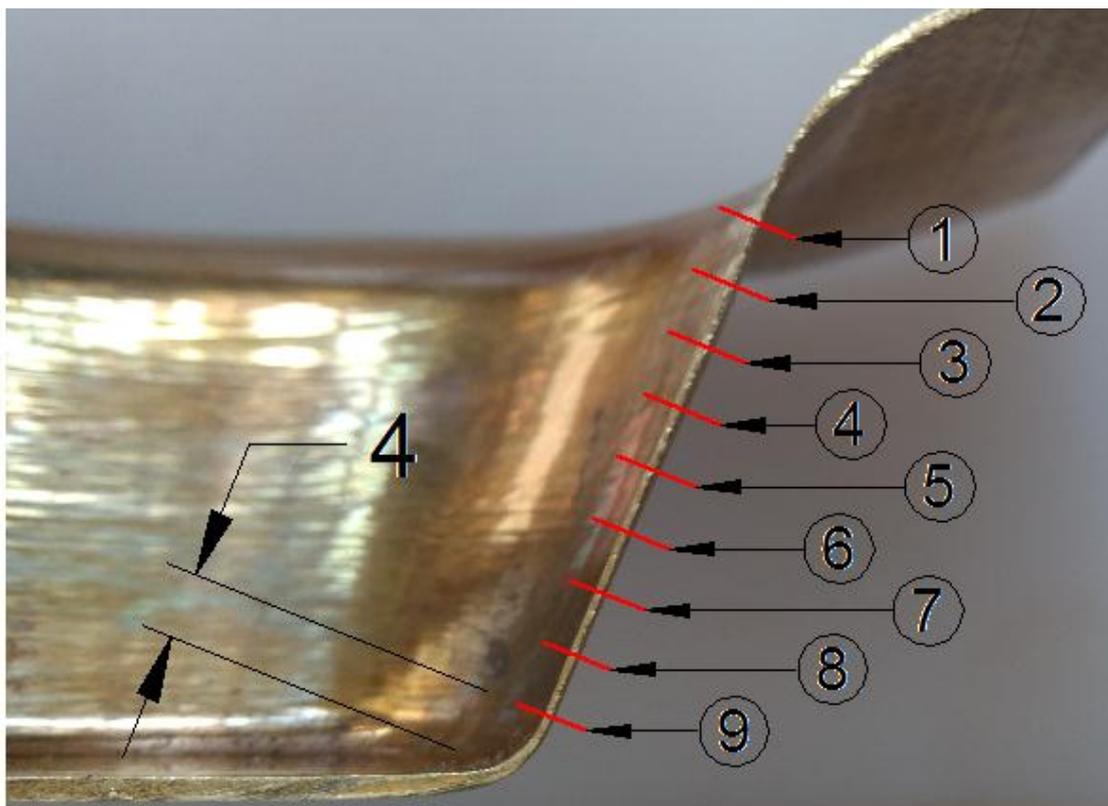


Figura 52 – Perfil cortado e posições para medição das espessuras.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 12 – Espessuras das chapas de latão após estampagem.

	$\Phi = 65^\circ$ e_f prevista = 0,423 mm	$\Phi = 66^\circ$ e_f prevista = 0,407 mm	$\Phi = 66,5^\circ$ e_f prevista = 0,399 mm
Posição	e_f medida (mm)	e_f medida (mm)	e_f medida (mm)
1	0,41	0,49	0,40
2	0,44	0,39	0,29
3	0,50	0,40	0,40
4	0,49	0,44	0,39
5	0,46	0,45	0,41
6	0,47	0,44	0,37
7	0,44	0,40	0,39
8	0,43	0,39	0,42
9	0,42	0,42	0,43
Variação	0,032 mm	0,028 mm	0,025 mm
Média	(7,6%)	(6,9%)	(6,3%)

Tabela 13 – Espessuras das chapas de cobre após estampagem.

	$\Phi = 65^\circ$ e_f prevista = 0,423 mm	$\Phi = 67^\circ$ e_f prevista = 0,391 mm	$\Phi = 68^\circ$ e_f prevista = 0,375 mm
Posição	e_f medida (mm)	e_f medida (mm)	e_f medida (mm)
1	0,34	0,46	0,39
2	0,39	0,37	0,29
3	0,40	0,36	0,30
4	0,43	0,40	0,38
5	0,43	0,43	0,34
6	0,44	0,40	0,40
7	0,40	0,39	0,39
8	0,41	0,36	0,38
9	0,40	0,39	0,37
Variação	0,025 mm	0,023 mm	0,029 mm
Média	(5,9%)	(5,9%)	(7,7%)

Com os dados das Tabelas 12 e 13 foram confeccionados os gráficos apresentados na Figura 53 (latão) e na Figura 54 (cobre).

Para o latão com ângulo de 65° a maior variação identificada foi na posição 3 e a menor variação na posição 9, com o ângulo de 66° a maior variação na posição 1 e a menor nas posições 3 e 7. Para o ângulo de $66,5^\circ$ a maior variação foi a posição 2 e a menor variação identificada foi nas posições 1 e 3, sendo este ângulo o que apresentou a maior e a menor variação de espessura em relação ao valor previsto pela lei do cosseno.

Para o cobre com ângulo de 65° a maior variação identificada foi posição 1 e a menor variação nas posições 4 e 5, com o ângulo de 67° a maior variação foi na posição 1 e a menor nas posições 7 e 9. Para o ângulo de 68° a maior variação foi a posição 2 e a menor variação identificada foi nas posições 4 e 8. A maior variação de espessura identificada em relação ao valor previsto pela lei do cosseno foi com o ângulo 65° , enquanto que a menor foi com o ângulo de 67° .

