



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL



Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos  
Materiais  
PPGEM

ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE MULTIPLOS PASSES  
EM CHAPA DE LATÃO C268

Gerson Maximiliano

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre  
2016



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL



Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos  
Materiais  
PPGEM

## ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE MULTIPLOS PASSES EM CHAPA DE LATÃO C268

Gerson Maximiliano

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre  
2016

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Ing Lirio Schaeffer

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Anderson Daleffe (Faculdade SATC – SC)

Prof. Dr. Eng. Luis Fernando Folle (UniRitter – RS)

Prof. Dr. Eng. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler (Faculdade SATC – SC)

**Suplente:**

Prof. Dr. Eng. Fábio André Lora (SENAI-Cimatec – BA)

Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann  
Coordenador do PPGEM

Dedico ao meu filho João Vitor e a minha esposa Elister, pelo apoio, paciência e motivação dedicados a mim durante a elaboração deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ing Lírio Schaeffer pelo estímulo, pela paciência e pela divisão de conhecimentos que ele me proporcionou durante a produção desta, e pela receptividade, meu sincero agradecimento.

Aos colegas da Faculdade SATC, especialmente ao MSc. Daniel Fritzen, pela sua colaboração como revisor, com observações e orientações importantes ao trabalho.

À todos do Ldtm que de forma direta ou indiretamente contribuíram com o apoio técnico e científico para a elaboração deste trabalho.

Ao colega Dr. Anderson Daleffe, pelo suporte técnico na execução e disponibilidade dos ensaios e para fabricação dos dispositivos e ferramentas utilizados neste trabalho.

Ao coordenador do curso de Técnico em Fabricação Mecânica, Hildo Tomazzi pelo incentivo e apoio incondicional na realização deste trabalho.

Ao colega MSc. Fernando Michelin Marques, pela prestação de serviços e disponibilidade dos aparelhos de medição.

À Instituição SATC, pela disponibilidade de equipamentos e ferramentas para a execução dos experimentos práticos e as análises de fundamental importância para a dissertação.

À todos os colegas da SATC que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu sincero reconhecimento.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	08
LISTA DE TABELAS .....	13
LISTA DE ABREVIATURAS.....	14
LISTA DE SÍMBOLOS .....	15
LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS.....	16
RESUMO .....	17
ABSTRACT .....	18
1 INTRODUÇÃO .....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	23
2.1 Estampagem incremental.....	23
2.2 Descrição dos processos.....	26
2.2.1 Tipos de Estampagem Incremental.....	27
2.2.1.1 Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF) .....	28
2.2.1.2 Estampagem Incremental com Dois Pontos de Apoio (TPIF) .....	30
2.2.1.3 Estampagem Incremental em Múltiplos Passes (MSPIF) .....	33
2.3 Limitações do Processo Relacionadas à Geometria das Peças.....	36
2.4 Índice de anisotropia.....	40
2.5 Ligas de Cobre-zinco .....	42
2.6 Chapa de Latão C268.....	45
2.6.1 Análise Química.....	46
2.6.2 Propriedades Físicas.....	46
2.6.3 Características Mecânicas e Tecnológicas.....	47
2.7 Propriedades da liga de Latão .....	48
2.7.1 Ensaio e resultados.....	48
2.8 Parâmetros de rugosidade.....	58
2.8.1 Parâmetro Ra (Rugosidade média absoluta) .....	59
2.8.2 Parâmetro Rz (Rugosidade média real) .....	59
2.8.3 Parâmetro Rt (Rugosidade total) .....	60

3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	61
3.1 Caracterização da Chapa de Latão C-268.....	61
3.1.1 Propriedades Mecânicas do Latão C-268 .....	61
3.1.2 Curva Tensão x Deformação (Convencional) .....	61
3.2 Modelamentos da forma geométrica de estudo.....	70
3.3 Preparações do Blank.....	71
3.4 Gravação Eletroquímica.....	72
3.5 Escolha da máquina- erramenta.....	72
2.6 Escolha da ferramenta.....	73
3.7 Montagem do dispositivo de estampagem (prensa-chapas) .....	74
3.8 Determinação das estratégias de usinagem.....	75
3.9 Escolha do lubrificante.....	76
4 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	78
4.1 Execução dos experimentos.....	78
4.2 Medição das deformações verdadeiras.....	82
4.3 Medições da rugosidade.....	91
5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	95
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Trabalhos relacionados com estampagem incremental no Ldtm.....	21
Figura 1.2: Trabalhos de doutorado realizados no Ldtm.....	21
Figura 1.3: Diagrama dos trabalhos realizados .....	22
Figura 2.1: Variantes da estampagem incremental de chapa (Editado de SOEIRO, 2014) .....	25
Figura 2.2: Ciclo de aplicação da estampagem incremental (AMBROGIO, 2005) apud (CASTELAN, 2009) .....	25
Figura 2.3: Princípio do processo de estampagem incremental (Editado de MARTINS, BAY, et al., 2008) .....	26
Figura 2.4: Sequência de etapas do processo de estampagem de chapa (LOPES, 2013) .	27
Figura 2.5: Elementos básicos necessários para a conformação incremental de chapa (Editado de JESWIET, 2005) <i>apud</i> (LOPES, 2013) .....	27
Figura 2.6: Estampagem incremental de ponto simples. a) situação inicial, b) situação final.....	28
Figura 2.7: Esquema representativo da estampagem incremental de dois pontos com suporte estático (genérico). a) situação inicial, b) situação final .....	29
Figura 2.8: Trajetória da ferramenta de deformação para formar um cone em chapa.....	31
Figura 2.9: Esquema representativo da estampagem incremental de dois pontos com matriz (suporte específico). a) situação inicial, b) situação final, c) detalhe da matriz.....	31
Figura 2.10: TPIF com suporte assimétrico de configuração positiva. a) situação inicial, b) situação final.....	32
Figura 2.11: TPIF com suporte assimétrico de configuração negativa. a) situação inicial, b) situação final.....	33
Figura 2.12: Estampagem em múltiplos passes e o efeito do encruamento. No detalhe, o encruamento dos grãos, fenômeno que causa o aumento da resistência ao escoamento (Editado de BAMBACH, 2008) apud (CASTELAN 2010) .....	34
Figura 2.13: Espessura em função da profundidade (DUFLOU, <i>et al.</i> , 2008), .....	34
Figura 2.14: Variação da espessura da base do cone estampado (Editado de DUFLOU, et al. 2008) .....	35
Figura 2.15: Redução da espessura de parede. (Editado de JUNK et al., 2003), apud (SILVA, 2011) .....	37

Figura 2.16: Relação entre o ângulo de parede e a espessura da chapa no processo de estampagem incremental - Equação dos senos - (Editado de SILVA, 2011) .....	37
Figura 2.17: Variação da inclinação da chapa (Editado de HUSSAIN et al., 2007) .....	38
Figura 2.18: Diagrama de correção de desvios (MEIER et al, 2009) .....	39
Figura 2.19: Definição das deformações do corpo de prova para obter o índice de anisotropia (Editado de FERRARINI, 2004) .....	40
Figura 2.20: Diagrama de fases cobre-zinco. (Editado de CALLISTER JR, 2002) .....	43
Figura 2.21: Microestrutura de latão (Cu-Zn), trabalhado a frio e recozido, apresentando maclas de recozimento: Cu 89.0-90.0%, Zn 8.9-11.0%, Fe 0.05%, Pb 0.05%;(CDA,2013) .....	44
Figura 2.22: Microestrutura de latão (Cu-Zn), trabalhado a frio e recozido, apresentando maclas de recozimento: Cu 68.5-71.5%, Zn 28.38-31.38%, Pb 0.07%, Fe 0.05%(CDA,2013) .....	44
Figura 2.23: Diagrama convencional Tensão x Deformação Relativa (Editado de SCHAEFFER, 2004) .....	49
Figura 2.24: Máquina de ensaios EMIC com capacidade de 600kN.....	50
Figura 2.25: Dimensões esquemáticas num ensaio de tração (Editado de SCHAEFFER, 2004) .....	51
Figura 2.26: Curva convencional $\sigma$ x $\epsilon$ latão 70/30. a) Sentido de longitudinal (0° da laminação) b) Sentido de oblíquo (45° da laminação), c) Sentido de transversal (90° da laminação), (FRITZEN, 2012) .....	52
Figura 2.27: Curva de Escoamento em escala logarítmica do corpo de prova com sentido de laminação a 0° do latão 70/30 (Editado de FRITZEN, 2012) .....	56
Figura 2.28: Rugosidade RZ sob condições de estampagem incremental (JESWIET, MICARI, <i>et al.</i> , 2005) apud (FRITZEN 2012) .....	59
Figura 3.1: Dimensões do corpo de prova (Editado de ABNT 6152) .....	61
Figura 3.2: a) Corpo de Prova original; b) Corpos de Prova após ensaio de tração.....	62
Figura 3.3: Curva Convencional do corpo de prova 01 com sentido de laminação a 0° do latão C-268.....	62

Figura 3.4: Curva Convencional do corpo de prova 01 com sentido de laminação a 45° do latão C-268.....	63
Figura 3.5: Curva Convencional do corpo de prova 01 com sentido de laminação a 90° do latão C-268.....	63
Figura 3.6: Dimensões do corpo de prova 02, sentido longitudinal (0°) antes e depois do ensaio de tração.....	64
Figura 3.7: Curva de Escoamento do corpo de prova 02 com sentido de laminação a 0° do latão C-268. ....	66
Figura 3.8: Curva de Escoamento do corpo de prova 02 com sentido de laminação a 45° do latão C-268. ....	67
Figura 3.9: Curva de Escoamento do corpo de prova 02 com sentido de laminação a 90° do latão C-268.....	67
Figura 3.10: Gráfico $\log(k_f) \times \log(\varphi)$ com a equação da reta tangente do corpo de prova 02 com sentido de laminação a 0° do latão C-268.....	68
Figura 3.11: Gráfico $\log(k_f) \times \log(\varphi)$ com a equação da reta tangente do corpo de prova 02 com sentido de laminação a 45° do latão C-268.....	68
Figura 3.12: Gráfico $\log(k_f) \times \log(\varphi)$ com a equação da reta tangente do corpo de prova 02 com sentido de laminação a 90° do latão C-268.....	69
Figura 3.13: Desenho de detalhamento do modelo de estudo.....	70
Figura 3.14: Modelamento do modelo de estudo.....	71
Figura 3.15: Chapa cortada nas dimensões projetadas.....	71
Figura 3.16: a) Gravador de metais; b) Tela de serigrafia; c) Ácido para latão.....	72
Figura 3.17: Centro de usinagem modelo D 600.....	73
Figura 3.18: Desenho Projetivo da Ferramenta de Estampar.....	73
Figura 3.19: Montagem no mandril porta-pinça.....	74
Figura 3.20: Dispositivo de estampagem (prensa-chapas) montado.....	74
Figura 3.21: Interface do software EdgeCAM®.....	75
Figura 3.22: Configuração do software EdgeCAM®.....	75
Figura 3.23: Simulação da trajetória helicoidal.....	76
Figura 3.24: Graxa a base de lítio.....	77

Figura 3.25: a) Chapa lubrificada; b) Ferramenta lubrificada; c) Residual de lubrificante depois da conformação.....	77
Figura 4.1: Plano de corte do suporte.....	82
Figura 4.2: Montagem e fixação do microscópio.....	83
Figura 4.3: Deslocamentos em três eixos.....	83
Figura 4.4: Ajuste rotativo.....	84
Figura 4.5: a) Imagens das deformações (640 x 480 pixels) b) Região das medições ..	84
Figura 4.6: Imagens alinhadas restituídas.....	85
Figura 4.7: Círculos alinhados sem deformação.....	86
Figura 4.8: Equivalência de medida.....	86
Figura 4.9: a) cota antes da escala - b) depois da escala aplicada.....	87
Figura 4.10: Princípio da determinação das deformações. (SCHAEFFER, 2004) .....	87
Figura 4.11: a) Cotas (a) e (b) para cálculo de ( $\phi_1$ e $\phi_2$ ) e distancia( $d'$ )para ângulo de parede( $\psi$ ) de $58^\circ/59^\circ$ direção longitudinal de laminação ( $0^\circ$ ); b)Cotas (a) e (b) para cálculo de( $\phi_1$ e $\phi_2$ ) e distancia( $d'$ )para ângulo de parede( $\psi$ ) de $58^\circ/59^\circ$ direção transversal de laminação ( $90^\circ$ ) .....	88
Figura 4.12: Deformação verdadeira ( $\phi$ ) x Distância do ponto de partida $d'$ a $0^\circ$ em relação a direção de laminação. ( $\psi: 58^\circ/59^\circ$ ).....	89
Figura 4.13: Deformação verdadeira ( $\phi$ ) x Distância do ponto de partida $d'$ a $90^\circ$ em relação a direção de laminação. ( $\psi: 58^\circ/59^\circ$ ).....	90
Figura 4.14: Redução de espessura para o experimento da Etapa C ( $\psi: 58/59^\circ$ ) .....	90
Figura 4.15: Direção da laminação com a chapa conformada.....	91
Figura 4.16: Medição da rugosidade da amostra.....	91
Figura 4.17: Rugosidades $R_a$ nas duas direções de laminação.....	92
Figura 4.18: Rugosidades $R_z$ nas duas direções de laminação.....	92

Figura 4.19: Rugosidades $R_t$ nas duas direções de laminação.....	93
Figura 4.20: Rugosidades $R_a$ , $R_z$ e $R_t$ .....	94
Figura 5.1: Quadro comparativo do experimento.....	95
Figura 5.2: Tensão Máxima para o latão 70/30 e latão C-268.....	96
Figura 5.3: Tensão de escoamento para o latão 70/30 e latão C-268.....	96
Figura 5.4: Índice de anisotropia para o latão 70/30 e latão C-268.....	96
Figura 5.5: Deformação verdadeira para o latão 70/30 e latão C-268.....	97
Figura 5.6: Alongamento para o latão 70/30 e latão C-268.....	97
Figura 5.7: Constante do material na curva de escoamento para o latão 70/30 e latão C-268 .....	97
Figura 5.8: Índice de encruamento para o latão 70/30 e latão C-268.....	98
Figura 5.9: Plotagem das equações de resistência ao escoamento para o latão 70/30 e latão C-268 .....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Aplicações Típicas do Latão C268. (TERMOMECANICA, 2013) .....	45
Tabela 2.2: Normas correspondentes (TERMOMECANICA, 2013) .....	46
Tabela 2.3: Limites de composição química do Latão C268. (TERMOMECANICA, 2013) .....	46
Tabela 2.4: Propriedades físicas do Latão C268. (TERMOMECANICA, 2013) .....	46
Tabela 2.5: Características tecnológicas do Latão C268. (TERMOMECANICA, 2013) .....	47
Tabela 2.6: Propriedades Mecânicas em Temperatura Ambiente Válidas para a Forma e o Grau de Dureza Indicados. (TERMOMECANICA, 2013) .....	47
Tabela 2.7: Exigências para Materiais Recozidos - Tamanho de Grão para Fitas no Grau de Dureza Indicado (TERMOMECANICA, 2013) .....	48
Tabela 2.8: Dados do material após o ensaio de tração. (FRITZEN, 2012) .....	53
Tabela 2.9: Valores do índice de anisotropia do latão 70/30 (FRITZEN, 2012) .....	53
Tabela 2.10: Propriedade mecânicas obtidas com os corpos de prova do latão C-268 ...	64
Tabela 2.11: Resultado dos valores C e n dos corpos de prova ensaiados.....	69
Tabela 2.12: Índices de anisotropia.....	70
Tabela 4.1: Primeira Etapa (Etapa A) .....	78
Tabela 4.2: Segunda Etapa (Etapa B) .....	80
Tabela 4.3: Terceira Etapa (Etapa C) .....	81
Tabela 4.4: Direção longitudinal de laminação (0°) .....	88
Tabela 4.5: Direção transversal de laminação (90°) .....	89
Tabela 4.6: Relação das rugosidades medidas .....	93
Tabela 5.1: Equações de resistência ao escoamento para o latão 70/30 e latão C-268.....	98

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASPIF	Estampagem Incremental Assimétrica com Ponto Simples ( <i>Asymmetric single point incremental forming</i> ).
CAD	Desenho Auxiliado por Computador ( <i>Computer Aided Design</i> )
CAM	Manufatura Auxiliada por Computador( <i>Computer Aided Manufacturing</i> )
CCC	Cúbica de Faces Centradas
CFC	Cúbica de Face Centrada
CLC	Curva Limite de Conformação
CLT	Curva Limite de tensão
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DIN	Instituto Alemão para Normatização ( <i>Deutsches Institut für Normung</i> )
FEM	Método de Elementos Finitos ( <i>Finite Element Method</i> )
HC	Estrutura hexagonal compacta
I.A.C.S.	International Annealed Copper Standard
ISF	Estampagem Incremental ( <i>Incremental Sheet Forming</i> )
LDTM	Laboratório de Transformação Mecânica
MSPIF	Estampagem Incremental de Múltiplos Passes ( <i>Multi Pass Single Point Incremental Forming</i> )
NC	Comando Numérico ( <i>Numerical control</i> )
SPIF	Estampagem Incremental com Ponto Simples ( <i>Single Point Incremental Forming</i> )
TPIF	Estampagem Incremental com Dois Pontos de Apoio ( <i>Two Points Incremental Forming</i> )
UFRGS	Universidade do Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_0$	Área inicial	[ mm <sup>2</sup> ]
$A_1$	Área final	[ mm <sup>2</sup> ]
$b_0$	Largura inicial	[ mm ]
$b_1$	Largura final	[ mm ]
$d'$	Distância do ponto de partida	[ mm ]
$C$	Constante do material na Curva de Escoamento: $k_f = C \cdot \varphi^n$	[ MPa ]
$E$	Módulo de Elasticidade	[ N/mm <sup>2</sup> ]
$F$	Força de conformação	[ N ]
$F_{máx}$	Força máxima aplicada	[ N ]
$k_f$	Tensão do Escoamento	[ MPa ]
$l$	Comprimento instantâneo da chapa	[ mm ]
$l_0$	Comprimento inicial	[ mm ]
$l_1$	Comprimento final	[ mm ]
$n$	Índice de encruamento	[ - ]
$R_a$	Rugosidade média aritmética	[ μm ]
$R_T$	Rugosidade máxima	[ μm ]
$R_Z$	Média da rugosidade	[ μm ]
$r$	Índice de anisotropia	[ - ]
$R_f$	Raio da ferramenta	[ mm ]
$s$	Espessura da chapa	[ mm ]
$s_0$	Espessura inicial da chapa	[ mm ]
$s_1$	Espessura da chapa medida em um determinado estágio do processo de conformação	[ mm ]
$V_0$	Volume inicial	[ mm <sup>3</sup> ]
$V_1$	Volume final	[ mm <sup>3</sup> ]
$V_c$	Velocidade de rotação	[ mm/min ]
$V_{fh}$	Velocidade de mergulho no eixo XY	[ mm/min ]
$V_z$	Velocidade de mergulho no eixo Z	[ mm/min ]

## LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

$\delta$	Alongamento	[ % ]
$\sigma$	Tensão	[ MPa ]
$\sigma_e$	Tensão de Escoamento Convencional	[ MPa ]
$\sigma_B$	Limite de Resistência ou Tensão Máxima	[ MPa ]
$\sigma_R$	Tensão de Ruptura	[ MPa ]
$\Delta b$	Deformação absoluta na largura	[ mm ]
$\Delta l$	Deformação absoluta no comprimento	[ mm ]
$\Delta r$	Anisotropia planar	[ - ]
$\Delta s$	Deformação absoluta na espessura	[ mm ]
$\Delta Z$	Incremento vertical (Direção Z)	[ mm ]
$\varepsilon$	Deformação relativa	[ % ]
$\varepsilon_b$	Deformação relativa na largura	[ % ]
$\varepsilon_l$	Deformação relativa no comprimento	[ % ]
$\varepsilon_s$	Deformação relativa na espessura	[ % ]
$\varphi$	Deformação verdadeira	[ - ]
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	Deformação verdadeira nas direções 1,2 3	[ - ]
$\varphi_b$	Deformação verdadeira na largura	[ - ]
$\varphi_l$	Deformação verdadeira no comprimento	[ - ]
$\varphi_s$	Deformação verdadeira na espessura	[ - ]
$\Psi$	Ângulo de inclinação da parede	[ Graus ]
$\Psi_0$	Ângulo de inclinação da parede inicial	[ Graus ]
$\Psi_1$	Ângulo de inclinação da parede final	[ Graus ]

## RESUMO

O presente trabalho investiga o comportamento da chapa de latão C268, com 0,50 mm de espessura, quando exposto ao processo de Estampagem Incremental de Chapas de Metal (Incremental Sheet Metal Forming -ISMF). Especificamente para a pesquisa, foram utilizadas as modalidades de Estampagem Incremental com Ponto Simples (Single Point Incremental Forming- SPIF) e Estampagem Incremental de Múltiplos Passes (Multi Pass Single Point Incremental Forming- MSPIF). Os experimentos foram baseados em uma geometria de tronco de pirâmide de base quadrada com 100 mm de lado e 45 mm de profundidade. Para as estratégias de estampagem foi atribuído, a estampagem helicoidal. Como resultado principal, foi verificado o ângulo de parede máximo atingido por cada processo de estampagem incremental. Adicionalmente, ensaios de tração, análise de deformações e de rugosidade da chapa de latão foram realizados. Todos os seus resultados estão detalhados na investigação. Para os parâmetros adotados nestes experimentos, o ângulo de parede obtido por SPIF foi maior do que pelo estudo proposto por MSPIF.

**Palavras-chave:** Ferramenta de Estampagem, Estampagem Incremental de Chapas de Metal, Estampagem Incremental de Múltiplos Passes, Latão C268.

## ABSTRACT

The present study investigates the performance of the brass plate C-268 with 0.50 mm thickness, when exposed to Incremental Sheet Metal Forming (ISMF). Specifically for research, it was used the modalities Single Point Incremental Forming (SPIF) and Multi Pass Single Point Incremental Forming (MSPIF). The experiments were based on a truncated pyramid geometry with square base 100 mm side and 45 mm depth. For forming strategies has been assigned, the helical forming. As the main outcome, it was found the maximum wall angle achieved by each process of incremental printing. In addition, tensile tests, analysis of deformation and roughness of the brass sheet were performed. All results are detailed in the investigation. For the parameters used in these experiments, the wall angle obtained by SPIF is greater than the study proposed by MSPIF.

**Keywords:** Forming Tool, Incremental Sheet Forming, *Multi Pass Single Point Incremental Forming*, Brass C268.

## 1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, é evidente que os processos de conformação mecânica estão, cada vez mais presentes nos produtos, no meio em que se vive. Novas técnicas e processos vem sendo desenvolvidos juntamente com o aparecimento de novos compósitos de materiais, sendo aplicados nos mais diversos sistemas construtivos. Mais recentemente devido ao desenvolvimento de novos equipamentos, principalmente aqueles que possibilitam a fabricação de peças com altíssimas velocidades, a produção de componentes por conformação mecânica possibilitou uma enorme diminuição dos custos de produção (SCHAEFFER, 2009).

A indústria metal mecânica vem fornecendo opiniões desde a condição de produto final, até componentes necessários a outras atividades industriais. Deste modo, é importante observar que dentre os muitos processos usados na indústria metalmeccânica, a estampagem de chapas tem um destaque significativo nesta área (FRITZEN, 2012).

A estampagem incremental pode representar um ponto de mudança. De fato, o seu conceito básico é completamente diferente dos processos convencionais. Em *Single Point Incremental Forming* (SPIF) a geometria final é gerada pela trajetória de uma pequena e simples ferramenta, que deforma uma chapa fixada por um prensa-chapas. O fato de não serem precisas, as matrizes diferenciam de qualquer outro processo de estampagem convencional. Entre as muitas vantagens desta tecnologia, inclui-se a sua capacidade de dar resposta positiva a alguns requerimentos industriais: flexibilidade do processo, forte orientação para o cliente, produção de produtos muito diferenciados a custos industriais baixos. No entanto é necessário destacar alguns inconvenientes nomeadamente no que diz respeito ao nível de precisão permitido pelo processo. O efeito de retorno elástico pode ser relevante quando é retirada a ação do punção e quando a peça é rebarbada. A compensação deste efeito apresenta a estampagem incremental como uma alternativa válida aos processos convencionais no que diz respeito a peças especiais. Outro grande inconveniente é a dificuldade da previsão da fratura no processo de estampagem incremental principalmente quando se trata de geometrias complexas (LOPES, 2013).

O presente estudo abordará o comportamento da chapa de latão C268 para o Processo de Estampagem Incremental de chapas (*ISF – Incremental Sheet Forming*). Os experimentos iniciais baseiam-se na variante da Estampagem denominada Estampagem Incremental com Ponto Simples (*SPIF - Single Point Incremental Forming*) sendo conformado até o seu rompimento, registrando-se o ângulo de parede ( $\psi$ ), que foi obtido.

A partir deste ponto, muda-se o processo para Estampagem Incremental de Múltiplos Passes (*MSPIF - Multi Pass Single Point Incremental Forming*) .

Por meio da realização dos experimentos práticos, (FRITZEN,2012) demonstrou que é possível adaptar recursos da área de usinagem (*softwares CAD/CAM, equipamentos, ferramentas e centro de usinagem CNC*) na prototipagem de peças a partir de chapas de latão 70/30(C-260), sendo que o teor de cobre (70%)descrito no trabalho de Fritzen é maior do que o teor de cobre (66%) da chapa C-268 estudada neste trabalho. De acordo com a análise de conformidade geométrica dos experimentos realizados, é visível que produtos possam ser confeccionados com êxito, desde que estes, permitam uma tolerância geométrica e dimensional.

É citado em (MATESO, 2006), que a liga C-268 possui propriedades mecânicas ligeiramente inferior às do latão C 260, porém seu custo de fabricação é menor, sendo utilizada como alternativa ao uso daquela liga, em aplicações nas quais os requisitos de propriedades mecânicas não são tão importantes e o custo de fabricação é um fator determinante.

Conclusões estabelecidas por (DALEFFE, 2008) para o estudo do processo de estampagem incremental em chapas de alumínio puro concluiu que na medida em que se aumenta o diâmetro da ferramenta compromete-se o acabamento superficial da chapa. Quanto menor o tempo de estampagem, maior é a rugosidade e quanto menor a excentricidade da ferramenta melhor é o acabamento superficial da peça estampada. Para melhorar o acabamento, manter a temperatura e reduzir o atrito durante a estampagem foi fundamental o uso de lubrificação.

Os experimentos de estampagem incremental foram realizados em um centro de usinagem ROMI D 600 , usando um dispositivo prensa chapas devidamente projetado para tal função, além de ferramentas específicas dos testes práticos também definidas em estudos anteriores.

O diagrama representado na Figura 1.1 que segue demonstra um apanhado geral de trabalhos sobre Estampagem Incremental realizados referentes a dissertações de mestrado.

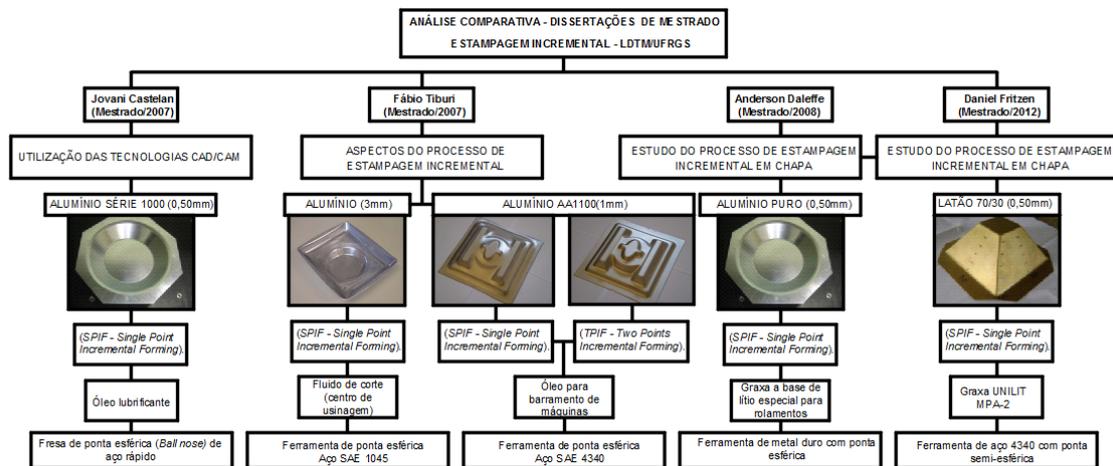


Figura 1.1: Trabalhos relacionados com Estampagem Incremental no Ldtm

Continuidade de estudos no âmbito de doutorado, também foram desenvolvidos trabalhos nacionais e internacionais, como demonstrado na Figura 1.2

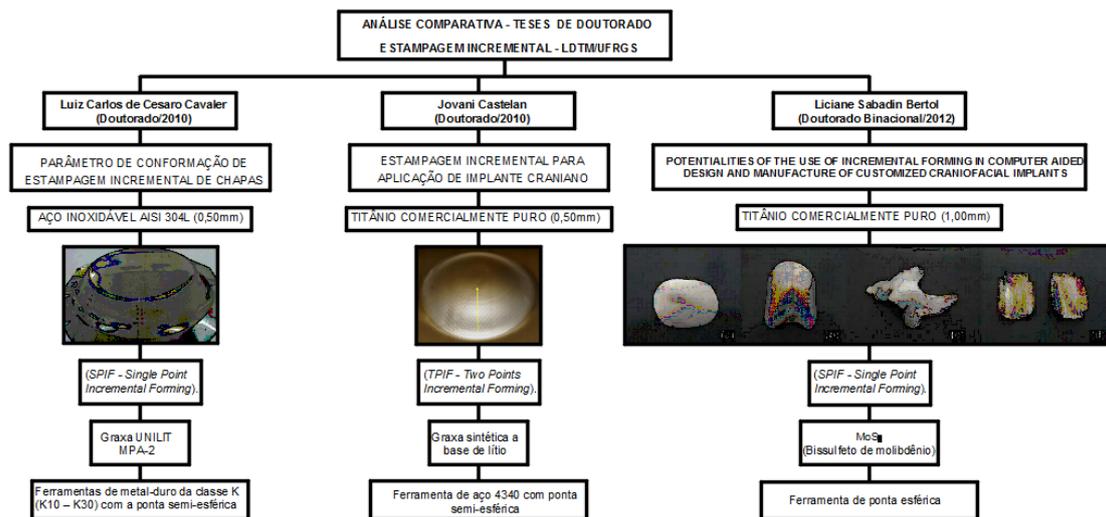


Figura 1.2: Trabalhos de doutorado realizados no Ldtm

Como objetivo principal do trabalho, será verificado o ângulo de parede máximo obtido por este processo antes do rompimento. A Figura 1.3 mostra o diagrama do trabalho realizado neste estudo.

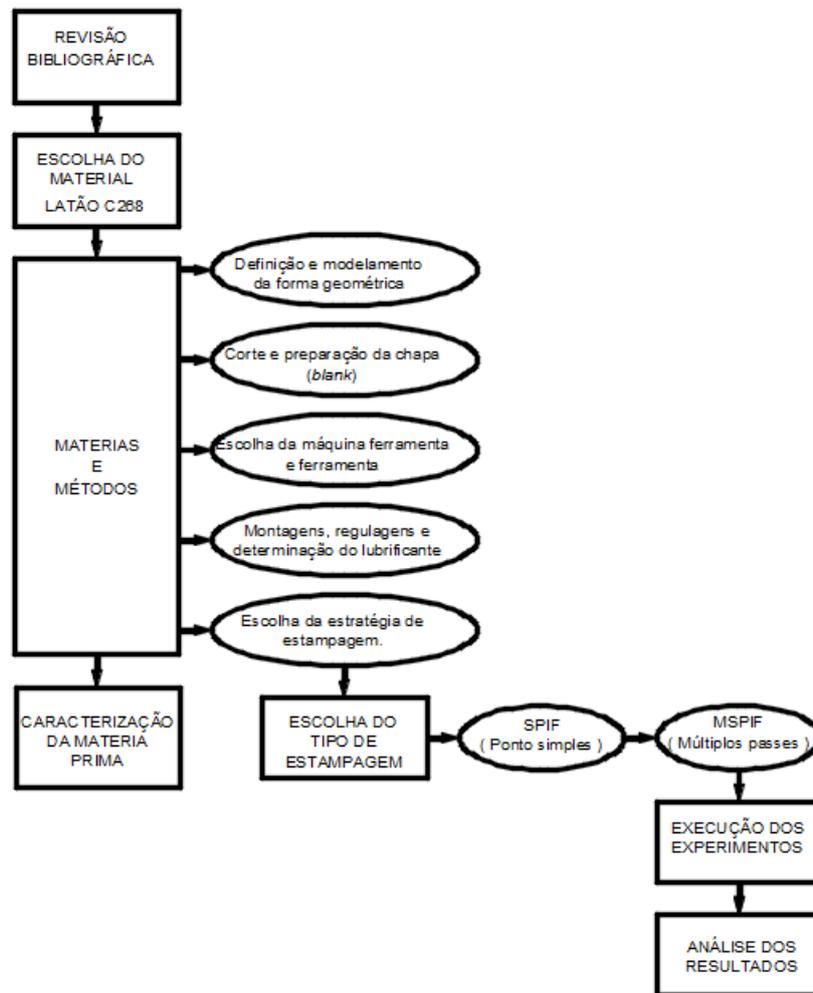


Figura 1.3: Diagrama dos trabalhos realizados.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Neste capítulo é descrito os processos de estampagem incremental, características dos materiais, elementos norteadores do trabalho e resultados obtidos por outros pesquisadores.

