



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

ESTUDO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL  
EM CHAPA DE LATÃO 70/30

Daniel Fritzen

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2012



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

ESTUDO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPA  
DE LATÃO 70/30

Daniel Fritzen

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

2012

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. Jánes Landre Júnior (PUC - MG)

Prof. Dr. Jovani Castelan (Faculdade SATC – SC)

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

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGEM

Dedico ao meu filho Pedro e a minha esposa Juliane, por todo apoio, paciência e motivação concentrados a mim durante a elaboração deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

À Deus por eu concluir este trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ing Lirio Schaeffer pelo estímulo, pela atenção dispensada, pelas valiosas informações técnicas e metodológicas repassadas, meu sincero agradecimento.

À minha esposa Juliane e ao meu filho Pedro, pela paciência, motivação e compreensão das seguidas ausências de seu convívio, necessárias à conclusão deste trabalho.

Ao colega Anderson Daleffe, pelo suporte técnico na execução dos ensaios e disponibilidade para fabricação dos dispositivos e ferramentas utilizados neste trabalho, além das várias discussões válidas sobre o assunto.

Ao colega Alexandre Milanez, pela sua inestimável colaboração, persistência, paciência e apoio técnico para a realização dos ensaios de microdureza e metalografia do material, realizados no IPAT / UNESC.

Ao Prof. Dr Márcio Rocha, da UNESC, pela autorização para a utilização dos equipamentos de análise de dureza e metalográfica.

Ao coordenador do curso de Tecnologia em Manutenção Industrial, Joeci Casagrande pelo incentivo na realização deste trabalho.

Ao colega Cletson do LAMETRO, pela prestação de serviços e disponibilidade dos aparelhos de medição de precisão.

Ao colega Fernando Michelin Marques da SATC, pela disponibilidade em ajudar com a análise química do material junto à Fundação Nobre.

Aos colegas do LdTM, especialmente ao Eng Luis Fernando Folle, pela sua colaboração como revisor, com observações importantes ao trabalho. À secretária Ágatha pelo seu excelente atendimento, simpatia e agilidade na resolução dos por menores ocorridos durante a realização deste trabalho.

À Faculdade SATC, pela disponibilidade de equipamentos e ferramentas para a execução dos experimentos práticos da dissertação.

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

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	14
LISTA DE ABREVIATURAS.....	15
LISTA DE SIMBOLOS.....	16
RESUMO .....	18
ABSTRACT .....	19
1 INTRODUÇÃO .....	20
1.1 Objetivo Geral.....	21
1.2 Objetivos Específicos e Metodologia.....	21
2 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL.....	23
2.1 Ensaio de Tração.....	23
2.2 Curvas de Escoamento .....	24
2.3 Índice de Anisotropia .....	26
2.4 Análise Química.....	27
2.5 Análise Metalográfica .....	27
2.6 Chapa de Latão 70/30.....	29
3 CONFORMAÇÃO CONVENCIONAL DE CHAPAS .....	31
3.1 Estampagem de Chapas.....	31
3.1.1 Estampagem Profunda.....	32
3.1.2 Estampagem: Processo de Dobra .....	36
3.1.3 Estampagem: Processo de Corte .....	38
4 ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS .....	40
4.1 Descrição do Processo de Estampagem Incremental de Chapas .....	41
4.2 Vantagens e Desvantagens da Estampagem Incremental.....	42
4.3 Tipos de Estampagem Incremental .....	44
4.3.1 Estampagem Incremental com Ponto Simples (SPIF) .....	45
4.3.2 Estampagem Incremental com Dois Pontos de Apoio (TPIF).....	47
4.3.3 Estampagem Incremental em Múltiplos Passes (MSPIF) .....	47
4.4 Limitações do Processo Relacionadas à Geometria das Peças.....	49
4.5 Máquinas para Estampagem Incremental de Chapas.....	50
4.5.1 Processo de Estampagem Incremental de Chapas por meio de Robôs .....	53

4.6	Parâmetros da Estampagem Incremental.....	55
4.6.1	Velocidade de Avanço.....	56
4.6.2	Profundidade do Passe Vertical .....	56
4.6.3	Rotação da Ferramenta .....	57
4.6.4	Lubrificação .....	58
4.6.5	Ferramentas para Estampagem Incremental de Chapas .....	59
4.6.6	Tipo de Estratégia da Ferramenta de Conformação .....	61
4.7	Aplicações Industriais da Estampagem Incremental de Chapas.....	64
4.8	Rugosidade .....	65
4.9	Análise das Deformações .....	67
5	RUGOSIDADE.....	72
6	CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE LATÃO 70/30 .....	74
6.1	Propriedades Mecânicas do Latão 70/30.....	74
6.1.1	Curva Tensão x Deformação (Convencional).....	74
6.1.2	Curvas de Escoamento.....	77
6.1.3	Microdureza .....	80
6.1.4	Índice de Anisotropia .....	80
6.1.5	Análise Química.....	81
6.1.6	Análise Metalográfica.....	83
7	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	84
7.1	Dispositivos Usados nos Experimentos Preliminares .....	84
7.2	Metodologia Aplicada nos Experimentos Preliminares .....	86
7.3	Lubrificação .....	88
7.4	Deformações .....	89
7.5	Equipamentos de Medição.....	90
7.6	Medição da Rugosidade Superficial.....	91
8	RESULTADOS.....	92
8.1	Metodologia e Resultados dos Experimentos Preliminares .....	92
8.1.1	Medição das Deformações Verdadeiras .....	98
8.1.2	Medição das Espessuras após a ISF .....	103
8.2	Conformidade Geométrica .....	106
8.3	Rugosidade Superficial.....	110
9	CONCLUSÕES .....	114

10 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	116
11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	117
APÊNDICE A: Perfil do tronco de pirâmide com $\psi: 57^\circ$ .....	123
APÊNDICE B: Perfil do tronco de pirâmide com $\psi: 56^\circ$ .....	124

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama convencional Tensão x Deformação Relativa (SCHAEFFER, 2004). .	23
Figura 2.2: Corpo de prova para ensaio de tração(ABNT.NBR-6152, 2002).....	24
Figura 2.3: Curva de escoamento representada com eixos logarítmicos para definir o índice de encruamento do Ti CP (CASTELAN, 2010). .....	26
Figura 2.4 - Micrografia do latão 70/30 com 25 microns. (INC., 2011) .....	28
Figura 2.5 - Microestruturas da chapa de latão recozido 70/30. (PASEBANI, TOROGHINEJAD, et al., 2010) .....	28
Figura 2.6: Gráfico tensão x deformação latão 70/30. Adaptado de (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2008) .....	29
Figura 3.1 - Estampagem de Embutimento(GALDINO, 2010) .....	33
Figura 3.2 - Tensões atuantes na estampagem profunda. (FOLLE, 2008) apud (BACKOFEN, 1991) .....	33
Figura 3.3 - Operação de conformação por estiramento. (DIETER e BACON, 1988).....	34
Figura 3.4 - Anel da turbinas a gás produzido pelo processo de estiramento. Dimensões dadas em polegadas. (ASM, 1993).....	35
Figura 3.5: Dispositivo para estiramento de formas circulares (ASM, 1993).....	35
Figura 3.6 - Tipos de dobramentos em matrizes. (MARCONDES, 2009) .....	37
Figura 3.7: Operação de corte em chapa (DOEGE† e BEHRENS, 2010).....	38
Figura 4.1 - Princípio do processo de estampagem incremental (MARTINS, BAY, et al., 2008) .....	41
Figura 4.2 - Modalidades da estampagem incremental. Adaptado de (CASTELAN, 2010)...	45
Figura 4.3: Processo de Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF). a) Adaptado de (JESWIET, MICARI, et al., 2005). b) (SY, 2009) .....	46
Figura 4.4: Estampagem Incremental com Ponto Duplo(CASTELAN, 2010).....	47
Figura 4.5: Estampagem em múltiplos passes e o efeito do encruamento dos grãos, exemplificado no detalhe A, fenômeno que causa o aumento da resistência ao escoamento (CASTELAN, 2010).....	48
Figura 4.6: Variação da espessura do cone estampado (DUFLOU, VERBERT, et al., 2008).	49

Figura 4.7 Correlação entre redução da espessura da chapa e dobramento. A espessura final $S_1$ depende da espessura inicial $S_0$ e do Ângulo de Parede ( $\psi$ ). Adaptado de (CAVALER, 2010). .....	50
Figura 4.8 - a) Máquina dedicada para ISF desenvolvida pela Amino Corporation; b) Capa externa de um capô de carro; c) Capa interna de um capô de carro; d) Montagem do capô de carro. (AMINO, 2006) .....	51
Figura 4.9 - Máquina para ISF de Cambridge. (ALLWOOD, HOUGHTON e JACKSON, 2005) .....	51
Figura 4.10 - Máquina CNC MAZAK VTC-300C três eixos utilizada na estampagem incremental de chapas de metal. (SY, 2009) .....	52
Figura 4.11 - Robô usado na ISF. (LAMMINEN, TUOMINEN e KIVIVUORI, 2005). .....	53
Figura 4.12 - a) Configuração da estampagem por Rôbo, b) Estampagem incremental duplex com suporte periférico (DPIF-P), c) Estampagem incremental duplex com o apoio local (DPIF-L), d) Peças automotivas complexas e) cilindro com ângulo parede inferior a $97^\circ$ . (MEIER, MAGNUS e SMUKALA, 2011) .....	55
Figura 4.13: a) Passo ( $\Delta_z$ ) constante; b) Passo ( $\Delta_z$ ) variável, mantendo a mesma distância entre os pontos de contato ( $\Delta_x$ ) com a chapa (ATTANASIO, CERETTI e GIARDINI, 2006) .....	57
Figura 4.14: Ferramenta executando um ciclo de ISF, utilizando graxa convencional como lubrificante. (CAVALER, 2010) .....	58
Figura 4.15: Ferramentas de metal duro com $\varnothing 6, 10, 30$ mm, e uma ferramenta de plástico (à direita) (LAMMINEN, WADMAN, et al., 2003) .....	60
Figura 4.16: Estratégias diferenciadas de estampagem incremental (BAMBACH, AMES, et al., 2003) apud (CASTELAN, 2010) .....	62
Figura 4.17: Modelo de experimento (RAUCH, HASCOET, et al., 2009). .....	63
Figura 4.18: Tipos de estratégias (RAUCH, HASCOET, et al., 2009). .....	63
Figura 4.19: Pontos para medição de erro dimensional (RAUCH, HASCOET, et al., 2009). .....	64
Figura 4.20: Protetor automotivo de calor / ruído; b) Cavidade do forno solar (JESWIET, MICARI, et al., 2005); c) Resultados dos testes preliminares dos protótipos físicos para implante craniano (CASTELAN, DALEFFE, et al., 2010) .....	65
Figura 4.21: Rugosidade $R_z$ sob condições de estampagem incremental (JESWIET, MICARI, et al., 2005). .....	66
Figura 4.22: Dimensões esquemáticas num ensaio de tração (SCHAEFFER, 2004). .....	67