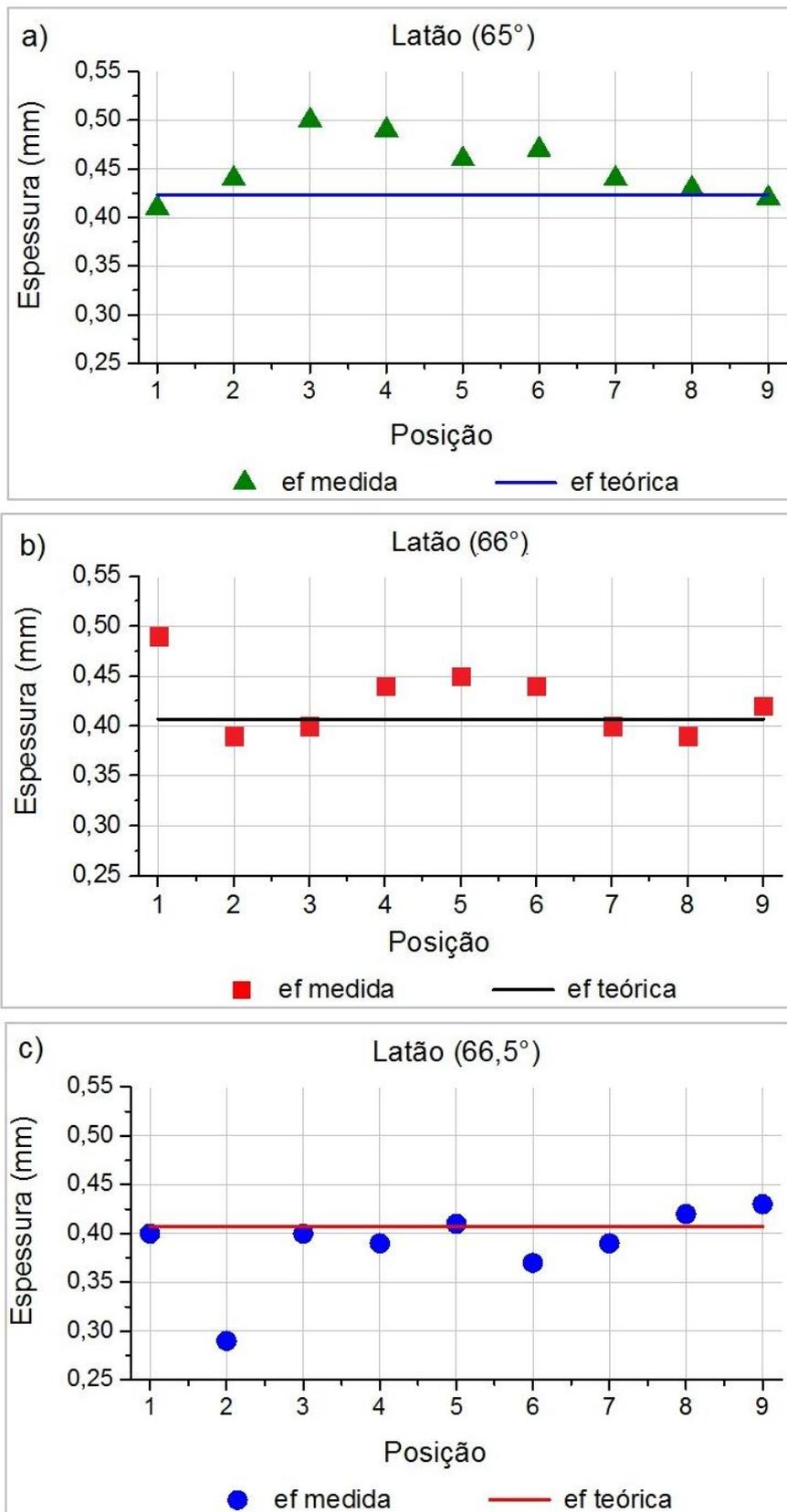


Figura 53 – Espessura medida x prevista para o latão.

a) 65°; b) 66°; c) 66,5°.

Fonte: Próprio autor.

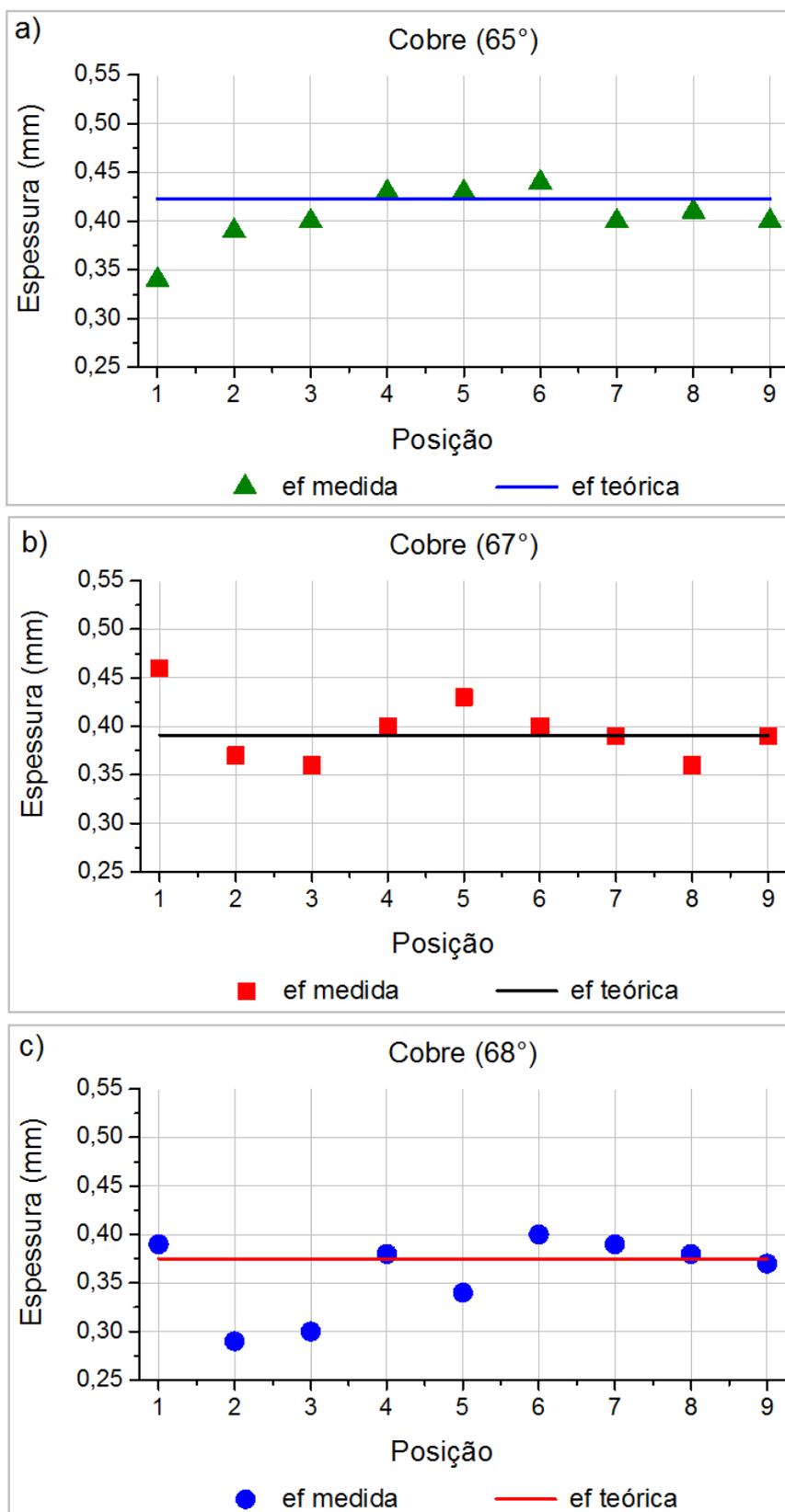


Figura 54 – Espessura medida x prevista para o cobre.
a) 65°; b) 67°; c) 68°.

Fonte: Próprio autor.

Os perfis não apresentaram espessura constante ao longo do perfil estampado, como previsto pela lei do cosseno. A variação do valor medido em relação ao previsto não possui regularidade entre as diferentes posições de medição, alguns valores se apresentaram acima e outros abaixo da espessura prevista. A variação da espessura ao longo do perfil para os dois materiais apresentou comportamento semelhante aos dados obtidos por Salem et al. (2016).