### 2.1 Estampagem incremental

Atualmente, as necessidades das empresas passam pela capacidade de oferecer novos produtos no menor espaço de tempo possível (redução dos tempos de concepção, desenvolvimento, fabricação e comercialização), com o custo mínimo face à concorrência, cumprindo as exigências de alterações nos produtos, por parte dos consumidores. Tendo isto em consideração é cada vez mais importante encontrar processos que permitam obter protótipos, peças únicas ou pequenos lotes de peças de uma forma rápida e com baixo custo. No decorrer destas necessidades surgem processos de manufatura aditiva, comumente conhecido como prototipagem rápida. Porém, o volume sólido de uma peça em chapa de metal em comparação com o seu volume líquido é muito alto pelo que se torna num processo pouco económico. Além disso, grandes paredes finas são difíceis ou impossíveis de fabricar com tecnologias de fabricação aditiva. Assim, foi introduzida a tecnologia de estampagem incremental de chapas (*Incremental Sheet Forming - ISF*) (JESWIET, 2005).

O termo “estampagem” generaliza várias operações de manufatura realizadas em chapas de metal, onde sempre ocorrerão alterações na sua forma geométrica, produzindo dobras, cavidades, saliências, cunhas e furos. Todas estas deformações são realizadas no estado sólido, onde o material é escoado em regime plástico. Tem-se na estampagem um grande aproveitamento da matéria-prima, com reduzido desperdício e geração de sobras de material, diferentemente de outros processos como, por exemplo, a usinagem (RODRIGUES, 2005).

A ISF é atualmente um processo promissor no que diz respeito à conformação plástica de materiais em chapa, estando associada a novos campos de aplicação, como o caso da biomecânica e da prototipagem rápida, onde a produção em série de um produto não é a prioridade, mas sim a análise individual da peça a conceber (SENA, 2009).

Esta técnica foi patenteada em setembro de 1967 em Nova York por Edward Leszak, onde a descrição do processo se refere a um método para a conformação de

materiais em várias formas de revoluções sem o uso de moldes, formas, ou mandris, desta forma, permitindo avanços no estado da arte da conformação de chapas de metal dúctil, podendo ser trabalhadas ou deformadas plasticamente nas formas desejadas de seção cônica de revolução, utilizando ferramentas simples e baratas (LESZAK, 1967) *apud* (FRITZEN, 2012).

No ano de 1994, *Matsubara* introduziu o conceito de estampagem incremental (ISF) como método de prototipagem e fabricação de pequenas séries de produtos em chapa metálica, no ramo automotivo no Japão (EMMENS, *et al*, 2010).

Segundo (SHIMA, 2012), o processo de ISF não é realmente um novo processo de fabricação, pois em estampagem convencional existem outros processos que podem ser chamados de estampagem incremental. Um típico exemplo é o estiramento, no qual é utilizado um mandril e uma ferramenta. O mandril é fabricado com o formato interno da peça que se deseja obter e a ferramenta tem formatos comuns de forma a facilitar a conformação. Neste processo, a ferramenta é avançada contra uma chapa de aço que gira fixada ao mandril, normalmente montada em um torno formando assim uma peça axi-simétrica com o formato do mandril, no entanto, a forma intermediária depende diretamente do caminho que a ferramenta executa durante o processo.

Outro exemplo, citado por (SHIMA, 2012), de processo de conformação que é executado de forma incremental é o “*hammering*” o qual consiste na utilização de um conjunto de martelos com diversas formas e matrizes com formas simples. Estes processos são comuns na fabricação de peças artísticas como vasos, potes suportes e castiçais. Este tipo de processo é também empregado na fabricação de protótipos na indústria automotiva. Na indústria naval ao invés da aplicação da ação mecânica, é aplicada uma repetição de aquecimento seguido de resfriamento localizado sendo utilizado para a fabricação de superfícies tridimensionais.

Atualmente, tal tecnologia é comercializada pela empresa *Amino Corporation* do Japão. Desenvolvida com o objetivo de atender algumas necessidades da indústria automobilística, tal tecnologia de estampagem a frio sem o uso de matriz e com o auxílio de máquinas CNC ou Robôs (DALEFFE, 2008).

Existem três variações de estampagem incremental de chapa, indicado na Figura 2.1 que se denominam por estampagem incremental sem matriz, estampagem incremental com ferramenta auxiliar e estampagem incremental com matriz, sendo que a matriz pode ser parcial ou total. Em todas as variações são necessários encostadores, máquinas-ferramentas CNC, ferramentas e estruturas (SOEIRO, 2014).

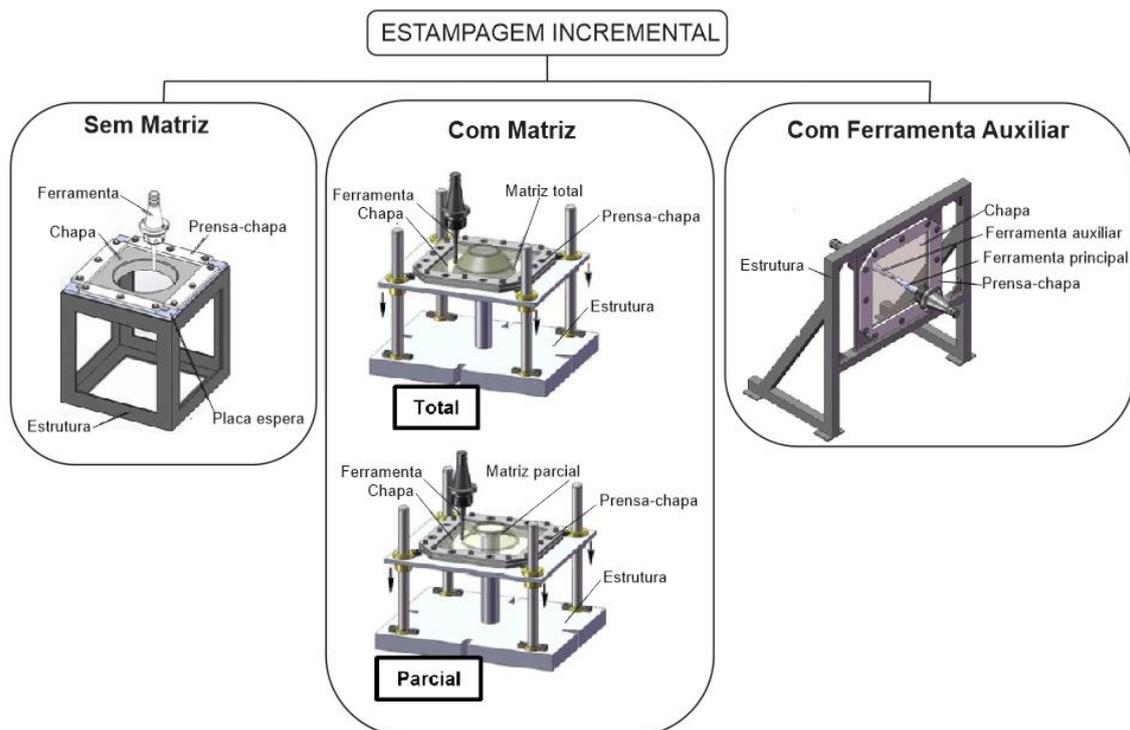


Figura 2.1: Variantes de estampagem incremental de chapa (Editado de SOEIRO, 2014).

Em um processo de ISF, o movimento da ferramenta é um dos principais fatores na determinação da forma e tolerância final da peça acabada, enquanto que no processo convencional de estampagem, este controle é dado principalmente pelas tolerâncias de fabricação das ferramentas (TIBURI, 2007).

A Figura 2.2 mostra o ciclo de aplicação da estampagem incremental normalmente utilizado no setor fabril.

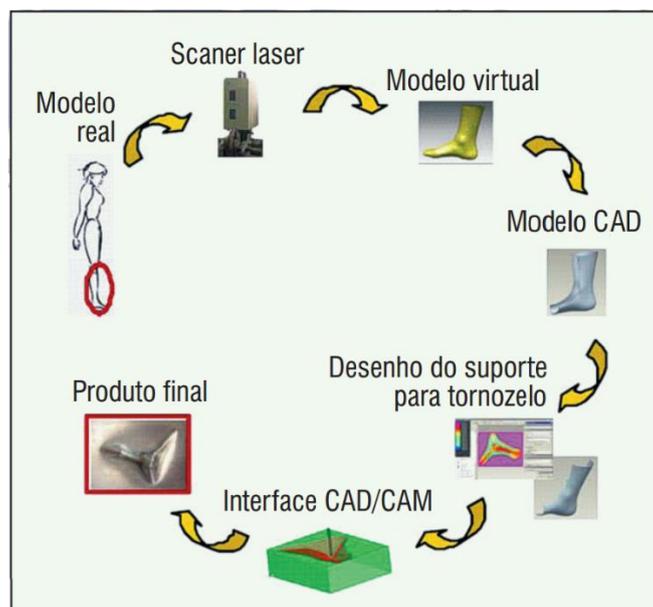


Figura 2.2: Ciclo de aplicação da estampagem incremental (AMBROGIO, 2005) apud (CASTELAN, 2009).

## 2.2 Descrição dos processos

O desenvolvimento do processo ISF foi facilitado pela introdução de centros de comando numéricos computadorizados – *Computer Numerical Control (CNC)* – e do desenho auxiliado por computador – *Computer-Aided Design (CAD)*. O centro de usinagem *CNC* permite a materialização de uma imagem tridimensional através de uma ferramenta e de uma mesa onde se encontra fixo o suporte da chapa. O movimento relativo entre a ferramenta e a chapa dá-se sobretudo de fora para dentro, seguindo uma trajetória pré-definida e provocando, de forma incremental, deformações plásticas localizadas, obtendo como resultado a geometria pretendida (RODRIGUES, 2013).

Acoplada ao eixo árvore (*spindle*) de um dispositivo *CNC*, uma ferramenta de ponta semi-esférica dá o início ao processo de ISF por meio do movimento contínuo sobre a superfície da chapa e vai, gradativamente, através de incrementos verticais negativos, realizando a conformação (HIRT, *et al.*, 2005).

A fixação da chapa é feita por meio de um suporte prensa-chapas e o contato da chapa com a ferramenta, ocorre numa pequena região que se move conforme a trajetória imposta, como pode ser visto na Figura 2.3.

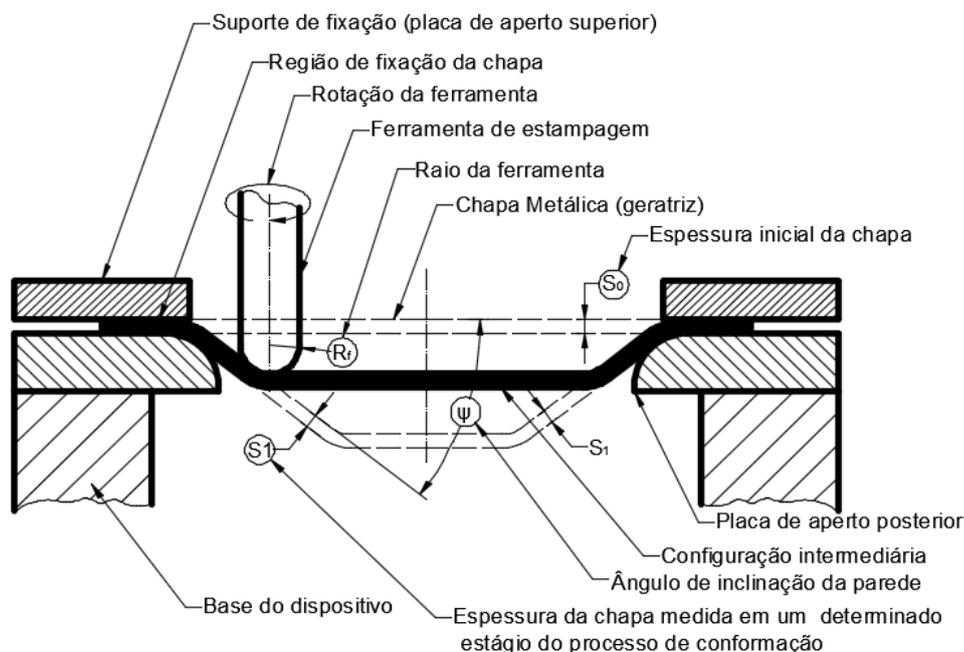


Figura 2.3: Princípio do processo de estampagem incremental (Editado de MARTINS, BAY, *et al.*, 2008)

Devido à natureza dos mecanismos de deformação da estampagem incremental (zona de deformação plástica extremamente pequena), consegue-se atingir deformações significativamente mais elevadas quando comparadas com a conformação convencional sendo esta, uma das razões para que existam forças de conformação inferiores (LOPES, 2013). O pesquisador ainda relata que para a fabricação de peças em estampagem incremental é necessário efetuar várias etapas como ilustrado na Figura 2.4

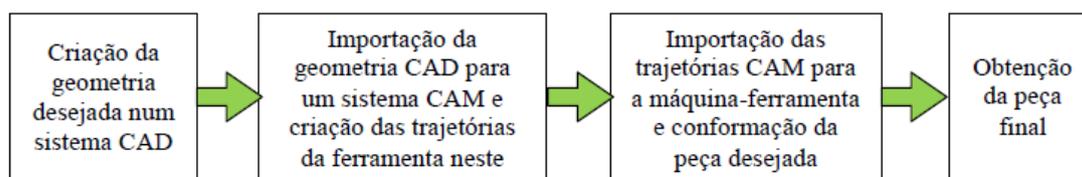


Figura 2.4: Sequência de etapas do processo de estampagem de chapa (LOPES, 2013).

A primeira etapa a ser efetuada, consiste em desenhar a geometria da peça pretendida num sistema CAD. Em seguida, o arquivo CAD da geometria é importado para um sistema CAM no qual são criadas as trajetórias da ferramenta necessárias para a fabricação da peça desejada. Após definidas as trajetórias da ferramenta, importa-se o arquivo CAM para o centro de usinagem CNC, no qual foi previamente colocado um dispositivo experimental (ferramenta, estrutura e chapa). Por fim, executa-se o programa CAM introduzido no centro de usinagem e obtêm-se a peça pretendida como demonstrado na Figura 2.5.

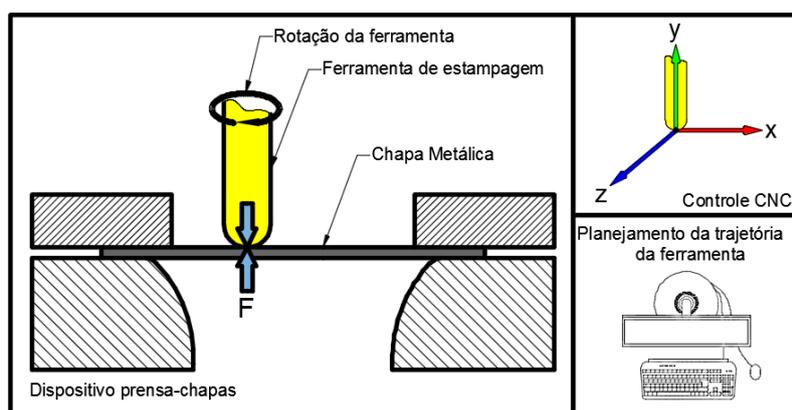


Figura 2.5: Elementos básicos necessários para a conformação incremental de chapa (Editado de JESWIET, 2005) apud (LOPES, 2013).

### 2.2.1 Tipos de Estampagem Incremental

As variações da estampagem incremental se baseiam na quantidade de pontos de apoio ou de ferramentas utilizadas. Além da estampagem de ponto simples, que utiliza uma ferramenta que executa movimentos de translação e rotação, existe a estampagem

com uma ferramenta de forma geométrica simples e estacionária, posicionada sob a chapa. Existem ainda os processos que fazem uso de matrizes positivas ou negativas, posicionadas também sob a chapa, que irão dar forma ao produto final (ALLWOOD *et al.*, 2006).

Nos trabalhos (CASTELAN, 2010), classifica em suas pesquisas, que o processo de estampagem incremental por múltiplos passes também se inclui como um dos principais tipos.

### 2.2.1.1 Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF)

A estampagem incremental de ponto simples (ou de ponto único), definida pela sigla em inglês *SPIF - Single-point Incremental Forming*. Neste tipo de estampagem incremental, a superfície da chapa não está suportada, ou seja, é deformada de uma forma “livre” pela ferramenta que desliza sobre a superfície da chapa, conforme ilustrado na Figura 2.6.

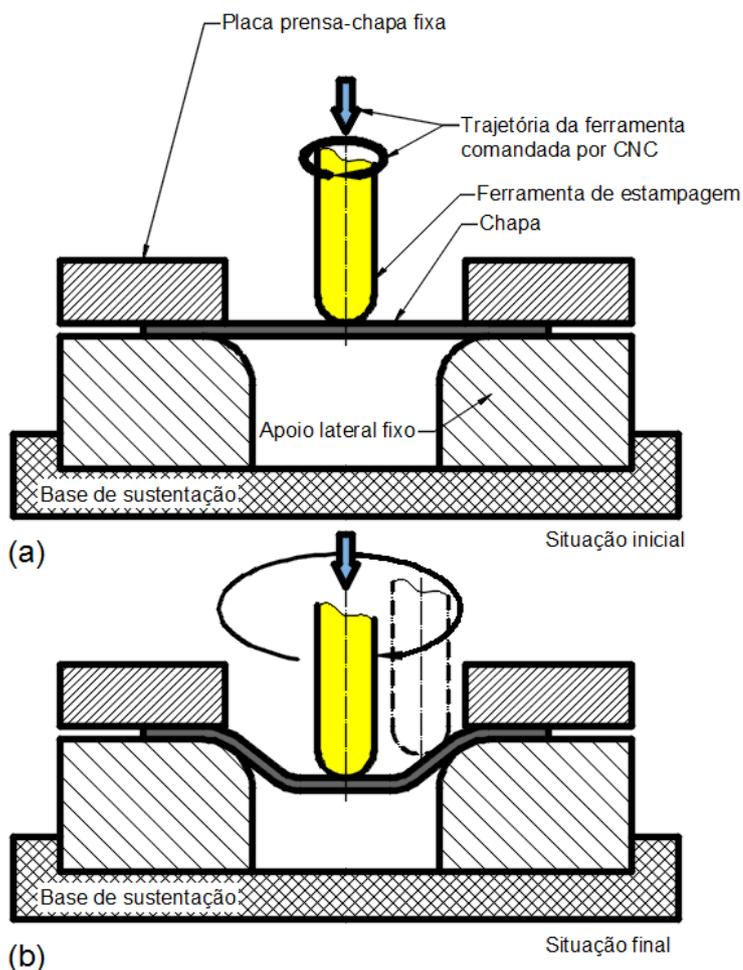


Figura 2.6: Estampagem incremental de ponto simples. a) situação inicial, b) situação final.

A deformação plástica é gerada pela ferramenta em rotação acoplada ao eixo vertical principal do sistema CNC, através de incrementos negativos executados gradualmente. O sistema de fixação nas extremidades da chapa evita que esta se desloque enquanto a conformação ocorre. Durante a deformação da chapa, a ferramenta de conformação está em contato com a superfície interna do componente em fabricação, gerando incrementalmente uma concavidade. Para (JESWIET, 2005), além da flexibilidade de aplicação e utilização de ferramentas de baixo custo, existem ainda outras vantagens relacionadas com a aplicação do processo de estampagem incremental por único ponto:

- O objeto a produzir pode ser efetuado diretamente do CAD com o mínimo de especificações da ferramenta e pode ser usado na prototipagem rápida;
- Este processo dispensa qualquer tipo de matriz, no entanto precisa de uma zona de suporte que possibilite criar o ângulo de deformação na zona embutida (*backing plate*);
- As tensões originadas na zona de mudança de ângulo são facilmente corrigidas e controladas;
- Normalmente é dispendioso fazer protótipos em chapa, com esta técnica o custo de fabricar esses mesmos protótipos é substancialmente menor;
- A conformabilidade dos materiais é aparentemente acrescida;
- Uma máquina convencional de CNC pode ser utilizada para aplicação deste processo;
- O tamanho do componente é limitado pelo tamanho da máquina de CNC;
- A qualidade do acabamento da superfície dos componentes pode ser facilmente controlada;
- O funcionamento e modos de operação são relativamente pouco ruidosos;
- Facilidade de alterações no *layout* da unidade fabril devido ao equipamento ser de menor dimensão e peso, facilitando o transporte para grandes distâncias.

No entanto também existem limitações neste processo:

- O tempo de formação do componente, que aumenta com a profundidade da geometria da peça a conformar;
- A utilização deste processo está limitada à produção de pequenos lotes de peças;
- Ocorre recuperação elástica, tornando necessário o desenvolvimento de algoritmos de correção;
- A formação de paredes verticais não pode ser efetuada num único passo.

### 2.2.1.2 Estampagem Incremental com Dois Pontos de Apoio (TPIF)

A estampagem incremental de dois pontos de apoio (ponto duplo), também designada pela sigla inglesa *TPIF – Two Points Incremental Forming*, utiliza, além da ferramenta de conformação, um suporte inferior rígido, localizado na região inferior da chapa.

Existem duas variáveis deste processo de estampagem incremental, seguidamente descrito (JESWIET, 2005 *apud* SENA, 2009):

#### - Estampagem incremental por dois pontos com suporte estático (genérico)

Neste processo, a chapa movimenta-se verticalmente juntamente com placa prensa-chapa, através de um sistema de colunas guias, sobre um suporte estático (genérico) que auxilia na conformação, enquanto a ferramenta semi-esférica forma o perfil geométrico na chapa. O suporte estático cria uma força de apoio na chapa, atuando como um punção fictício, também responsável pela determinação da forma geométrica final da peça. A Figura 2.7 mostra o esquema do equipamento para o sistema e a Figura 2.8, a trajetória da ferramenta de deformação para formar um cone em chapa.

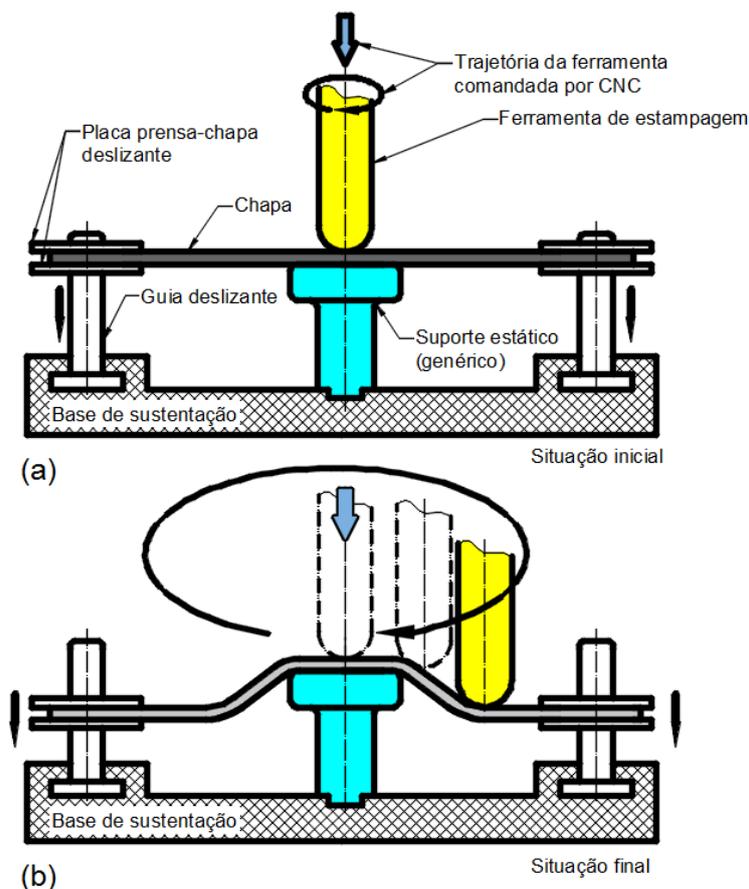


Figura 2.7: Esquema representativo da estampagem incremental de dois pontos com suporte estático (genérico). a) situação inicial, b) situação final.

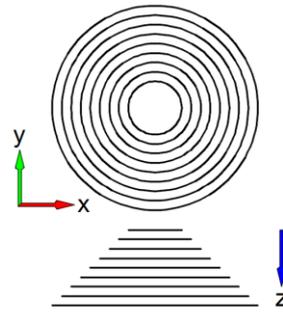


Figura 2.8: Trajetória da ferramenta de deformação para formar um cone em chapa

**- Estampagem incremental por dois pontos com matriz dedicada (específico)**

Idêntico ao tipo de conformação incremental por dois pontos que foi anteriormente descrita com a utilização de uma matriz dedicada com a forma geométrica final da peça. Alguns autores referem-se como “específico”, quando o suporte tem exatamente o perfil da peça como representado na Figura 2.9.

Este sistema utiliza os mesmos componentes que o processo descrito anteriormente, com exceção do tipo de suporte usado no contato com a superfície inferior da chapa. Em lugar do suporte local estático, utiliza-se uma matriz fabricada normalmente em materiais maciços de baixo custo, como por exemplo em resina ou em material polimérico. Pode-se dizer que esta técnica de estampagem incremental não é verdadeiramente livre de matriz em comparação com a estampagem incremental de ponto simples (SENA, 2009).

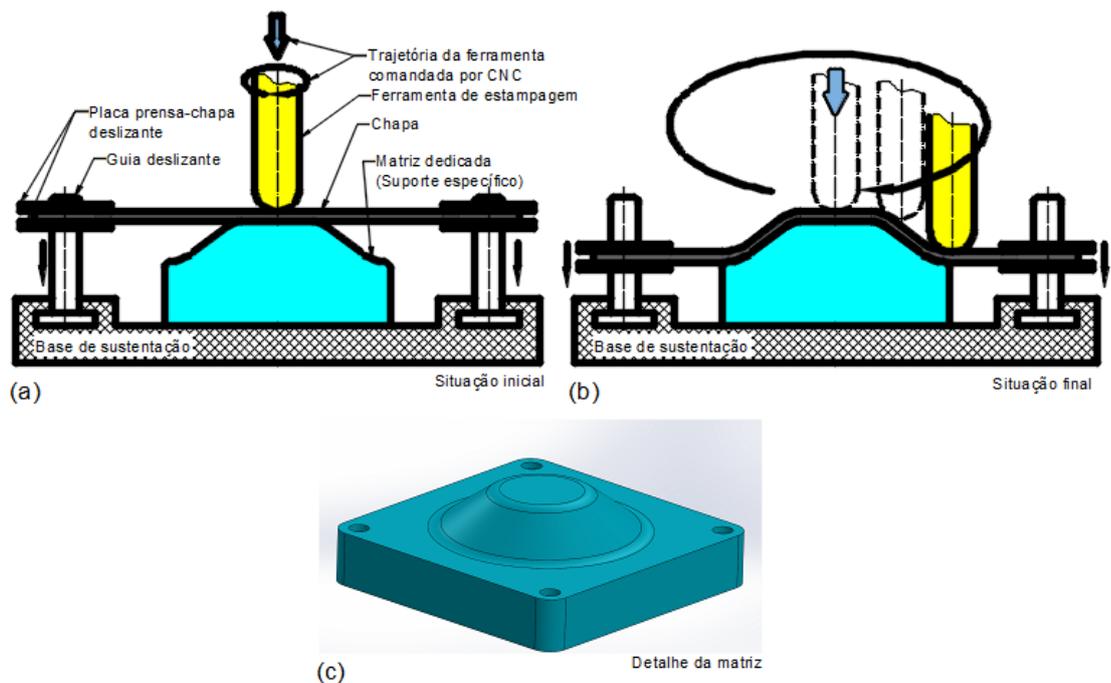


Figura 2.9: Esquema representativo da estampagem incremental de dois pontos com matriz (suporte específico). a) situação inicial, b) situação final, c) detalhe da matriz.

De um modo geral, as vantagens associadas a estes dois tipos da estampagem incremental por dois pontos, geral e específico, são a inexistência de erros de forma em regiões planas e o rigor geométrico da peça final produzida, superior ao método de estampagem por ponto simples. No entanto, a complexidade e o custo desses dois tipos de estampagem incremental, são maiores relativamente ao processo de conformação por único ponto. A razão deve-se ao aumento de componentes necessários para efetuar esta técnica de conformação, conjugado com a utilização de um sistema de controle auxiliar, refletindo-se no custo de produção do componente e do próprio processo (SENA, 2009).

Segundo (CASTELAN,2010), outra variação da TPIF é a que utiliza suporte inferior específico e de formato assimétrico, indicado para obtenção de superfícies complexas e orgânicas. Este suporte, por sua vez, pode ser positivo (protuberância), Figura 2.10 ou negativo (cavidade), conforme a Figura 2.11.

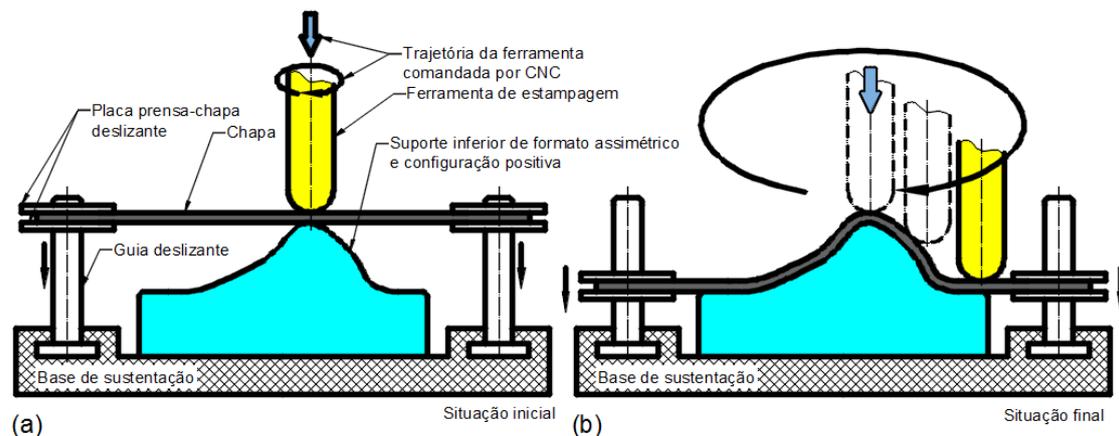


Figura 2.10: TPIF com suporte assimétrico de configuração positiva. a) situação inicial, b) situação final.

O suporte negativo tem a vantagem de tornar o dispositivo mais simples de ser fabricado e utilizado e não há partes móveis (colunas-guia e talas deslizantes). Por outro lado, o suporte positivo apresenta menor retorno elástico do material, contribuindo para sua estabilidade dimensional.

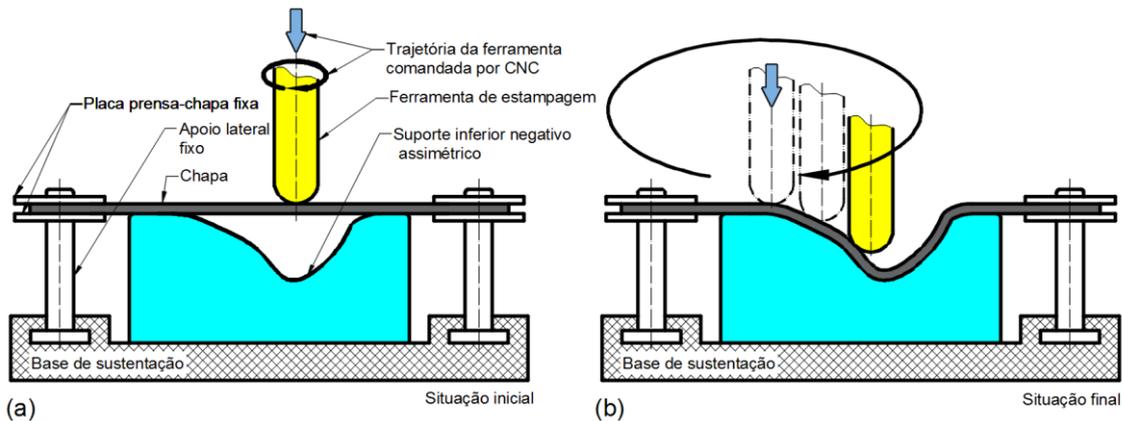


Figura 2.11: TPIF com suporte assimétrico de configuração negativa. a) situação inicial, b) situação final.