Figura 4.23 - Exemplo de deformações em um componente estampado. (CAVALER, 2010)	69
Figura 4.24. Princípio da determinação das deformações. (SCHAEFFER, 2004)	70
Figura 4.25 - Tipos de deformação em chapa metálica. (SCHAEFFER, 2004)	71
Figura 5.1: Esboço representativo do parâmetro $R_z$ , conforme NBR4287/2002 (PIRATELLI FILHO, 2011)	72
Figura 5.2: Esboço representativo do parâmetro $R_z$ , conforme a antiga NBR6405/1988 (COUTINHO, 2007)	72
Figura 6.1 - Dimensões do corpo de prova	74
Figura 6.2 - a) Corpo de Prova original; b) Corpos de Prova após ensaio de tração	75
Figura 6.3: Curva Convencional do corpo de prova 01 com sentido de laminação a $0^\circ$	75
Figura 6.4: Dimensões do corpo de prova antes e depois do ensaio de tração	76
Figura 6.5: Curva de Escoamento do corpo de prova 01 com sentido de laminação a $0^\circ$	78
Figura 6.6: Curva de Escoamento em escala logarítmica do corpo de prova 01 com sentido de laminação a $0^\circ$	79
Figura 6.7 - Micrografia da chapa de latão 70/30 aumentada 500x	83
Figura 7.1 - Centro de Usinagem usado nos experimentos	85
Figura 7.2: a) Desenho Projetivo da Ferramenta de Estampar, b) Ferramenta de Estampar	85
Figura 7.3: Desenho Projetivo do blank	86
Figura 7.4: Simulação da estampagem incremental	87
Figura 7.5 – Experimento com lubrificante aplicado	89
Figura 7.6 – Equipamentos usados no processo de gravação eletroquímica. a) Chapa de latão; b) Tela de serigrafia; c) Chapa de latão gravada	89
Figura 7.7: Equipamento de medição de coordenadas	90
Figura 7.8: Numeração das faces de medição da rugosidade superficial $R_z$	91
Figura 8.1 - a) Experimento nº 1; b) Primeira fratura c) Segunda fratura	93
Figura 8.2: a) Experimento 2; b) Ponto de entrada da ferramenta em Z; c) Marca do Ponto de entrada da ferramenta em Z na parte externa	94
Figura 8.3: Experimento 4; b) Detalhe ampliado da região fraturada	94
Figura 8.4: Experimento 6; b) Fratura da chapa (vista interna) c) Fratura da chapa (vista externa); d) Ponto de entrada da ferramenta em Z	95
Figura 8.5: Experimento 7 partido para as medições de espessuras e deformações	96
Figura 8.6: Experimento 10 sem fraturas durante o processo de ISF	96
Figura 8.7: Experimento 12. Fratura da chapa em detalhe ampliado. ( $\psi$ : $58^\circ$   $\Delta z$ : 1,00 mm)	97

Figura 8.8: Experimento 13. Fratura da chapa em detalhe ampliado. ( $\psi: 59^\circ \mid \Delta_Z: 1,00 \text{ mm}$ ).	97
Figura 8.9: Experimento 11. Fratura da chapa em detalhe ampliado. ( $\psi: 60^\circ \mid \Delta_Z: 1,00 \text{ mm}$ ).	97
Figura 8.10: Região de medição das deformações no ensaio nº 16 ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta_Z: 0,50 \text{ mm}$ ). ...	98
Figura 8.11: Deformação verdadeira ( $\phi$ ) x Distância do ponto de partida $d'$ a $0^\circ$ em relação a direção de laminação, no experimento nº16. ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta_Z: 0,50 \text{ mm}$ ). .....	100
Figura 8.12: Deformação verdadeira ( $\phi$ ) x Distância do ponto de partida $d'$ a $90^\circ$ em relação a direção de laminação, no experimento nº16. ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta_Z: 0,50 \text{ mm}$ ). .....	100
Figura 8.13: Deformação verdadeira ( $\phi$ ) x Distância do ponto de partida $d'$ a $45^\circ$ em relação a direção de laminação, no experimento nº16 ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta_Z: 0,50 \text{ mm}$ ). .....	101
Figura 8.14: Deformação verdadeira ( $\phi$ ) x Distância do ponto de partida $d'$ a $0^\circ$ em relação a direção de laminação, no experimento nº12 ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta_Z: 1,00 \text{ mm}$ ). .....	102
Figura 8.15: Deformação verdadeira ( $\phi$ ) x Distância do ponto de partida $d'$ a $90^\circ$ em relação a direção de laminação, no experimento nº12 ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta_Z: 1,00 \text{ mm}$ ). .....	102
Figura 8.16: Deformação verdadeira ( $\phi$ ) x Distância do ponto de partida $d'$ a $45^\circ$ em relação a direção de laminação, no experimento nº12 ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta_Z: 0,1,00 \text{ mm}$ ). .....	103
Figura 8.17: Gráfico Variação das Espessuras do experimento nº16 ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta_Z: 0,50 \text{ mm}$ ). .....	103
Figura 8.18: Gráfico Variação das Espessuras do experimento nº12 ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta_Z: 1,00 \text{ mm}$ ). .....	105
Figura 8.19: Modelo com a organização dos Pontos coletados e os eixos cartesianos. ....	106
Figura 8.20: Perfil do experimento nº 12 no sentido Longitudinal. ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta_Z: 1,00 \text{ mm}$ )..	107
Figura 8.21: Perfil do experimento nº 12 no sentido Transversal. ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta_Z: 1,00 \text{ mm}$ )....	107
Figura 8.22: Perfil do experimento nº 16 no sentido Longitudinal. ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta_Z: 0,50 \text{ mm}$ )..	108
Figura 8.23: Perfil do experimento nº 16 no sentido Transversal. ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta_Z: 0,50 \text{ mm}$ )....	108
Figura 8.24: Perfil do experimento nº 8 no sentido Longitudinal. ( $\psi: 54^\circ \mid \Delta_Z: 1,00 \text{ mm} \mid$ Trajetória Espiral). .....	109
Figura 8.25: Perfil do experimento nº 8 no sentido Transversal. ( $\psi: 54^\circ \mid \Delta_Z: 1,00 \text{ mm} \mid$ Trajetória Espiral). .....	109
Figura 8.26: Perfil do experimento nº 6 no sentido Longitudinal. ( $\psi: 54^\circ \mid \Delta_Z: 1,00 \text{ mm} \mid$ Trajetória Paralela de Contorno) .....	110
Figura 8.27: Perfil do experimento nº 6 no sentido Transversal. ( $\psi: 54^\circ \mid \Delta_Z: 1,00 \text{ mm} \mid$ Trajetória Paralela de Contorno) .....	110

Figura 8.28: Variação da rugosidade superficial de acordo com a face medida [ $\psi$ : $58^\circ$ ]......	111
Figura 8.29: Variação da rugosidade superficial de acordo com a face medida [ $\psi$ : $57^\circ$ ]......	111
Figura 8.30: Variação da rugosidade superficial de acordo com a face medida [ $\psi$ : $56^\circ$ ]......	112
Figura 8.31: Variação da rugosidade superficial média de acordo com o experimento. ....	112
Figura 8.32: Variação da rugosidade superficial de acordo com a estratégia. ....	113
Figura 11.1: Perfil do tronco de pirâmide no sentido Longitudinal. ( $\psi$ : $57^\circ$   $\Delta z$ : 1,00 mm).	123
Figura 11.2: Perfil do tronco de pirâmide no sentido Transversal. ( $\psi$ : $57^\circ$   $\Delta z$ : 1,00 mm)...	123
Figura 11.3: Perfil do tronco de pirâmide no sentido Longitudinal. ( $\psi$ : $57^\circ$   $\Delta z$ : 0,50 mm).	123
Figura 11.4: Perfil do tronco de pirâmide no sentido Transversal. ( $\psi$ : $57^\circ$   $\Delta z$ : 0,50 mm)...	123
Figura 11.5: Perfil do tronco de pirâmide no sentido Longitudinal. ( $\psi$ : $56^\circ$   $\Delta z$ : 1,00 mm).	124
Figura 11.6: Perfil do tronco de pirâmide no sentido Transversal. ( $\psi$ : $56^\circ$   $\Delta z$ : 1,00 mm)...	124
Figura 11.7: Perfil do tronco de pirâmide no sentido Longitudinal. ( $\psi$ : $56^\circ$   $\Delta z$ : 0,50 mm).	124
Figura 11.8: Perfil do tronco de pirâmide no sentido Transversal. ( $\psi$ : $56^\circ$   $\Delta z$ : 0,50 mm)...	124