5.5. Medição das deformações

Para medição das deformações maior (ϵ_1) e menor (ϵ_2) e a construção dos diagramas limite de conformação foi utilizada a mesma metodologia do ensaio de Nakazima, por isso foram consideradas apenas as chapas fraturadas e com espessura de 1,0 mm.

Os ensaios com ângulo de parede variável e geometria quadrada e os ensaios com ângulo fixo apresentaram o efeito casca de laranja (Figura 55), dificultando a análise das deformações. Segundo Dieter (1981), este efeito apresenta uma rugosidade superficial excessiva nas regiões sujeitas a grandes deformações e costuma ocorrer em chapas com tamanho de grão grosseiro.



Figura 55 – Efeito de casca de laranja em chapa de cobre.

Fonte: Próprio autor.

Apenas os ensaios com ângulo de parede variável e geometria circular foram utilizados para a análise das deformações, pois sofreram fratura e o efeito casca de laranja foi menor.

Na Figura 56 são mostrados os diagramas limite de conformação para o latão e para o cobre, gerados a partir da medição das elipses. Foram traçadas linhas de tendência para indicar os limites de conformação para cada tipo de elipse medida (falha, margem e bom) e todas as medidas das deformações maior (ϵ_1) e menor (ϵ_2) (Equações 5 e 6) são mostradas no Apêndice III.

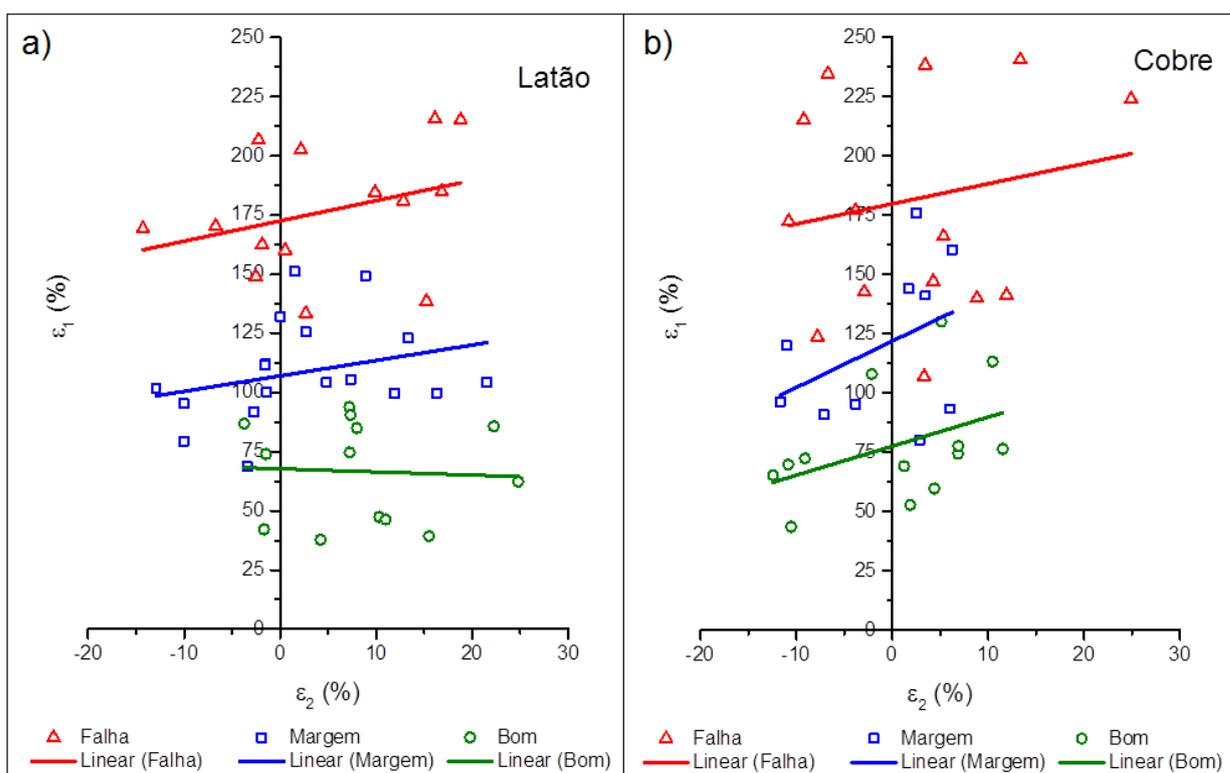


Figura 56 – Diagrama limite de conformação (*SPIF*).

a) Latão, b) Cobre.

Fonte: Próprio autor.

As linhas de tendência dos dois materiais estão em patamares distintos e existem diversos pontos com valores positivos para a deformação menor, diferente do que se observou no ensaio de Nakazima.

O cobre apresentou maiores valores de deformação em alguns pontos “falha”, em comparação com o latão, indicando uma maior estampabilidade quando submetido ao processo *SPIF*.

Na Figura 57 pode-se ver o diagrama limite de conformação com as linhas de tendência obtidas no ensaio de Nakazima e no processo *SPIF*. Os limites de conformação atingidos no processo *SPIF* foram muito superiores aos obtidos no ensaio de Nakazima, em todos os casos. Por este motivo o ensaio de Nakazima não é indicado para prever o comportamento de materiais produzidos pela estampagem incremental, conforme descrito na literatura.