### 2.2.1.3 Estampagem Incremental em Múltiplos Passes (MSPIF)

A execução em múltiplos passes visa ampliar os limites de estampagem, que são fortemente influenciados pelo ângulo de parede ( $\psi$ ), ilustrado na Figura 2.3. A realização de passes de estampagem intermediários, incrementando o ângulo de parede, pode aumentar o valor final do ângulo ( $\psi$ ), sem ocasionar o rompimento da chapa (DUFLOU, *et al.*, 2008).

A limitação do método convencional SPIF para formar paredes verticais sem falhas é superada pela conformação de várias formas intermediárias antes da obtenção do componente final, com a aplicação por MSPIF. Um grande problema com MSPIF é imprecisão geométrica significativa do componente formado (DONGKAI, 2012).

A Figura 2.12 mostra uma estampagem realizada em quatro etapas. À medida que as etapas ocorrem, os ângulos de parede ( $\psi$ ) e o índice de encruamento ( $n$ ) aumentam, enquanto a espessura ( $s$ ) diminui. O detalhe “A” mostra a ocorrência do encruamento, que provoca o aumento da rigidez da chapa, ou seja, ela se torna mais resistente à deformação. Este fenômeno pode explicar a ampliação do limite de deformação: ao invés da fratura, a mudança no aspecto microscópico dos grãos faz com que a chapa se torne mais tenaz. O aumento da tenacidade irá exigir maior força para deformar plasticamente a chapa, mas por outro lado, irá prolongar o seu limite de ruptura (BAMBACH, 2008) *apud* (CASTELAN, 2010).

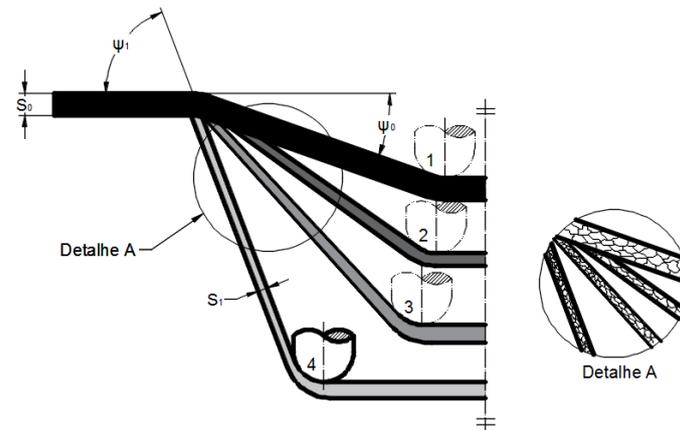


Figura 2.12: Estampagem em múltiplos passes e o efeito do encruamento. No detalhe, o encruamento dos grãos, fenômeno que causa o aumento da resistência ao escoamento (Editado de BAMBACH, 2008) apud (CASTELAN 2010).

Em comparação do processo de múltiplos passes com de ponto simples, (DUFLOU, *et al.*, 2008), obteve um gráfico, plotando a espessura do perfil em função da profundidade, tendo como geometria do modelo, um tronco de cone com diâmetro interno superior (máximo) de 178 mm, profundidade de 30mm e ângulo de parede de 70°. A Figura 2.13 mostra o traçado plotado com as espessuras obtidas pela lei do seno, com múltiplos passes e ponto simples, com a espessura da chapa de 1,2mm para a chapa de alumínio Al 3003-0.

Como pode ser visto, a espessura da parede do cone de múltiplos passes é significativamente maior do que a espessura obtida com o percurso de ponto simples. Utilizando a abordagem de múltiplos passes, observa-se que a parte inferior da peça já não é plana, mas ligeiramente curvada e mais profunda do que o perfil CAD programado.

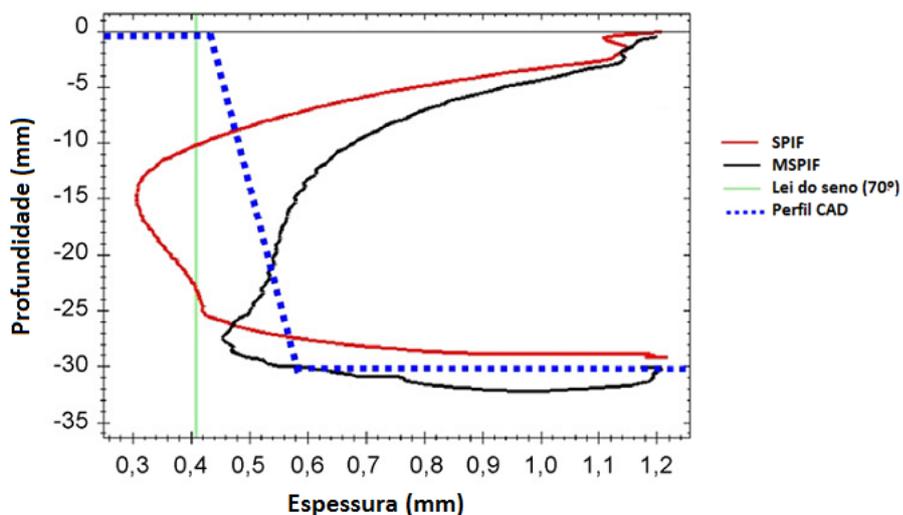


Figura 2.13: Espessura em função da profundidade (DUFLOU, *et al.*, 2008),

Em relatos de estudos (DUFLOU, *et al.*, 2008), além do encruamento, a redistribuição de materiais de outras áreas da peça para as áreas da parede, por meio da utilização de múltiplos passes, altera o escoamento do material, resultando num aumento da conformabilidade da chapa. No entanto, a espessura da parte inferior obtida por múltiplos passes é menor do que a espessura da parte inferior de ponto simples. Isto pode ser visto mais claramente na Figura 2.14, onde a espessura é plotada em função da dimensão radial da peça (tronco de cone).

Os testes práticos estão demonstrados na Figura 2.14 evidenciando que entre os raios 59 e 79 a redução de espessura da base do cone é menor quando é estampado em múltiplos passes, em comparação à estampagem em passe simples. A mesma Figura 2.14 apresenta a espessura mínima (0,46mm) de parede é maior do que a obtida em passo simples (0,3mm), e até mesmo do que a espessura (0,41 mm) prevista pela lei do seno. Tomando como base a Constância dos Volumes, conclui-se que a técnica de múltiplos passes causa uma melhor distribuição de material ao decorrer das sucessivas deformações, resultando em maior conformabilidade.

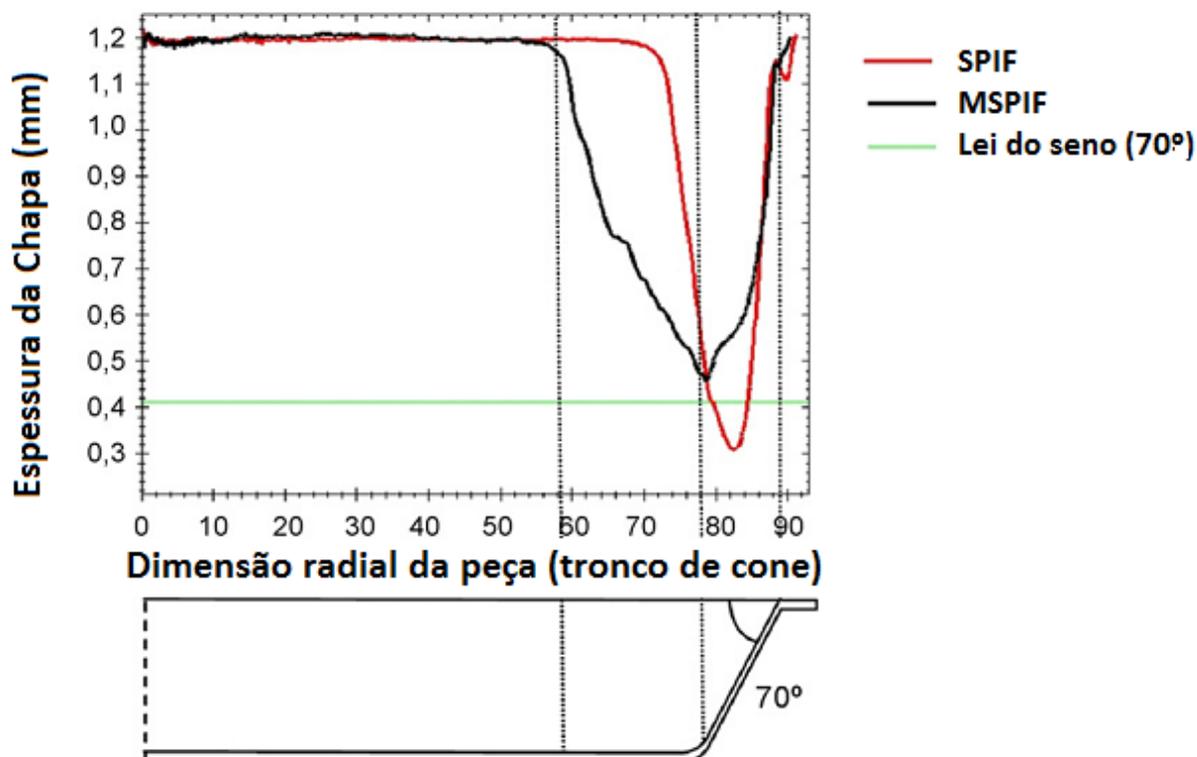


Figura 2.14: Variação da espessura da base do cone estampado (Editado de DUFLOU, *et al.* 2008).

### 2.3 Limitações do Processo Relacionadas à Geometria das Peças

Em publicações, (KOPAC E KAMPUS, 2005) *apud* (SILVA, 2011) descrevem que como em outros processos de conformação (forjamento e estampagem convencional), existem valores máximos de ângulos que definem certas regiões da peça, a fim de que seja possível a sua manufatura. No caso da ISF, estudos recentes apontam para um ângulo máximo de parede de chapa de 65°. Ultrapassando este valor, se torna muito frequente a ruptura ou, no mínimo, uma diminuição drástica da espessura da chapa, causando uma baixa resistência mecânica localizada.

O ângulo da superfície da chapa deformada é também importante na conformação incremental assimétrica. Um dos pontos que se deve ter em atenção ao conceber a peça no *software* CAD é a obrigatoriedade do ângulo de parede da peça desenhada ser inferior ao ângulo de conformação permitido pelas características do material da chapa durante a deformação (JESWIET, 2005) *apud* (SENA, 2009).

A constância de volume conduz a uma relação direta entre a espessura da parede e o ângulo de parede indicado na Figura 2.14, o qual tem sido comumente referenciado como “lei do seno” e que leva a um afinamento extremo da chapa, ou falha no caso de aplicações de grandes ângulos em um único passe (JUNK et al.,2003) *apud* (SILVA, 2011).

O ângulo máximo de estampagem é determinado por uma relação entre a espessura da chapa e seu ângulo de conformação, que é expresso pela equação matemática chamada de lei dos senos:

$$s_1 = s_0 * \text{sen} (90 - \psi) \quad (\text{eq. 2-1})$$

O cálculo que segue, refere-se a indicação mostrada nas Figuras 2.13 e 2.14 para o ângulo de inclinação da parede ( $\psi$ ) de 70° e espessura original da chapa de 1,2mm.

$$s_1 = 1,2 * \text{sen} (90 - 70)$$

$$s_1 = 1,2 * \text{sen} 20^\circ$$

$$s_1 = 1,2 * 0,342$$

$$s_1 = 0,41\text{mm}$$

Onde:

$s_0$  : Espessura original da chapa,

$s_1$  : Espessura da chapa medida em um determinado estágio do processo de conformação

$\psi$ : Ângulo de inclinação da parede da chapa neste mesmo ponto

Entretanto, a lei de senos não prevê como ocorre a variação de espessura ao longo de processo de estampagem.

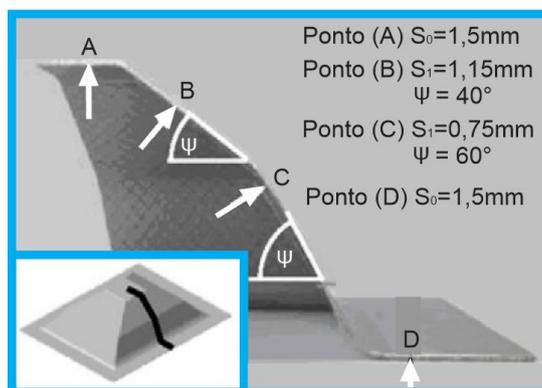


Figura 2.15: Redução da espessura de parede. (Editado de JUNK et al., 2003), apud (SILVA, 2011)

O comportamento da chapa, em relação ao ângulo de inclinação da parede ( $65^\circ$ ) e sua relação com a diminuição de espessura está demonstrado na Figura 2.16. O ângulo de  $45^\circ$  e uma inclinação que a maioria dos materiais pode ser conformada, sem que ocorra um afinamento extremo na chapa. Já os ângulos de parede próximos a  $90^\circ$ , considerando um único estágio de estampagem, tendem a produzir seções extremamente finas, que obviamente constituem um problema a ser evitado (KOPAC e KAMPUS, 2005) apud (SILVA, 2011).

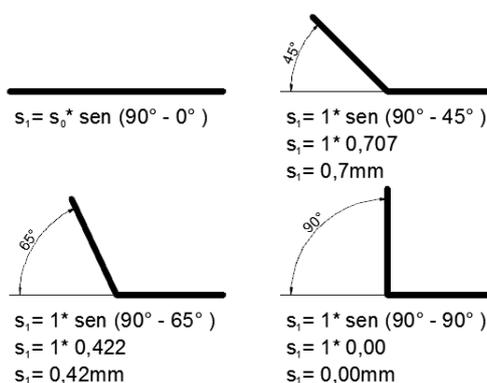


Figura 2.16: Relação entre o ângulo de parede e a espessura da chapa no processo de estampagem incremental - Equação dos senos - (Editado de SILVA, 2011)

Limitações de geometria aplicadas em formas complexas de estampagem convencional, possibilitaram estudos para o desenvolvimento novos processos possibilitando ângulos finais de conformação maiores que  $65^\circ$ .

Em pesquisas (HUSSAIN *et al.*, 2009) *apud* (SILVA, 2011) realizadas sobre o limite de conformação das chapas de alumínio utilizadas na indústria automobilística, foram avaliados dois parâmetros: limite de espessura (*thinning limit*) e o ângulo limite de estampagem (*forming angle limit*). Através da análise dos resultados, constatou-se que variando a inclinação da chapa ao longo da profundidade consegue-se uma maior capacidade de estampagem do que se utilizando uma inclinação constante.

A Figura 2.17 apontada nos trabalhos de (HUSSAIN *et al.*, 2007) demonstra um teste de estampagem onde o ângulo de parede ( $\Psi$ ) aumentou gradativamente a medida que a profundidade de estampagem também aumentava. Assim, foi observada a profundidade de ruptura, a profundidade atingida e a profundidade projetada de acordo com o modelo CAD da peça. A partir do menor diâmetro o ângulo de parede ficou próximo de  $90^\circ$ , o que causou o rompimento da chapa. A diferença entre a profundidade atingida e a projetada foi ocasionada pelo retorno elástico do material, comum em operações de estampagem.

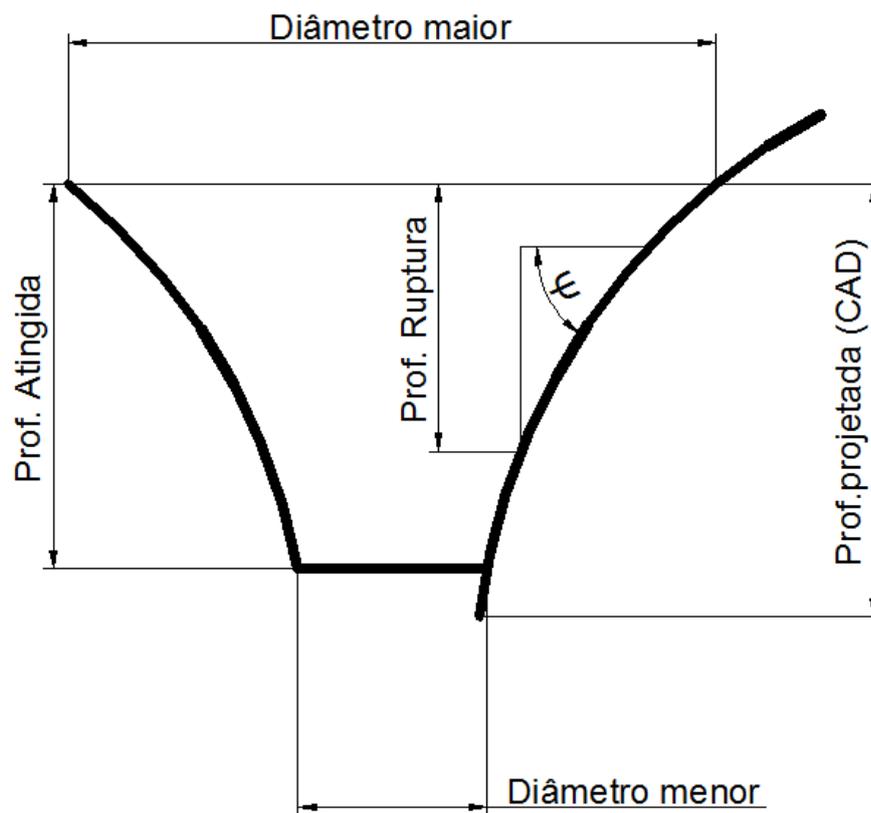


Figura 2.17: Variação da inclinação da chapa (Editado de HUSSAIN *et al.*, 2007).

Uma característica presente nos processos de estampagem em geral, que acontece na ISF e que determina limites de qualidade geométrica é o retorno elástico. Além da deformação plástica programada, a deformação elástica produz discrepâncias geométricas entre o produto final e seu modelo correspondente em CAD (SILVA, 2011).

A utilização do Método de Elementos Finitos (*Finit Elements Method –FEM*) auxilia no desenvolvimento de um algoritmo de correção da malha que venha a diminuir ou excluir totalmente o desvio, que é gerado pelo retorno elástico da peça, entre o teórico e o real. Esse algoritmo de correção recebe dados de uma máquina de medir por coordenadas, que é utilizada para medir a primeira peça produzida do lote. Esses dados são comparados com os dados geométricos do modelo em CAD 3D e então é feito o ajuste de coordenadas, gerando uma nova malha (superfície) corrigida. Estando em um ambiente paramétrico, o *software* de CAM atualiza automaticamente os dados de trajetória das ferramentas. Um novo arquivo NC (*Numerical control*) é gerado e uma peça subsequente é produzida, já com as devidas atualizações (DUFLOU *et al.*, 2005).

(MEIER *et al.*, 2009) *apud* (MARABUTO, 2010) apresentou um sistema de correção em malha fechada de trajetórias de conformação, que consiste em fazer um levantamento em tempo real da superfície a ser gerada por estampagem incremental, e calcular os desvios face ao modelo CAD. Os dados são introduzidos num algoritmo de correção e novamente calculados os desvios para a interação seguinte, até que o erro entre a superfície real e o modelo CAD esteja dentro da tolerância pretendida. A figura 2.18 representa um diagrama de correção de desvios.

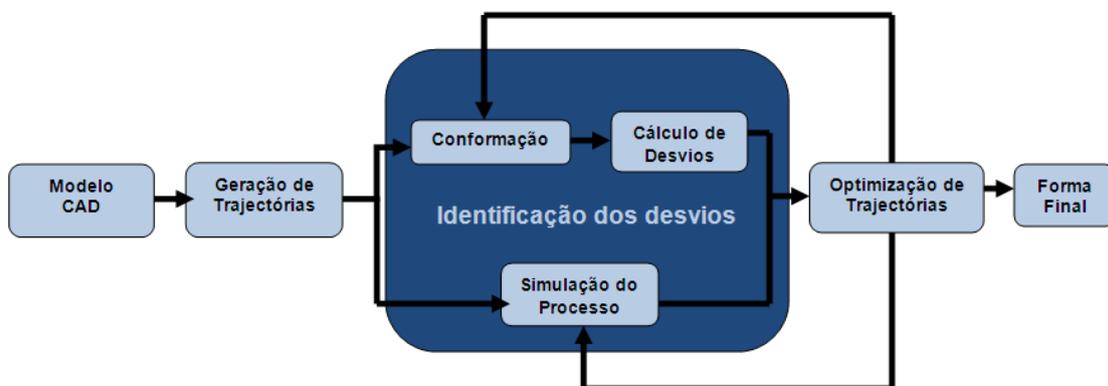


Figura 2.18: Diagrama de correção de desvios (MEIER *et al.*, 2009).

## 2.4. Índice de Anisotropia

Na laminação a frio de chapas, ocorre um fenômeno de alongamento dos grãos no sentido de laminação, tornando o material anisotrópico e variando suas propriedades mecânicas. O índice de anisotropia pode ser determinado através do ensaio de tração e representa a razão entre as deformações verdadeiras de comprimento e largura do corpo de prova, segundo o sentido de laminação. (CASTELAN, 2010).

Um corpo de prova com medidas iniciais  $l_0$ ,  $b_0$  e  $s_0$  é deformado sob influência de uma força agindo no sentido indicado na figura 2.19. A constância do volume faz com que qualquer alongamento em direção  $l$  num sistema de coordenadas cartesianas causa uma alteração da geometria do elemento de volume nas outras duas direções. Alguns materiais diminuem mais rápido a espessura ocorrendo rupturas prematuras enquanto outras chapas nas mesmas condições somente diminui a largura, o que geralmente não causa problemas em processos de estampagem. O fenômeno de anisotropia é muito complexo. Ele também depende da direção e do sentido de laminação. Por isso não existe um único índice de anisotropia: as razões de deformação ( $r$ ) que são obtidos em ensaios de tração que trabalham com corpos de prova retirados nas três diferentes direções ao sentido da laminação ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ), (SCHAEFFER, 1999).

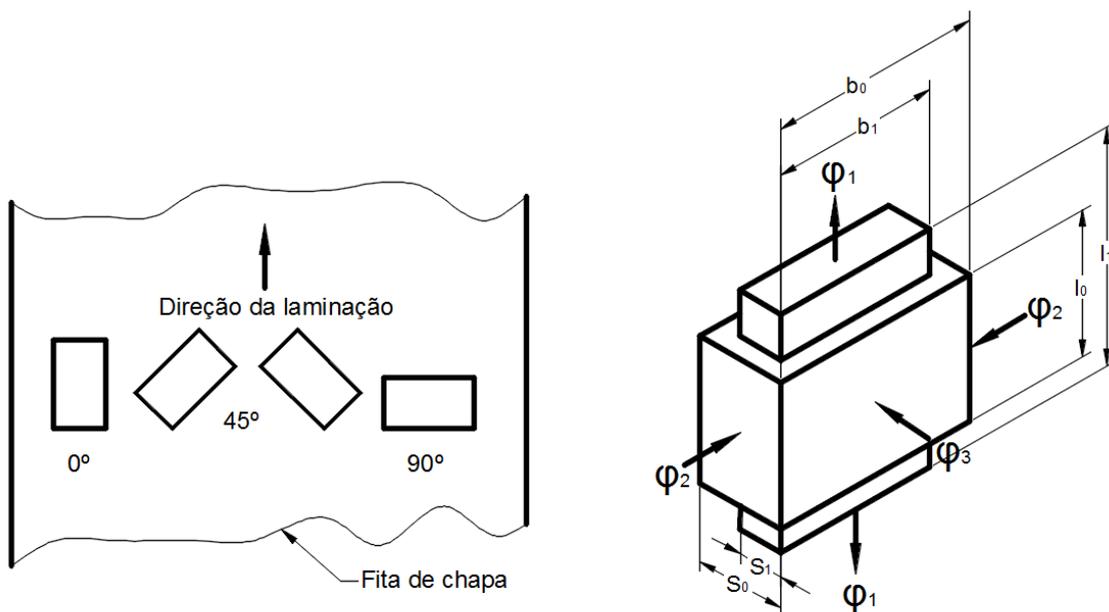


Figura 2.19: Definição das deformações do corpo de prova para obter o índice de anisotropia (Editado de FERRARINI, 2004).

A razão de deformação ( $r$ ) é definida por:

$$r = \frac{\varphi_2}{\varphi_3} = \frac{\ln \frac{b_1}{b_0}}{\ln \frac{b_0 * l_0}{b_1 * l_1}} \quad (\text{eq.2-2})$$

Onde:

$b_0$  [mm]: Largura inicial do corpo de prova no ensaio de tração.

$b_1$ [mm]: Largura final do corpo de prova no ensaio de tração.

$l_0$  [mm]: Comprimento inicial do corpo de prova no ensaio de tração.

$l_1$ [mm]: Comprimento final do corpo de prova no ensaio de tração.

A partir das três razões de deformação são calculados os valores da anisotropia média ( $r_m$ ) e da anisotropia planar ( $\Delta r$ ):

$$r_m = \frac{1}{4} ( r_{0^\circ} + 2 * r_{45^\circ} + r_{90^\circ} ) \quad (\text{eq. 2-3})$$

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} \quad (\text{eq. 2-4})$$

A anisotropia planar  $\Delta r$  mede a variação de  $r_m$  entre as direções longitudinal e transversal de laminação. Já o índice de anisotropia  $r_m$  é assim chamado porque mede a resistência à deformação na espessura da chapa, ou seja, é a anisotropia plástica através da espessura. O índice  $r_m=1$ , indica que existe igualdade entre a resistência à deformação na largura e na espessura. Para  $r_m>1$ , significa que a chapa oferece maior resistência à deformação plástica na espessura. O que se deseja para um aço de boa estampabilidade é que tenha um elevado de  $r_m$  e um  $\Delta r$  próximo de zero (ACESITA, 2004). Em estudos (COSTA, 2003) afirma que quanto mais alto o valor de “ $r_m$ ” maior a resistência do material à diminuição da espessura.

Segundo (NOVOTNY,2001), materiais anisotrópicos com  $r_m$  menor que 1, como alumínio por exemplo, não apresentam boa capacidade de se permitir estampar, pois para a mesma solicitação mecânica uma deformação na espessura será maior que na largura, isto é, há falha prematura na direção da espessura.

## 2.5 Ligas de Cobre-zinco

Ligas de cobre como latão, bronze e cupro-níquel são usadas extensivamente em radiadores de automóveis, permutadores de calor, casa de sistemas de aquecimento, painéis de absorção de energia solar e diversas outras aplicações. Devido à sua alta resistência à corrosão, cobre, latão, alguns bronzes e ligas cupro-níquel são utilizados para tubos, válvulas e acessórios em sistemas de transporte de água potável, águas de processo ou outros fluidos aquosos (ASM,1990).

São denominados latões as ligas constituídas basicamente de cobre e zinco. A concentração típica de zinco nos latões varia de 10% a 45% e podem ou não conter outros elementos de liga, presentes em baixos teores. Latões de uma única fase, denominadas latões  $\alpha$ , contém teores de zinco de até 39%. O zinco e o cobre formam, à temperatura ambiente, uma solução sólida. Latões com duas fases,  $\alpha+\beta'$ , contém teores de zinco acima de 37%, sendo a fase  $\beta'$ , rica em maiores quantidades de zinco que  $\alpha$ . Tanto os latões  $\alpha$ , como os  $\alpha+\beta'$ , podem conter até 5% de alumínio (latão ao alumínio) em sua composição ou um ou mais dos elementos a seguir (com teores variando de 1% a 2%): estanho (latão almirantado), chumbo (latão ao chumbo), ferro e manganês (PANOSSIAN, Z, 1993) apud (MARTINS,2009).

O diagrama de equilíbrio Cu-Zn (latões comuns) pode ser observado na Figura 2.20, contém de 0% a 50% de zinco. O cobre puro possui estrutura Cúbica de Face Centrada (CFC) e o zinco puro possui estrutura hexagonal compacta (HC). Ocorrem nesse campo, quatro fases, denominadas  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\beta'$  e  $\gamma$ .

A fase alfa ( $\alpha$ ) é uma solução sólida substitucional primária, de estrutura Cúbica de Faces Centradas (CFC), muito dúctil, com teores de zinco variando entre 0 e 39%. A fase beta ( $\beta$ ) é uma solução sólida de estrutura Cúbica de Corpo Centrado (CCC), desordenada, onde os átomos de Cu e Zn posicionam-se aleatoriamente nos vértices ou nos centros das células unitárias, existente acima do intervalo de 454 - 468 C°. A fase beta-linha ( $\beta'$ ) é uma fase intermediária (CuZn) ordenada, de estrutura CCC, onde os átomos de cobre ou zinco posicionam-se nos vértices dos cubos: esta é a que está presente

à temperatura ambiente. Gama ( $\gamma$ ) é uma fase intermediária, CCC, complexa ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ), localizada desde 853 C° com 60% de Zn, alcançando, à temperatura ambiente, os valores de 59-67,2% de Zn, sendo a mais dura e frágil das fases citadas. (COUTINHO, 1980 apud MARTINS, 2009)

O objeto de estudo, latão C268 encontra-se na fase ( $\alpha$ ) conforme destacado no diagrama apresentado na Figura 2.20

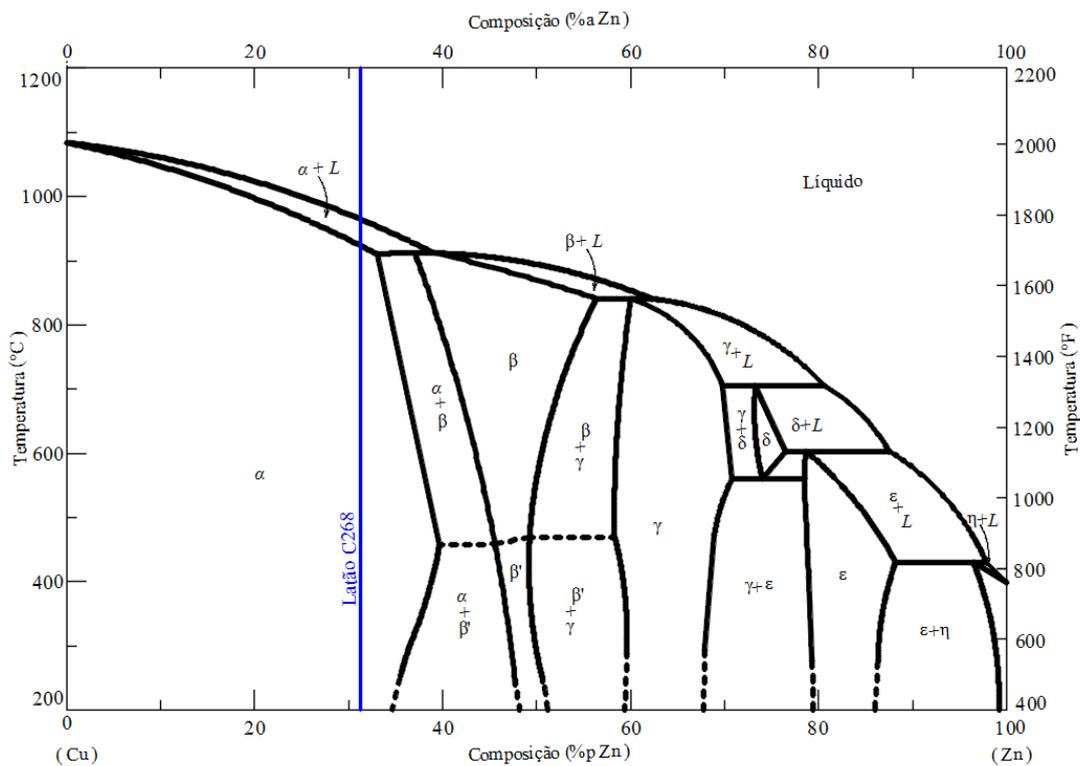


Figura 2.20: Diagrama de fases cobre-zinco (Editado de CALLISTER JR, 2002)

A estrutura fundida de um latão monofásico, com até 32% de zinco, consiste em fase alfa dendrítica. O primeiro material a se solidificar é praticamente o cobre puro, com a continuação da solidificação das dendritas elas se tornam uma mistura de cobre e zinco. Um gradiente de composição existe em toda a dendrita, com teor de zinco iguais a zero no centro e valores mais altos nas extremidades, comportamento que ocorre em ligas em que as transformações durante o resfriamento ocorrem em uma ampla faixa de temperatura.