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Limites de composição química do Latão 70/30 [%]. (ASM, 1992) .....	27
Tabela 2.2: Propriedades físico-químicas do latão 70/30 (ASM, 1992) e (DOEGE† e BEHRENS, 2010).....	30
Tabela 6.1: Propriedades mecânicas obtidas a partir do Latão 70/30 ensaiado a 0°. .....	79
Tabela 6.2: Propriedades mecânicas obtidas a partir do Latão 70/30 ensaiado a 45°. .....	80
Tabela 6.3: Propriedades mecânicas obtidas a partir do Latão 70/30 ensaiado a 90°. .....	80
Tabela 6.4: Valores do índice de anisotropia do latão 70/30 .....	81
Tabela 6.5 - Análise química. Fonte: Servicorte Indústria e Comércio de Metais.....	82
Tabela 6.6 - Limites de composição química do Latão 70/30. (ASM, 1992) .....	82
Tabela 6.7 – Resultado da análise química do Latão 70/30 realizado no espectrômetro. ....	82
Tabela 7.1 – Características técnicas do Centro de Usinagem usado nos experimentos.....	84
Tabela 7.2: Parâmetros usados nos experimentos .....	88
Tabela 8.1 - Parâmetros analisados nos experimentos.....	92
Tabela 8.2 - Deformações verdadeiras de acordo com o sentido de laminação (0°, 90° e 45°) no ensaio nº 16. ( $\psi$ : 58°   $\Delta_Z$ : 0,50 mm). .....	99
Tabela 8.3 - Deformações verdadeiras de acordo com o sentido de laminação (0°, 90° e 45°) no ensaio nº 12. ( $\psi$ : 58°   $\Delta_Z$ : 1,00 mm). .....	101
Tabela 8.4: Espessura Final ( $s_1$ ) medida em relação a distância ao ponto de partida d' no experimento nº16 ( $\psi$ : 58°   $\Delta_Z$ : 0,50 mm). .....	104
Tabela 8.5: Espessura Final ( $s_1$ ) medida em relação a distância ao ponto de partida d' no experimento nº16 ( $\psi$ : 58°   $\Delta_Z$ : 1,00 mm). .....	105
Tabela 8.6: Valores de Rugosidade $R_z$ medido nos experimentos [ $\mu\text{m}$ ]. .....	113

**LISTA DE ABREVIATURAS**

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho assistido por computador)
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> (Manufatura assistida por computador)
CCC	Estrutura Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Estrutura Cúbica de Faces Centradas
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CP	Corpo de Prova
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão de Normalização)
DPIF	<i>Duplex Incremental Forming</i>
HV	<i>Hardness Vickers</i>
IPAT	Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas da UNESC
ISF	Incremental Sheet Forming
MSPIF	<i>Multi-Pass Single Point Incremental Forming</i>
NC	Controle Numérico
RPM	Rotações Por Minuto
SATC	Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
SPIF	<i>Single Point Incremental Forming</i>
TPIF	<i>Two Point Incremental Forming</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNESC	Universidade do Extremo Sul Catarinense.

## LISTA DE SIMBOLOS

$\alpha$	Ângulo da reta $n$	[ ° ]
$\delta$	Alongamento	[ mm ]
$\sigma$	Tensão	[ MPa ]
$\sigma_e$	Tensão de Escoamento Convencional	[ MPa ]
$\sigma_B$	Tensão Máxima	[ MPa ]
$\sigma_R$	Limite de Ruptura	[ MPa ]
$\Delta r$	Anisotropia planar	[ ]
$\Delta_z$	Passo Vertical	[ mm ]
$E$	Módulo de Elasticidade	[ GPa ]
$\varepsilon$	Deformação relativa	[ % ]
$\varphi$	Deformação verdadeira	[ ]
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	Deformação verdadeira nas direções 1, 2 e 3	[ ]
$\varphi_l$	Deformação verdadeira no comprimento	[ ]
$\varphi_b$	Deformação verdadeira na largura	[ ]
$\varphi_s$	Deformação verdadeira na espessura	[ ]
$\Psi$	Ângulo de Parede	[ ° ]
$\emptyset$	Diâmetro	[ mm ]
$A_0$	Área inicial	[ mm <sup>2</sup> ]
$A$	Área final	[ mm <sup>2</sup> ]
$b_0$	Largura inicial	[ mm ]
$b$	Largura final	[ mm ]
$C$	Constante do material	[ MPa ]
$d_0$	Diâmetro inicial	[ mm ]
$d'$	Distância do ponto de partida	[ mm ]
$F$	Força de Conformação	[ N ]
$F_{S \text{ Max}}$	Força de Corte	[ N ]
$k_f$	Tensão do Escoamento	[ MPa ]

$l$	Comprimento instantâneo da chapa	[ mm ]
$l_0$	Comprimento inicial	[ mm ]
$l_1$	Comprimento final	[ mm ]
$\ell_m$	Comprimento de Medição do Perfil	[ $\mu\text{m}$ ]
$\ell_e$	Comprimento de Amostragem do Perfil	[ $\mu\text{m}$ ]
$n$	Índice de Encruamento	[ ]
$r$	Anisotropia	[ ]
$r_m$	Anisotropia média	[ ]
$R_T$	Raio da Ferramenta	[ mm ]
$R_Z$	Parâmetro de Rugosidade Superficial	[ $\mu\text{m}$ ]
$s$	Espessura	[ mm ]
$s_0$	Espessura Inicial	[ mm ]
$s_1$	Espessura Final	[ mm ]
$V_0$	Volume inicial	[ $\text{mm}^3$ ]
$V$	Volume final	[ $\text{mm}^3$ ]
$v_c$	Velocidade de Rotação	[ rpm ]
$v_{fh}$	Velocidade de Avanço nos eixos XY	[ mm/min ]
$v_z$	Velocidade de Mergulho no eixo Z	[ mm/min ]
$Z_P$	Altura Máxima do Pico no Perfil medido	[ $\mu\text{m}$ ]
$Z_V$	Profundidade Máxima do Vale no Perfil medido	[ $\mu\text{m}$ ]
$X$	Eixo X da máquina-ferramenta	[ ]
$Y$	Eixo Y da máquina-ferramenta	[ ]
$Z$	Eixo Z da máquina-ferramenta	[ ]

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da chapa de latão 70/30 para o processo de Estampagem Incremental de Chapas (*ISF - Incremental Sheet Forming*), baseado nos parâmetros: ângulo de parede ( $\psi$ ), passo vertical ( $\Delta z$ ) e estratégia do caminho da ferramenta. Os experimentos baseiam-se na variante da Estampagem Incremental denominada Estampagem Incremental com Ponto Simples (*SPIF - Single Point Incremental Forming*). Foram realizados 18 ensaios usando uma ferramenta de estampar com raio ( $R_T$ ) de 5 mm. Para execução dos testes práticos, foram utilizados os recursos: *softwares* CAD/CAM, centro de usinagem CNC com três eixos, matriz incremental, ferramenta de estampagem incremental e um dispositivo prensa chapas. Além disso, o acabamento da superfície conformada foi medido através do parâmetro de rugosidade  $R_z$  nos principais ensaios, bem como a medição das deformações verdadeiras ( $\phi$ ) e da espessura ( $s_1$ ). Os testes práticos demonstraram que a estratégia de usinagem espiral proporcionou um maior ângulo de parede, comparado à estratégia paralela de contorno.

**Palavras-chave:** Ferramenta de Estampagem, Estampagem Incremental, Deformações, Latão 70/30.

## ABSTRACT

This study aims to evaluate the behavior of 70/30 brass plate to the process of Incremental Sheet Forming - ISF, based on the parameters: wall angle ( $\psi$ ), vertical step ( $\Delta z$ ) and tool path strategy. The experiments were based on a variation of the ISF process, called SPIF (Single Point Incremental Forming). Eighteen tests were conducted using a punching tool with a radius ( $R_T$ ) of 5 mm. For the execution of practical tests, the resources were used: CAD / CAM software, CNC machining center with three axis. It was also used an incremental matrix, a tool for incremental forming and a sheet-press device. In addition, the surface finish was measured by  $R_z$  roughness parameter in the main tests, the same way the measurement of true strains ( $\phi$ ) and thickness ( $s_1$ ). The practice tests showed that the spiral machining strategy has provided a greater wall angle, compared to the parallel strategy contour.

**Keywords:** Forming Tool, Incremental Sheet Forming, Strains, Brass 70/30.

## 1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais o avanço da tecnologia nas diversificadas áreas de atuação vem refletindo em nossos cotidianos. A utilização de metais, sejam puros ou em ligas metálicas, neste contexto é evidente. A indústria metal mecânica vem fornecendo seus alvitres 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 metal-mecânica, a estampagem de chapas tem um destaque significativo nesta área.

O processo de fabricação de chapas metálicas tem suas origens na descoberta dos primeiros metais. No início do século XVIII, com o surgimento das primeiras laminações de chapas, os processos de conformação destas chapas sofreram grande impulso (SCHAEFFER, 2004). Desta maneira, é notório que após grandes avanços nesta área, as chapas metálicas começaram a ter um emprego maior na produção industrial.

O processo de estampagem de chapas baseia-se no deslocamento de um punção, acionado por uma prensa, contra uma ferramenta, comumente chamada de matriz, onde se encontra a chapa metálica. Conforme as características geométricas do punção e da matriz, a chapa metálica plana assumirá o formato imposto por ambos (HIRT, JUNK, *et al.*, 2005).

Os componentes manufaturados por esses processos destinam-se para uma infinidade de ramos industriais, tais como a indústria automotiva, máquinas agrícolas, aeroespacial, aparelhos de utensílios domésticos, construção civil, medicina, transportes, indústria eletroeletrônica, etc.

Para atender às demandas do alto volume de produção, levando em consideração custos baixos e tempos mínimos de fabricação, a indústria começou a estampar chapas em prensas. No entanto, evidenciou-se a desvantagem de que para cada produto a estampar, se faz necessário uma ferramenta dedicada, comumente chamada de estampo (punção, matriz, prensa-chapas, etc). Os custos de conceber ferramentas dedicadas são muito elevados, resultando também em aumento dos custos dos produtos. Deste modo, confirma-se a estampagem em ferramentas dedicadas como apropriada apenas para alto volume de produção. Como é incessante a produção de novos produtos pela indústria, há também uma necessidade constante de desenvolver protótipos. Os protótipos são feitos a fim de experimentar uma nova peça ou a sua funcionalidade (KOPAC e KAMPUS, 2005).