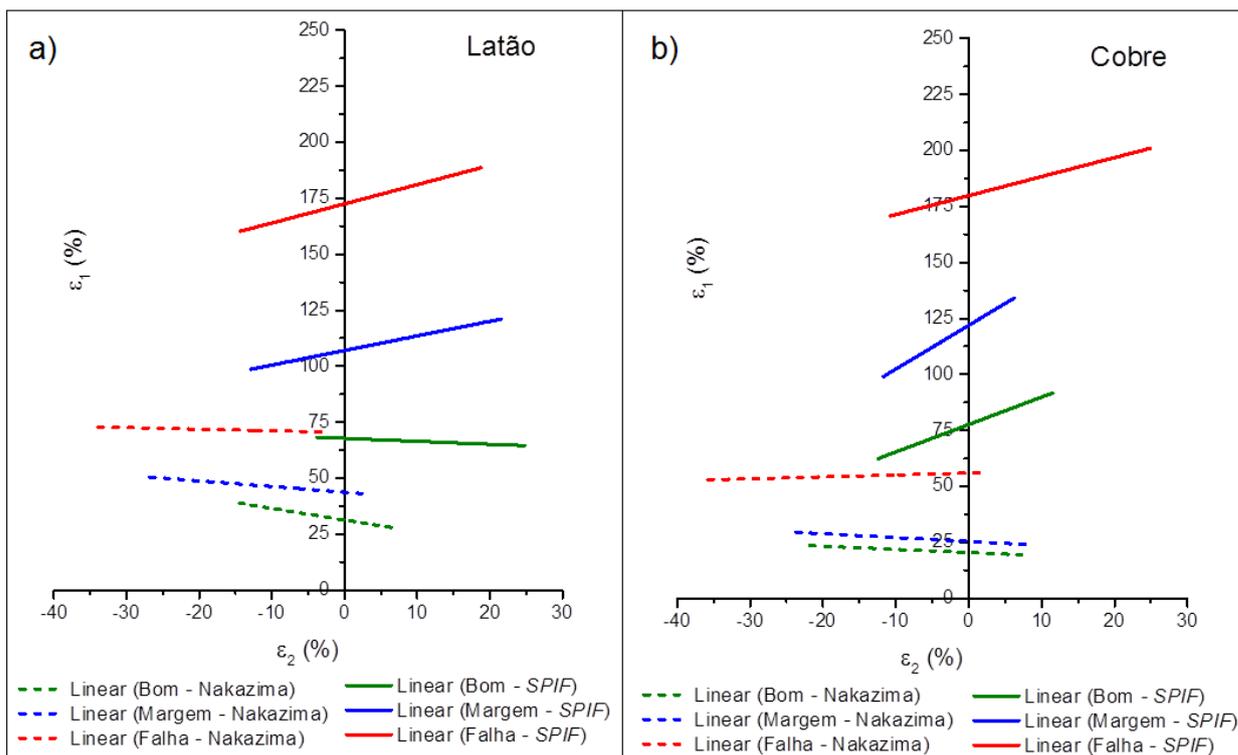


Figura 57 – Diagrama limite de conformação (Nakazima x *SPIF*).

a) Latão, b) Cobre.

Fonte: Próprio autor.

5.6. Comparação dos alongamentos

Foram considerados os valores médios dos alongamentos máximos atingidos no ensaio de tração, no ensaio de Nakazima e no processo *SPIF* com ângulo de parede variável e geometria circular para as chapas de latão e de cobre com 1,0 mm de espessura. Para o ensaio de Nakazima e para o processo *SPIF* foram considerados os valores da deformação maior (ϵ_1) dos pontos classificados como falha.

Nas Tabelas 14 (latão) e 15 (cobre) são mostrados os comparativos dos alongamentos médios do ensaio de tração, do ensaio de Nakazima e do processo *SPIF*. O ensaio de tração foi o que apresentou menor alongamento, porém com valores próximos ao do ensaio de Nakazima, enquanto que os alongamentos atingidos no processo *SPIF* foram muito superiores aos demais.

Tabela 14 – Comparativo dos alongamentos médios do latão.

Ensaio	<i>SPIF</i>	Nakazima	Tração
Alongamento (%)	175	72,5	67
Latão	<p>141% maior (comparado a Nakazima) 161% maior (comparado a Tração)</p>		

Tabela 15 – Comparativo dos alongamentos médios do cobre.

Ensaio	<i>SPIF</i>	Nakazima	Tração
Alongamento (%)	171	55,5	50,5
Cobre	<p>208% maior (comparado a Nakazima) 239% maior (comparado a Tração)</p>		

Os alongamentos médios do cobre foram inferiores aos do latão, devido à heterogeneidade dos grãos daquele material, porém no processo *SPIF* estes valores ficaram muito próximos. O alongamento do latão no processo *SPIF* foi 141% maior que no ensaio de Nakazima e 161% maior que no ensaio de tração. O cobre apresentou no processo *SPIF* um alongamento 208% maior que o ensaio de Nakazima e 239% maior que o ensaio de tração.

Estes resultados são um bom indicativo do comportamento dos materiais no processo *SPIF* e mais análises deste tipo são necessárias para se confirmar a relação entre estes alongamentos e se obter um método de previsibilidade para o processo, baseado principalmente no ensaio de tração, por este ser mais fácil e prático de se executar do que o ensaio de Nakazima.

6. CONCLUSÕES

A Estampagem Incremental de Ponto Simples (*SPIF*) é um processo capaz de produzir geometrias com ângulos diferentes e com relativa facilidade de reconfiguração, pois não há necessidade de troca de ferramental. Diversos ângulos foram ensaiados, com materiais distintos e em duas espessuras diferentes, confirmando a flexibilidade do processo.

O uso de programas *CAD/CAM* é essencial para a execução do processo, desde a criação da geometria até a definição do caminho da ferramenta, conforme os parâmetros desejados. Utilizar uma ferramenta com esfera rolante só foi viável devido ao centro de usinagem de 5 eixos, que possibilita inclinar a ferramenta de modo a se manter contato apenas entre a chapa e a esfera.

Por meio dos ensaios de caracterização: dureza, tração e Nakazima, verifica-se que o latão C260 apresenta maior resistência mecânica e alongamento, influenciado por uma granulação refinada e homogênea. Contudo, com o uso do cobre C110 é possível atingir maiores ângulos de parede e maiores profundidades de estampagem, quando submetido ao processo *SPIF*.

Os ângulos limite de estampagem das chapas de 0,5 mm de espessura, com ângulo fixo de parede, não foram encontrados devido à fratura prematura do material, mas fica evidente que menores espessuras estão limitadas a menores ângulos de parede e conseqüentemente menores profundidades.

Para chapas com espessura de 1,0 mm e geometria com ângulo de parede fixo foi possível identificar o ângulo limite de estampagem de 66,5° para o latão e de 68° para o cobre. Nota-se que para estas chapas, variações de 0,5° no ângulo de parede acarretam variações significativas na profundidade de estampagem máxima atingida, acima de 20 mm, e que maiores ângulos podem ser executados desde que a geometria possua menores profundidades.

A medição de espessuras dos perfis estampados para os dois materiais mostrou que a lei do cosseno não é suficiente para prever a variação de espessura, porém a maior diferença entre os valores medidos e o valor previsto foi de 7,7%.

A granulação apresentada pelos dois materiais dificultou a análise das deformações feitas por meio da gravação eletroquímica de uma grade de círculos. Apenas em alguns dos ensaios com ângulo de parede variável foi possível medir as deformações causadas pela estampagem incremental. Estas deformações foram comparadas com o ensaio de Nakazima e mostraram que tanto o latão quanto o cobre são capazes de suportar deformações bem superiores na estampagem incremental.

Levando-se em conta a fratura, o processo *SPIF* apresentou para o latão alongamento 161% maior que o do ensaio de tração e 141% maior em relação ao ensaio de Nakazima. Para o cobre, o alongamento no processo *SPIF* foi 239% maior que o ensaio de tração e 208% maior que o ensaio de Nakazima.

Os resultados obtidos nos experimentos são subsídios importantes quanto aos limites de estampabilidade dos materiais estudados, para as condições ensaiadas, podendo servir de orientação para trabalhos futuros.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar ensaios com diferentes ferramentas e parâmetros;
- Identificar o ângulo limite para as chapas de diferentes espessuras, considerando a mesma metodologia;
- Determinar os desvios dimensionais e geométricos devido ao retorno elástico das chapas estampadas.
- Utilizar simulação por elementos finitos considerando diferentes materiais e variáveis.
- Avaliar a variação de propriedades mecânicas ao longo do perfil estampado.
- Estudar o processo *SPIF* com chapas fabricadas pelo processo de soldagem por mistura e agitação.