O trabalho a frio, com posterior recozimento, elimina a estrutura dendrítica, e a microestrutura resultante consiste em grãos maclados e equiaxiais de fase alfa, semelhante à estrutura do cobre puro. Os grãos aparecem em tons diferentes, devido às suas diferentes orientações cristalográficas. As maclas são linhas paralelas que se estendem entre diferentes grãos, e são resultantes de uma falha na sequência de

empilhamento dos átomos de cobre, dificultando a distinção dos grãos individuais. A energia interfacial é responsável pela formação de "maclas de recozimento" muito frequentes em metais e ligas com baixas energias de falha de empilhamento como, por exemplo, o latão tanto no estado deformado quanto recozido. (CDA, 2013)

Um exemplo de microestrutura do latão com fase alfa pode ser visualizada nas Figuras 2.21 e 2.22.

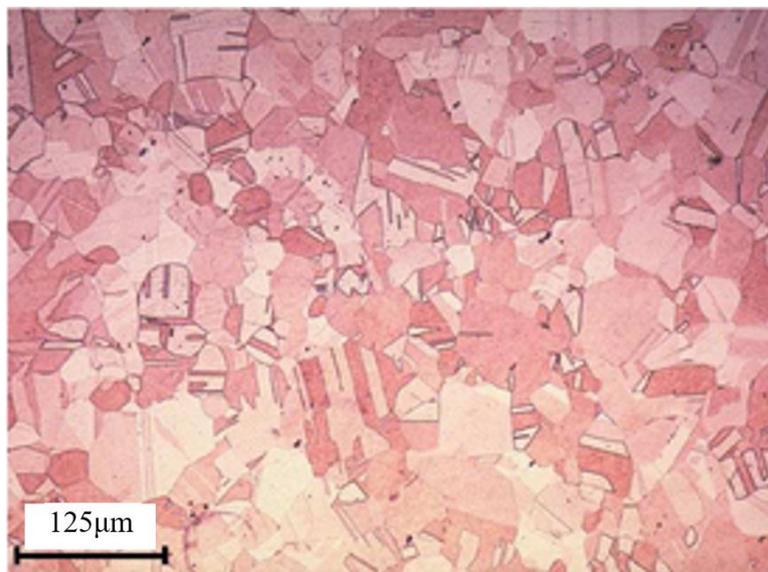


Figura 2.21: Microestrutura de latão (Cu-Zn), trabalhado a frio e recozido, apresentando maclas de recozimento : Cu 89.0-90.0%, Zn 8.9-11.0%, Fe 0.05%, Pb 0.05%;(CDA,2013).

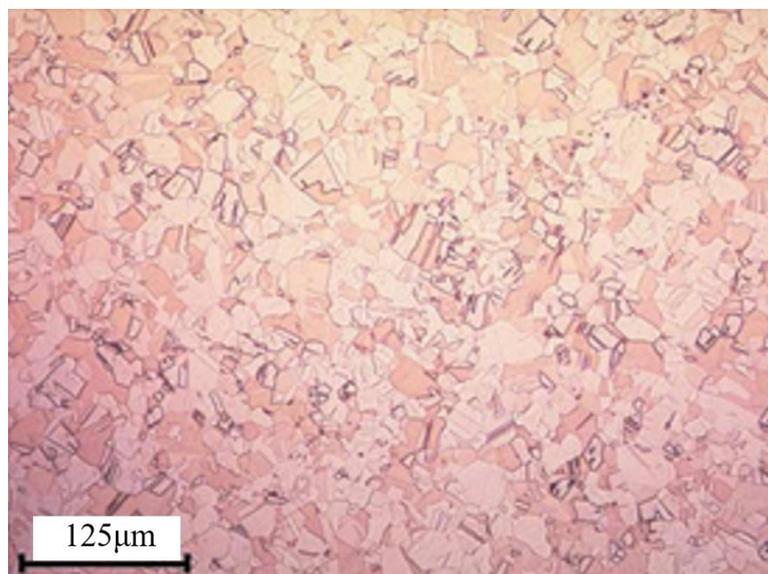


Figura 2.22: Microestrutura de latão (Cu-Zn), trabalhado a frio e recozido, apresentando maclas de recozimento : Cu 68.5-71.5%, Zn 28.38-31.38%, Pb 0.07%, Fe 0.05%(CDA,2013).

A fase alfa ( $\alpha$ ) é a principal fase em ligas de latão contendo até cerca de 40% de zinco. A fase beta linha ( $\beta'$ ), com alto teor de zinco, é a menor constituinte preenchendo

as áreas entre as dendritas da fase alfa, envolvendo-as. Ligas com mais de 40% de zinco contém dendritas primárias de fase beta. Se o material for resfriado rapidamente, a estrutura será inteiramente constituída de fase beta. Durante resfriamento mais lento, a fase alfa precipita nos contornos dos grãos, formando uma estrutura dendrítica ( $\beta$ ) cercada por  $\alpha$  (denominada *Widmanstätten*), onde o padrão geométrico de alfa é formado sobre determinadas orientações cristalográficas de beta (CDA,2013).

## 2.6 Chapa de Latão C268

As ligas de latão são largamente utilizadas nos diversos seguimentos fabris como mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Aplicações Típicas do Latão C268. (TERMOMECANICA, 2013)

<b>Arquitetônicas</b>	<i>Grades.</i>
<b>Elétricas</b>	<i>Estojos para faroletes, refletores, soquetes e receptáculos para lâmpadas.</i>
<b>Ferragens:</b>	<i>Correntes, ilhoses, dobradiças, fechaduras.</i>
<b>Mecânicas</b>	<i>Variedade de componentes obtidos por embutimento profundo e repuxo, tanques de radiadores, tubos e aletas, caixas de relógios e de instrumentos, peças obtidas por recalçamento, tais como: rebites, pinos e parafusos, chapas gravadas por ataque químico, molas.</i>

A liga C-268 é um material de excelente estampabilidade ( $\beta$ ) e alta resistência mecânica, podendo ser fornecido em: chapas, fitas e barras chatas.

Para fins de especificação e correlação, as normas correspondentes estão representadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Normas correspondentes (TERMOMECANICA, 2013)

País	Designação do Material	Norma para Composição Química	Fitas
Alemanha (DIN)	CuZn33	17660	17670
União Européia (DIN EN)	CW506L	EN 1652	EN 1652
		EN 12163	-
Estados Unidos (ASTM)	UNS – C26800	B36	B36

### 2.6.1 Análise Química

A Tabela 2.3 mostra os valores limites de composição química da chapa de latão C268 copilada de manual técnico validado pela norma ASTM. Os valores dos elementos listados a seguir estão expressos em porcentagem (%):

Tabela 2.3: Limites de composição química do Latão C268. (TERMOMECANICA, 2013)

Cu [ % ]	Pb [ % ]	Fe [ % ]	Zn [ % ]
64,0 - 68,5	0,150 máximo	0,050 máximo	Restante

### 2.6.2 Propriedades Físicas

A Tabela 2.4 traz os valores das propriedades físicas da chapa de latão C268 extraídos da literatura.

Tabela 2.4: Propriedades físicas do Latão C268. (TERMOMECANICA, 2013)

Densidade a 20°C ( g/cm <sup>3</sup> )	8,47
Ponto de Fusão ( °C )	930
Coefficiente Médio de Expansão Térmica ( 20 – 300°C ) ( 10 – 6°C )	20,3
Condutibilidade Elétrica Volumétrica a 20°C ( % I.A.C.S )	27
Recozido	
Condutibilidade Térmica a 20°C ( cal/cm s °C )	0,28
Calor Específico a 20°C ( cal/g °C )	0,09
Resistividade Elétrica a 20°C ( Ω mm <sup>2</sup> / m )	0,064
Recozido	
Módulo de Elasticidade a 20°C (MPa)	105000
Módulo de Rigidez ( Torção ) a 20°C (MPa)	35000

### 2.6.3 Características Mecânicas e Tecnológicas

A escolha adequada do material a ser estampado depende de suas propriedades mecânicas e tecnológicas. As propriedades mecânicas são obtidas por ensaios tradicionais, como ensaio de tração e de compressão, em busca das características inerentes ao material. As propriedades tecnológicas dos materiais são alcançadas através de ensaios específicos para o processo de manufatura pelas quais os materiais irão passar. No caso da conformação de chapas é requerido um conhecimento sobre a quantidade de deformação que o material aceite (LORA, 2009). As características tecnológicas também foram extraídas das literaturas e apresentadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Características tecnológicas do Latão C268. (TERMOMECANICA , 2013)

Faixa de Temperatura de Recozimento	425-700°C
Faixa de Temperatura para Trabalho a Quente	700-820°C
Temperatura de Solidificação	905°C
Conformabilidade a Quente	Razoável
Conformabilidade a Frio	Excelente
Usinabilidade Relativa (Latão CLA = 100%)	30%

As propriedades mecânicas sob condições de temperatura ambiente são apresentadas na tabela 2.6.

Tabela 2.6: Propriedades Mecânicas em Temperatura Ambiente Válidas para a Forma e o Grau de Dureza Indicados. (TERMOMECANICA , 2013)

Forma	Grau de Dureza	Limite de Resistência a Tração ( $\sigma_B$ ) (Mpa)		Faixa de Dureza							
				Rockwell B (HRB)				Rockwell 30-T (HR30T)			
				0,50mm – 0,90 mm, incl.		Acima de 0,90 mm		0,30mm – 0,70mm, incl		Acima de 0,70 mm	
				Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Fitas	1/4 duro	340	405	40	61	44	65	43	57	46	60
	1/2 duro	380	450	57	71	60	74	54	64	56	66
	3/4 duro	425	495	70	77	73	80	65	69	67	71
	Duro	470	540	76	82	78	84	68	72	69	73
	Extraduro	545	615	83	87	85	89	73	75	74	76
	Mola	595	655	87	90	89	92	75	77	76	78
	Extramola	620	685	88	91	90	93	76	78	77	79

As faixas de dureza e tamanho de grão para materiais recozidos, são mostrados na Tabela 2.7.

*Tabela 2.7: Exigências para Materiais Recozidos - Tamanho de Grão para Fitas no Grau de Dureza Indicado (TERMOMECANICA , 2013)*

<i>Tamanho de Grão (mm)</i>		<i>Faixa de Dureza</i>	
		<i>Rockwell F (HRF)</i>	
<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
<i>0,250 máximo</i>		<i>72</i>	<i>85</i>
<i>0,015</i>	<i>0,035</i>	<i>67</i>	<i>79</i>
<i>0,025</i>	<i>0,050</i>	<i>65</i>	<i>76</i>
<i>0,035</i>	<i>0,070</i>	<i>61</i>	<i>73</i>
<i>0,050</i>	<i>0,120</i>	<i>52</i>	<i>67</i>
<i>0,070 mínimo</i>		<i>50</i>	<i>62</i>

## **2.7 Propriedades da Liga de Latão**

É apresentado uma revisão bibliográfica dos parâmetros fundamentais relacionados à caracterização da matéria prima, em chapas metálicas, juntamente com resultados obtidos pela pesquisa de (FRITZEN, 2012), relacionados ao Latão 70/30.

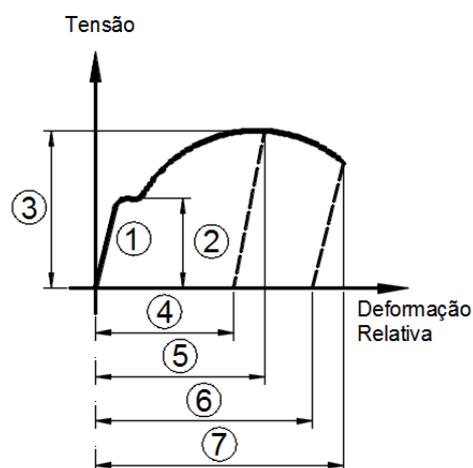
### **2.7.1 Ensaios e resultados**

Em um ensaio de tração, um corpo de prova é submetido a um esforço que tende a alongá-lo ou esticá-lo até à ruptura. Geralmente, o ensaio é realizado num corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados ou, se necessário, reproduzidos. Este é fixado numa máquina de ensaios que aplica esforços crescentes na sua direção axial, sendo medidas as deformações correspondentes. Os esforços ou cargas são mensurados na própria máquina, e, normalmente, o ensaio ocorre até a ruptura do material (ensaio destrutivo). Segundo (SCHAEFFER ,2009 e 2004), este é o mais comum e tradicional dos testes para definir algumas propriedades mecânicas pois permite obter-se:

- Módulo de Elasticidade (E) [N/mm<sup>2</sup>];
- Tensão de Escoamento Convencional ( $\sigma_e$ ) [MPa];
- Limite de Resistência ou Tensão Máxima ( $\sigma_B$ ) [MPa];
- Limite de Ruptura ( $\sigma_R$ ) [MPa];
- Alongamento ( $\delta$ ) [%]
- Grau de encruamento ( $n$ )
- Índice de anisotropia ( $r$ )

(GARCIA, SPIM e SANTOS, 2008 *apud* FRITZEN, 2012) estabelecem que os resultados fornecidos pelo ensaio de tração são fortemente influenciados pela temperatura, pela velocidade de deformação, pela anisotropia ( $r$ ) do material, pelo tamanho de grão, pela porcentagem de impurezas.

A Figura 2.23 mostra o diagrama convencional Tensão x Deformação Relativa.



1. Módulo de Young (Lei de Hooke) (E)
2. Tensão de Escoamento ( $\sigma_e$ )
3. Limite de Resistência ( $\sigma_B$ )
4. Alongamento na Força Máxima (alongamento uniforme)
5. Alongamento total na Força Máxima
6. Alongamento de Ruptura
7. Alongamento Total de Ruptura

Figura 2.23: Diagrama convencional Tensão x Deformação Relativa (Editado de SCHAEFFER, 2004).

Conforme descrito nas normas ABNT 6152 ou DIN EN 10002, o ensaio de tração consiste em fixar um corpo de prova nas garras de uma máquina de ensaios mecânicos, garantindo um estado uniaxial de tensões. O corpo de prova é tracionado com velocidade constante até a ruptura registrando-se a força (F) [N] e o comprimento instantâneo ( $l$ ) [mm]. Nos ensaios de (FRITZEN, 2012), foram usadas chapas de latão 70/30 com a

espessura de 0,5 mm, sendo que para o mesmo foram retirados doze (12) corpos de prova, alternando o sentido de laminação (0°, 45° e 90°).

A Figura 2.24 representa um dos modelos de máquina de ensaios mecânicos disponíveis no mercado.



Figura 2.24: Máquina de ensaios EMIC com capacidade de 600kN

Uma vez realizada as medições da força (F) e do comprimento ( $l_1$ ) obtêm-se a tensão ( $\sigma$ ) e a deformação relativa ( $\epsilon$ ) em cada instante do ensaio.

A tensão ( $\sigma$ ) é calculada por:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ [ N/mm}^2 \text{ ]} \quad (\text{eq. 2-5})$$

Onde:

F [N]: Força aplicada.

$A_0$  [mm<sup>2</sup>]: Seção inicial do corpo de prova.

A deformação relativa ( $\epsilon$ ) é obtida por:

$$\epsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \text{ [ \% ]} \quad (\text{eq. 2-6})$$

A figura 2.25 mostra as principais geometrias em um ensaio de tração convencional que serve de base para o esclarecimento das principais formas de se definir as deformações.

Segundo (SCHAEFFER, 2004), as deformações podem ser caracterizadas por diversas Formas,

- Deformações absolutas;
- Deformações relativas;
- Deformações verdadeiras.

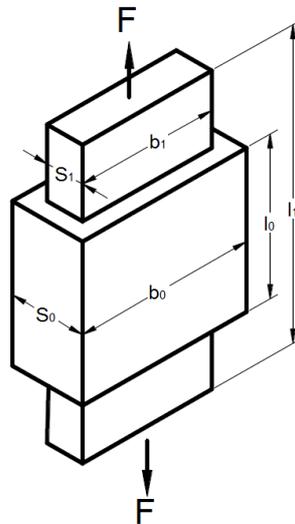


Figura 2.25- Dimensões esquemáticas num ensaio de tração ( SCHAEFFER, 2004).

A deformação absoluta no comprimento  $\Delta l$  é definida por:

$$\Delta l = l_1 - l_0 \quad [mm] \quad (\text{eq. 2-7})$$

A deformação absoluta na largura  $\Delta b$  é definida por:

$$\Delta b = b_1 - b_0 \quad [mm] \quad (\text{eq. 2-8})$$

A deformação absoluta na espessura  $\Delta s$  é definida por:

$$\Delta s = s_1 - s_0 \quad [mm] \quad (\text{eq. 2-9})$$

A deformação relativa no comprimento  $\varepsilon_l$  é definida por:

$$\varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \text{ [ \% ]} \quad (\text{eq. 2-10})$$

A deformação relativa na largura  $\varepsilon_b$  é definida por:

$$\varepsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0} \cdot 100 \text{ [ \% ]} \quad (\text{eq. 2-11})$$

A deformação relativa na espessura  $\varepsilon_s$  é definida por:

$$\varepsilon_s = \frac{s_1 - s_0}{s_0} \cdot 100 \text{ [ \% ]} \quad (\text{eq. 2-12})$$

Na publicação de (SCHAEFFER, 2004), é relatado que as deformações verdadeiras são os parâmetros empregados nas análises dos processos de conformação. O conhecimento das deformações que ocorrem num processo de conformação pode fornecer informações importantes, tais como situação das tensões internas, possibilidades de reduzir etapas de processo, conhecimento sobre o limite máximo de deformações etc. .

Após realizados os ensaios, foram geradas as curvas tensão-deformação convencionais para cada sentido de laminação conforme indicado na Figura 2.26. A tabela 2.8 a seguir relaciona os dados calculados obtidos nos ensaios dos respectivos sentidos de laminação (FRITZEN, 2012)

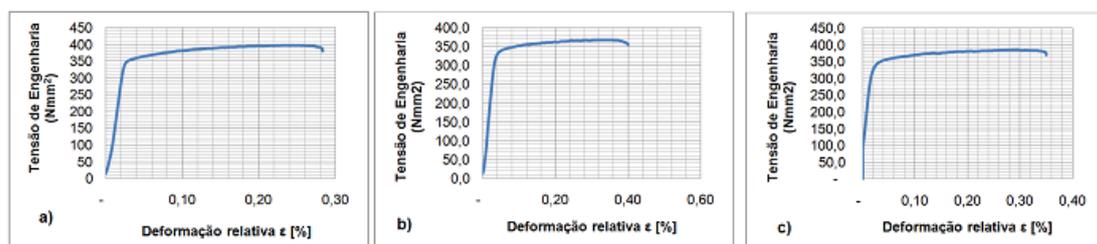


Figura 2.26: Curva convencional  $\sigma \times \varepsilon$  e latão 70/30. a) Sentido de longitudinal ( $0^\circ$  da laminação) b) Sentido de oblíquo ( $45^\circ$  da laminação), c) Sentido de transversal ( $90^\circ$  da laminação) (FRITZEN, 2012).

Tabela 2.8: Dados do material após o ensaio de tração. (FRITZEN, 2012)

Ensaio	Sentido de Laminação: 0°						
	C [MPa]	$\varphi^n$	$\sigma_B$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\varepsilon$	$\delta$ [mm]	n (tg $\alpha$ )
CP0° - 1	756,53	0,285	398,00	348,00	0,33	29,70	0,26
CP0° - 2	749,92	0,277	398,00	345,00	0,32	30,69	0,27
CP0° - 3	758,15	0,288	397,00	337,00	0,33	29,17	0,26
CP0° - 4	734,50	0,272	393,00	339,00	0,31	29,63	0,27
<b>Média</b>	<b>750,02</b>	<b>0,281</b>	<b>396,50</b>	<b>342,25</b>	<b>0,32</b>	<b>29,80</b>	<b>0,27</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>10,99</b>	<b>0,007</b>	<b>2,38</b>	<b>5,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,64</b>	<b>0,01</b>
Equação Média da curva de escoamento do Latão 70/30 para direção de laminação 0°:					$k_f = 750,02 \cdot \varphi^{0,281}$		
Ensaio	Sentido de Laminação: 45°						
	C [MPa]	$\varphi^n$	$\sigma_B$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\varepsilon$	$\delta$ [mm]	n (tg $\alpha$ )
CP45° - 1	715,76	0,305	368,00	335,00	0,36	31,60	0,21
CP45° - 2	717,47	0,293	373,00	332,00	0,34	37,81	0,23
CP45° - 3	712,44	0,284	375,00	338,00	0,33	34,20	0,22
CP45° - 4	702,16	0,281	371,00	327,00	0,33	29,76	0,22
<b>Média</b>	<b>711,96</b>	<b>0,291</b>	<b>371,75</b>	<b>332,80</b>	<b>0,34</b>	<b>33,34</b>	<b>0,22</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>6,86</b>	<b>0,011</b>	<b>2,99</b>	<b>4,73</b>	<b>0,01</b>	<b>3,49</b>	<b>0,02</b>
Equação Média da curva de escoamento do Latão 70/30 para direção de laminação 45°:					$k_f = 711,96 \cdot \varphi^{0,291}$		
Ensaio	Sentido de Laminação: 90°						
	C [MPa]	$\varphi^n$	$\sigma_B$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\varepsilon$	$\delta$ [mm]	n (tg $\alpha$ )
CP90° - 1	706,88	0,257	385,00	337,00	0,29	28,01	0,19
CP90° - 2	729,98	0,272	390,00	343,00	0,31	33,70	0,23
CP90° - 3	692,14	0,243	385,00	341,00	0,28	26,29	0,21
CP90° - 4	723,49	0,271	387,00	337,00	0,31	30,68	0,22
<b>Média</b>	<b>713,07</b>	<b>0,261</b>	<b>386,75</b>	<b>339,18</b>	<b>0,30</b>	<b>29,67</b>	<b>0,21</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>17,06</b>	<b>0,014</b>	<b>2,36</b>	<b>3,02</b>	<b>0,02</b>	<b>3,24</b>	<b>0,04</b>
Equação Média da curva de escoamento do Latão 70/30 para direção de laminação 90°:					$k_f = 713,07 \cdot \varphi^{0,261}$		

Com os valores obtidos do ensaio de tração, foi possível obter os índices de anisotropia ( $r$ ), indicados na tabela 2.9, para os corpos de prova retirados paralelo ao sentido de laminação (0°), oblíquo (45°) e perpendicular (90°) (FRITZEN, 2012).

Tabela 2.9: Valores do índice de anisotropia do latão 70/30 (FRITZEN, 2012).

Direção	Corpo de Prova	$b_0$ [mm]	$b$ [mm]	$l_0$ [mm]	$l$ [mm]	$r$	$r_m$	$\Delta r$
0°	1	20,20	17,30	80,00	109,70	0,4908	0,5106	-0,054
	2	20,20	17,45	80,00	110,69	0,4507		
	3	20,20	17,50	80,00	109,17	0,4615		
	4	20,20	17,35	80,00	109,63	0,4827		
45°	1	20,20	16,60	80,00	111,60	0,5896		
	2	20,20	16,50	80,00	117,81	0,5228		
	3	20,20	16,95	80,00	114,20	0,4929		
	4	20,20	17,00	80,00	109,76	0,5454		
90°	1	20,20	17,40	80,00	108,01	0,4971		
	2	20,20	17,40	80,00	113,77	0,4238		
	3	20,20	17,20	80,00	106,29	0,5658		
	4	20,20	17,20	80,00	110,68	0,4952		

A deformação verdadeira no comprimento  $\varphi_1$  é calculada por:

$$\varphi_1 = \ln \left( \frac{l_1}{l_0} \right) \quad (\text{eq. 2-13})$$

A deformação verdadeira na largura  $\varphi_b$  é calculada por:

$$\varphi_b = \ln \left( \frac{b_1}{b_0} \right) \quad (\text{eq. 2-14})$$

A deformação verdadeira na espessura  $\varphi_s$  é calculada por:

$$\varphi_s = \ln \left( \frac{s_1}{s_0} \right) \quad (\text{eq. 2-15})$$

Sendo que

$l_0$  [mm]: Comprimento inicial

$l_1$  [mm]: Comprimento final

$b_0$  [mm]: Largura inicial

$b_1$  [mm]: largura final

$s_0$  [mm]: Espessura inicial

$s_1$  [mm]: Espessura final

A variação da Tensão de Escoamento (ou Limite de Escoamento) ( $k_f$ ) que um material apresenta durante uma deformação (a frio ou a quente) em função da deformação verdadeira ( $\varphi$ ) pode ser obtida através do ensaio de tração uniaxial, onde, de forma semelhante ao ensaio de tração convencional, mede-se a força (F) e a variação do comprimento ( $l$ ). A Tensão de Escoamento ( $k_f$ ) em cada instante é obtida por:

$$k_f = \frac{\sigma}{A} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{eq. 2-16})$$

Onde:

A [mm<sup>2</sup>]: Área instantânea do corpo de prova ao longo do ensaio.

A área instantânea (A) pode ser determinada a partir da lei de constância de volume (volume inicial  $V_0$  é igual ao volume final V):

$$V_0 = V_1$$

$$A_0 \cdot l_0 = A_1 \cdot l$$

Isolando A tem-se que:

$$A_1 = \frac{A_0 \cdot l_0}{l} \quad [ \text{mm}^2 ] \quad (\text{eq. 2-17})$$

A deformação verdadeira  $\varphi$  em cada instante é obtida por:

$$\varphi = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (\text{eq. 2-18})$$

Onde:

$V_0$  [mm<sup>3</sup>]: Volume inicial

$V_1$  [mm<sup>3</sup>]: Volume final

$A_0$  [mm<sup>2</sup>]: Área inicial

$A_1$  [mm<sup>2</sup>]: Área final

$l_0$  [mm ]: Comprimento inicial da região de medição no corpo de prova

$l$  [mm<sup>2</sup>]: Comprimento instantâneo

As curvas de escoamento, que sempre são obtidas experimentalmente, podem ser descritas por uma função matemática. Em geral, na deformação a frio, essa equação tem a seguinte forma:

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad [\text{MPa}] \quad (\text{eq. 2-19})$$

Onde:

$C$  [MPa]: Constante do material para  $\varphi = 1$

$n$ : Índice de encruamento do material

A deformação a frio produz alongamento dos grãos na direção principal da deformação. Estas deformações produzem uma reorganização dos grãos numa direção preferencial, ocasionando mudanças nas propriedades à tração e deformação a frio. Para

a grande maioria dos materiais empregados nestes processos a temperatura do meio ambiente é muito mais baixa do que a temperatura de recristalização. Isto significa que a tensão de escoamento geralmente é maior que 0 (zero) (FERRARINI, 2004).

O índice de encruamento ( $n$ ) é um importante indicador das características de encruamento dos materiais. Quanto maior o índice de encruamento ( $n$ ), maior é o encruamento do material, ou seja, maior será a capacidade do material se deformar, em tração, sem que ocorra a estricção. O índice de encruamento ( $n$ ) pode ser obtido quando se transfere os dados da tensão de escoamento ( $k_f$ ) e a deformação ( $\phi$ ) para um diagrama em escala logarítmica, Figura 2.27. Normalmente se obtém uma reta sendo o valor “ $n$ ” dado pela inclinação ( $\alpha$ ) desta reta ( $n = \text{tg } \alpha$ ) (SCHAEFFER, 2004).

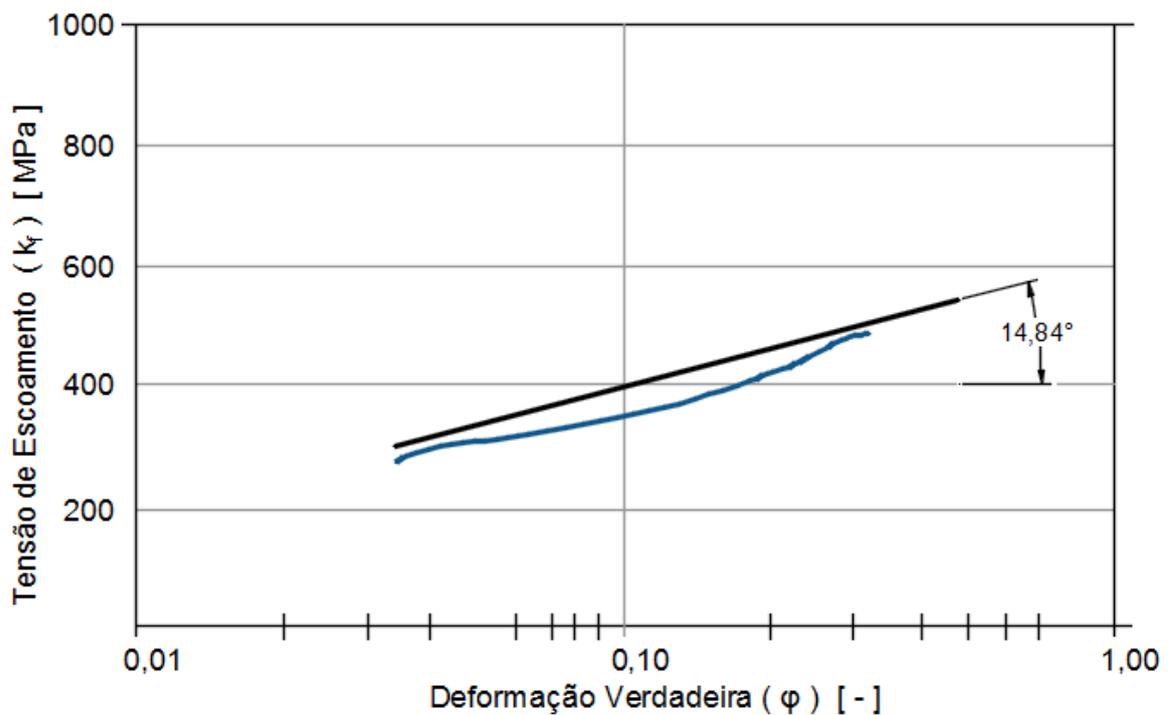


Figura 2.27: Curva de Escoamento em escala logarítmica do corpo de prova com sentido de laminação a 0° do latão 70/30 (Editado de FRITZEN, 2012).

Onde:

$$n = \text{tg } \alpha \quad (\text{eq.2-20})$$

$$n = \text{tg } 14,84^\circ$$

$$n = 0,26$$

Os demais dados necessários para a determinação algébrica da curva de escoamento são:

- A deformação verdadeira que correspondente à tensão máxima é calculada com o valor da deformação relativa no instante de tensão máxima.

- Para o instante da tensão máxima, tem-se que a deformação ( $\varphi$ ) é igual ao coeficiente de encruamento ( $n$ ).

$$\varphi = n \quad (\text{eq. 2-21})$$

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (\text{eq. 2-22})$$

A tensão verdadeira ( $k_f$ ) correspondente a tensão máxima do material

Nos estudos dirigidos por (FRITZEN, 2012), os valores de alongamento ( $\delta$ ) foram obtidos por medição na chapa, antes e depois de rompida,

As fórmulas usadas seguem descritas a seguir:

- Alongamento ( $\delta$ )

$$\delta = l - l_0 \quad (\text{eq. 2-23})$$

- Tensão máxima ( $\sigma_B$ )

$$\sigma_B = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_0} \quad (\text{eq. 2-24})$$

Desta forma a tensão de escoamento ( $k_f$ ) para a deformação ( $\varphi$ ) é encontrada com a equação que segue:

$$k_f = \sigma_B (1 + \varepsilon) \quad [\text{MPa}] \quad (\text{eq. 2-25})$$

Desta maneira foi possível obter a constante C para a deformação ( $\varphi$ )

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad [\text{MPa}] \quad (\text{eq. 2-26})$$

Deste modo pode definir a curva de escoamento ( $k_f$  x  $\varphi$ ) do latão 70/30 matematicamente por:

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (\text{eq. 2-27})$$

## 2.8 – Parâmetros de rugosidade

A rugosidade de superfície é a topografia microscópica deixada pela estampagem e é mais influenciada pelo processo que pela máquina. O acabamento de superfície, representado principalmente pela rugosidade e geralmente especificado em projetos mecânicos, consiste em um conjunto de irregularidades que tendem a criar um padrão, ou seja, uma textura em uma determinada superfície. Tais irregularidades estão presentes em todas as superfícies reais, por mais perfeitas que aparentem ser e na maioria das vezes ocorrem devido ao método empregado na obtenção desta. Além de  $R_a$ , outro parâmetro internacional de rugosidade reconhecido universalmente é a rugosidade total ( $R_t$ ). O parâmetro  $R_t$  consiste da soma da maior altura de pico e da maior profundidade de vale do perfil efetivo (medido) em relação à linha média no comprimento de avaliação.  $R_t$  é empregado quando é desejável (ou necessário) especificar a altura máxima da rugosidade, pois é diretamente influenciado por qualquer defeito ou irregularidade na superfície (MACHADO, 2009).