A fim de minimizar o uso de ferramentas dedicadas para a estampagem de chapas, no que diz respeito à fabricação de pequenos lotes ou modelos únicos, a estampagem incremental de chapas surge como uma boa alternativa na indústria. O processo de Estampagem Incremental (*Incremental Sheet Forming – ISF*) é uma inovação tecnológica na área de deformação de chapas. Consiste na conformação de uma geratriz, empregando um pequeno punção, comandado por controle numérico (CNC), que vai deformando aos poucos a peça através de pequenas deformações (SCHAEFFER, 2004) (BAMBACH, HIRT e AMES, 2004).

O processo de estampagem incremental de chapas foi patenteado em 1967 por Edward Leszak, objetivando fornecer novos avanços no estado da arte da conformação de chapas de metal dúctil em um espaço vazio, podendo ser trabalhado ou deformado plasticamente nas configurações desejadas utilizando ferramentas simples e baratas com formas cônica de revolução (LESZAK, 1967)

## **1.1 Objetivo Geral**

Considerando essa busca constante da indústria por novos produtos e suas novas formas, o presente trabalho tem como finalidade primordial estudar o processo de estampagem incremental de chapa de latão 70/30, com 0,5 mm de espessura, obtendo produtos em caráter experimental, visando prover informações relevantes para estudos futuros sobre a prototipagem e customização de produtos de ferragens para construção civil (espelhos de fechaduras).

## **1.2 Objetivos Específicos e Metodologia**

O formato dos experimentos ensaiados foi baseado num tronco de pirâmide de base quadrada, onde, com a variação do ângulo de parede ( $\psi$ ), do passo vertical ( $\Delta z$ ) e da estratégia de usinagem, os limites de estampabilidade do material estudado foram definidos. Também foram analisadas as deformações verdadeiras ( $\phi$ ), por meio do exame de visioelasticidade, sofridas nos principais experimentos, bem como a variação da espessura ( $s_1$ ) e o parâmetro de rugosidade superficial  $R_z$ .

Para a caracterização do material, foram empregados: análise química, análise metalográfica, ensaios de tração, e o índice de anisotropia ( $r$ ).

Os experimentos de estampagem incremental foram realizados em um centro de usinagem, usando um dispositivo prensa chapas devidamente projetados para tal função, além de ferramentas específicas dos testes práticos.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica dos parâmetros fundamentais relativos à caracterização da matéria-prima, processo de estampagem e rugosidade da superfície das chapas metálicas.

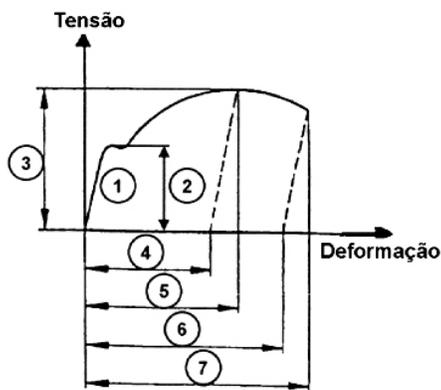
### 2.1 Ensaio de Tração

Segundo Schaeffer (1999) e (2004), o mais comum e tradicional dos testes para definir algumas propriedades mecânicas é o ensaio de tração, pois permite obter-se:

- Módulo de Elasticidade (E) [GPa];
- Tensão de Escoamento Convencional ( $\sigma_{0,2}$ ) ou ( $\sigma_e$ ) [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 ( $r$ )

Além das mesmas observações descritas acima, (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2008) 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 2.1 mostra o diagrama convencional Tensão x Deformação Relativa.



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

Figura 2.1: Diagrama convencional Tensão x Deformação Relativa (SCHAEFFER, 2004).

Conforme a normas ABNT 6152 ou DIN EM 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] (SCHAEFFER, 2004). A Figura 2.2 mostra dimensões típicas de corpo de prova para ensaio de tração.

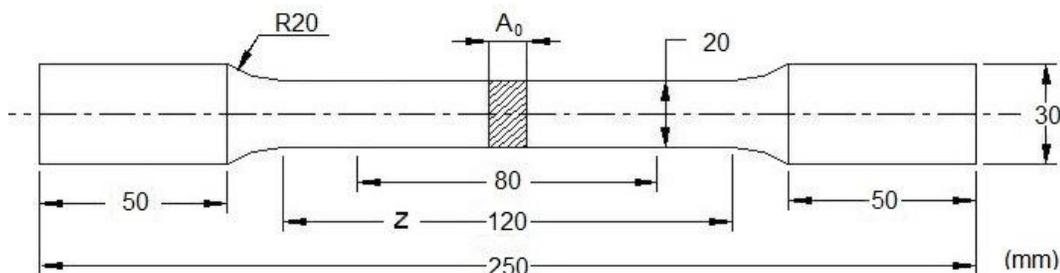


Figura 2.2: Corpo de prova para ensaio de tração (ABNT.NBR-6152, 2002).

Com as medições da força (F) e do comprimento ( $l_1$ ) se obtém a tensão ( $\sigma$ ) e a deformação relativa ( $\varepsilon$ ) em cada instante do ensaio.

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

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad [N/mm^2] \quad (2-1)$$

Onde:

F [N]: Força aplicada.

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

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

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad [\%] \quad (2-2)$$

## 2.2 Curvas de Escoamento

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:

$$k_f = \frac{\sigma}{A} \quad [N/mm^2] \quad (2-3)$$

Onde:

A [ $mm^2$ ]: 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:

$$\begin{aligned} & V_0 = V \\ \therefore & \\ & A_0 \cdot l_0 = A \cdot l \\ \therefore & \\ & A = \frac{A_0 \cdot l_0}{l} \quad [mm^2] \end{aligned}$$

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

$$\varphi = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (2-4)$$

Onde:

$V_0$  [ $mm^3$ ]: Volume inicial

V [ $mm^3$ ]: Volume final

$A_0$  [ $mm^2$ ]: Área inicial

A [ $mm^2$ ]: Área final

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

l [ $mm^2$ ]: 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 (SCHAEFFER, 2004):

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad [MPa] \quad (2-5)$$

Onde:

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

$n$ : Índice de encruamento

O índice de encruamento ( $n$ ) é um importante indicador das características de encruabilidade dos materiais. Quanto maior o índice de encruamento ( $n$ ), maior é a encruabilidade do material. O índice de encruamento ( $n$ ) pode ser obtido quando se transfere os dados da tensão de escoamento ( $k_f$ ) e a deformação ( $\varphi$ ) para um diagrama em escala logarítmica (Figura 2.3). Normalmente se obtém uma reta sendo o valor “ $n$ ” dado pela inclinação ( $\alpha$ ) desta reta ( $n = \text{tg } \alpha$ ) (SCHAEFFER, 2004).

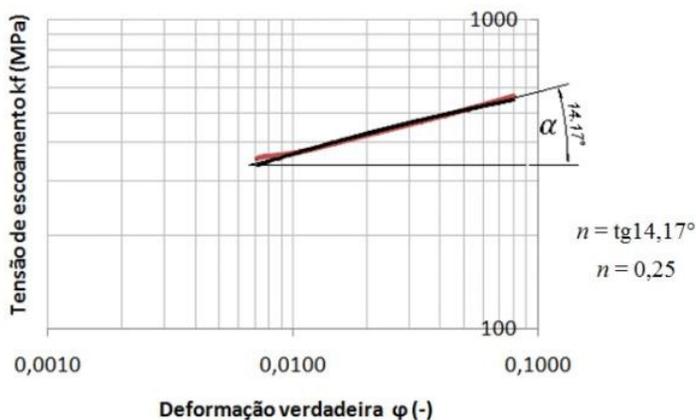


Figura 2.3: Curva de escoamento representada com eixos logarítmicos para definir o índice de encruamento do Ti CP (CASTELAN, 2010).

### 2.3 Índice de Anisotropia

Na laminação a frio de chapas, ocorre um fenômeno de alongamento dos grãos na direção da 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 que ocorrem em um elemento de volume durante a deformação dele.

O índice de anisotropia é calculado por três razões de deformação ( $r$ ) que são obtidos em ensaios de tração que trabalham com corpos de prova retirados nas três diferentes direções a direção de laminação ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ).

A razão de deformação  $r$  é definida por (SCHAEFFER, 1999):

$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{b_0 * l_0}{b * l}} \quad (2-6)$$

Sendo:

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

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

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

$l$  [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 ( $\Delta r$ ):

$$r_m = \frac{1}{4} (r_{0^\circ} + 2 * r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (2-7)$$

e

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} \quad (2-8)$$

## 2.4 Análise Química

A Tabela 2.1 traz os valores limites de composição química da chapa de latão 70/30, extraídos da literatura. Os valores dos elementos listados a seguir estão expressos em porcentagem (%):

Tabela 2.1 - Limites de composição química do Latão 70/30 [%]. (ASM, 1992)

<i>Cu</i>	<i>Pb</i>	<i>Fe</i>	<i>Outros</i>	<i>Zn</i>
68,5 – 71,5	Máx. 0,07	Máx. 0,05	Máx. 0,15	Restante (28,2 – 31,5)

## 2.5 Análise Metalográfica

Latões são ligas de zinco, cobre. Ligas contendo até cerca de 35% de zinco são ligas monofásicas, consistindo de uma solução sólida de zinco e cobre alfa ( $\alpha$ ). As ligas  $\alpha$  podem

ser diferenciadas por uma mudança gradual na cor, do amarelo ouro (Figura 2.4) ao vermelho (Figura 2.5), com o aumento do teor de zinco até 35% (INC., 2011).

O zinco é o principal elemento de liga dos latões e participa da estrutura cúbica de faces centradas (CFC) do cobre como um átomo substitucional, formando uma solução sólida do tipo  $\alpha$ . À temperatura ambiente, a solubilidade máxima do zinco no cobre é de cerca de 37%, e, acima deste valor, forma-se uma fase de estrutura ordenada do tipo cúbica de corpo centrado (CCC), muito frágil e dura, chamada de  $\beta$ . A presença desta fase frágil limita o teor de zinco em 45%, no máximo. (SPINELLI, BOSE FILHO, *et al.*, 2004), (PANTAZOPOULOS e VAZDIRVANIDIS, 2008)

A Figura 2.5 ilustra a microestrutura da chapa de latão 70/30 antes de o processo Rolo de Colagem Acumulativo (*Accumulative roll-bonding - ARB*) estudado por (PASEBANI, TOROGHINEJAD, *et al.*, 2010).