REFERÊNCIAS

AMBROGIO, Giuseppina; GAGLIARDI, Francesco. Temperature variation during high speed incremental forming on different lightweight alloys. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 76, n. 9-12, p.1819-1825, 26 set. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6398-y>.

AL-GHAMDI, Khalid A.; HUSSAIN, G.. On the comparison of formability of roll-bonded steel-Cu composite sheet metal in incremental forming and stamping processes. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 87, n. 1-4, p.267-278, 19 fev. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8488-5>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM B36 / B36M-13, Standard Specification for Brass Plate, Sheet, Strip, And Rolled Bar, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. www.astm.org

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM B152 / B152M-13, Standard Specification for Copper Sheet, Strip, Plate, and Rolled Bar, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. www.astm.org

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E8 / E8M-16a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. www.astm.org

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E92, Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. www.astm.org

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E112, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. www.astm.org

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E2218, Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. www.astm.org

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E517, Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018. www.astm.org

ARAÚJO, André Fabiano Rodrigues. **Estampabilidade a quente de chapa espessa da liga de magnésio AZ31**. 2017. 152 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

ARFA, H.; BAHLOUL, R.; BELHADJSALAH, H.. Finite element modelling and experimental investigation of single point incremental forming process of aluminum sheets: influence of process parameters on punch force monitoring and on mechanical and geometrical quality of parts. **International Journal Of Material Forming**, [s.l.], v. 6, n. 4, p.483-510, 4 jun. 2012. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-012-1101-z>.

ASM HANDBOOK. **Forming and Forging**. ASM International. Volume 14, 1996.

ATTANASIO, A. et al. Asymmetric two points incremental forming: Improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 197, n. 1-3, p.59-67, fev. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.053>.

BERTOL, L. S. et al. Avaliação dos ângulos-limite na estampagem incremental de alumínio e titânio. **Corte & Conformação**, Porto Alegre, p.42-51, out. 2012.

BORREGO, M. et al. On the Study of the Single-stage Hole-flanging Process by SPIF. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 132, p.290-297, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.497>.

BRESCIANI F. E.; SILVA, I. B.; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T.. **Conformação Plástica dos Metais**. 6. ed. São Paulo: EPUSP, 2011.

CAVALER, L.C.C. et al. Surface roughness in the incremental forming of aisi 304l stainless steel sheets. **Far East Journal of Mechanical Engineering and Physics**, [s.l.], v. 1, p.87-98, may. 2010. <http://pphmj.com/journals/fjmep.htm>

CAWLEY, B.; ADAMS, D.; JESWIET, J. Examining tool shapes in single point incremental forming. **Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME**, v. 41, p. 114-120, jan. 2013.

COOPER, Daniel R.; ROSSIE, Kathleen E.; GUTOWSKI, Timothy G.. The energy requirements and environmental impacts of sheet metal forming: An analysis of five forming processes. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 244, p.116-135, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.010>.

CRUZ, A.M. et al. Implicação da rugosidade de chapas na estampagem incremental em aço automobilístico. **8° COBEF**, 2015, Salvador.

DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica, 2ª edição. Ed. Guanabara Dois, 1981, 653 p.

DURANTE, M. et al. The influence of tool rotation on an incremental forming process. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 209, n. 9, p.4621-4626, maio 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.11.028>.

DURANTE, M.; FORMISANO, A.; LANGELLA, A.. Observations on the Influence of Tool-Sheet Contact Conditions on an Incremental Forming Process. **Journal Of Materials Engineering And Performance**, [s.l.], v. 20, n. 6, p.941-946, 17 ago. 2010. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-010-9742-x>.

EMMENS, W.c.; SEBASTIANI, G.; BOOGAARD, A.h. van Den. The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 210, n. 8, p.981-997, jun. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.02.014>.

FRATINI, L. et al. Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 53, n. 1, p.207-210, 2004. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60680-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60680-5).

FRITZEN, D. et al. Estudo do processo estampagem incremental em chapa de latão 70/30. **31° SENAFOR**, 2011, Porto Alegre.

FRITZEN, D. et al. SPIF of brass alloys: Preliminary studies. **AIP Conference Proceedings**, 2016. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4963442>.

FRITZEN, Daniel et al. Incremental forming of Cu-35Zn brass alloy. **International Journal Of Material Forming**, [s.l.], p.1-16, 4 ago. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-017-1373-4>.

GOLABI, Sa'id; KHAZAALI, Hossain. Determining frustum depth of 304 stainless steel plates with various diameters and thicknesses by incremental forming. **Journal Of Mechanical Science And Technology**, [s.l.], v. 28, n. 8, p.3273-3278, ago. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-014-0738-6>.

HIRT, G. et al. Forming strategies and Process Modelling for CNC Incremental Sheet Forming. **Cirp Annals**, [s.l.], v. 53, n. 1, p.203-206, 2004. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60679-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60679-9).

HUSSAIN, G.; GAO, L.; DAR, N.u. An experimental study on some formability evaluation methods in negative incremental forming. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 186, n. 1-3, p.45-53, maio 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.12.005>.

JACKSON, Kathryn; ALLWOOD, Julian. The mechanics of incremental sheet forming. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 209, n. 3, p.1158-1174, fev. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.025>.

JAWALE, Kishore et al. Lubrication study for Single Point Incremental Forming of Copper. **Journal Of Physics: Conference Series**, [s.l.], v. 734, p.032038-032041, ago. 2016. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/734/3/032038>.

JESWIET, J. et al. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. **Cirp Annals - Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 54, n. 2, p.88-114, 2005. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60021-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60021-3)

JESWIET, J. et al. Metal forming progress since 2000. **Cirp Journal Of Manufacturing Science And Technology**, [s.l.], v. 1, n. 1, p.2-17, 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2008.06.005>.

JESWIET, J. et al. Single point and asymmetric incremental forming. **Advances In Manufacturing**, [s.l.], v. 3, n. 4, p.253-262, 26 nov. 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s40436-015-0126-1>.

KURRA, Suresh et al. Modeling and optimization of surface roughness in single point incremental forming process. **Journal Of Materials Research And Technology**, [s.l.], v. 4, n. 3, p.304-313, jul. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.01.003>.

LEHTINEN, Pekka et al. The Effect of Local Heating by Laser Irradiation for Aluminum, Deep Drawing Steel and Copper Sheets in Incremental Sheet Forming. **Physics Procedia**, [s.l.], v. 78, p.312-319, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.045>.

LI, Yanle et al. Simulation and Experimental Observations of Effect of Different Contact Interfaces on the Incremental Sheet Forming Process. **Materials And Manufacturing Processes**, [s.l.], v. 29, n. 2, p.121-128, fev. 2014. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2013.822977>.

LU, B. et al. Feature-based tool path generation approach for incremental sheet forming process. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 213, n. 7, p.1221-1233, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.01.023>.

LU, B. et al. Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, [s.l.], v. 85, p.14-29, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.04.007>.