O emprego do parâmetro  $R_z$  pode ser citado para casos em que pontos isolados influenciam a aplicabilidade do produto, como por exemplo, superfícies em contato e com deslizamento (por exemplo: a estampagem). As vantagens deste parâmetro referem-se à facilidade de obtenção através de gráficos e à informação sobre a distribuição dos pontos acentuados. Por outro lado, essa consideração parcial pode fornecer uma pequena parte da superfície total de análise, além de não possibilitar informações sobre a forma e a distância entre as ranhuras (TAYLOR HOBSON PRECISION, 2003) apud (MACHADO, 2009).

A ferramenta que atua no eixo Z deixa marcas sobre a superfície estampada em cada volta de estampagem. O acabamento de superfície no processo de estampagem incremental é uma combinação de grandes ondulações resultantes da trajetória da ferramenta e pequena escala de rugosidade resultante de tensões de atrito da superfície com a ferramenta. Os três principais parâmetros que influenciam na rugosidade são: o Ângulo de Parede ( $\psi$ ), o Passo ( $\Delta Z$ ) e o Raio ( $R_f$ ) da ferramenta. Tanto as ondulações resultantes da trajetória da ferramenta, quanto à rugosidade resultante de tensões de atrito da superfície com a ferramenta, podem ser amenizadas usando ferramenta com grande diâmetro e diminuindo o Passo ( $\Delta Z$ ) de estampagem a Figura 2.28, demonstra a rugosidade  $R_z$  no processo de ISF. Contudo, pequenos passos ( $\Delta Z$ ) levam a tempos

maiores de estampagem. Então há uma relação entre tempo de produção e a qualidade de superfície (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005) *apud* (FRITZEN, 2012).

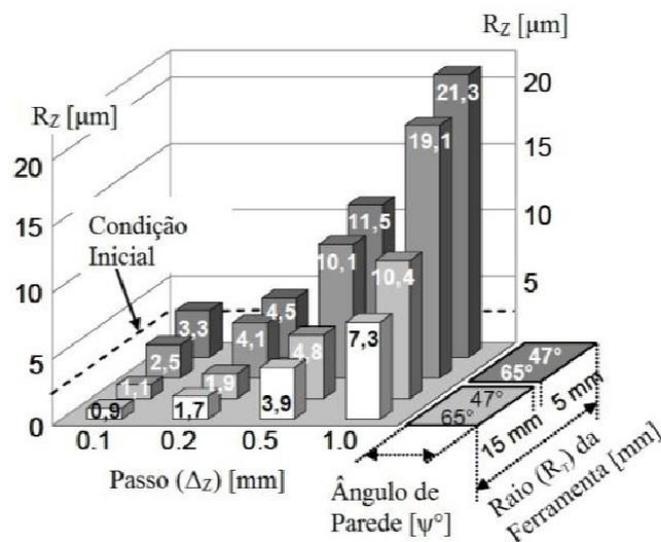


Figura 2.28: Rugosidade RZ sob condições de estampagem incremental (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005) *apud* (FRITZEN 2012).

### 2.8.1 Parâmetro Ra (Rugosidade média absoluta)

O parâmetro Ra é utilizado, quando for necessário o controle de rugosidade continuamente nas linhas de produção, devido à sua facilidade de obtenção. Nos casos de superfícies onde o acabamento apresenta os sulcos de usinagem bem orientados (torneamento, fresamento, etc.). Em superfícies de pouca responsabilidade, como por exemplo, acabamentos com fins apenas estéticos. Ra é o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo, sendo aplicável à maioria dos processos de fabricação.

Devido a sua grande utilização, quase a totalidade dos equipamentos apresenta este parâmetro (de forma analógica ou digital eletrônica). Os riscos superficiais inerentes ao processo, não alteram substancialmente o seu valor e para a maioria das superfícies, o valor da rugosidade neste parâmetro está de acordo com a curva de Gauss que caracteriza a distribuição de amplitude (MOLDES E INJEÇÃO DE PLÁSTICO, 2016).

### 2.8.2 Parâmetro Rz (Rugosidade média real)

Pode ser usado nos casos em que pontos isolados não influenciam na função da peça a ser controlada, por exemplo: superfícies de apoio e de deslizamento, ajustes prensados, etc. Em superfícies onde o perfil é periódico e conhecido. Como principais vantagens, obtém-se a informação sobre a distribuição média da superfície

vertical. É de fácil obtenção em equipamentos que fornecem gráficos. Em perfis periódicos, define muito bem a superfície. Riscos isolados serão considerados apenas parcialmente, de acordo com o número de pontos isolados. (MOLDES E INJEÇÃO DE PLASTICO, 2016).

### **2.8.3 Parâmetro Rt (Rugosidade total)**

É aplicado em superfícies com grandes solicitações de esforços dinâmico, superfícies de deslizamento onde o perfil é periódico. Seu gráfico é de fácil obtenção e fornece informações complementares ao parâmetro Ra.

Em alguns casos a rigidez de avaliação leva a resultados enganosos. Pode dar uma imagem errônea da superfície, pois avalia erros muitas vezes não representam a superfície como um todo, por exemplo, um risco causado após a usinagem e que não caracteriza o processo.

Individualmente não apresenta informações suficientes a respeito da superfície, isto é, não informa sobre a forma da superfície que pode estar composta por picos muito agudos com grandes vales ou por riscos finos e profundos a intervalos grandes, todos com o mesmo valor (MOLDES E INJEÇÃO DE PLASTICO, 2016).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, é descrito o processo realizado para fazer os experimentos com a chapa de latão C268 para o processo de Estampagem Incremental de chapas (*ISF – Incremental Sheet Forming*). Os experimentos iniciais baseiam-se na variante da estampagem denominada Estampagem Incremental com Ponto Simples (*SPIF - Single Point Incremental Forming*) sendo conformado até o seu rompimento, registrando-se o ângulo de parede que foi obtido. A partir deste ponto, muda-se o processo para Estampagem Incremental de Múltiplos Passes (*MSPIF - Multi Pass Single Point Incremental Forming*).

#### 3.1 Caracterização da Chapa de Latão C-268

Na sequência, serão demonstrados os estudos e ensaios realizados com a chapa de latão C-268 com 0,5 mm de espessura.

##### 3.1.1 Propriedades Mecânicas do Latão C-268

Para a caracterização do latão, realizada antes dos testes de estampagem incremental, foram utilizados equipamentos e insumos no laboratório de ensaios da Faculdade SATC.

##### 3.1.2 Curva Tensão x Deformação (Convencional)

A chapa de latão C-268 foi adquirida junto à Servicorte Indústria e Comércio de Metais de Porto Alegre – RS. As chapas usadas tanto nos experimentos de estampagem, quanto nos ensaios de tração, têm a espessura de 0,5 mm, sendo que para os ensaios foram retirados nove (09) corpos de prova, alternando o sentido de laminação (0°, 45° e 90°). O formato usado está de acordo com a norma ABNT 6152 demonstrado na Figura 3.1

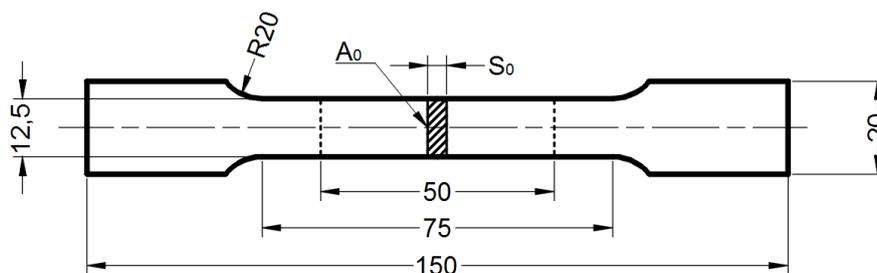


Figura 3.1 - Dimensões do corpo de prova (Editado de ABNT 6152)

Os ensaios foram feitos numa máquina de ensaio de tração EMIC DL 10000 com célula de carga com capacidade de 100 kN. A Figura 3.2 (a) e (b) mostram o corpo de prova original e os corpos de provas após o ensaio de tração realizado.

Com a análise do tipo de fratura indicado na Figura 3.2(b), constatou-se que a chapa de latão C-268 apresentou uma fratura do tipo dúctil, com estrição visível (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2008) apud (FRITZEN,2012).

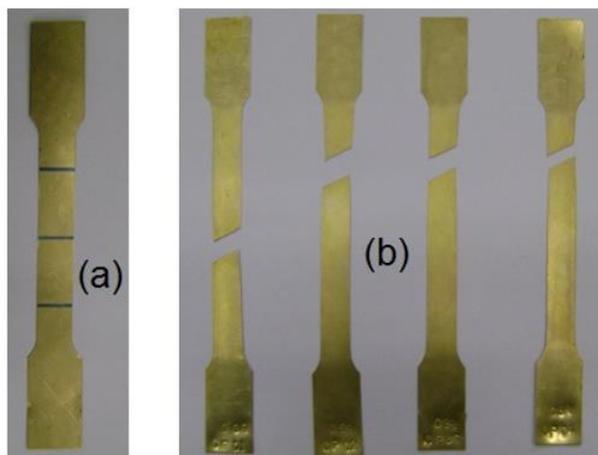


Figura 3.2 - a) Corpo de Prova original; b) Corpos de Prova após ensaio de tração.

Para a obtenção da curva “Tensão x Deformação”, foram realizados três (3) ensaios de tração por direção de laminação ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ). A Figura 3.3 ilustra a Curva Tensão x Deformação Convencional, obtida com os resultados do ensaio de tração de um dos corpos prova, para esta representação, com direção de laminação de  $0^\circ$ .

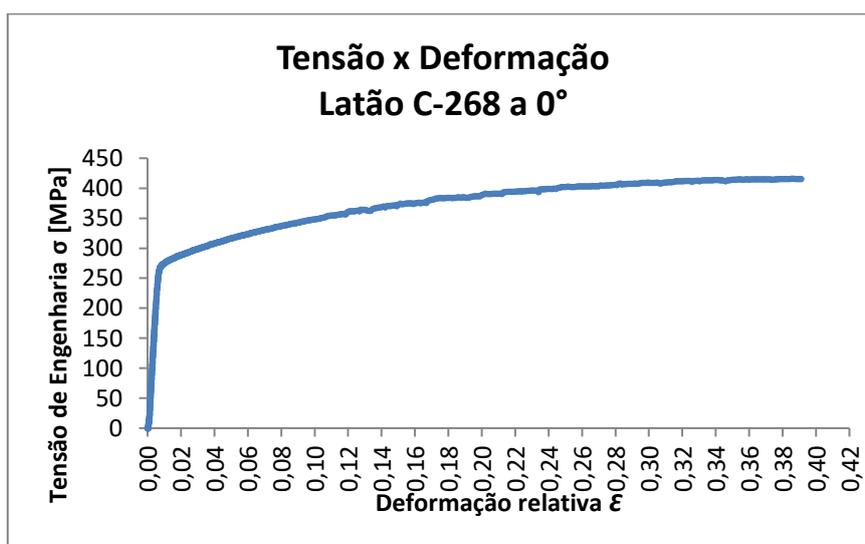


Figura 3.3: Curva Convencional do corpo de prova 01 com sentido de laminação a  $0^\circ$  do latão C-268.

Já a figura 3.4 mostra a Curva Tensão x Deformação Convencional, obtida com os resultados do ensaio de tração de um dos corpos prova, para esta representação, com direção de laminação de 45°.

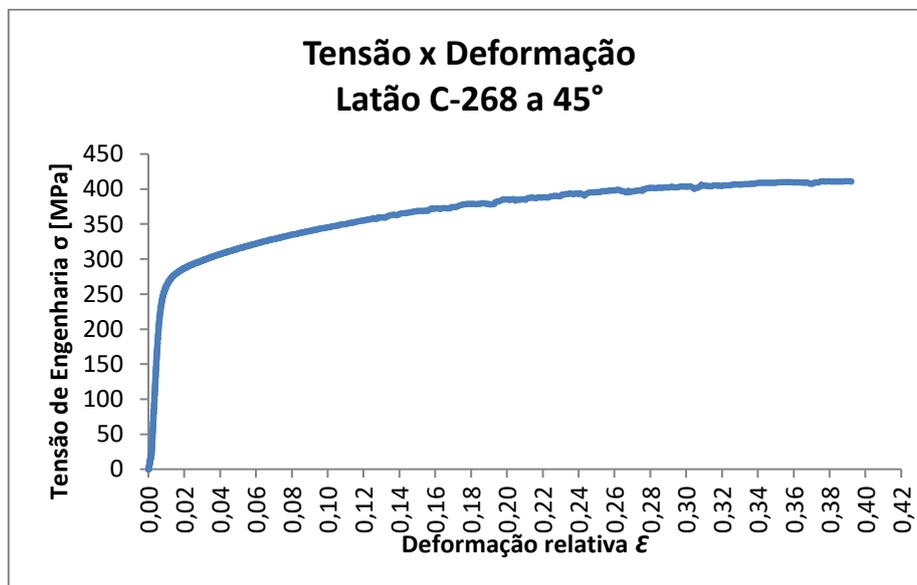


Figura 3.4: Curva Convencional do corpo de prova 01 com sentido de laminação a 45° do latão C-268.

Por último, a Figura 3.5 mostra a Curva Tensão x Deformação Convencional, obtida com os resultados do ensaio de tração de um dos corpos prova, para esta representação, a direção de laminação com 90°.

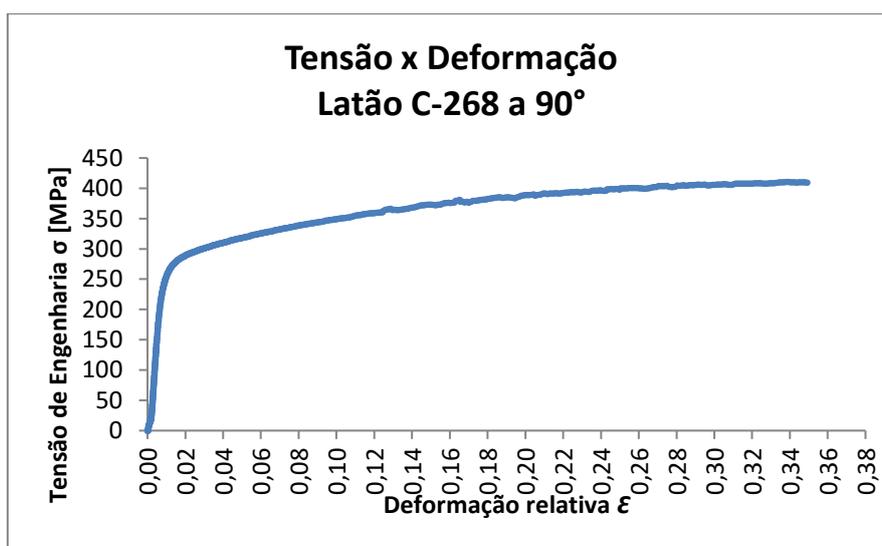


Figura 3.5: Curva Convencional do corpo de prova 01 com sentido de laminação a 90° do latão C-268.

Os valores de alongamento ( $\delta$ ) e área inicial ( $A_0$ ) foram obtidos por medição na chapa, antes e depois do rompimento das mesmas. A Figura 3.6 mostra as cotas antes e depois do ensaio para o corpo de prova 02.

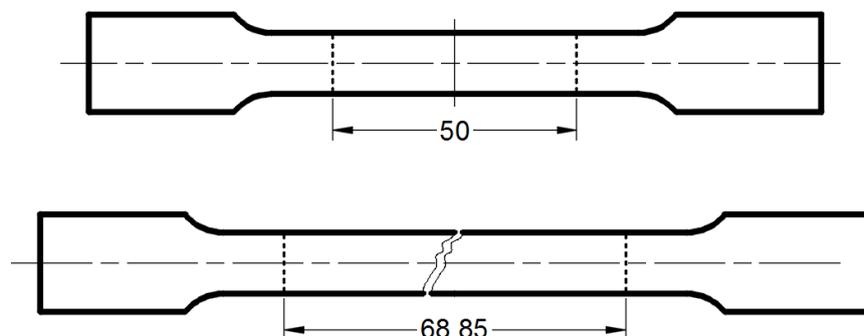


Figura 3.6: Dimensões do corpo de prova 02, sentido longitudinal ( $0^\circ$ ) antes e depois do ensaio de tração.

Com a execução do ensaio de tração puderam ser obtidos os valores de deformação relativa ( $\epsilon$ ), alongamento ( $\delta$ ), tensão máxima ( $\sigma_B$ ) e a curva de escoamento do material para cada sentido de laminação.

As curvas de todos os ensaios, bem como os valores calculados, foram obtidas com o auxílio do *software Microsoft Office Excel 2013* ®.

Procedimentos foram repetidos para os demais ensaios realizados, resultando na Tabela 2.10 a seguir com todos os valores obtidos nos ensaios de acordo com respectivos sentidos de laminação.

Tabela 2.10: Propriedade mecânicas obtidas com os corpos de prova do latão C-268

Sentido de laminação	Corpo de prova	$l_0$ [mm]	$l_1$ [mm]	$\delta$ [mm]	$\epsilon$	Fmáx [Mpa]	A0 [mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_B$ [Mpa]	$\sigma_{e0,20}$ [Mpa]
Longitudinal ( $0^\circ$ )	CP 01	50	69,55	19,55	0,39	2601,90	6,25	416,30	296,88
	CP 02	50	68,85	18,85	0,38	2605,40	6,25	416,86	295,74
	CP 03	50	69,20	19,20	0,38	2603,65	6,25	416,58	296,31
Obliquo ( $45^\circ$ )	CP 01	50	69,60	19,60	0,39	2570,20	6,25	411,23	290,00
	CP 02	50	69,10	19,10	0,38	2552,60	6,25	408,42	294,62
	CP 03	50	69,35	19,35	0,39	2561,40	6,25	409,82	292,31
Transversal ( $90^\circ$ )	CP 01	50	67,45	17,45	0,35	2566,70	6,25	410,67	302,51
	CP 02	50	66,20	16,20	0,32	2616,00	6,25	418,56	308,14
	CP 03	50	67,95	17,95	0,36	2594,80	6,25	415,17	302,51

Cálculos foram realizados a partir das fórmulas indicadas anteriormente:

- Alongamento ( $\delta$ ), representado pela deformação absoluta no comprimento (eq.2-7):

$$\delta = l_1 - l_0$$

- Deformação relativa ( $\varepsilon$ ) (eq.2-6):

$$\varepsilon = \left( \frac{l_1 - l_0}{l_0} \right)$$

Onde:

$l_0$  [mm]: Comprimento inicial da região de medição no corpo de prova

$l$  [mm]: Comprimento instantâneo

- Limite de resistência ou tensão máxima ( $\sigma_B$ ), (eq. 2-5):

$$\sigma_B = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_0}$$

Onde :

$F_{m\acute{a}x}$  [N]:Força máxima aplicada

$A_0$ [mm<sup>2</sup>]:Área inicial;

A variação da Tensão de Escoamento (ou Limite de Escoamento) ( $k_f$ ) que um material apresenta durante uma deformação (a frio ou a quente) em função da deformação verdadeira ( $\phi$ ) pode ser obtida através do ensaio de tração uniaxial, onde, de forma semelhante ao ensaio de tração convencional, mede-se a força (F) e a variação do comprimento ( $l$ ). A Tensão de Escoamento ( $k_f$ ) em cada instante é obtida por (eq. 2-16):

$$k_f = \frac{\sigma}{A} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Onde:

$A$  [mm<sup>2</sup>]: Área instantânea do corpo de prova ao longo do ensaio.

A área instantânea (A) pode ser determinada a partir da lei de constância de volume (volume inicial  $V_0$  é igual ao volume final V):

$$V_0 = V$$

$$A_0 \cdot l_0 = A \cdot l$$

Isolando A tem-se que (eq. 2-17):

$$A = \frac{A_0 \cdot l_0}{l} \quad [ \text{mm}^2 ]$$

A deformação verdadeira  $\varphi$  em cada instante é obtida por ( eq. 2-19):

$$\varphi = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

Onde:

$V_0$  [mm<sup>3</sup>]: Volume inicial

$V$  [mm<sup>3</sup>]: Volume final

$A_0$  [mm<sup>2</sup>]: Área inicial

$A$  [mm<sup>2</sup>]: Área final

$l_0$  [mm ]: Comprimento inicial da região de medição no corpo de prova

$l$  [mm<sup>2</sup>]: Comprimento instantâneo

Deste modo, a curva de escoamento ( $k_f \times \varphi$ ) do latão C-268 pode ser definida nos três sentidos de laminação, conforme representado graficamente nas Figuras 3.7, 3.8 e 3.9.

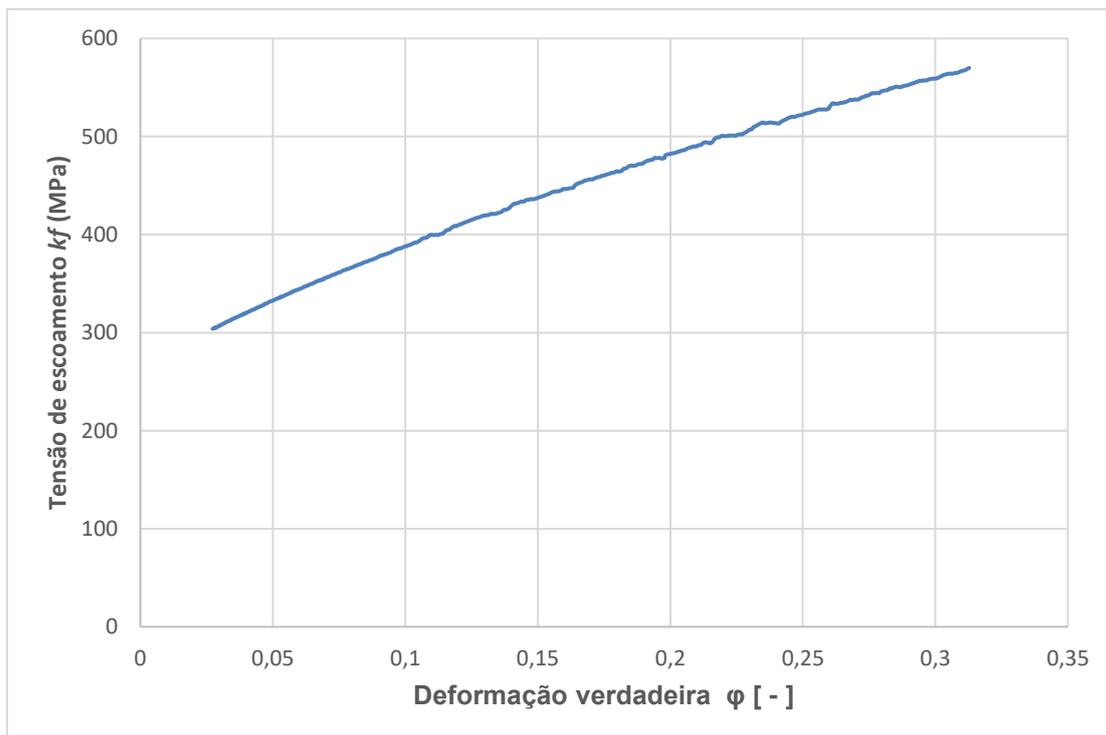


Figura 3.7: Curva de Escoamento do corpo de prova 02 com sentido de laminação a 0° do latão C-268.

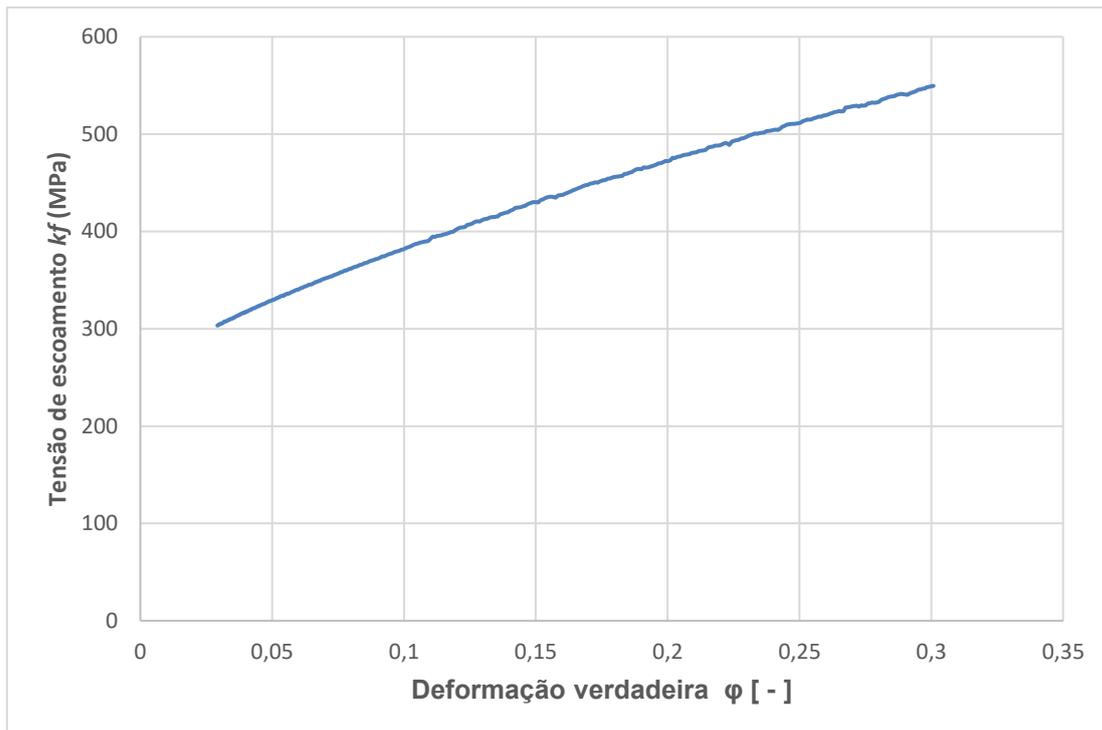


Figura 3.8: Curva de Escoamento do corpo de prova 02 com sentido de laminação a 45° do latão C-268.

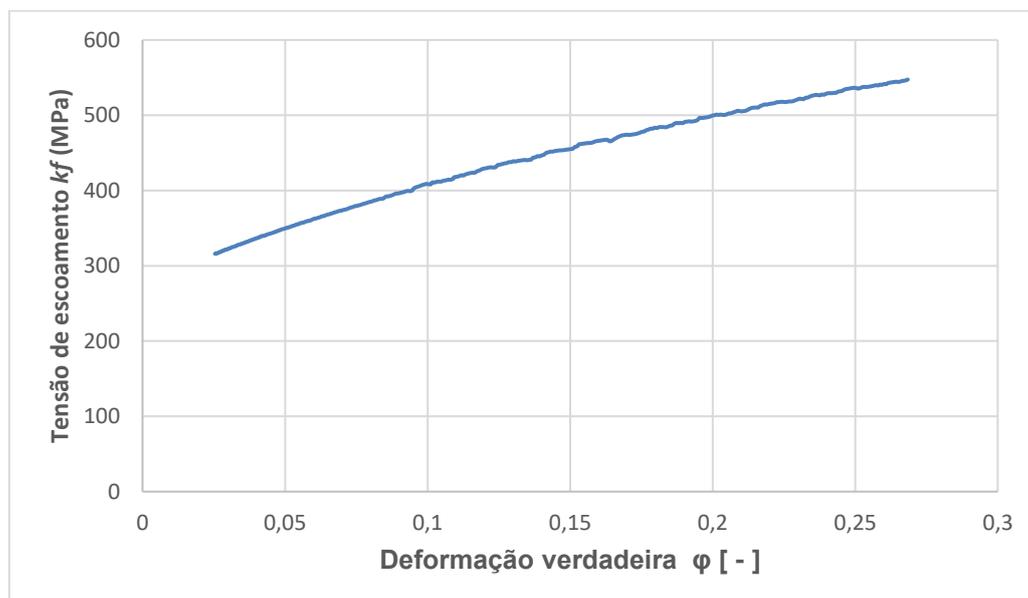


Figura 3.9: Curva de Escoamento do corpo de prova 02 com sentido de laminação a 90° do latão C-268.

As curvas de escoamento, podem ser descritas pela equação:

(eq. 2-19) :

$$k_f = C \cdot \phi^n \quad [\text{MPa}]$$

A partir dos gráficos obtidos de forma experimental de tensão ( $\sigma$ ) x deformação ( $\phi$ ), calcula-se o logaritmo de cada um destes e se constrói o gráfico  $\log k_f$  x  $\log \phi$ . Estes gráficos mostram dados para deformação  $\phi > 0,2$ , pois esta é a região de deformação plástica e a região de interesse na conformação mecânica. A partir da linearização do gráfico acima, obtém-se a equação da reta tangente (OLIVEIRA, 2012).

Para a obtenção desta equação, foi realizada uma linearização da curva de escoamento do material, construindo o gráfico  $\log(k_f)$  x  $\log(\phi)$ . O índice de encruamento ( $n$ ) é obtido pela inclinação da reta e a constante do material ( $C$ ) é igual ao valor de ( $k_f$ ) para  $\phi = 1$ . Para a construção do gráfico  $\log(k_f)$  x  $\log(\phi)$ , foram utilizados apenas os dados na região de deformação plástica do material, por ser esta região de interesse para os processos de conformação mecânica. O limite da região de deformação plástica foi definido como sendo  $\phi = 0,2$  (KNOLL *et al.*, 2007). Três representações gráficas são exemplificadas de acordo com os sentidos de laminação, indicado nas Figuras 3.10, 3.11 e 3.12.

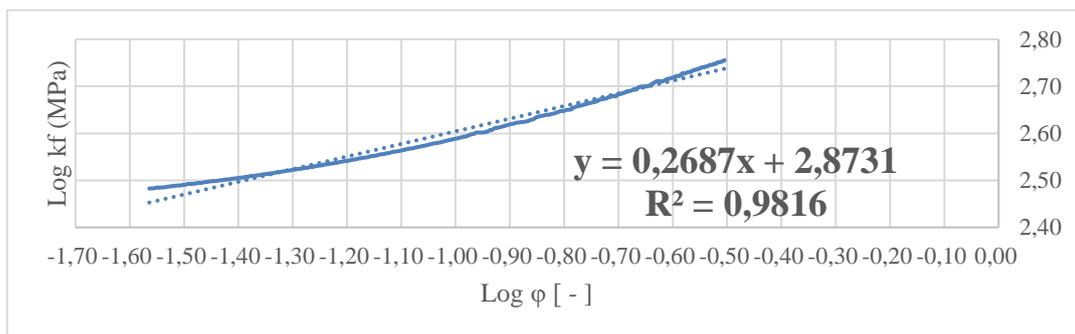


Figura 3.10: Gráfico  $\log(k_f)$  x  $\log(\phi)$  com a equação da reta tangente do corpo de prova 02 com sentido de laminação a  $0^\circ$  do latão C-268.

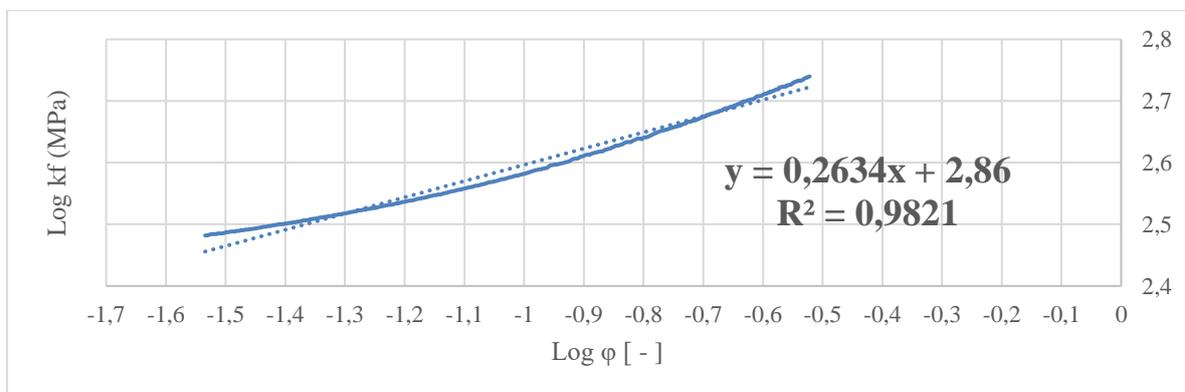


Figura 3.11: Gráfico  $\log(k_f)$  x  $\log(\phi)$  com a equação da reta tangente do corpo de prova 02 com sentido de laminação a  $45^\circ$  do latão C-268.