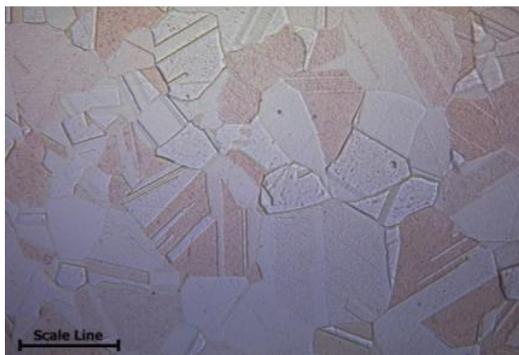


Figura 2.4 - Micrografia do latão 70/30 com 25 microns. (INC., 2011)

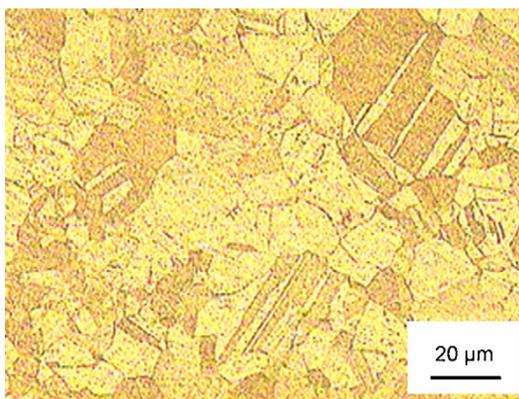


Figura 2.5 - Microestruturas da chapa de latão recozido 70/30. (PASEBANI, TOROGHINEJAD, *et al.*, 2010)

## 2.6 Chapa de Latão 70/30

Ao lado do aço inoxidável, as ligas de latão são largamente usadas nas indústrias fabricantes da construção civil (fechos, dobradiças, fechaduras, etc). Tãmanha é a aplicação, que o presente estudo visa prover informações relevantes para estudos futuros sobre a prototipagem e customização de produtos de ferragens para construção civil (espelhos de fechaduras), considerando uma produção de lote unitário ou pequenos lotes.

O material abordado, comumente chamado de latão para cartucho, devido a sua aplicação na fabricação dos mesmos, segue a norma SAE J463, que trata dos Forjados de Cobre e suas ligas. Comercialmente conhecido também como Latão UNS C26000 (ASM, 1992). Tem excelente trabalhabilidade a frio e diversas aplicações, tais como: núcleos de radiador e tanques, dispositivos elétricos da lâmpada, fechos, fechaduras, dobradiças, componentes de munições, acessórios de canalização, pinos, rebites (ASM, 1992).

Na Figura 2.6, duas curvas tensão versus deformação do ensaio convencional são apresentadas. Observa-se uma tensão máxima ( $\sigma_B$ ) de aproximadamente 390 MPa para o latão 70/30, e 300 MPa para o latão 90/10.

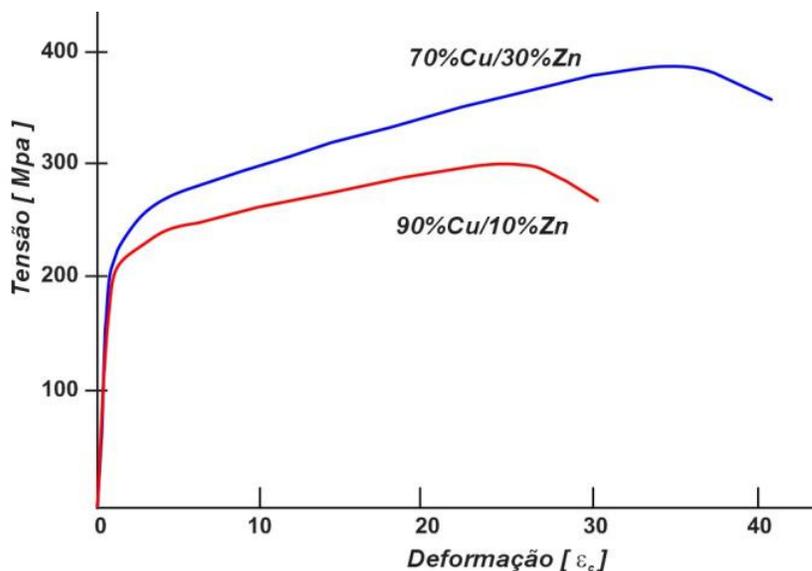


Figura 2.6: Gráfico tensão x deformação latão 70/30. Adaptado de (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2008)

A Tabela 2.2 a seguir, apresenta algumas propriedades físico-químicas da chapa de latão 70/30 encontradas na literatura.

Tabela 2.2: Propriedades físico-químicas do latão 70/30 (ASM, 1992) e (DOEGE† e BEHRENS, 2010)

<i>Propriedade</i>	<i>Valor</i>
<i>Densidade</i>	8,53 g/cm <sup>3</sup>
<i>Ponto de Fusão</i>	955 °C
<i>Temperatura de Solidificação</i>	915°C
<i>Calor Específico (a 20°C)</i>	0,09 cal/g°C
<i>Módulo de Elasticidade</i>	110 GPa
<i>Alongamento</i>	32 %
<i>Limite de Resistência à Tração</i>	395 a 460 MPa
<i>Tensão de Escoamento Convencional (<math>\sigma_e</math>)</i>	360 MPa
<i>Tensão de Escoamento (<math>k_f</math>)</i>	750 MPa
<i>Índice de Encruamento</i>	0,49
<i>Coefficiente de Poisson</i>	0,45 a 0,50
<i>Dureza</i>	132 HV
<i>Faixa de Temperatura de Recozimento</i>	425 a 750°C
<i>Faixa de Temperatura para Trabalho a Quente</i>	725 a 850°C
<i>Resistividade Elétrica (a 20°C)</i>	0,06 ohm mm <sup>2</sup> / m

### **3 CONFORMAÇÃO CONVENCIONAL DE CHAPAS**

Atualmente a nossa sociedade encontra-se extremamente dependente dos metais. Em transportes, estruturas e ferramentas são usadas grandes quantidades de ferro fundido e aço. Em quase todas as aplicações elétricas é utilizado cobre. À nossa volta observa-se uma crescente utilização de alumínio e de outros metais leves - titânio e zircônio (os chamados metais da idade espacial) (MARQUES e FERNANDES, 1998).

Focando o emprego dos metais, mais precisamente na forma de chapas, observa-se que a manufatura exige, além das operações de estampagem profunda, outras etapas de trabalho como corte, a furação, a calibragem, o rebordeado etc. Tais componentes manufaturados por esses processos destinam-se para uma infinidade de ramos industriais, tais como indústria automotiva, máquinas agrícolas, aeroespacial, aparelhos e utensílios domésticos, construção civil, medicina, transportes, indústria eletroeletrônica etc (SCHAEFFER, 2004)

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 e MARTINS, 2005)

Decorrente das características inerentes deste processo de conformação de chapas metálicas, diferentes modos de “estampar” foram desenvolvidos ao passar dos tempos, caracterizando peculiaridades individuais de cada processo.

#### **3.1 Estampagem de Chapas**

Atualmente, os processos de estampagem se diversificam em suas formas de trabalho e aplicação, porém, todos ainda mantêm o intuito original de sua concepção que é deformar a chapa tornando-a um produto de aproveitamento industrial, com dimensões e formas geométricas precisas conforme o projeto estipulado. Inerente a tamanha diversificação nos métodos de estampagem, estão os vários parâmetros peculiares de cada processo.

Deste modo, a seguir serão abordados alguns processos de estampagem, dando ênfase ao processo de estampagem incremental.

Inicialmente, a essência do processo de estampagem era caracterizada por um processo de conformação mecânica, realizado geralmente a frio, que compreende um conjunto de operações, por intermédio das quais uma chapa plana (*blank*) é submetida a transformações de modo a adquirir uma nova forma geométrica. A deformação plástica é levada a efeito com o emprego de prensas de estampagem, com o auxílio de dispositivos especiais chamados estampos ou matrizes (CHIAVERINI, 1977).

Segundo a norma DIN 8580, os processos de estampagem pertencem a dois diferentes grupos principais:

- a) Grupo principal dos processos de conformação (nº 2). Formado por todos processos que alteram a forma geométrica da peça sem separar ou adicionar material, como por exemplo: o embutimento profundo e a dobra.
- b) Grupo principal dos processos de separação (nº 3). Formado por todos processos de corte, como por exemplo o cisalhamento e o corte fino (SCHAEFFER, 1999).

### **3.1.1 Estampagem Profunda**

O repuxo ou embutimento é uma operação de estampagem onde uma chapa, inicialmente plana, é transformada em um corpo oco sem que haja aparecimento de rugas e trincas. As ferramentas que permitem a obtenção da forma desejada são chamadas de estampos, constituídos por um punção, uma matriz e um sujeitador chamado de prensa-chapa. Durante a operação de estampagem profunda, o punção força a chapa penetrar na matriz movido pela ação de uma força (F). O material da chapa flui para dentro da matriz, configurando gradativamente as paredes laterais da peça (Figura 3.1). O processo é empregado na fabricação de diversas peças (pára-lamas; portas de carros; painéis; etc.) (MORO e AURAS, 2006).