LU, B. et al. Investigation of material deformation mechanism in double side incremental sheet forming. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, [s.l.], v. 93, p.37-48, jun. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.03.007>.

MARTÍNEZ-ROMERO, Oscar et al. Tool Dynamics During Single Point Incremental Forming Process. ***Procedia Engineering***, [s.l.], v. 81, p.2286-2291, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.322>.

MCANULTY, T.; JESWIET, J.; DOOLAN, M.; Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art, ***CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology***, Volume 16, January 2017, Pages 43-54, ISSN 1755-5817. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.07.003>.

MICARI, F.; AMBROGIO, G.; FILICE, L.. Shape and dimensional accuracy in Single Point Incremental Forming: State of the art and future trends. ***Journal Of Materials Processing Technology***, [s.l.], v. 191, n. 1-3, p.390-395, ago. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.066>.

OLEKSIK, Valentin. Influence of Geometrical Parameters, Wall Angle and Part Shape on Thickness Reduction of Single Point Incremental Forming. ***Procedia Engineering***, [s.l.], v. 81, p.2280-2285, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.321>.

PALUMBO, G.; BRANDIZZI, M.. Experimental investigations on the single point incremental forming of a titanium alloy component combining static heating with high tool rotation speed. ***Materials & Design***, [s.l.], v. 40, p.43-51, set. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.03.031>.

PARK, Jong-jin; KIM, Yung-ho. Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique. ***Journal Of Materials Processing Technology***, [s.l.], v. 140, n. 1-3, p.447-453, set. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136\(03\)00768-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136(03)00768-4).

RADU, Crina et al. Analysis of the surface quality of parts processed by single point incremental forming. ***Journal of Engineering Studies and Research***, [s.l.], v. 19, p.76-79, 2013.

SALEM, Erika et al. Investigation of Thickness Variation in Single Point Incremental Forming. **Procedia Manufacturing**, [s.l.], v. 5, p.828-837, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.068>.

SILVA, M.b. et al. Single Point Incremental Forming of Metal Sheets. **Annual Winter Meeting of Danish Society for Metallurgy**, jan. 2009a.

SILVA, M.b. et al. Single point incremental forming of tailored blanks produced by friction stir welding. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 209, n. 2, p.811-820, jan. 2009b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.057>.

SILVA, M.b.; MARTINS, P.a.f.. Incremental Sheet Forming. **Comprehensive Materials Processing**, [s.l.], p.7-26, 2014. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-096532-1.00301-0>.

SOUSA, R.j. Alves de et al. SPIF-A: on the development of a new concept of incremental forming machine. **Structural Engineering And Mechanics**, [s.l.], v. 49, n. 5, p.645-660, 10 mar. 2014. Techno-Press. <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2014.49.5.645>.

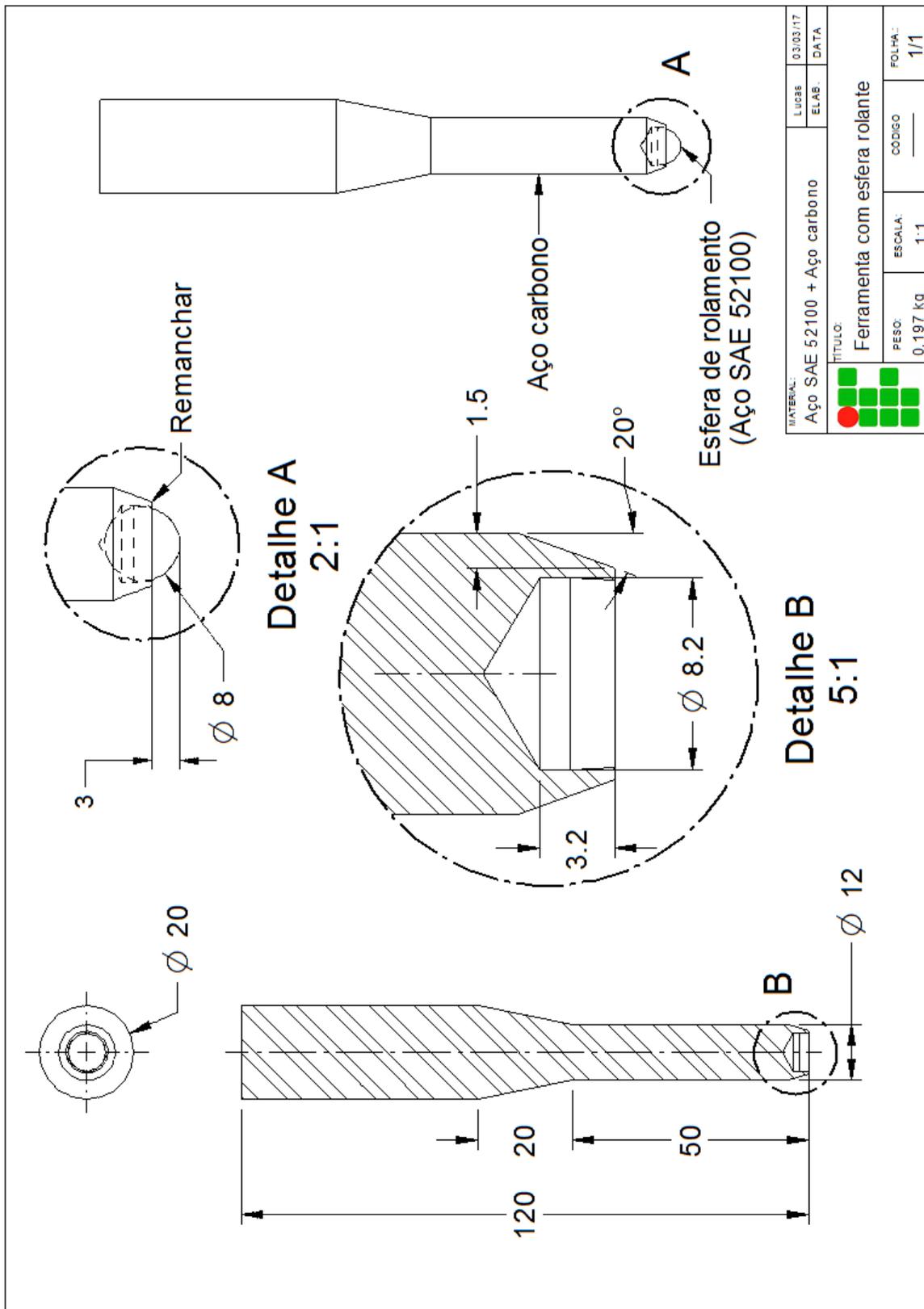
VALOPPI, Beatrice et al. A hybrid mixed double-sided incremental forming method for forming Ti6Al4V alloy. **Cirp Annals**, [s.l.], v. 65, n. 1, p.309-312, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.135>.

UHEIDA, E.H.; OOSTHUIZEN, G.A.; DIMITROV, D.. Investigating the Impact of Tool Velocity on the Process Conditions in Incremental Forming of Titanium Sheets. **Procedia Manufacturing**, [s.l.], v. 7, p.345-350, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.085>.