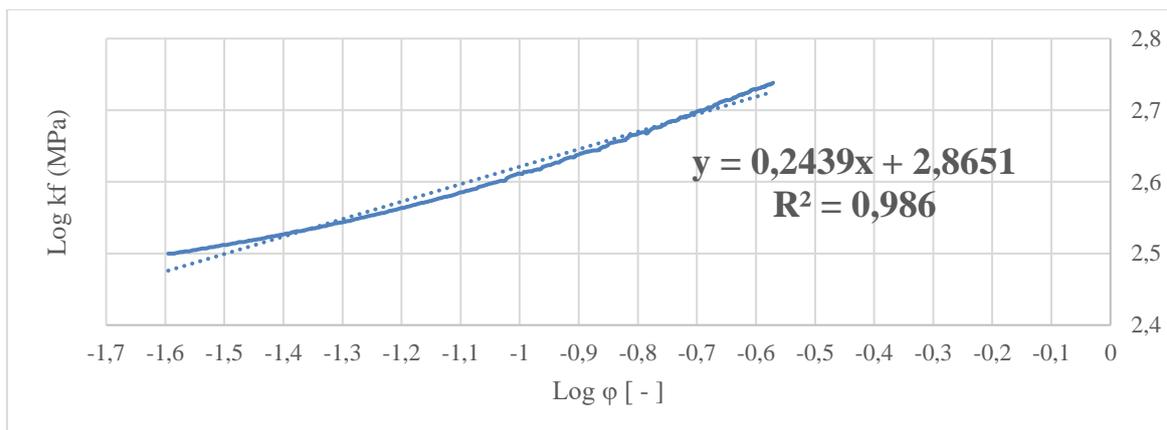


Figura 3.12: Gráfico  $\log(k_f) \times \log(\varphi)$  com a equação da reta tangente do corpo de prova 02 com sentido de laminação a  $90^\circ$  do latão C-268.

A partir das linearizações, obtiveram-se as equações das retas para cada corpo de prova e, conseqüentemente os valores de (C) e (n).

Desta forma, é possível escrever matematicamente a curva de escoamento de cada material ensaiado, conforme demonstrado na Tabela 2.11 e com a média definimos a equação de resistência ao escoamento do Latão C-268:

$$k_f = 735,97 * \varphi^{0,2618}$$

Tabela 2.11: Resultado dos valores C e n dos corpos de prova ensaiados.

Sentido de laminação	Corpo de prova	Equação da reta tangente	Índice de encruamento (n)	C (Mpa)	Equação de resistência ao escoamento
Longitudinal ( $0^\circ$ )	CP 01	$y = 0,2683x + 2,8739$	0,2683	748,00	$k_f = 748,00 * \varphi^{0,2683}$
	CP 02	$y = 0,2687x + 2,8731$	0,2687	746,62	$k_f = 746,62 * \varphi^{0,2687}$
	CP 03	$y = 0,2685x + 2,8735$	0,2685	747,31	$k_f = 747,31 * \varphi^{0,2685}$
Obliquo ( $45^\circ$ )	CP 01	$y = 0,2655x + 2,8657$	0,2655	734,01	$k_f = 734,01 * \varphi^{0,2655}$
	CP 02	$y = 0,2634x + 2,86$	0,2634	724,44	$k_f = 724,44 * \varphi^{0,2634}$
	CP 03	$y = 0,2645x + 2,8628$	0,2645	729,12	$k_f = 729,12 * \varphi^{0,2645}$
Transversal ( $90^\circ$ )	CP 01	$Y = 0,2599x + 2,8629$	0,2599	729,29	$k_f = 729,29 * \varphi^{0,2599}$
	CP 02	$y = 0,2439x + 2,8651$	0,2439	732,99	$k_f = 732,99 * \varphi^{0,2439}$
	CP 03	$y = 0,2532x + 2,8645$	0,2532	731,98	$k_f = 731,98 * \varphi^{0,2532}$
<b>MÉDIA</b>			<b>0,2618</b>	<b>735,97</b>	<b><math>k_f = 735,97 * \varphi^{0,2618}</math></b>

O levantamento das curvas de escoamento é de extrema importância para os processos de conformação mecânica. A obtenção da equação que descreve o comportamento plástico do material, ajuda na previsão de sua tensão de escoamento em qualquer nível de deformação.

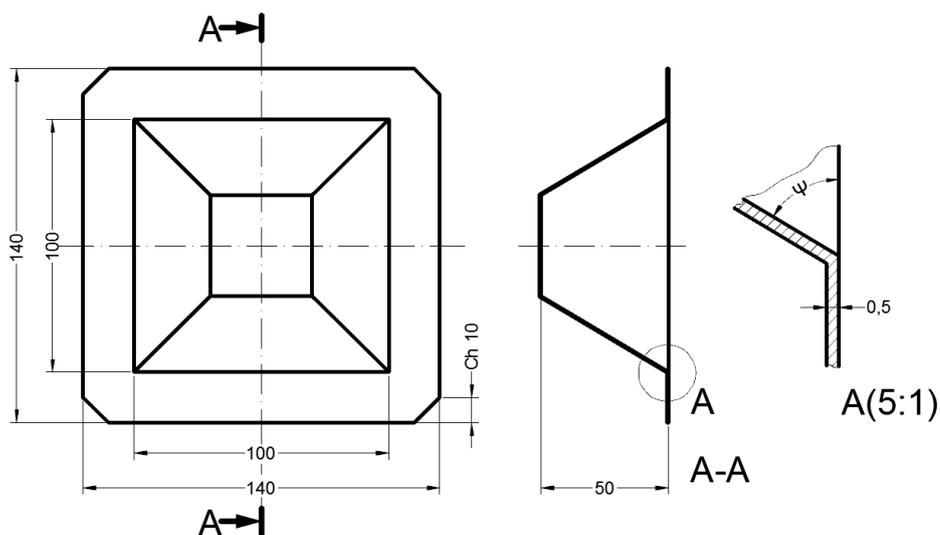
Com os valores obtidos do ensaio de tração, foi possível obter os índices de anisotropia ( $r$ ) para os corpos de prova retirados paralelos ao sentido de laminação ( $0^\circ$ ), oblíquo ( $45^\circ$ ) e perpendicular ( $90^\circ$ ), demonstrados na Tabela 2.12.

Tabela 2.12: Índices de anisotropia.

Sentido de laminação	Corpo de prova	$l_0$ [mm]	$l_1$ [mm]	$b_0$ [mm]	$b_1$ [mm]	$\phi_l$	$\phi_b$	$r$	$r_m$
Longitudinal ( $0^\circ$ )	CP 01	50	69,55	12,50	10,05	0,33	-0,22	1,95	1,69
	CP 02	50	68,85	12,50	10,25	0,32	-0,20	1,63	
	CP 03	50	69,2	12,50	10,15	0,32	-0,21	1,78	
Oblíquo ( $45^\circ$ )	CP 01	50	69,6	12,50	10,40	0,33	-0,18	1,25	
	CP 02	50	69,1	12,50	10,30	0,32	-0,19	1,49	
	CP 03	50	69,35	12,50	10,35	0,33	-0,19	1,36	
Transversal ( $90^\circ$ )	CP 01	50	67,45	12,50	10,10	0,30	-0,21	2,47	
	CP 02	50	66,2	12,50	10,45	0,28	-0,18	1,76	
	CP 03	50	67,95	12,50	10,40	0,31	-0,18	1,50	

### 3.2 Modelamento da forma geométrica de estudo

O modelo de estudo foi baseado num tronco de pirâmide de base quadrada com 100 mm de lado e 45 mm de profundidade como representado na Figura 3.13.



Nota: Não estão projetados o raio da ferramenta

Figura

3.13: Desenho de detalhamento do modelo de estudo.

Para o projeto deste modelo, foi utilizado o *software* CAD SolidWorks ®. A Figura 3.14 mostra uma visão isométrica do modelo.

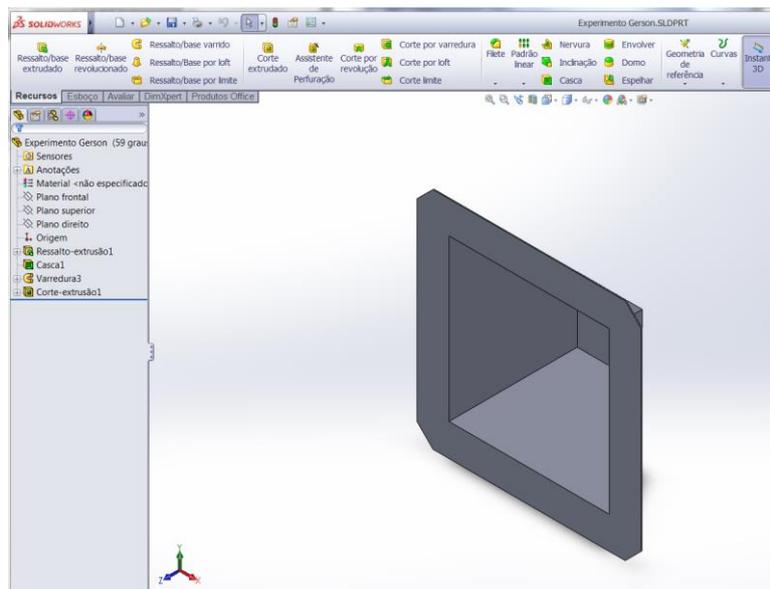


Figura 3.14: Modelamento do modelo de estudo.

### 3.3 Preparação do Blank

O tamanho da chapa bruta (blank), foi cortado de acordo com as dimensões estabelecidas na base do modelo, ou seja 140x140mm - Chapa de latão C268 com 0,5mm de espessura. A Figura 3.15 mostra a chapa (*blank*) cortada e devidamente chanfrada para a posterior montagem no conjunto do dispositivo de estampagem.

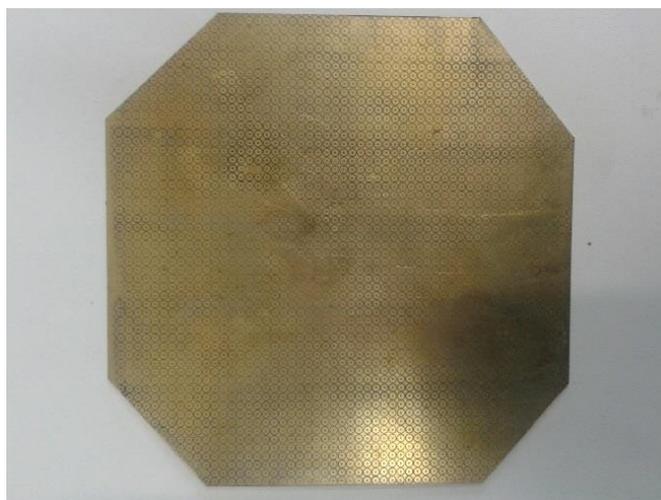


Figura 3.15: Chapa cortada nas dimensões projetadas.

### 3.4 Gravação Eletroquímica

Antes de submeter cada *blank* aos esforços de conformação, é necessário fazer a gravação eletroquímica para posterior coleta de dados, verificando as deformações verdadeiras que ocorreram na chapa pelo método de exame de visioelasticidade. Este exame consiste na gravação de pequenos círculos alinhados sobre a chapa. As gravações foram feitas nas superfícies inferiores (opostas ao contato da ferramenta de conformação), com círculo de 2,5mm. Os materiais e equipamentos utilizados estão demonstrados na Figura 3.16 e seguem descritos:

- Gravador de metais da marca Gravamet , modelo Ônix ;
- Tela de serigrafia com círculos de diâmetro de 2,5 mm;
- Ácido para latão referência L-1.

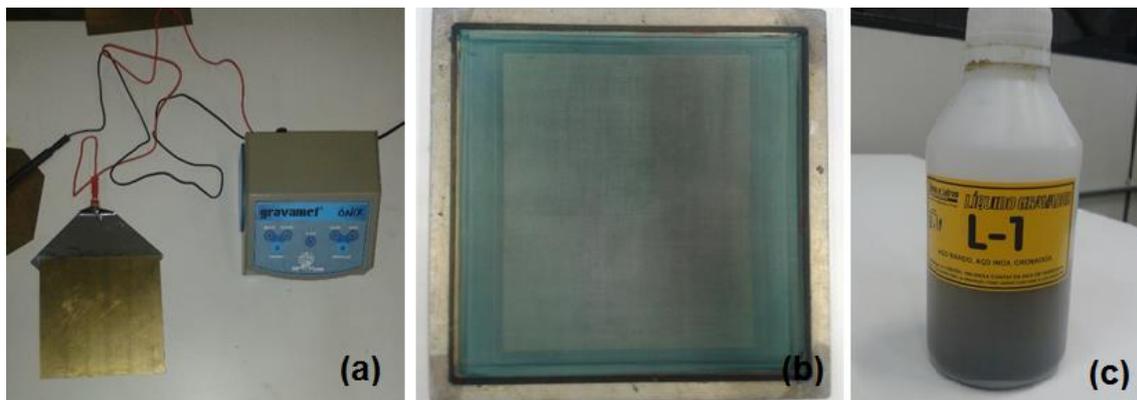


Figura 3.16: a) Gravador de metais; b) Tela de serigrafia; c) Ácido para latão.

### 3.5 Escolha da máquina-ferramenta

É comum em ISF o uso de máquinas-ferramentas com comando CNC. Estas máquinas dividem-se em fresadoras e centros de usinagem (fresadoras com estoque e troca automática de ferramentas). Em estampagem incremental estas máquinas normalmente possuem conectadas a elas, cabos que transmitem programas elaborados por softwares CAD/CAM. A razão do modelamento da superfície da peça via um software CAD é devido à complexidade de um desenho em 3 dimensões (CAVALER, 2010).

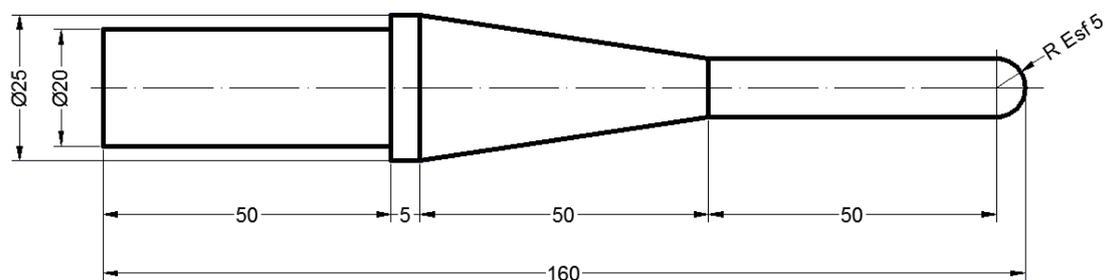
Para os experimentos preliminares, foi definido o centro de usinagem modelo D 600, demonstrado na figura 3.17 e fabricado pela empresa Romi.



*Figura 3.17: Centro de usinagem modelo D 600.*

### 3.6 Escolha da ferramenta

Nos experimentos preliminares, foi usado uma ferramenta de estampar com ponta semiesférica com raio  $R_f$  de 5 mm, feita de aço 4340 sem revestimento algum, montada em um mandril porta-pinça. As ferramentas de estampagem incremental diferem das ferramentas de usinagem convencionais por não possuírem arestas de corte. A Figura 3.18 mostra o desenho técnico da ferramenta utilizada e a Figura 3.19, a montagem da ferramenta no mandril.



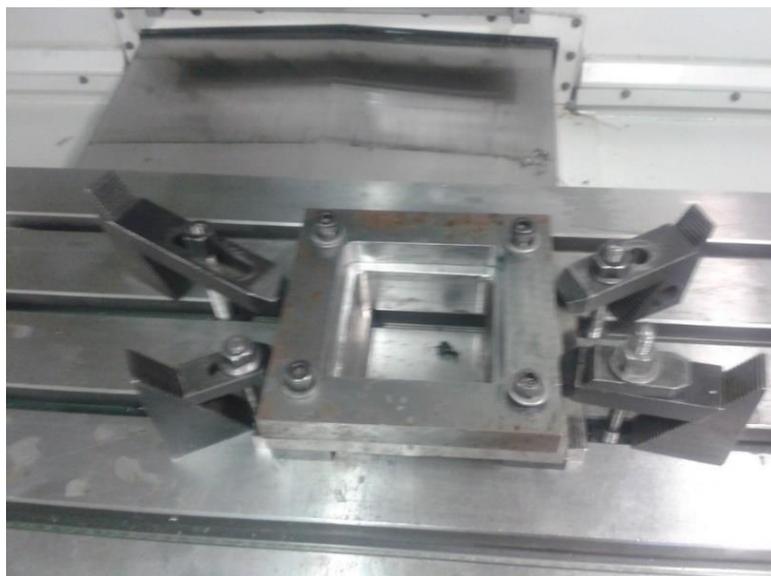
*Figura 3.18: Desenho Projetivo da Ferramenta de Estampar.*



*Figura 3.19: Montagem no mandril porta-pinça.*

### **3.7 Montagem do dispositivo de estampagem (prensa-chapas).**

Para a execução da estampagem, o dispositivo demonstrado na Figura 3.20, também chamado de prensa-chapas, é montado. Ele é de fixação manual e possui uma base fixa para prender sobre a mesa da máquina CNC. Uma chapa sobreposta (mordente) é utilizada para fixar a chapa de latão com parafusos. Todo este dispositivo vai preso sobre a mesa de centro de usinagem CNC.



*Figura 3.20: Dispositivo de estampagem (prensa-chapas) montado.*

### 3.8 Determinação das estratégias de usinagem

Para a estratégia de usinagem, foi empregado o *software* EdgeCAM ® como mostrado na Figura 3.21, onde a interface principal é apresentada

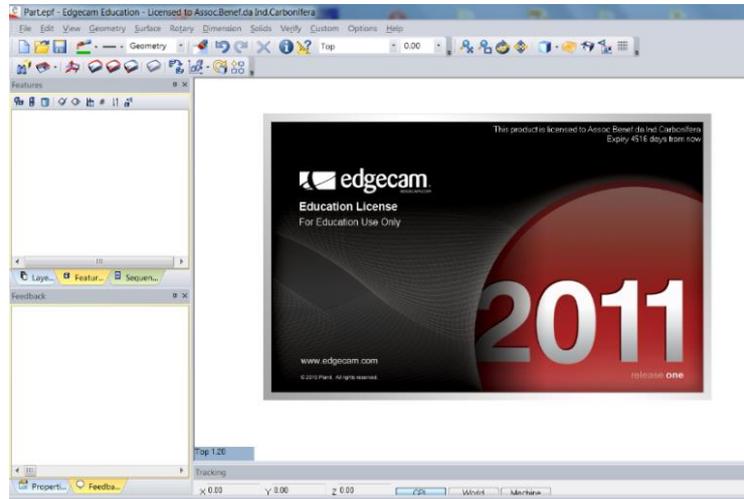


Figura 3.21: Interface do software EdgeCAM. ®

Na programação da estratégia, os parâmetros adotados foram:

Raio da Ferramenta ( $R_T$ )=5,00mm

Passo Vertical ( $\Delta Z$ )=0,50mm

Velocidade de Avanço nos eixos XY ( $V_{th}$ )=1000 mm/min

Velocidade de Mergulho no eixo Z ( $V_z$ )= 300 mm/min

Velocidade de Rotação ( $V_C$ ) = 0 rpm

Estratégia = Helicoidal

Algumas configurações são apresentadas na Figura 3.22

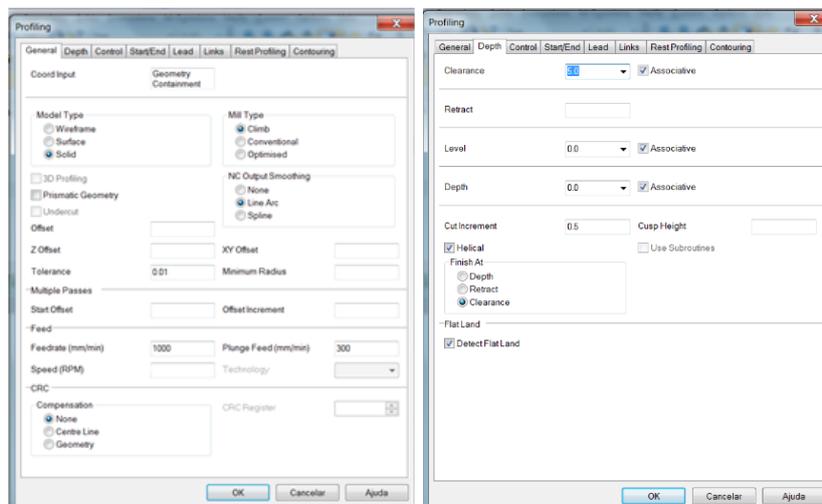


Figura 3.22 - Configuração do software EdgeCAM ®.

Ainda no *software*, a Figura 3.23, mostra a possibilidade de simular a trajetória helicoidal da ferramenta de um dos experimentos.

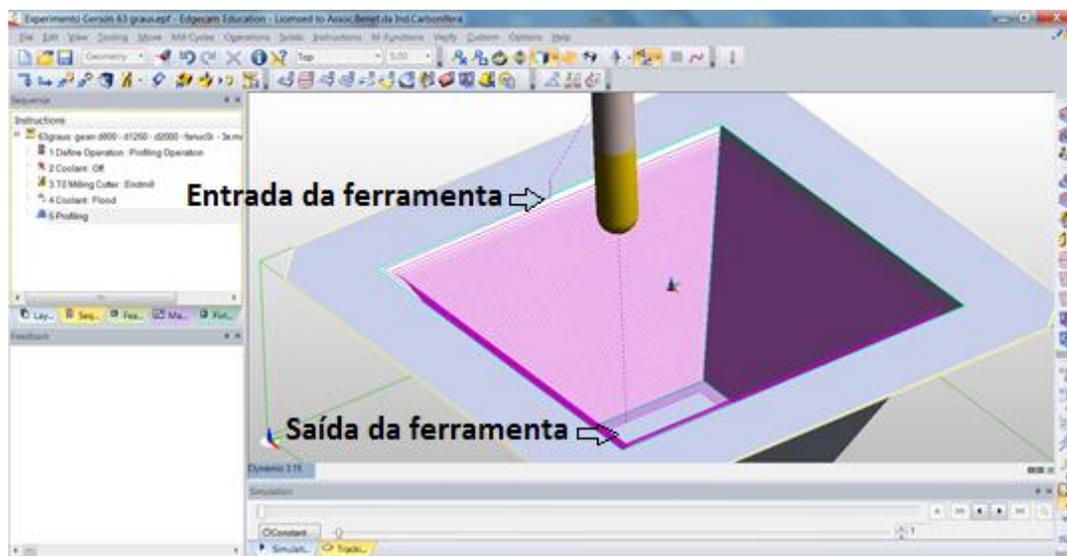


Figura 3.23 – Simulação da trajetória helicoidal.

### 3.9 Escolha do lubrificante

A lubrificação é importante na maioria dos processos de estampagem, bem como na estampagem incremental e exerce papéis fundamentais para:

- Diminuir o atrito;
- Reduzir o aquecimento da peça e da ferramenta;
- Minimizar o desgaste da ferramenta de estampagem;
- Melhorar o acabamento superficial da peça;
- Estabelecer uma minimização da força de trabalho exercida pela ferramenta.

Nos experimentos descritos, a Figura 3.24 mostra a graxa azul UNILIT BLUE, a base de lítio, proporcionando alta performance em variadas gamas de aplicações. De fácil aplicação e boa adesão oferece proteção contra a corrosão e oxidação, é hidro-repelente e tolera temperaturas de até 150°.

- Grau NLGI-2;
- Ponto de gota: 185°C;

- Composição: óleos minerais, sabão de lítio, aditivos anticorrosivos e antioxidantes, agente de adesividade e corantes.



Figura 3.24 : Graxa a base de lítio.

A Figura 3.25 que segue, mostra a chapa (*Blank*) fixada no dispositivo prensa-chapa e a ferramenta devidamente presa no mandril porta-pinça devidamente lubrificada. Também é mostrado o residual de lubrificante logo após o processo de conformação.

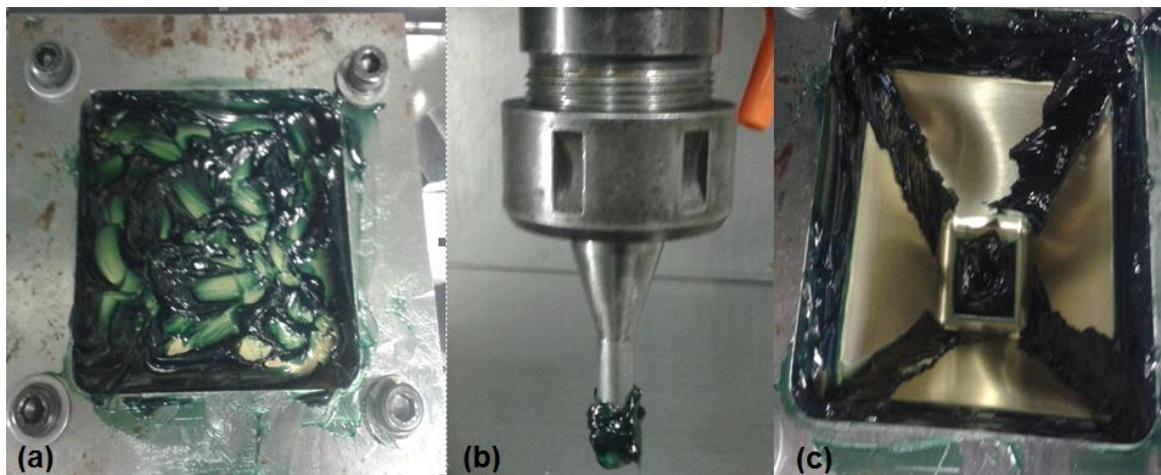


Figura 3.25 : a) Chapa lubrificada; b) Ferramenta lubrificada; c) Residual de lubrificante depois da conformação.

#### 4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Neste capítulo é descrito os procedimentos do experimento de estampagem incremental, o desenvolvimento do suporte para as medições de deformação e a medição dos parâmetros de rugosidades.

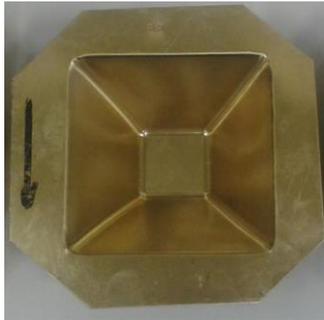
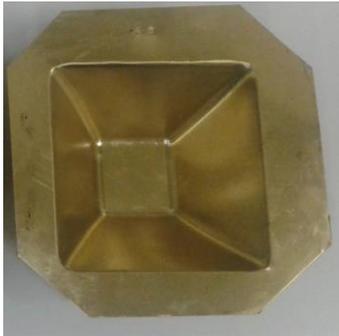
##### 4.1 Execução dos experimentos

Os experimentos preliminares foram feitos com as configurações anteriormente descritas, ou seja, nenhum parâmetro foi alterado. A espessura de 0,50 mm da chapa também foi a mesma para todos os testes.

Os experimentos, indicados na Tabela 4.1, como primeira etapa (**Etapa A**), baseiam-se na modalidade da Estampagem Incremental denominada Estampagem Incremental com Ponto Simples (*SPIF - Single Point Incremental Forming*). A conformação foi realizada com ângulo de parede inicial de 57°, 58°, 59° e 60° (adicionado 1° para cada chapa conformada), até ocorrer o rompimento. Desta forma, foi verificado que o rompimento só aconteceu com o ângulo de parede de 60°. Cinco chapas foram utilizadas pois o último ângulo, 60°, foi repetido, afim de validar o ângulo máximo da conformação para assim, dar sequência aos experimentos.

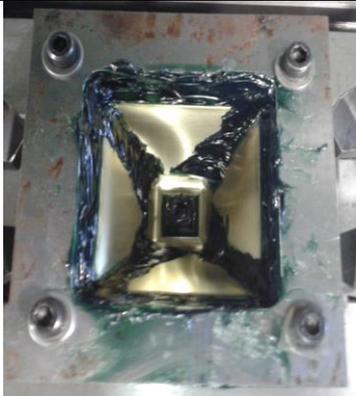
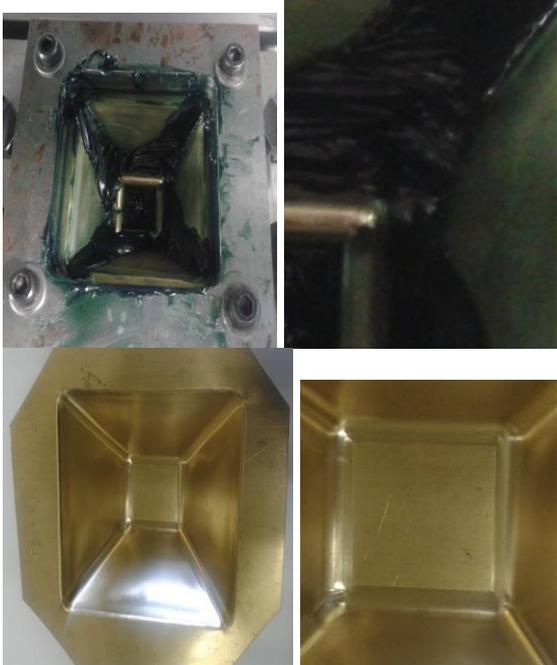
Tabela 4.1: Primeira Etapa (Etapa A)

Testes	Ângulo de Parede ( $\psi$ )	Chapa Conformada	Situação
01A	57°		Sem rompimento

02A	58°		Sem rompimento
03A	59°		Sem rompimento
04A	60°		Rompimento
05A	60°		Rompimento

Na segunda etapa (**Etapa B**), indicado na Tabela 4.2, continuou sendo aplicada a Estampagem Incremental com Ponto Simples (*SPIF - Single Point Incremental Forming*), como início do ISF, partindo do ângulo de parede de 58°. Com esta mesma chapa conformada, foi aplicado novamente SPIF, com a programação CNC feita para 59°. Como sucessivas execuções com variações angulares estão sendo aplicadas na mesma chapa, o processo passa a se chamar Estampagem Incremental de Múltiplos Passes (*MSPIF - Multi Pass Single Point Incremental Forming*).

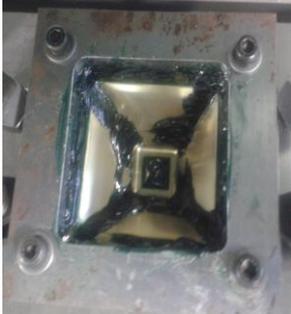
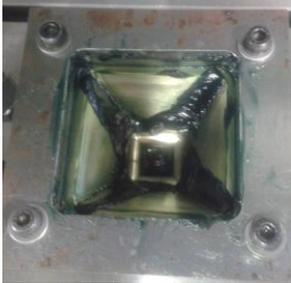
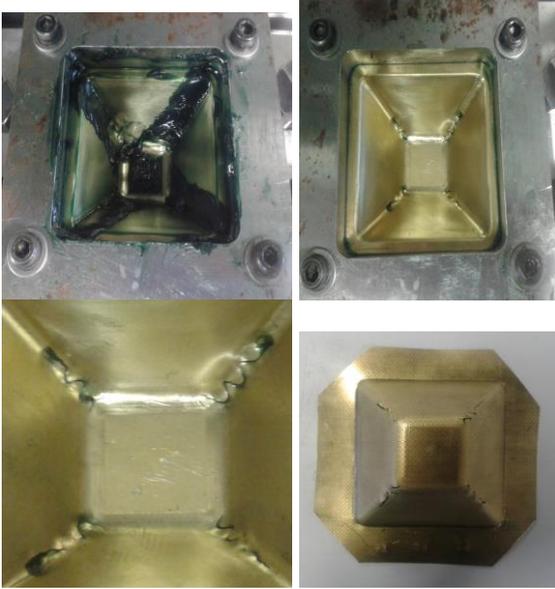
Tabela 4.2: Segunda Etapa (Etapa B)

Testes	Ângulo de Parede ( $\psi$ )	Chapa Conformada	ISF / Situação
01B	58°		<i>SPIF</i> / Sem rompimento
02B	59°		<i>MSPIF</i> / Rompimento

Na terceira etapa (**Etapa C**), indicado na Tabela 4.3, continuou sendo aplicada a Estampagem Incremental com Ponto Simples (*SPIF - Single Point Incremental Forming*),

como início do ISF, partindo do ângulo de parede de  $57^\circ$ . Com esta mesma chapa conformada, foi aplicado novamente SPIF, com a programação CNC feita para  $58^\circ$  e  $59^\circ$ . Como sucessivas execuções com variações angulares estão sendo aplicadas na mesma chapa, o processo passa a se chamar Estampagem Incremental de Múltiplos Passes (*MSPIF - Multi Pass Single Point Incremental Forming*) a partir do ângulo de  $58^\circ$ .