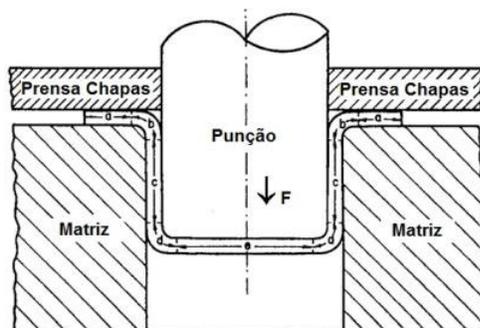


Figura 3.1 - Estampagem de Embutimento (GALDINO, 2010)

A estampagem ou embutimento é um processo de conformação que envolve uma contínua intervenção entre ferramenta, lubrificante, material de conformação e equipamentos. A grande vantagem da fabricação de componentes a partir de chapas metálicas é o baixo custo originado pela minimização do uso de matéria prima, aliado a baixa necessidade de usinagem (SCHAEFFER, 2004)

O processo de estampagem profunda submete a chapa plana a um estado complexo de tensões e deformações que alteram sua espessura durante o processo. O estado típico de tensão varia conforme a posição da retirada do elemento de análise na peça que está sendo conformada. Para peças cilíndricas existem três diferentes estados de tensão: um na flange, um na lateral e um no fundo do copo, como pode ser visto na Figura 3.2.

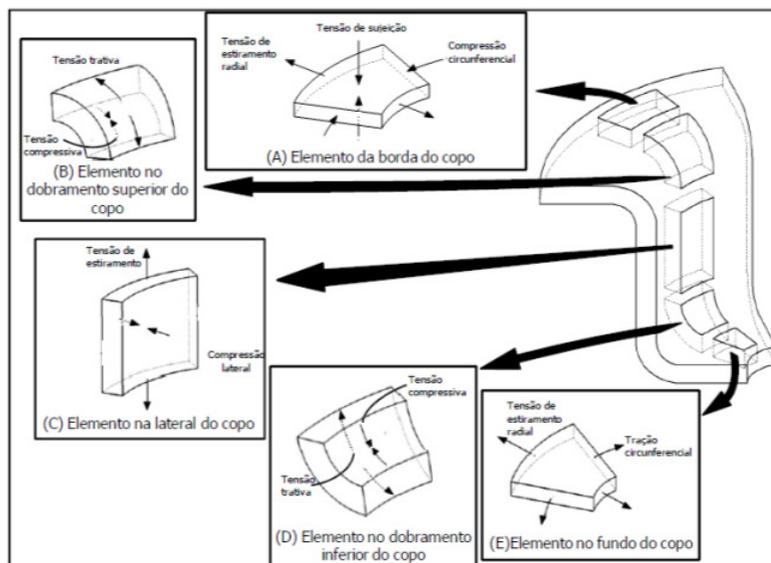


Figura 3.2 - Tensões atuantes na estampagem profunda. (FOLLE, 2008) apud (BACKOFEN, 1991)

A capacidade de alongamento de um material é importante para operações de estampagem profunda, e depende diretamente do coeficiente de anisotropia normal. Em materiais com elevado coeficiente de anisotropia normal, a deformação localizada causa um incremento rápido da resistência mecânica e o material se torna capacitado a resistir cada vez mais à deformação. Mas em materiais de pequeno coeficiente, a deformação localizada causa estricção (redução de seção) e uma perda da resistência mecânica (MORO e AURAS, 2006)

### 3.1.1.1 Estampagem: Processo de Estiramento

Conformação por estiramento (*stretch forming*) é o processo de conformação, que se dá pela aplicação de forças de tração de tal maneira a esticar o material sobre uma matriz que define o contorno da peça (Figura 3.3). O processo é uma consequência do nivelamento do esticador de chapas laminadas. O retorno elástico é amplamente eliminado devido ao maior percentual de deformação plástica causado pela força trativa, que reduz as tensões residuais. Por outro lado, visto que predominam tensões de tração, grandes deformações podem ser obtidas por esse processo apenas em materiais com ductilidade apreciável (DIETER e BACON, 1988) e (BRAGA, 2009).

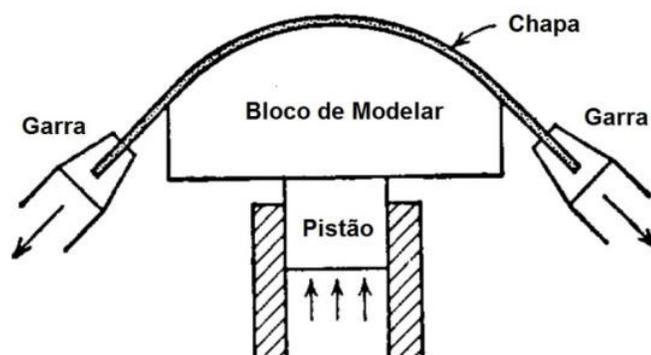


Figura 3.3 - Operação de conformação por estiramento. (DIETER e BACON, 1988)

Além de ser amplamente utilizada na indústria automobilística, a conformação por estiramento é utilizada para produzir peças aeroespaciais de aço, níquel, alumínio e ligas de titânio e outras resistentes ao calor e metais refratários, como os perfis de chapas de revestimento da fuselagem e da cabine de piloto dos aviões. Algumas dessas peças são difíceis ou impossíveis de se produzir por meio de outros métodos, como por exemplo, o anel da turbinas a gás feito da liga de titânio mostrado na Figura 3.4 (BRAGA, 2009) e (ASM, 1993).

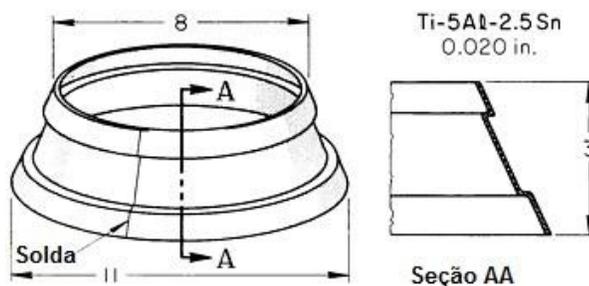


Figura 3.4 - Anel da turbinas a gás produzido pelo processo de estiramento. Dimensões dadas em polegadas. (ASM, 1993)

No exemplo acima, para o anel da turbina não perder sua característica geométrica circular após conformado e soldado, devido ao retorno elástico, um dispositivo é utilizado de tal forma que o *blank* é estirado em forma helicoidal em torno de um bloco de modelar circular com o diâmetro um pouco menor do que o anel acabado. Ao fim do processo, quando o *blank* é removido a partir do bloco de modelar, o retorno elástico é apenas suficiente para permitir a soldadura sem perder sua característica geométrica circular. A Figura 3.5 ilustra o processo descrito.

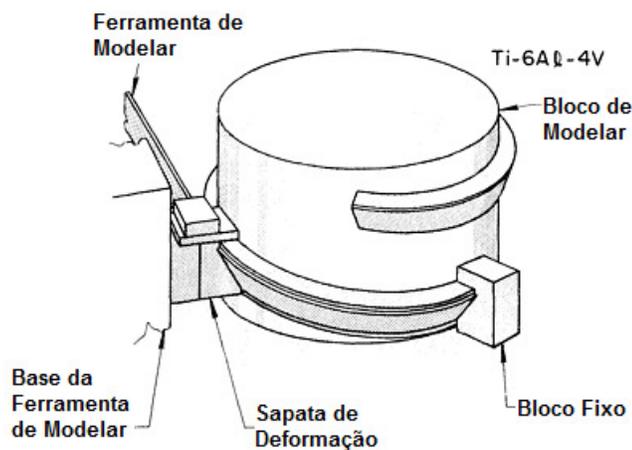


Figura 3.5: Dispositivo para estiramento de formas circulares (ASM, 1993).

Comparando a conformação por estiramento com os outros processos convencionais de conformação em prensas, observa-se vantagens valiosas por este processo como a pouca probabilidade de fivelas e rugas na peça, devido ao estiramento ser feito em toda a área da peça, além aumentar a resistência à tração de modo uniforme aproximadamente em 10%. Também é notório o aumento da dureza da peça estirada, em torno de 2%. Além deste benefício mecânicos, os moldes usados no processo de estiramento geralmente são feitos de de

materiais baratos, como madeira, plástico, ferro fundido ou aço de baixo carbono, e são cerca de um terço do custo de estampagem convencional (ASM, 1993).

Contudo, também se observa algumas restrições como a capacidade limitada de formar ângulos reentrantes, raramente é usado para operações progressivas, em algumas aplicações, especialmente em embalagens de estiramento, o processo é mais lento do que os da estampagem convencional. Além destes detalhes técnicos do processo ou característicos das peças, metais com elasticidade e resistência à tração muito próxima, como o titânio, exigem a utilização de equipamentos automáticos para a determinação da quantidade de tensão para obter resultados uniformes (ASM, 1993).

### **3.1.2 Estampagem: Processo de Dobra**

O dobramento (*bending*) é um processo relativamente simples e há muitos anos aplicado na indústria. A importância deste processo reporta-se a aplicação de componentes geometricamente simples até estruturas complexas quando se pensa nas estruturas de nossas indústrias na área de transporte (por exemplo: fabricação de ônibus ou navios). Se o material é deformado abaixo de sua temperatura de recristalização o mesmo é submetido, inicialmente, a deformações elásticas, depois ocorrem as deformações plásticas até o momento da ruptura. Durante o processo de dobramento ocorrem muitas vezes fenômenos indesejados como a variação de secção ou a alteração da espessura, além do retorno elástico (SCHAEFFER, 2004)

O dobramento é usualmente definido como a deformação plástica de uma chapa metálica ao longo de uma linha reta. Na maioria dos casos tem-se uma deformação plana localizada no canto da dobra. Outras formas de aplicação da conformação por dobramento é a operação para obter curvatura cilíndrica ou cônica em rolos (calandras). Outras variedades de dobramento são o enrolamento (*curling*), o recravamento e agrafamento (*hemming*) e o repuxamento (*spinning*). Tem-se, ainda, o dobramento por giro, caso do dobramento contínuo em rolos de vários estágios (*roll forming*) para produzir, calhas, tubos e perfis (MARCONDES, 2009).

O dobramento não é somente usado para produzir geometrias funcionais tais como bordas, flanges, curvas, emendas e corrugação, mas também para aumentar a rigidez das peças aumentando o momento seccional transversal de inércia (MARCONDES, 2009) e (SCHAEFFER, 2004).