ZIRAN, Xu et al. The performance of flat end and hemispherical end tools in single-point incremental forming. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 46, n. 9-12, p.1113-1118, 5 jul. 2009. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-009-2179-4>.

APÊNDICE I

Ferramenta com esfera rolante



APÊNDICE II

Medições das elipses no ensaio de Nakazima do latão Ø 100.

Elipse	C_f (mm)	L_f (mm)	ε_1 (%)	ε_2 (%)
Falha	4,15	2,24	65,88	-10,48
Falha	4,35	2,00	73,96	-19,92
Falha	4,33	2,07	73,04	-17,24
Falha	4,21	2,43	68,24	-2,92
Falha	4,12	2,16	64,76	-13,56
Margem	3,02	2,36	20,72	-5,76
Margem	3,42	2,42	36,60	-3,12
Margem	3,69	2,45	47,40	-1,88
Margem	3,54	2,53	41,52	1,16
Margem	3,58	2,46	43,32	-1,72
Margem	3,46	2,56	38,28	2,52
Margem	3,35	2,33	34,12	-6,76
Margem	3,02	2,18	20,68	-12,92
Margem	3,02	2,31	20,92	-7,48
Margem	3,10	2,27	24,04	-9,16
Bom	3,14	2,55	25,64	2,00
Bom	2,99	2,53	19,40	1,08
Bom	3,19	2,55	27,52	2,12
Bom	2,73	2,17	9,00	-13,24
Bom	3,37	2,38	34,84	-4,96
Bom	3,00	2,32	19,92	-7,28
Bom	2,82	2,27	12,96	-9,40
Bom	3,11	2,68	24,48	7,28
Bom	3,08	2,58	23,16	3,24
Bom	3,60	2,26	43,96	-9,80

Medições das elipses no ensaio de Nakazima do latão R40.

Elipse	C_f (mm)	L_f (mm)	ε_1 (%)	ε_2 (%)
Falha	4,56	2,13	82,32	-14,64
Falha	4,21	1,86	68,32	-25,48
Falha	4,16	1,65	66,24	-33,96
Falha	3,91	1,75	56,24	-30,00
Falha	4,17	1,79	66,96	-28,56
Margem	4,11	2,34	64,56	-6,44
Margem	4,11	2,34	64,52	-6,24
Margem	3,82	2,39	52,84	-4,56
Margem	3,71	2,38	48,40	-4,80
Margem	3,98	2,43	59,20	-2,84
Margem	3,90	2,27	55,80	-9,32
Margem	4,27	2,25	70,80	-10,04
Margem	3,94	2,16	57,60	-13,48
Margem	4,02	2,13	60,64	-14,68
Bom	4,13	2,44	65,24	-2,40
Bom	3,42	2,26	36,72	-9,72
Bom	3,52	2,39	40,60	-4,48
Bom	3,56	2,31	42,28	-7,48
Bom	3,68	2,34	47,32	-6,40
Bom	3,78	2,16	51,00	-13,60
Bom	3,49	2,23	39,56	-10,76
Bom	3,61	2,27	44,48	-9,40
Bom	3,49	2,16	39,52	-13,60
Bom	3,55	2,23	41,80	-10,84

Medições das elipses no ensaio de Nakazima do latão R45.

Elipse	C_f (mm)	L_f (mm)	ϵ_1 (%)	ϵ_2 (%)
Falha	4,57	1,77	82,88	-29,40
Falha	4,53	1,92	81,00	-23,20
Falha	4,72	1,80	88,64	-28,12
Falha	4,22	1,95	68,76	-21,96
Margem	3,80	2,06	51,84	-17,60
Margem	3,73	2,12	49,04	-15,28
Margem	3,97	1,83	58,80	-26,84
Margem	3,65	2,21	46,04	-11,76
Margem	3,65	2,09	45,88	-16,60
Margem	3,45	1,84	37,96	-26,44
Bom	3,38	2,32	35,24	-7,04
Bom	3,47	2,14	38,96	-14,48
Bom	3,40	2,16	36,00	-13,64

Medições das elipses no ensaio de Nakazima do cobre Ø 100.

Elipse	C_f (mm)	L_f (mm)	ϵ_1 (%)	ϵ_2 (%)
Falha	4,06	2,31	62,40	-7,68
Falha	3,73	2,48	49,24	-0,88
Falha	3,98	2,54	59,16	1,60
Falha	3,76	2,51	50,52	0,32
Falha	3,81	2,34	52,52	-6,48
Falha	4,05	2,48	62,00	-0,64
Margem	2,95	2,63	18,12	5,20
Margem	3,06	2,54	22,48	1,56
Margem	3,20	2,71	28,08	8,44
Margem	2,94	2,62	17,52	4,96
Margem	2,76	2,46	10,28	-1,80
Margem	3,40	2,51	36,16	0,32
Margem	2,67	2,45	6,80	-2,16
Margem	3,18	2,53	27,36	1,32
Margem	3,11	2,65	24,36	6,12
Margem	3,28	2,55	31,12	2,00
Margem	3,22	2,53	28,92	1,00
Margem	3,17	2,57	26,92	2,84
Bom	2,89	2,53	15,64	1,32
Bom	3,25	2,49	30,04	-0,44
Bom	3,11	2,51	24,44	0,24
Bom	2,92	2,52	16,92	0,68
Bom	2,78	2,68	11,36	7,28

Medições das elipses no ensaio de Nakazima do cobre R30.

Elipse	C_f (mm)	L_f (mm)	ϵ_1 (%)	ϵ_2 (%)
Falha	3,79	2,16	51,72	-13,60
Falha	4,23	2,28	69,32	-8,80
Falha	3,34	2,35	33,76	-6,20
Falha	3,47	2,01	38,76	-19,60
Falha	3,79	2,02	51,44	-19,16
Falha	3,68	2,39	47,12	-4,32
Falha	3,45	2,28	38,00	-8,76
Margem	3,33	2,42	33,36	-3,36
Margem	3,35	2,25	34,04	-10,12
Margem	3,35	2,37	33,80	-5,28
Margem	3,35	2,31	33,96	-7,60
Margem	3,03	2,23	21,36	-11,00
Margem	2,91	2,27	16,40	-9,36
Margem	3,38	2,21	35,36	-11,56
Margem	2,81	2,07	12,32	-17,40
Margem	3,09	2,32	23,64	-7,28
Margem	3,31	2,44	32,28	-2,28
Margem	2,88	2,23	15,20	-10,84
Margem	3,03	2,31	21,28	-7,76
Bom	3,25	2,21	29,96	-11,56
Bom	3,06	2,18	22,24	-12,92
Bom	2,77	2,14	10,72	-14,60
Bom	2,85	2,29	13,92	-8,48
Bom	3,00	2,33	19,92	-6,72
Bom	3,12	2,39	24,60	-4,32
Bom	3,14	2,34	25,64	-6,28

Medições das elipses no ensaio de Nakazima do cobre R40.