Tabela 4.3: Terceira Etapa ( Etapa C)

Testes	Ângulo de Parede ( $\psi$ )	Chapa Conformada	ISF / Situação
01C	$57^\circ$		<i>SPIF / Sem rompimento</i>
02C	$58^\circ$		<i>MSPIF / Sem rompimento</i>
03C	$59^\circ$		<i>MSPIF / Com rompimento</i>

## 4.2 Medição das deformações verdadeiras

Conforme relatado anteriormente, o método empregado para medir as deformações foi a gravação eletroquímica de uma malha de círculos, com diâmetro inicial de 2,5 mm, na face inferior do corpo de prova. Ao terminar o processo de conformação, ocorre a deformação da malha e os círculos iniciais passaram a ter forma elíptica, onde o eixo com maior deformação (a) corresponde à variação do comprimento e o eixo com menor deformação (b) corresponde à variação da largura. As deformações do comprimento ( $\phi_1$ ) e da largura ( $\phi_2$ ) são calculadas pelas equações (2-10) e (2-11) respectivamente, e a deformação da espessura ( $\phi_3$ ), pela equação (2-12). Para medir a variação da geometria foi desenvolvido um dispositivo para servir como suporte para o microscópio digital para facilitar e validar as escalas das imagens, permitindo a restituição das mesmas. O projeto de corte laser segue representado na Figura 4.1.

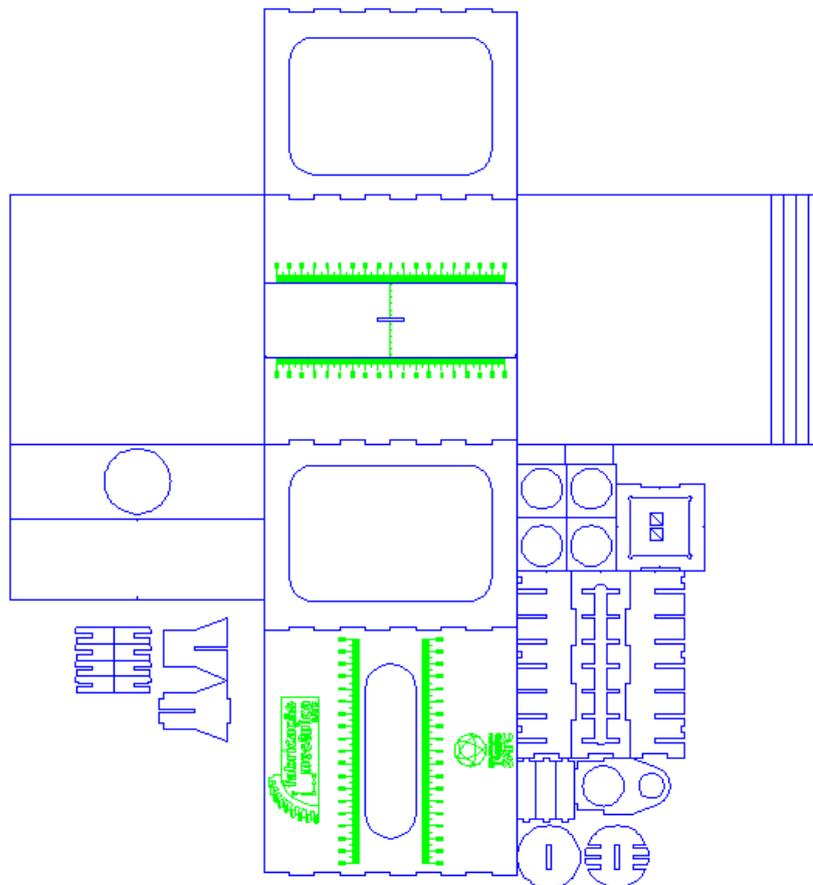
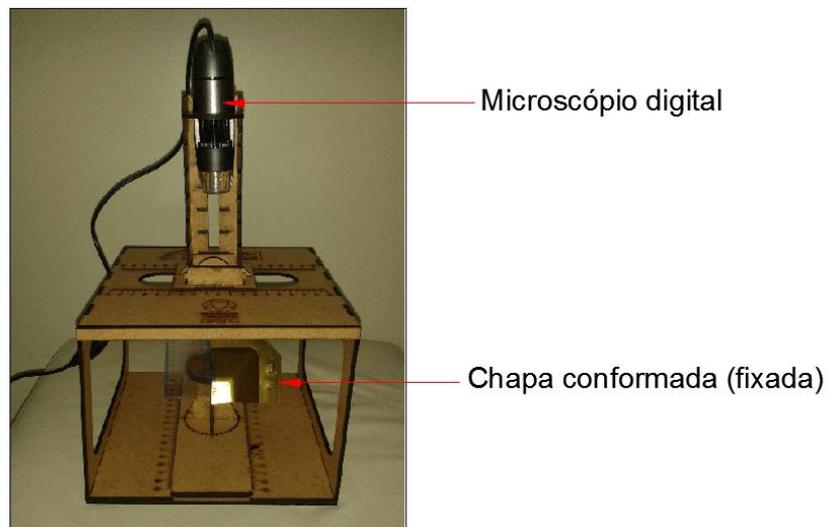


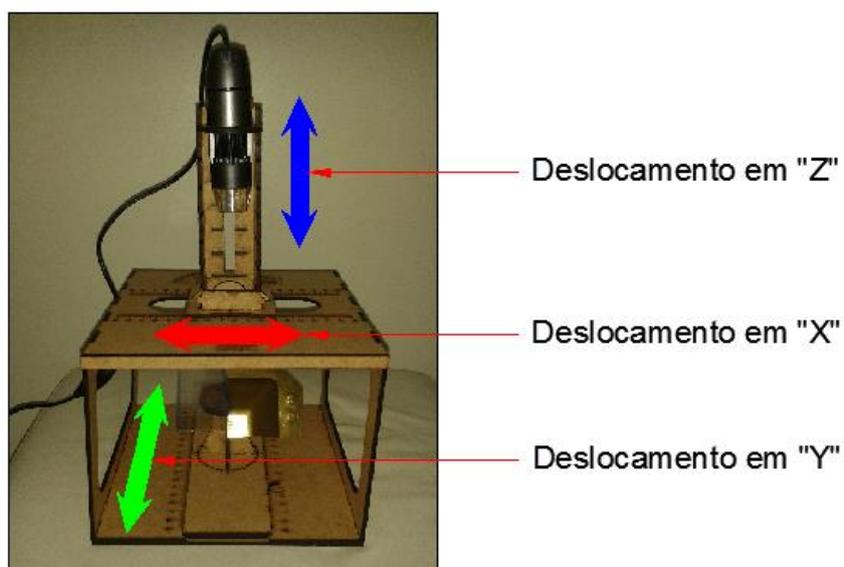
Figura 4.1: Plano de corte do suporte.

O referido dispositivo foi montado conforme segue na Figura 4.2, onde aparece o corpo de prova e o microscópio digital devidamente fixados.



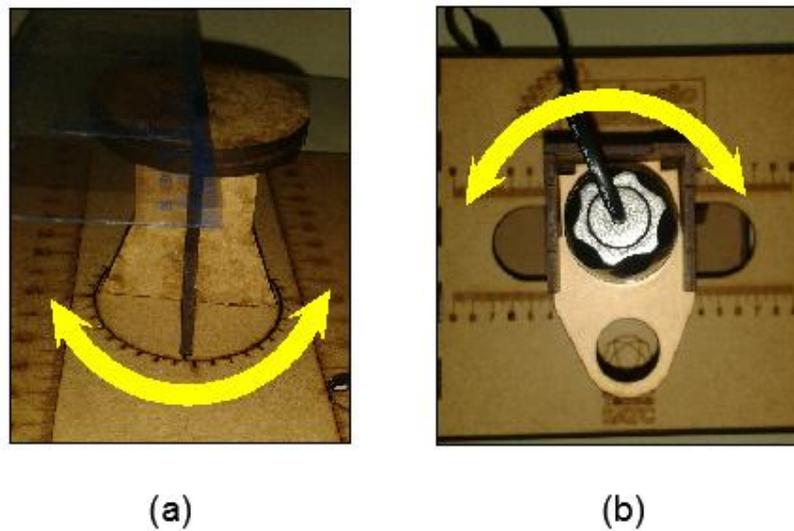
*Figura 4.2: Montagem e fixação do microscópio.*

A fim de facilitar os ajustes e permitir imagens (fotos) com o mesmo referencial, o dispositivo permite deslocamentos lineares e rotativos. Os lineares nos eixos X, Y e Z, são representados na Figura 4.3.



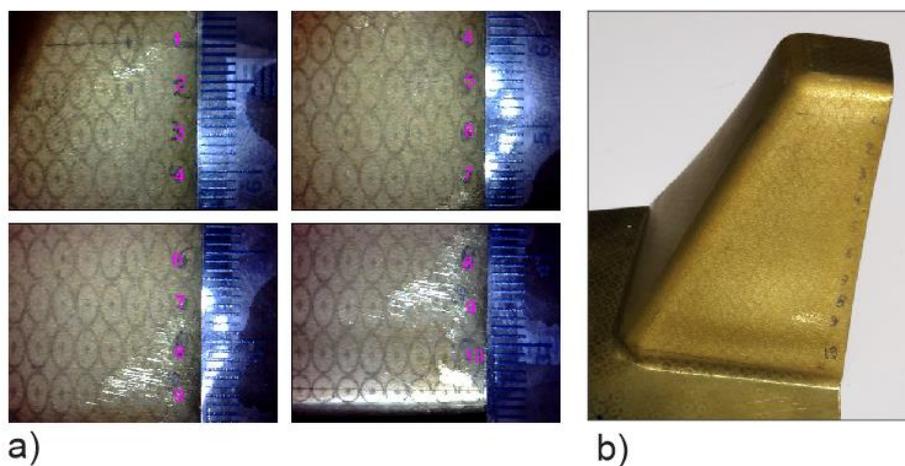
*Figura 4.3: Deslocamentos em três eixos.*

Dois ajustes rotativos são permitidos, um para o suporte de fixação (a) e o outro na própria fixação do microscópio (b). Os ajustes são indicados na Figura 4.4.



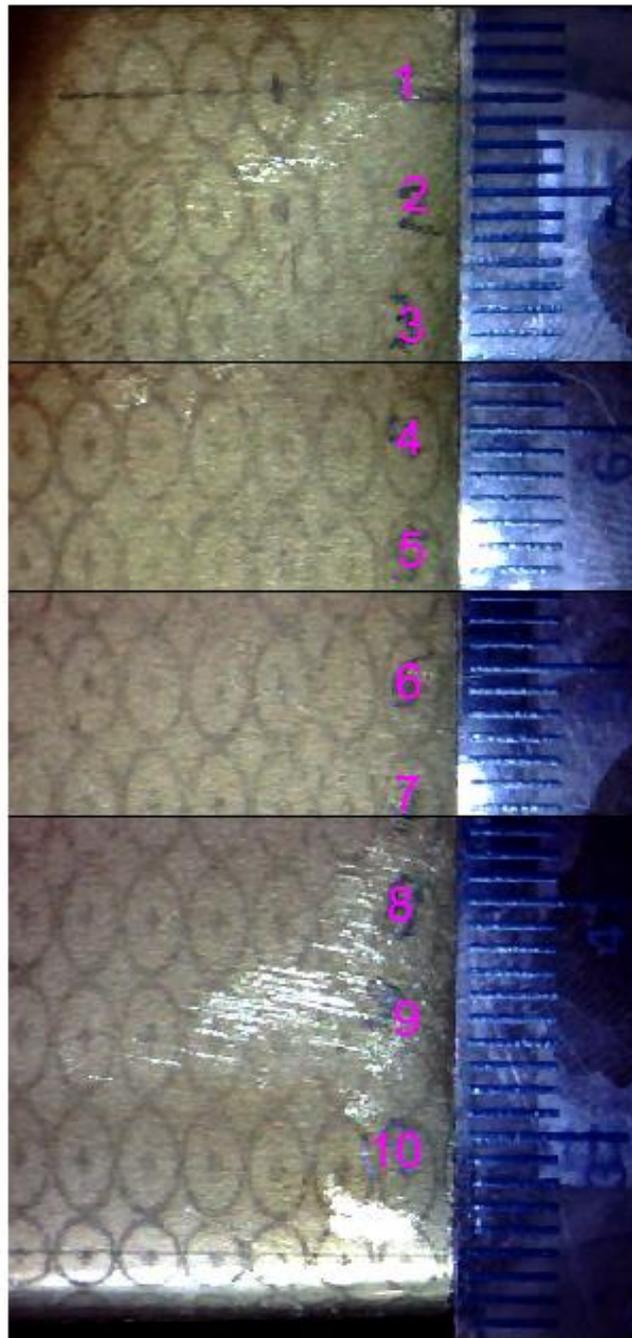
*Figura 4.4: Ajuste rotativo*

Com estas regulagens, todas as chapas fotografadas terão os mesmos parâmetros de altura e alinhamento, tendo igualdade nas resoluções de imagem. A fixação da chapa deverá ser feita de maneira que a mesma fique paralela a lente da câmera do microscópio, evitando deformações e facilitando a restituição das imagens. Para facilitar as relações de montagem das imagens a serem restituídas, fixou-se uma régua graduada junto a chapa. Observa-se na Figura 4.5, que as quatro imagens possuem pontos de referência que podem ser deslocados, formando uma única imagem com as dez marcações a serem medidas. As imagens apresentam resolução de  $640 \times 480 \text{ pixels}$  e a região de medição do corpo de prova.



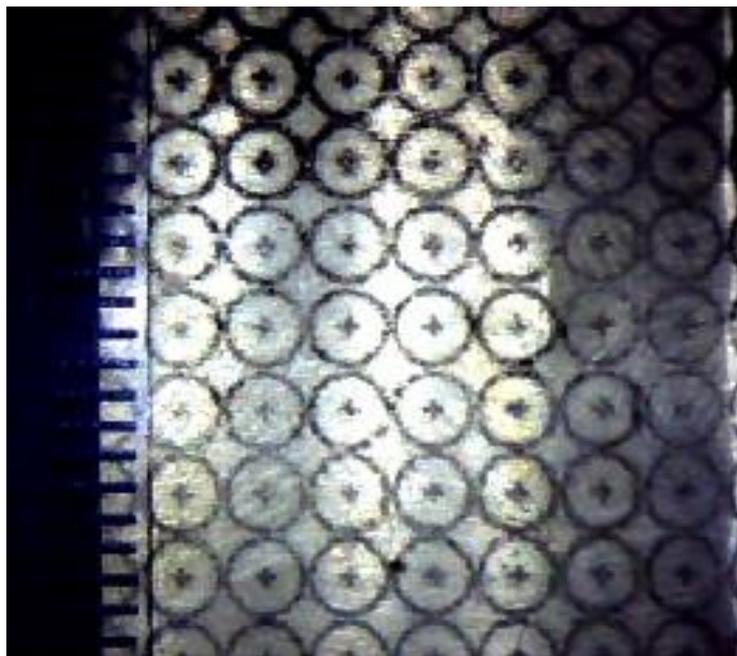
*Figura 4.5: a) Imagens das deformações (640 x 480 pixels) b) Região das medições*

Com base nas quatro imagens, faz-se a restituição como apresentada na Figura 4.6



*Figura 4.6: Imagens alinhadas restituídas.*

Estas montagens foram feitas no software AutoCAD®, assim, foi possível modificar a escala das imagens para a escala natural 1:1. Para a relação, foi necessária uma imagem com as mesmas configurações de altura em uma parte onde não aconteceu deformação. A Figura 4.7 mostra esta imagem.



*Figura 4.7: Círculos alinhados sem deformação.*

Uma vez inseridas as respectivas imagens, verificou-se a medida equivalente a 10 mm apresentada na régua graduada, indicada na Figura 4.8.



*Figura 4.8: Equivalência de medida.*

Ao dividir o valor de 10mm pelo valor da cota de 55,58mm, obtêm-se o fator de escala de 0,1799 que deve ser aplicado com o comando de escala do AutoCAD. Desta maneira, as imagens restituídas e dimensionadas em pixels, passam a ter referência vetorial e o diâmetro que antes era de 13,9 mm com a aplicação da escala, passa a ter 2,5 mm como original. A Figura 4.9 mostra a escala aplicada.

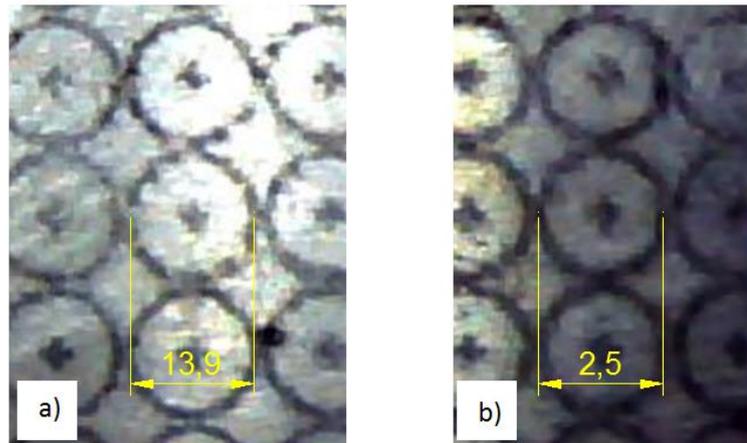


Figura 4.9: a) cota antes da escala - b) depois da escala aplicada.

Depois de realizado o processo de estampagem, avalia-se as deformações desta rede, sendo a elipse apresentado na Figura 4.10, a geometria a ser medida após a estampagem.

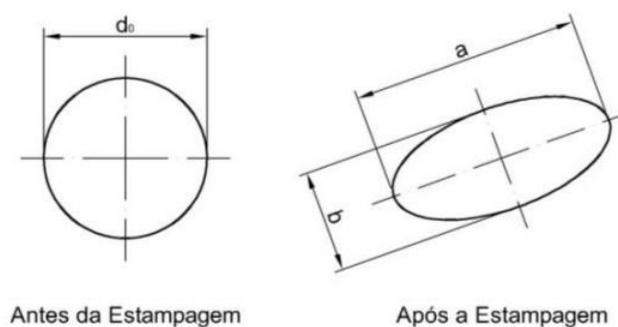


Figura 4.10: Princípio da determinação das deformações. (SCHAEFFER, 2004)

As medições foram feitas com a ferramenta cotagem do AutoCAD®. O experimento analisado foi da chapa estampada por Ponto Simples (*SPIF - Single Point Incremental Forming*), como início do ISF, partindo do ângulo de parede ( $\psi$ ) de  $58^\circ$ . Com esta mesma chapa conformada, foi aplicado novamente SPIF, com a programação CNC feita para ângulo de parede ( $\psi$ )  $59^\circ$ . Como sucessivas execuções com variações angulares estão sendo aplicadas na mesma chapa, o processo passa a se chamar Estampagem Incremental de Múltiplos Passes (*MSPIF - Multi Pass Single Point Incremental Forming*). A Figura 4.11 mostra parte da imagem restituída com as cotas que correspondem à direção longitudinal de laminação ( $0^\circ$ ) e direção transversal de laminação ( $90^\circ$ ).

Além das deformações ( $\phi_1$  e  $\phi_2$ ) medidas de cada elipse, também foi medida a distância ( $d'$ ) correspondente ao centro das mesmas.

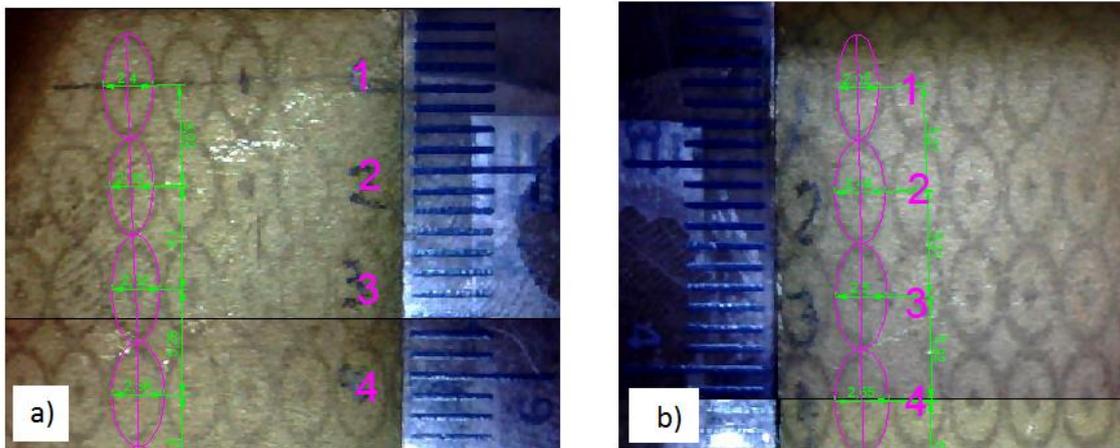


Figura 4.11 - a) Cotas (a) e (b) para cálculo de ( $\phi_1$  e  $\phi_2$ ) e distancia ( $d'$ ) para ângulo de parede ( $\psi$ ) de  $58^\circ/59^\circ$  direção longitudinal de laminação ( $0^\circ$ ); b) Cotas (a) e (b) para cálculo de ( $\phi_1$  e  $\phi_2$ ) e distancia ( $d'$ ) para ângulo de parede ( $\psi$ ) de  $58^\circ/59^\circ$  direção transversal de laminação ( $90^\circ$ ).

Os valores de deformação verdadeira ( $\phi_1$ ,  $\phi_2$  e  $\phi_3$ ) são calculados e mostrados na Tabela 4.4, correspondem à direção longitudinal de laminação ( $0^\circ$ ), e na tabela 4.5 a direção transversal de laminação ( $90^\circ$ ).

Tabela 4.4: Direção longitudinal de laminação ( $0^\circ$ ),

58/ 59° direção longitudinal de laminação ( $0^\circ$ )						
PONTO	dist	a	b	$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_3$
1	0	5,2	2,4	0,73	-0,04	-0,69
2	5,02	4,84	2,12	0,66	-0,16	-0,50
3	10,125	5,37	2,32	0,76	-0,07	-0,69
4	15,385	5,15	2,56	0,72	0,02	-0,75
5	20,59	5,26	2,59	0,74	0,04	-0,78
6	25,76	5,08	2,9	0,71	0,15	-0,86
7	30,825	5,05	2,67	0,70	0,07	-0,77
8	35,935	5,17	2,8	0,73	0,11	-0,84
9	41,18	5,32	2,53	0,76	0,01	-0,77
10	46,34	5	2,53	0,69	0,01	-0,71

Tabela 4.5: Direção transversal de laminação (90°).

58/ 59° direção transversal de laminação (90°)						
PONTO	dist	a	b	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$
1	0	5,28	2,02	0,75	-0,21	-0,53
2	5,21	5,14	2,46	0,72	-0,02	-0,70
3	10,42	5,28	2,5	0,75	0,00	-0,75
4	15,635	5,15	2,65	0,72	0,06	-0,78
5	20,825	5,23	2,4	0,74	-0,04	-0,70
6	26,08	5,28	2,23	0,75	-0,11	-0,63
7	31,265	5,09	2,31	0,71	-0,08	-0,63
8	36,515	5,41	2,46	0,77	-0,02	-0,76
9	41,87	5,3	2,48	0,75	-0,01	-0,74
10	47,27	5,5	2,41	0,79	-0,04	-0,75

O gráfico representado na figura 4.12, corresponde aos dados plotados obtidos na Tabela 4.4.

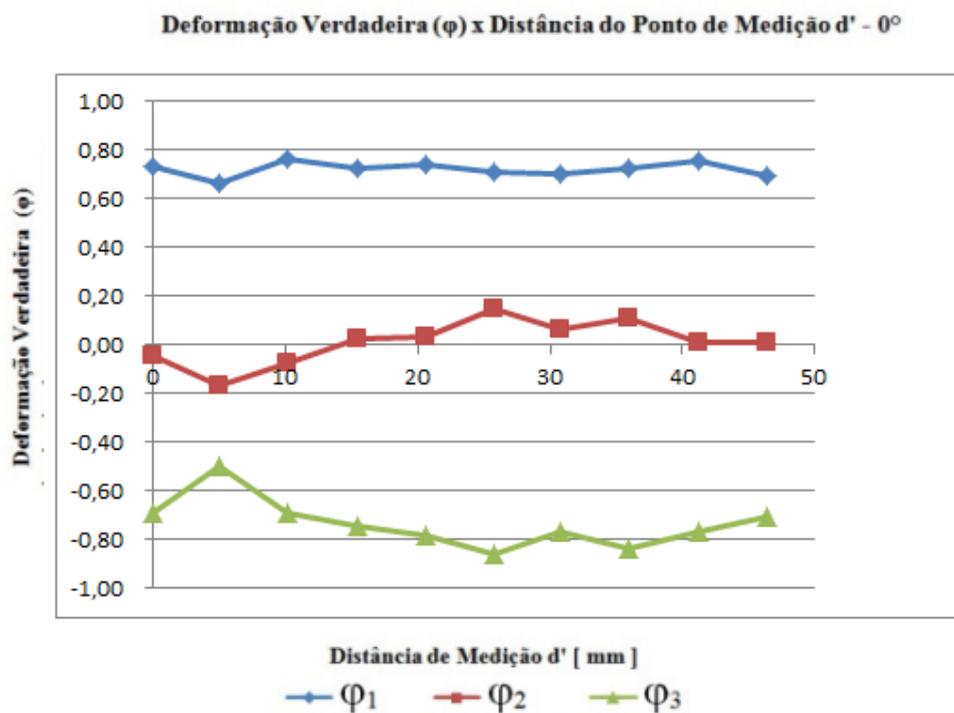


Figura 4.12: Deformação verdadeira ( $\varphi$ ) x Distância do ponto de partida  $d'$  a 0° em relação a direção de laminação. ( $\psi$ : 58°/59°)

O gráfico representado na Figura 4.13, corresponde aos dados plotados obtidos na Tabela 4.5.

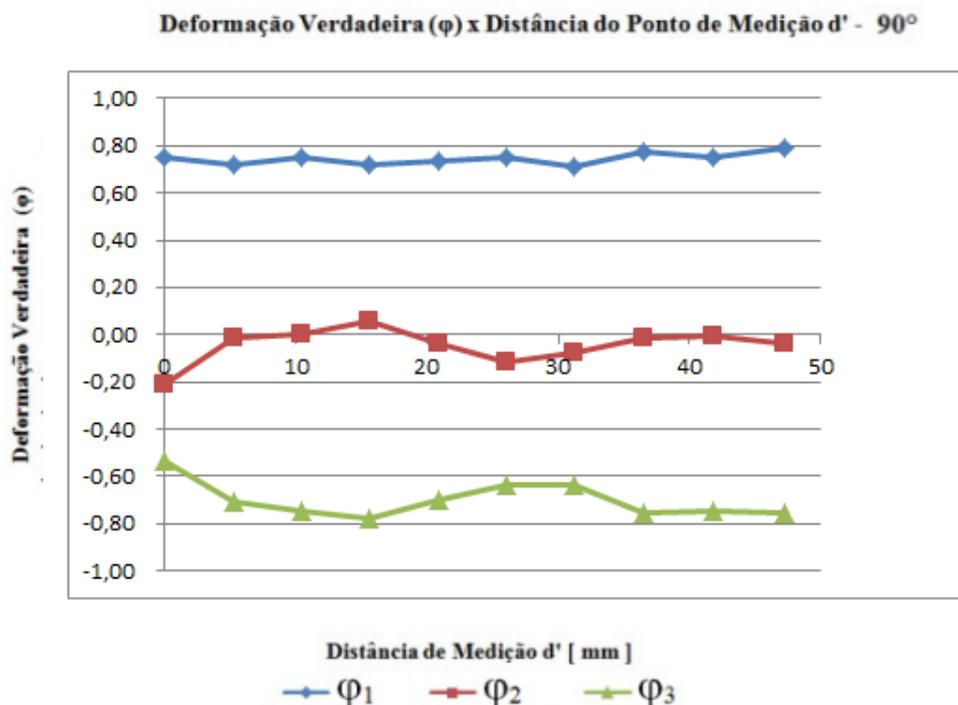


Figura 4.13: Deformação verdadeira ( $\phi$ ) x Distância do ponto de partida  $d'$  a  $90^\circ$  em relação a direção de laminação. ( $\psi$ :  $58^\circ/59^\circ$ )

Como continuidade do processo de medição, foi realizado nos mesmos pontos as medições de espessura, gerando o gráfico da Figura 4.14 que mostra as variações das espessuras dentro dos parâmetros da espessura inicial e pela lei do seno calculada.

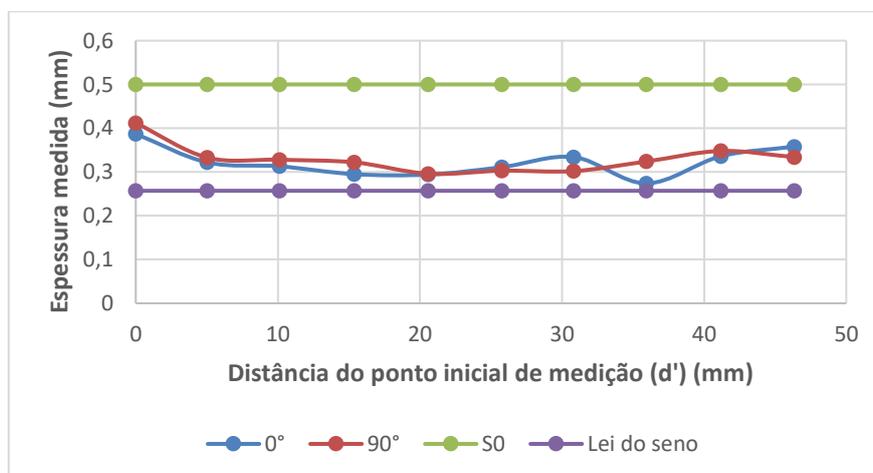


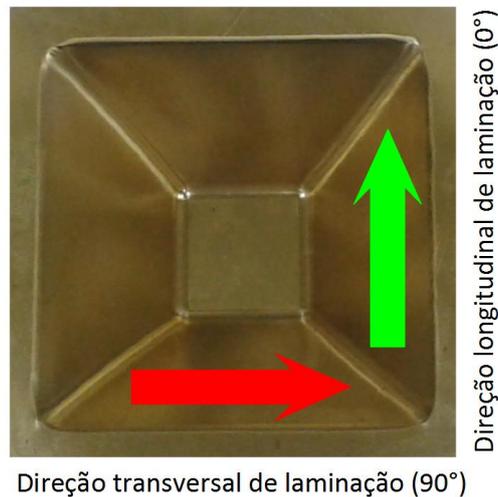
Figura 4.14: Redução de espessura para o experimento da Etapa C ( $\psi$ :  $58^\circ/59^\circ$ )

### 4.3 Medições das rugosidades

No presente trabalho, foi verificado o acabamento superficial na superfície em que ocorreu a estampagem, no lado que estava em contato com a ferramenta, através de medição de rugosidade. As medições foram feitas nos experimentos nas três etapas descritas na análise experimental (Etapa A B e C), ressaltando que os parâmetros da estampagem continuaram os mesmos: lubrificante, passo vertical, estratégia helicoidal, velocidade de avanço, velocidade de mergulho e velocidade de rotação da ferramenta.

O equipamento de medição utilizado foi o Rugosímetro portátil SJ-310 da marca *Mitutoyo*.

A Figura 4.15 indica a direção de laminação de um dos experimentos após o processo de estampagem.



*Figura 4.15 : Direção da laminação com a chapa conformada.*

Todas as medições foram feitas com a mesma configuração do equipamento descrito, a Figura 4.16 mostra um dos processos de medição.



*Figura 4.16: Medição da rugosidade da amostra.*

Os ângulos de parede ( $\psi$ ) tiveram variações, conforme indicados na Tabela 4.1, da dissertação, ou seja, Etapa A com SPIF, Etapa B e Etapa C com MSPIF

A Figura 4.17 apresenta o comparativo da rugosidade Ra na direção longitudinal e transversal das amostras. Observa-se que os valores de rugosidade Ra são maiores para a estampagem MSPIF 58°/59° (Etapa B) e que os valores MSPIF 57°/58° e 59° (Etapa C), chegam próximo dos apresentados com as amostras em SPIF 57°, 58°, 59° e 60° (Etapa A). É comprovado também a diferença desses valores por conta da direção de laminação.