O ferramental utilizado no processo de dobramento constitui-se de prensa mecânica ou hidráulica, matriz e punção. Na prensa mecânica, o cabeçote móvel é acionado por manivela ou excêntrico por meio do trem de engrenagens, permitindo seu rápido deslocamento. Na prensa hidráulica, o cabeçote é deslocado pelo movimento de atuadores hidráulicos de dupla ação. Matrizes e punções podem ter diferentes formas geométricas, dependendo do formato desejado e da operação executada, conforme mostra Figura 3.6 (BRAGA, 2009).

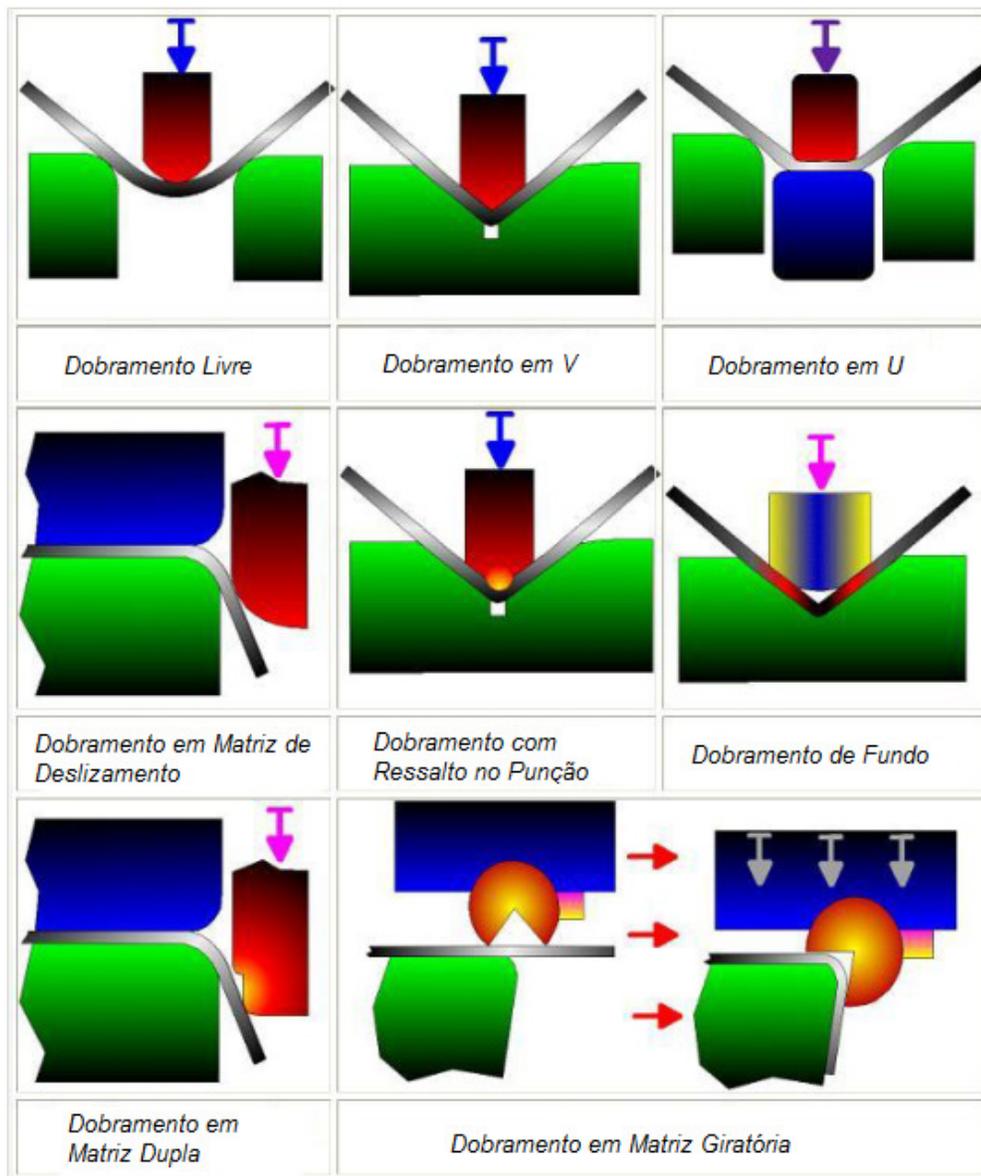


Figura 3.6 - Tipos de dobramentos em matrizes. (MARCONDES, 2009)

### 3.1.3 Estampagem: Processo de Corte

O processo corresponde à obtenção de formas geométricas determinadas, a partir de chapas, submetidas à ação de uma ferramenta ou punção de corte, aplicada por intermédio de uma prensa que exerce pressão sobre a chapa apoiada numa matriz (Figura 3.7). No instante em que o punção penetra na matriz, o esforço de compressão converte-se em esforço de cisalhamento e ocorre o desprendimento brusco de uma parte da chapa. (CHIAVERINI, 1977)

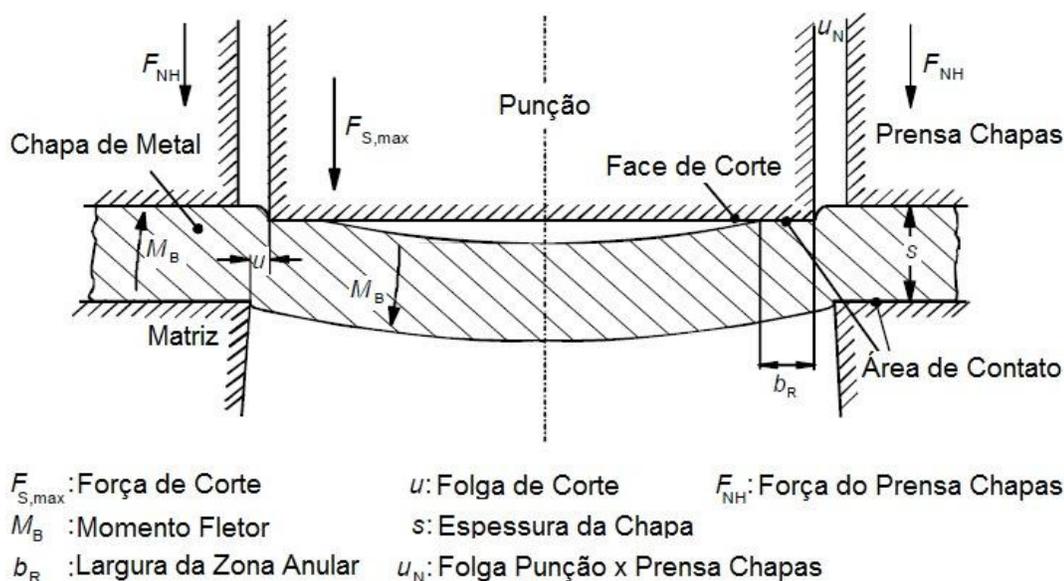


Figura 3.7: Operação de corte em chapa (DOEGE† e BEHRENS, 2010)

Para Schaeffer (1999), o processo de corte por cisalhamento é um processo de separação, o qual geralmente é tratado juntamente com os processos de estampagem por terem muito em comum. O processo de corte está classificado na norma DIN 8588.

O corte é efetuado por dois cantos afiados que passam um em frente do outro com uma folga entre eles. Essa folga é determinada pelo material e a espessura da chapa a ser cortada. Para o projeto de uma ferramenta de corte e a escolha da prensa adequada é necessário saber a força máxima  $F_{S,max}$  que vai ocorrer durante o corte. Esta força pode ser calculada usando fórmula 3-1.

$$F_{S,max} = k_s \times l_s \times S \dots [N] \quad (3-1)$$

Onde:

- $k_s$ : Resistência do material contra o corte [ N/mm<sup>2</sup> ];
- $l_s$ : Comprimento da linha de corte [ mm ];
- $s$ : Espessura da chapa cortada [ mm ].

Segundo Schaeffer (2004) quanto à este processo, o mesmo pode ser classificado em:

- a) Técnica de Corte Convencional: Produz peças com valores médios de tolerâncias, com média frequência de batidas de prensa;
- b) Técnica de Corte de Alta Velocidade: Produz peças com tolerâncias mais ajustadas que o processo anterior, com até 180 batidas por segundo;
- c) Técnica de Corte Fino: produz peças de chapas de 1 até 10 mm de espessura com tolerâncias muito boas e alta qualidade da superfície cortada.

#### 4 ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS

A busca incessante por novas tecnologias aplicadas a conformação mecânica dos materiais, desencadeou novas formas de exercer a estampagem em chapas, com características singulares, como as da Estampagem Incremental (*Incremental Sheet Forming – ISF*), que se adaptam muito bem a algumas das novas exigências do mercado, tais como a agilidade na fabricação de protótipos, a produção de pequenas séries de componentes e a obtenção de peças que, por possuírem elevada complexidade geométrica, se tornariam inviáveis por processos convencionais (PATRÍCIO, MARTINS, *et al.*, 2010), (BAMBACH, HIRT e AMES, 2004).

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).

Porém, após mais de 20 anos da idéia de Leszak ser patenteada, começou a despertar interesse e apareceu em algumas literaturas científicas. Razão esta, foi às limitações da tecnologia CNC em fresadoras e tornos da época. No final dos anos 80, a tecnologia CNC avançou e a produção ficou mais complexa, com o aumento da demanda por produtos num prazo mais rápido. Deste modo, as empresas de manufatura precisaram reduzir o tempo de desenvolvimento de produto e custo, criando meios mais eficientes de produzir protótipos num curto prazo. Em face disto, a tecnologia ISF usando uma máquina CNC para a conformação de chapas de metal para a prototipagem rápida, se tornou um dos temas importantes em conferências internacionais, e com isso alguns estudos preliminares começaram a ser apresentados a partir dos anos 90 (SY, 2009).

Nos últimos três anos o processo de estampagem incremental tem tido um grande número de pesquisas relacionadas principalmente ao entendimento dos mecanismos de

deformação, da respostas de novos materiais ao processo, da configuração multi-estágio para obtenção de geometrias com maiores ângulos de trabalho e a ampliação da sua gama de aplicações (PATRÍCIO, 2012).

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).