Elipse	C_f (mm)	L_f (mm)	ϵ_1 (%)	ϵ_2 (%)
Falha	4,32	2,29	72,76	-8,28
Falha	4,33	2,44	73,32	-2,40
Falha	3,91	1,90	56,48	-24,04
Falha	3,87	2,27	54,72	-9,32
Falha	3,76	2,27	50,52	-9,36
Margem	3,58	2,20	43,16	-12,04
Margem	3,53	2,09	41,08	-16,36
Margem	3,66	2,13	46,40	-14,64
Margem	3,69	2,18	47,72	-12,88
Margem	2,92	2,06	16,84	-17,68
Margem	2,98	2,08	19,28	-16,72
Margem	3,11	2,23	24,32	-10,76
Margem	3,10	2,18	24,16	-12,96
Margem	2,94	2,14	17,52	-14,32
Bom	3,30	2,23	31,88	-10,96
Bom	3,23	2,17	29,00	-13,28
Bom	3,31	2,15	32,56	-14,08
Bom	3,31	1,96	32,36	-21,80
Bom	3,21	1,99	28,24	-20,48

Medições das elipses no ensaio de Nakazima do cobre R45.

Elipse	C_f (mm)	L_f (mm)	ϵ_1 (%)	ϵ_2 (%)
Falha	4,22	2,13	68,84	-14,84
Falha	3,93	1,74	57,00	-30,52
Falha	3,94	2,15	57,72	-13,96
Falha	3,94	2,10	57,76	-15,84
Falha	3,64	1,89	45,60	-24,56
Falha	3,93	1,61	57,20	-35,80
Margem	3,38	1,93	35,00	-22,88
Margem	3,11	1,98	24,32	-20,68
Margem	3,26	1,91	30,28	-23,68
Margem	3,25	2,19	30,04	-12,56
Margem	3,10	2,20	23,92	-12,12
Margem	3,23	2,09	29,12	-16,28
Bom	2,88	2,01	15,32	-19,56
Bom	2,80	2,09	12,00	-16,56
Bom	2,92	1,98	16,80	-20,80
Bom	2,89	2,09	15,52	-16,52

APÊNDICE III

Medições das elipses no processo *SPIF* do latão com ângulo de parede variável circular (1).

Elipse	C_f (mm)	L_f (mm)	ε_1 (%)	ε_2 (%)
Falha	7,56	2,55	202,52	2,16
Falha	6,22	2,44	148,96	-2,52
Falha	6,76	2,33	170,24	-6,72
Falha	6,50	2,51	160,04	0,52
Falha	5,83	2,57	133,36	2,68
Falha	6,56	2,45	162,40	-1,88
Margem	5,05	2,18	101,80	-12,92
Margem	6,23	2,72	149,12	8,88
Margem	4,22	2,42	68,68	-3,40
Margem	4,88	2,25	95,28	-10,04
Margem	4,99	2,91	99,76	16,28
Margem	5,00	2,47	100,16	-1,40
Margem	4,49	2,25	79,52	-10,04
Margem	5,30	2,46	111,92	-1,52
Bom	4,35	2,46	74,04	-1,48
Bom	4,67	2,41	86,88	-3,76
Bom	3,56	2,46	42,24	-1,68
Bom	3,45	2,61	37,84	4,20
Bom	3,69	2,76	47,44	10,32
Bom	3,48	2,89	39,36	15,52
Bom	4,37	2,68	74,64	7,24
Bom	3,66	2,78	46,40	11,00

Medições das elipses no processo *SPIF* do latão com ângulo de parede variável circular (2).

Elipse	C_f (mm)	L_f (mm)	ε_1 (%)	ε_2 (%)
Falha	7,12	2,92	184,80	16,84
Falha	5,96	2,88	138,44	15,24
Falha	6,73	2,14	169,16	-14,28
Falha	7,02	2,82	180,80	12,84
Falha	7,89	2,90	215,64	16,12
Falha	7,88	2,97	215,12	18,80
Falha	7,67	2,44	206,68	-2,24
Falha	7,11	2,75	184,52	9,88
Margem	5,29	2,46	111,52	-1,56
Margem	5,80	2,50	132,00	0,04
Margem	6,28	2,54	151,12	1,52
Margem	5,58	2,83	123,00	13,32
Margem	4,99	2,80	99,76	11,92
Margem	5,11	2,62	104,36	4,84
Margem	5,14	2,68	105,56	7,32
Margem	5,11	3,04	104,36	21,52
Margem	4,80	2,43	91,80	-2,72
Margem	5,64	2,57	125,68	2,68
Bom	4,85	2,68	93,84	7,20
Bom	4,76	2,68	90,52	7,32
Bom	4,63	2,70	85,00	8,00
Bom	4,64	3,06	85,72	22,24
Bom	4,06	3,12	62,36	24,80

Medições das elipses no processo *SPIF* do cobre com ângulo de parede variável circular (1).

Elipse	C_f (mm)	L_f (mm)	ε_1 (%)	ε_2 (%)
Falha	5,59	2,31	123,72	-7,80
Falha	6,03	2,80	141,36	11,92
Falha	5,17	2,58	106,96	3,32
Falha	6,81	2,23	172,48	-10,80
Falha	6,07	2,43	142,68	-2,92
Margem	4,91	2,21	96,32	-11,68
Margem	4,89	2,40	95,40	-3,84
Margem	4,77	2,32	90,80	-7,12
Margem	4,50	2,57	79,92	2,84
Margem	5,50	2,22	120,04	-11,04
Bom	4,13	2,19	65,28	-12,44
Bom	3,82	2,55	52,84	1,88
Bom	3,59	2,24	43,64	-10,56
Bom	3,99	2,61	59,72	4,40
Bom	4,31	2,27	72,44	-9,12

Medições das elipses no processo *SPIF* do cobre com ângulo de parede variável circular (2).

Elipse	C_f (mm)	L_f (mm)	ε_1 (%)	ε_2 (%)
Falha	6,93	2,40	177,00	-3,84
Falha	7,88	2,27	215,36	-9,24
Falha	6,00	2,72	140,08	8,84
Falha	9,01	2,64	260,52	5,52
Falha	8,51	2,83	240,52	13,36
Falha	8,37	2,33	234,72	-6,72
Falha	6,65	2,63	166,12	5,36
Falha	6,18	2,61	147,08	4,28
Falha	8,46	2,59	238,36	3,44
Falha	8,10	3,12	223,96	24,92
Margem	6,90	2,56	176,04	2,52
Margem	4,83	2,65	93,36	5,96
Margem	6,10	2,54	143,92	1,72
Margem	6,03	2,59	141,28	3,48
Margem	6,51	2,66	160,52	6,24
Bom	5,20	2,45	108,04	-2,12
Bom	5,75	2,63	130,16	5,12
Bom	5,33	2,76	113,28	10,48
Bom	4,23	2,53	69,20	1,24
Bom	4,41	2,79	76,44	11,52
Bom	4,36	2,67	74,44	6,88
Bom	4,44	2,67	77,68	6,88
Bom	4,25	2,23	69,80	-10,84