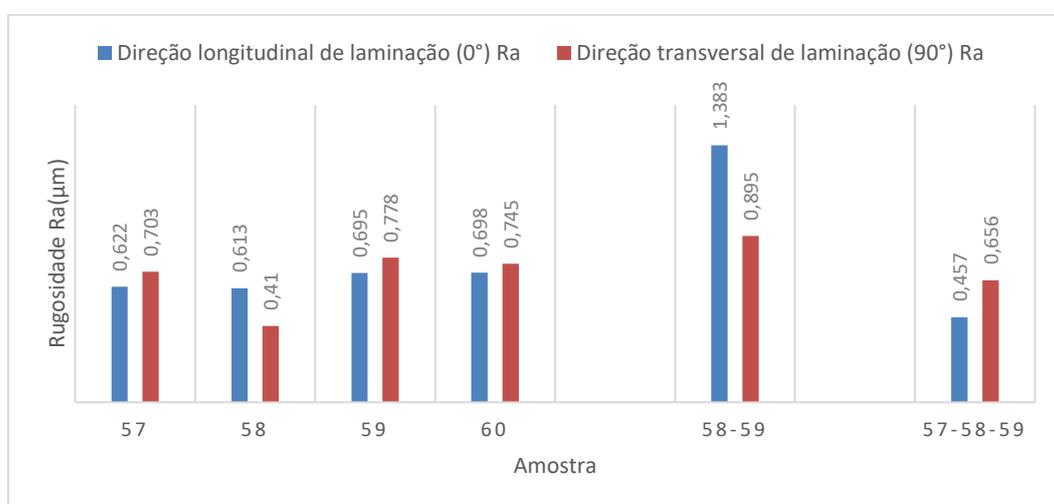


Figura 4.17: Rugosidades Ra nas duas direções de laminação

A Figura 4.18 apresenta o comparativo da rugosidade Rz na direção longitudinal e transversal das amostras, seguindo as mesmas considerações dos grupos de amostragens descritos na figura anterior.

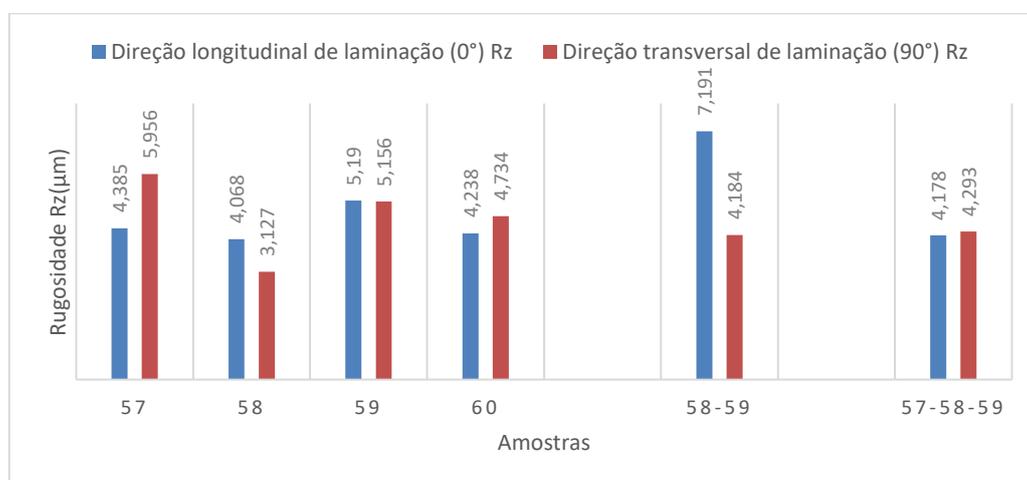


Figura 4.18: Rugosidades Rz nas duas direções de laminação

A Figura 4.19 apresenta o comparativo da rugosidade  $R_z$  na direção longitudinal e transversal das amostras. Os comparativos de variação também são os mesmos dispostos no descritivo da Figura 4.17.

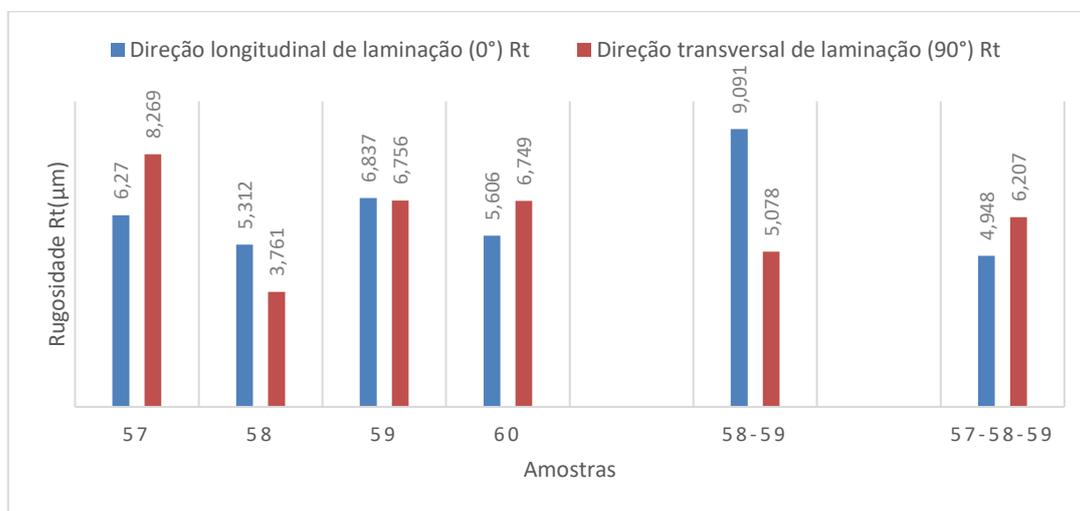


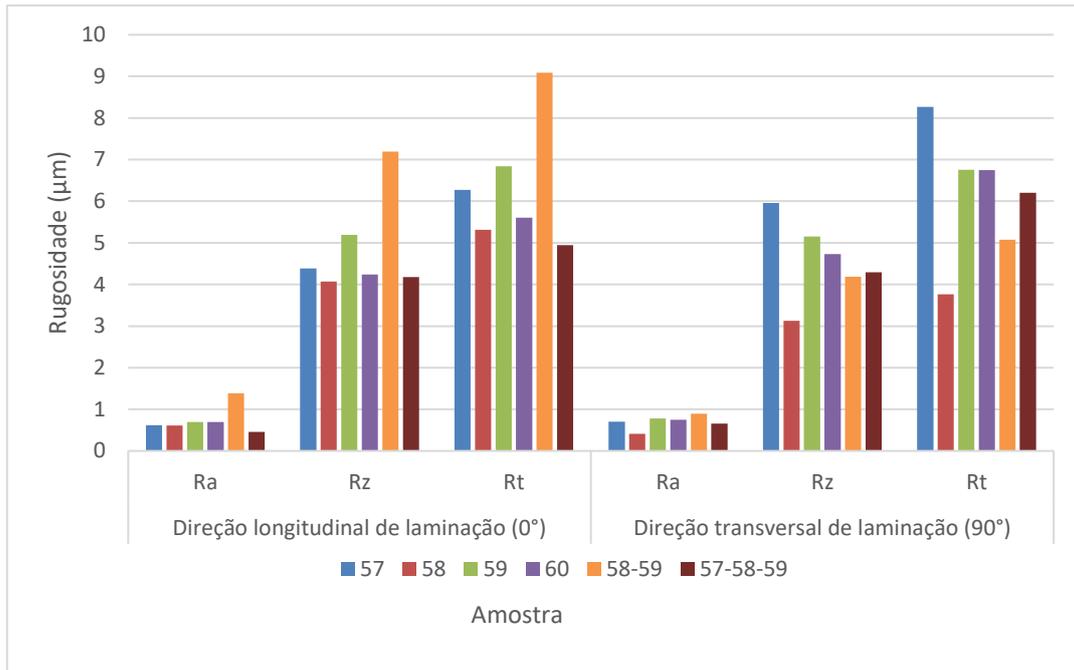
Figura 4.19: Rugosidades  $R_t$  nas duas direções de laminação

A Tabela 4.6 que segue, mostra os valores numéricos gerais obtidos em cada modelo .

Tabela 4.6: Relação das rugosidades medidas

	Ângulo de parede ( $\psi$ )	Direção longitudinal de laminação (0°)			Direção transversal de laminação (90°)		
		Ra( $\mu\text{m}$ )	Rz( $\mu\text{m}$ )	Rt( $\mu\text{m}$ )	Ra( $\mu\text{m}$ )	Rz( $\mu\text{m}$ )	Rt( $\mu\text{m}$ )
<b>ETAPA A (SPIF)</b>	57°	0,622	4,385	6,27	0,703	5,956	8,269
	58°	0,613	4,068	5,312	0,41	3,127	3,761
	59°	0,695	5,19	6,837	0,778	5,156	6,756
	60°	0,698	4,238	5,606	0,745	4,734	6,749
<b>ETAPA B (MSPIF)</b>	58°/59°	1,383	7,191	9,091	0,895	4,184	5,078
<b>ETAPA C (MSPIF)</b>	57°/58°/59°	0,457	4,178	4,948	0,656	4,293	6,207

Como comparativo total, o gráfico indicado na Figura 4.20, mostra de uma maneira geral a tabela anteriormente citada, podendo assim, comparar cada medição feita nas amostras.



*Figura 4.20: Rugosidades Ra, Rz e Rt*

## 5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

A estampagem incremental oferece soluções rápidas e econômicas na produção de pequenos lotes de peças principalmente em peças únicas para uma possível substituição. Por este processo de conformação, pode-se conseguir deformações maiores que os conseguidos com o mesmo modelo em conformação numa prensa.

Conforme indicado na Figura 5.1, o ângulo máximo obtido por Estampagem Incremental de Múltiplos Passes (*MSPIF - Multi Pass Single Point Incremental Forming*) para o latão C268 chegou a 59° para as etapas B e C, indiferente do ângulo inicial do processo obtido por SPIF, 58° e 57° respectivamente. Para os parâmetros adotados nestes experimentos, obtém-se um maior ângulo de parede por Estampagem Incremental com Ponto Simples (*SPIF - Single Point Incremental Forming*) de 59°, conforme indicado na etapa A.

		(Ψ) Ângulo de parede			
		57°	58°	59°	60°
ISF	SPIF	ETAPA A	ETAPA A	ETAPA A	ETAPA A
	MSPIF		ETAPA B	ETAPA B	
	MSPIF	ETAPA C	ETAPA C	ETAPA C	

LEGENDA

- ISF sem rompimento
- Rompimento do ISF

Figura 5.1: Quadro comparativo do experimento.

A utilização dos softwares de CAD/CAM juntamente com a máquina ferramenta CNC demonstrou uma boa aplicabilidade para o protótipo proposto em chapa de latão C-268 com espessura de 0,5mm, para o processo de estampagem incremental de chapas MSPIF porém com um ângulo de parede menor do que a modalidade SPIF.

Por se tratar de dois tipos de latão, o Latão 70/30 abordado por (FRITZEN,2012) é apresentado um comparativo com o latão C268 relatado neste trabalho. Os gráficos foram gerados a partir das tabelas 2.8 e 2.9 para o latão 70/30 e as tabelas 2.11 e 2.12 para o latão C268, seguem os comparativos:

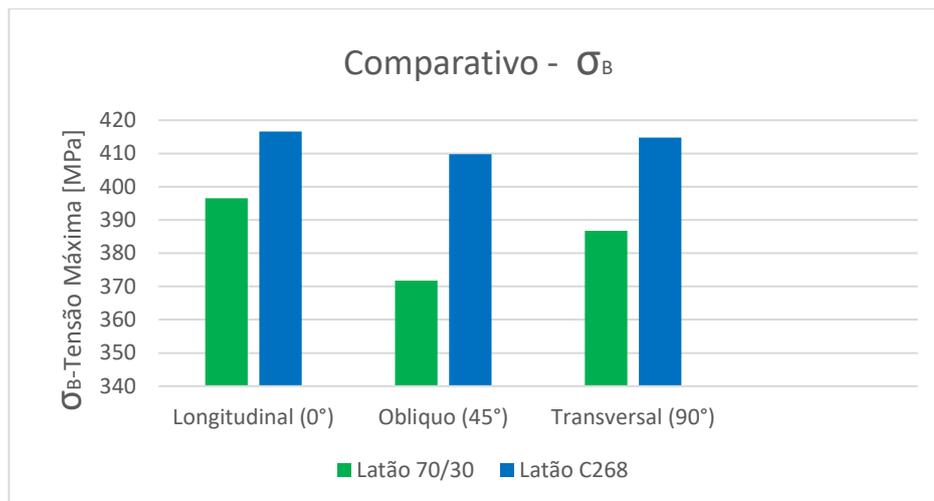


Figura 5.2 : Tensão Máxima para o latão 70/30 e latão C-268

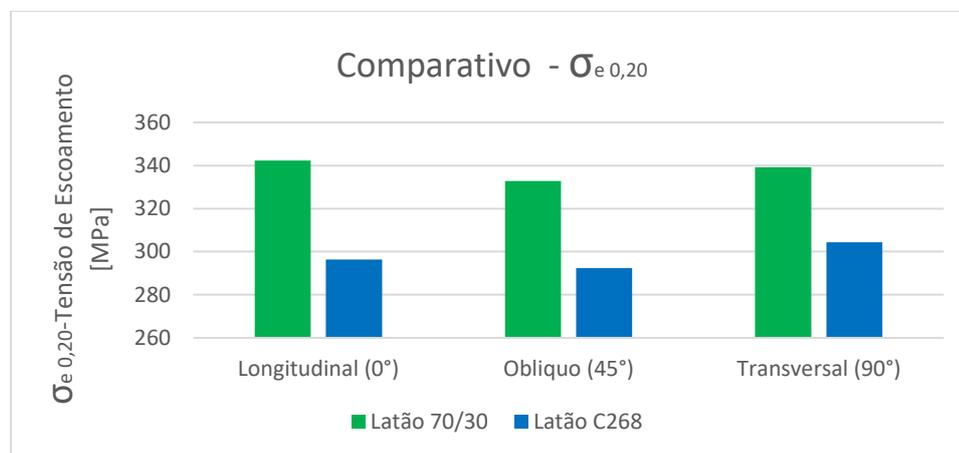


Figura 5.3 : Tensão de escoamento para o latão 70/30 e latão C-268

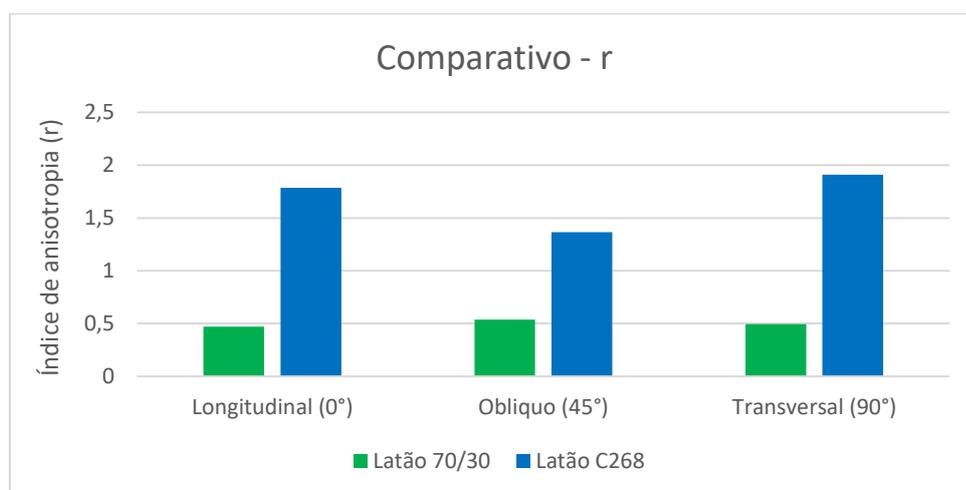


Figura 5.4 : Índice de anisotropia para o latão 70/30 e latão C-268

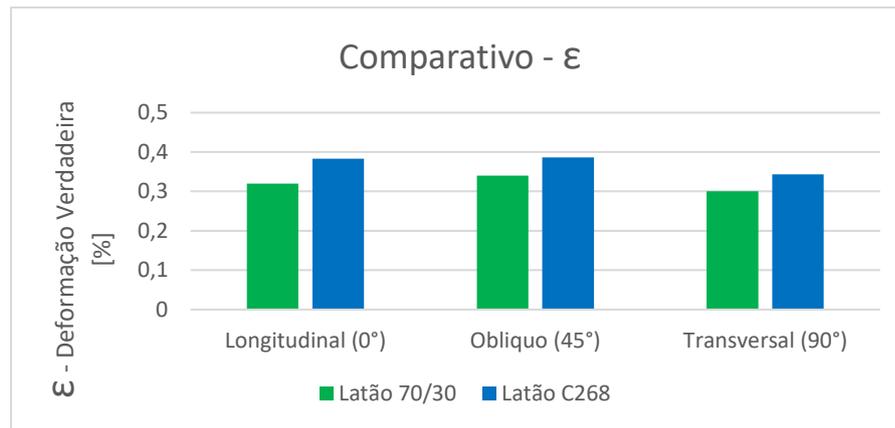


Figura 5.5 : Deformação verdadeira para o latão 70/30 e latão C-268

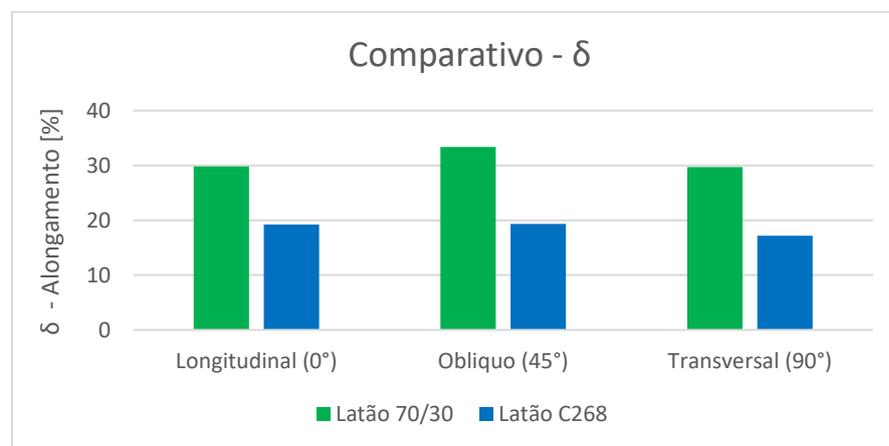


Figura 5.6 : Alongamento para o latão 70/30 e latão C-268

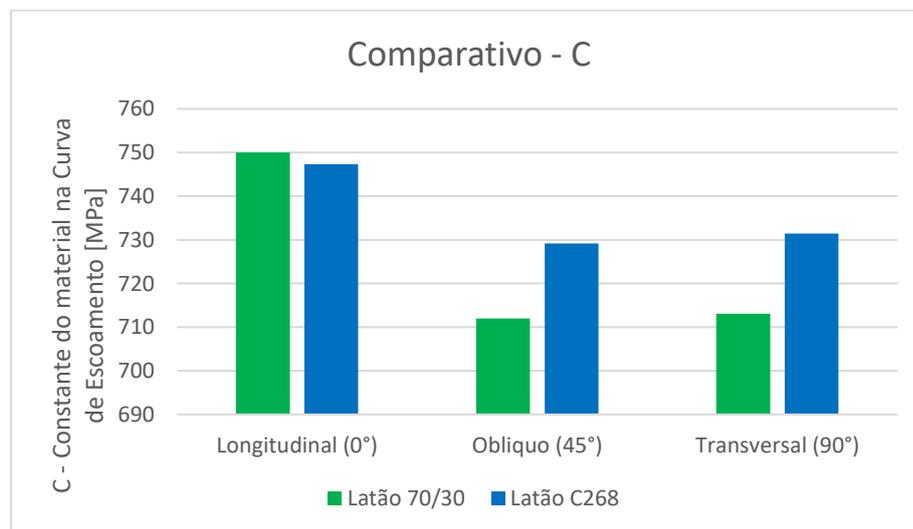


Figura 5.7 : Constante do material na curva de escoamento para o latão 70/30 e latão C-268

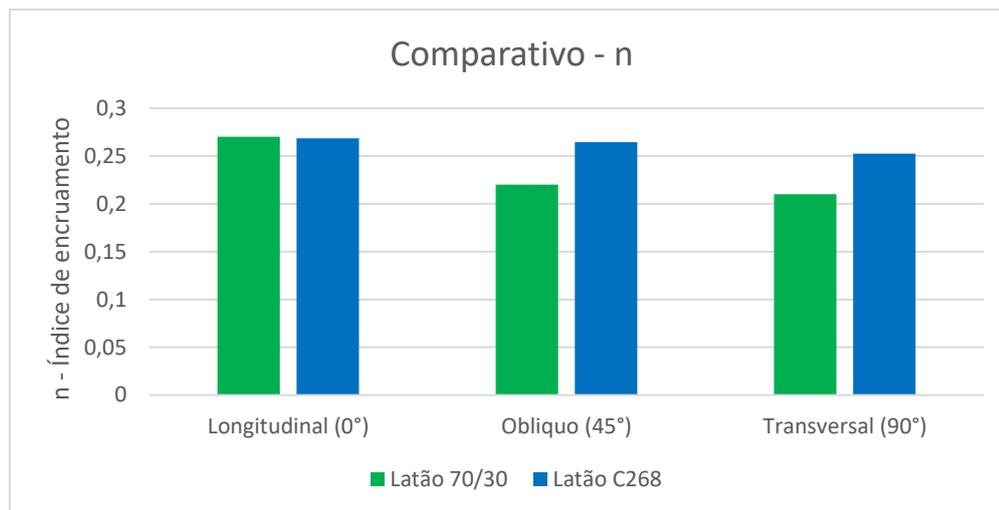


Figura 5.8 : Índice de encruamento para o latão 70/30 e latão C-268

As curvas de escoamento e suas respectivas linearizações foram obtidas com os ensaios realizados. Com essas linearizações, obtiveram-se as equações das retas para cada corpo de prova e, conseqüentemente os valores da constante do material na curva de escoamento (C) e índice de encruamento (n).

A média dos valores de (C) e (n) que foram encontrados determinam como sendo os valores para as duas chapas de latão comparadas, dentro das condições de ensaio de cada uma delas. Com estes valores, foi possível descrever matematicamente a curva de escoamento do material que no qual foi realizado o ensaio, descrevendo o comportamento plástico, facilitando a previsão de sua tensão de escoamento para qualquer nível de deformação. A Tabela 5.1 mostra as equações médias para cada material e a Figura 5.9 a plotagem dessas equações definidas.

Tabela 5.1: Equações de resistência ao escoamento para o latão 70/30 e latão C-268

Sentido de laminação	Latão 70/30	Latão C268
Longitudinal (0°)	$k_f = 750,02 * \varphi^{0,281}$	$k_f = 747,31 * \varphi^{0,2685}$
Obliquo (45°)	$k_f = 711,96 * \varphi^{0,291}$	$k_f = 729,19 * \varphi^{0,2645}$
Transversal (90°)	$k_f = 713,07 * \varphi^{0,261}$	$k_f = 731,42 * \varphi^{0,2523}$
<b>MÉDIA</b>	$k_f = 725,02 * \varphi^{0,233}$	$k_f = 735,97 * \varphi^{0,2618}$

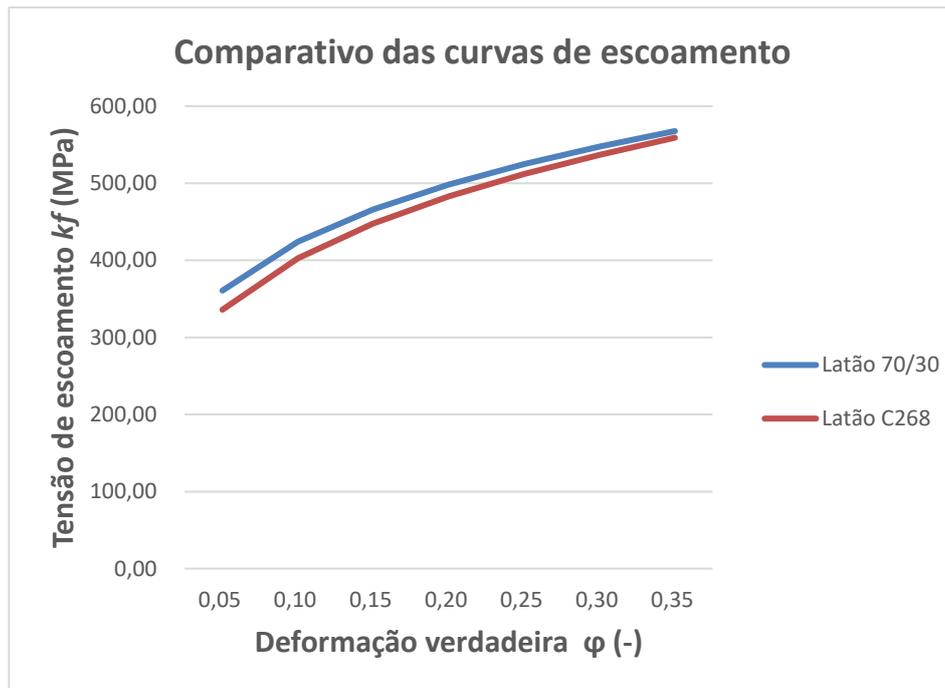


Figura 5.9 : Plotagem das equações de resistência ao escoamento para o latão 70/30 e latão C-

268

As análises das deformações feitas nos experimentos demonstram uma deformação planar ( $\phi_2 \approx 0$ ) nos sentidos de laminação longitudinal ( $0^\circ$ ) e transversal ( $90^\circ$ ), o aumento no comprimento é praticamente compensado com a redução da espessura, desde que a largura mantém-se praticamente constante (lei da constância de volume).

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT/NBR – 6152. **Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro. 2002.

ACESITA S.A. **Cadernos da Assistência Técnica**. Caderno 02. Julho, 2004.

ALLWOOD, J. M. *et al.* **A novel method for the rapid production of inexpensive dies and moulds with surfaces made by incremental sheet forming**. Proc. IMechE Part B: J. Engineering Manufacture, 220 (2): p. 323-327, 2006.

ASM (AMERICAN SOCIETY FOR METALS), **Metals Handbook. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, v.2, ed. 10, Ohio, Metals Park, 1990.

BERTOL, L.S. **Potentialities of the use of incremental forming in Computer Aided Design and manufacture of customized craniofacial implants**. UFRGS. Porto Alegre. 2010. Tese de Doutorado

CALLISTER JR, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução**. 5<sup>a</sup> Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro, 2002.

CASTELAN, J. **Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano**. UFRGS. Porto Alegre. 2010. Tese de Doutorado.

CASTELAN, J. **Utilização das tecnologias cad/cam para estampagem incremental do alumínio série 1000**. UFRGS. Porto Alegre, 2007. Dissertação de mestrado.

CASTELAN, J., *et al.* **Desenvolvimento de produtos personalizados através de estampagem incremental para aplicações na medicina ortopédica**. Ferramental. Curitiba, v. 24, p. 15-21, 2009.

CDA (Copper Development Association), **Microstructures of Copper Alloys**, Disponível <: <http://www.copper.org/resources/properties/microstructure/brasses.html>> Acessado em 20 de agosto de 2013.

CAVALER, L.D.C. **Parâmetros de conformação para estampagem incremental de chapas de aço inoxidável AISI 304**. UFRGS, Porto Alegre,2010. Dissertação de Doutorado.

COSTA, A.R. **Análise da Estampagem de Chapas Metálicas Utilizando Elementos Finitos**. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista, 2003. Dissertação de Mestrado.

DALEFE, A. **Estudo do processo de estampagem incremental em chapas de alumínio puro**. UFRGS, Porto Alegre,2008. Dissertação de mestrado

DONGKAI, X., MALHOTRA, R., NALLAGUNDLA, V.R., CAO, J. **Analytical prediction of stepped feature generation in multi-pass single point incremental forming**. Journal of Manufacturing Processes 14 ,p. 487–494, 2012.

DUFLOU, J. R., VERBERT, J., BELKASSEM, B., GU, J., SOL., HENRARD, C. **Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, p. 253–256, 2008.

EMMENS, W.C., SEBASTIANI, G., *et al.* **The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history**. Journal of Materials Processing Technology, 2010. 210(8): p. 981-997.

FERRARINI, J.L. **Caracterização de materiais para o processo de estampagem** . UFRGS, Porto Alegre,2004. Dissertação de mestrado.

FRITZEN, D. **Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de latão70/30**. UFRGS, Porto Alegre,2012. Dissertação de mestrado

HIRT, G. *et al.* **Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation**. Institute of materials Technology/Precision Forming (LWP), Saarland University, Germany, p.12, 2005.

HUSSAIN G., et al. **A comparative study on the forming limits of an aluminum sheet-metal in negative incremental forming.** Journal of Materials Processing Technology. p. 98–94, 2007.

JESWIET, J., et al. **Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, 54(2): p. 88-114, 2005.

KNOLL, P., et al. **Estudo descreve a obtenção da curva de escoamento do alumínio por ensaios de compressão.** Corte & Conformação, p. 74-79, 2007.

LOPES, T. F. S. **Estampagem Incremental: Compensação do Retorno Elástico e Análise à Rotula.** Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2013. Dissertação de Mestrado.

LORA, F.A. **Avaliação do processo de estampagem profunda de chapas de aço BH 180 e BH 220 utilizado na indústria automobilística.** UFRGS, Porto Alegre, 2009. Dissertação de mestrado.

MACHADO, A. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., da SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais.** São Paulo : Edgard Blücher, 2009, 371 p.

MACHADO, A. **Avaliação da Rugosidade em Superfícies Complexas.** Instituto Superior Tupy, Joinville, 2009 . Dissertação de mestrado.

MARABUTO, S.R.J.H. **Desenvolvimento de uma Máquina de Estampagem Incremental.** Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica – Universidade de Aveiro, Portugal, 2010. Dissertação de Mestrado.

MARTINS, A.B. **Avaliação da utilização de ligas de cobre-zinco (latão) em Permutadores de calor que trabalham com água de Resfriamento na Un-recap/Petrobras.** UFRGS, Porto Alegre, 2009. Dissertação de mestrado

MARTINS, P. A. F. *et al.* **Theory of single point incremental forming.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, p. 57(1): p. 247–252, 2008.

MATESO, V. **Análise da Solidificação para o Projeto de Molde e a Relação com as Propriedades Mecânicas na Fundição da Liga de Latão 60/40.** UFRGS. Porto Alegre, 2006. Dissertação de mestrado.

MEIER H., *et al.* **Increasing the part accuracy in dieless robot-based incremental sheet metal forming.** CIRP Annals – Manufacturing Technology, 58(1): p.233-238, 2009.

MOLDES E INJEÇÃO PLÁSTICOS. **Parâmetros de avaliação da Rugosidade. (Acabamento superficial).** Disponível < <http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/parametrorugosidade.asp> > Acesso em 29 de março de 2016.

NOVOTNY, S.; Hein, P. (2001) **Hydroforming of Sheet Metal Pairs from Aluminium Alloys.** Journal of Materials Processing Technology. 115(1): p65-69, 2001.

OLIVEIRA, A.S.M. *et al.* **Obtenção da curva de escoamento a frio para o aço AISI 4140 através do ensaio de compressão.** 67º Congresso Internacional da ABM. p 31-41.2012.

RODRIGUES, J. e MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica.** Vol. 1 e 2. [S.l.], Escolar Editora, 2005

RODRIGUES, P.F.S. **Aplicação da Estampagem Incremental no Fabrico de moldes: Estudo da Viabilidade Técnico-econômica para industrialização.** Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2013. Dissertação de Mestrado.

SOEIRO, J.M.C. **Enformabilidade em estampagem Incremental.** Mestrado em Engenharia Mecânica – Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal, 2014. Dissertação de Mestrado.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica.** 3. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2009. 167 p.

SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.193 p.

SENA, J. I. V. D. **Estampagem incremental: Um novo conceito de produção**. Universidade de Aveiro. Aveiro - Portugal, p. 102. 2009. Dissertação de Mestrado

SHIMA, S. **State of the Art - Incremental Forming**. Department of Mechanical Engineering, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto, Japan, 2002 p.606-8501, 2012.

SILVA, P.J. **Estampagem incremental utilizada para prototipagem de peças de aço ABNT 1008 e ABNT 304**. UNB, Brasília/DF ,2011. Dissertação de mestrado

TERMOMECAÂNICA. **Latão Fio Máquina 67-33 C268 - Catálogo técnico**. Disponível< [http://www.termomecanica.com.br/website/files/materiais-tecnicos/ficha%20268\\_novo.pdf](http://www.termomecanica.com.br/website/files/materiais-tecnicos/ficha%20268_novo.pdf)> Acesso em 23 de agosto de 2013.

TIBURI, F. **Aspectos do processo de estampagem incremental**. UFRGS, Porto Alegre,2007. Dissertação de mestrado