#### 4.1 Descrição do Processo de Estampagem Incremental de Chapas

Em ISF, a chapa a ser conformada (*blank*) é presa em um suporte retangular móvel, independente do formato final da chapa, que pode efetuar movimentos controlados na direção vertical, ou seja, paralelamente ao eixo Z, e nas direções horizontais de X e Y de um sistema CNC. Enquanto a estampagem estiver acontecendo, elementos de fixação distribuídos em torno da chapa evitam que a mesma se movimente, criando assim uma deformação plástica na chapa. Acoplada ao eixo árvore (*spindle*) de um dispositivo CNC, uma ferramenta de cabeça 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 (Figura 4.1) (HIRT, JUNK, *et al.*, 2005).

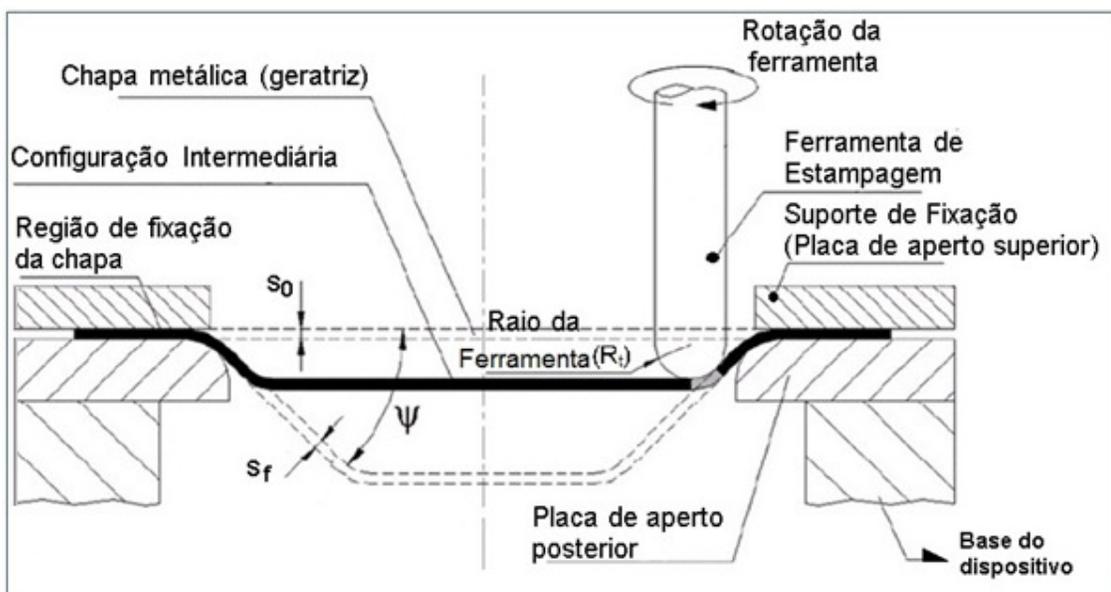


Figura 4.1 - Princípio do processo de estampagem incremental (MARTINS, BAY, *et al.*, 2008)

A trajetória de deformação da ferramenta é baseada em tecnologia de NC, que é gerada a partir do sistema CAM<sup>1</sup> normal. O produto deste processo pode ser feito diretamente de um modelo de CAD<sup>2</sup> 3D de produto acabado, sem qualquer tipo matriz. (SY, 2009).

O grande diferencial da ISF é que a estampagem pode ser realizada com matriz bastante simplificada ou mesmo sem matriz. O processo parece ser muito interessante para pequenos volumes de produção e prototipagem rápida de componentes de chapas (CAVALER, 2010), (SY, 2009). Adicionalmente, o processo permite ir além dos limites de deformação do processo convencional (ARRUDA, 2009). Outra situação é quando um determinado produto está em desenvolvimento e é necessária a fabricação de um protótipo para a realização de análises funcionais e de *design* (SENA, 2009).

#### 4.2 Vantagens e Desvantagens da Estampagem Incremental

A partir de dados CAD, é possível produzir protótipos de chapas de metal rapidamente, ou obter-se pequenos lotes de produção, com um mínimo de ferramentas especializadas. Deste modo, (JESWIET, DUFLOU, *et al.*, 2005) citam as vantagens técnicas e econômicas da modalidade SPIF do processo a ISF:

- Não há necessidade de matrizes negativas e/ou positivas, o que caracteriza *dieless*<sup>3</sup> previsto por Leszak (1967);
- Mudanças no projeto dos tamanhos das peças podem ser facilmente e rapidamente acomodadas, proporcionando um alto grau de flexibilidade.
- Produção de protótipos de chapa de metal de forma mais fácil;
- Como a zona de deformação plástica é pequena, devido à natureza incremental do processo, contribui para o aumento da conformabilidade das chapas de metais, inclusive as com baixa conformabilidade. Por conta desse pequeno contato, não há o aumento das forças de deformação;
- Fresadora CNC convencional pode ser usada para este processo. Neste caso, Arruda (2009), cita que estão sendo produzidos fresadoras CNC cada vez mais compactas, silenciosas e baratas. Além disso, pode ser considerado um processo de alta eficiência energética;

---

<sup>1</sup> *Computer Aided Manufacturing* - Manufatura Assistido por Computador

<sup>2</sup> *Computer Aided Design* - Desenho Assistido por Computador

<sup>3</sup> Sem matriz de apoio.

- O tamanho da peça é limitado apenas pelo tamanho da máquina. As forças de estampagem são extremamente reduzidas e independentes do tamanho da peça, relacionadas apenas a ferramenta de ISF (ARRUDA, 2009);
- A operação é livre de ruídos;
- Processo sem geração de cavaco, produzindo um mínimo desperdício de material na fabricação (MCLOUGHLIN, 2005) *apud* (CAVALER, 2010);
- O ferramental (punção/matriz) é de baixo custo e facilmente fabricáveis (ARRUDA, 2009). Além disso, por utilizar menos materiais para construção das ferramentas, os gastos com produtos siderúrgicos, como por exemplo, matrizes, são também reduzidos (HIRT, AMES e BAMBACH, 2003), (INGARAO, AMBROGIO, *et al.*, 2012);
- As peças produzidas possuem restrições geométricas devido ao ângulo da ferramenta, porém a flexibilidade do processo para produzir uma grande variabilidade de peças traz compensações. Variações na dimensão final da peça devido ao retorno elástico existem, mas algoritmos de compensação e alterações do processo já foram desenvolvidos para compensar o erro;
- A ISF também permite atingir grandes taxas de deformação do material, possibilitando e viabilizando o trabalho com ligas consideradas de baixa conformabilidade. Também permite obter rebaixos e estampos profundos com mais facilidade (ARRUDA, 2009).

A maior conformabilidade é observada em peças geradas através da ISF, atingindo profundidades maiores do que as peças obtidas por processos convencionais. As pequenas zonas de deformação plástica e a natureza incremental do processo contribuem para o aumento desta propriedade, tornando mais fácil a deformação (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005).

Também é relatado na literatura a redução do tempo de preparação de máquina (*setup*), haja vista que para diferentes peças é possível utilizar as mesmas ferramentas, o mesmo dispositivo prensa-chapas e os mesmos zeramentos dos sistemas de coordenadas (CASTELAN, 2010).

A utilização de *softwares* CAD/CAM parametrizados torna este processo flexível, haja vista que as alterações feitas no modelo CAD, serão repassadas de imediato ao modelo

CAM, e, por conseguinte, no programa do código G, responsável pelo comando CNC que desloca a ferramenta de estampar sobre a chapa.

Todavia, (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005)e (MICARI, AMBROGIO e FILICE, 2007), citam em seus estudos as desvantagens do processo:

- a) A principal desvantagem é o tempo de estampagem é muito maior do que processos convencionais, limitando o processo a pequenos lotes de produção.
- b) A formação de ângulos retos ( $90^\circ$ ) não é alcançada, contudo, usando uma estratégia de estampagem multiestágio podem ser obtidos ângulos de parede ( $\psi$ ) maiores ( $\psi = 81^\circ$ ) do que feitos em uma única etapa. (KITAZAWA e NAKAJIMA, 1999).
- c) Máquinas fresadoras não são geralmente projetadas para grandes carregamentos no *spindle*, então há perigo da máquina vir a se danificar durante as operações de Estampagem Incremental (CAVALER, 2010).
- d) Dependendo da geometria produzida, as regiões externas da chapa que não sofrem a ação do punção se deformam após o relaxamento dos fixadores (devido ao acúmulo de tensões residuais), causando discrepâncias dimensionais (AMBROGIO, DE NAPOLI, *et al.*, 2005) (ALLWOOD, BRAUN e MUSIC, 2010), porém já existem algoritmos em desenvolvimento para compensar este problema (CASTELAN, 2010);

Essa última desvantagem tornaria a estampagem incremental um processo não adequado para a fabricação de peças de precisão apurada. Essa não-adequação pode ser reduzida, através da alteração dos parâmetros relacionados à ferramenta: diâmetro, velocidade de avanço (X,Y), variação do passo incremental (Z), estratégias de movimentação e utilização de tipos diferentes de lubrificantes(HIRT, AMES, *et al.*, 2004).

### 4.3 Tipos de Estampagem Incremental

O processo de estampagem incremental pode ser dividido essencialmente em duas famílias, dependendo do número de pontos de contato entre ferramenta, chapa, e matriz (quando presente). Por isso, é possível distinguir a estampagem incremental de ponto simples

(*SPIF - Single-point Incremental Forming*), e de ponto duplo (*TPIF – Two Points Incremental Forming*) (ATTANASIO, CERETTI e GIARDINI, 2006).

Contudo, para alcançar formas precisas na estampagem incremental, se utiliza suporte inferior específico no formato desejado, podendo ser com simetria axial ou assimétrico, indicado para obtenção de superfícies complexas e orgânicas. Este suporte, por sua vez, pode ser positivo (ressalto) ou negativo (cavidade). (ALLWOOD, BRAMLEY, *et al.*, 2005), (HIRT, JUNK, *et al.*, 2005). A Figura 4.2 a seguir, ilustra as modalidades mencionadas.

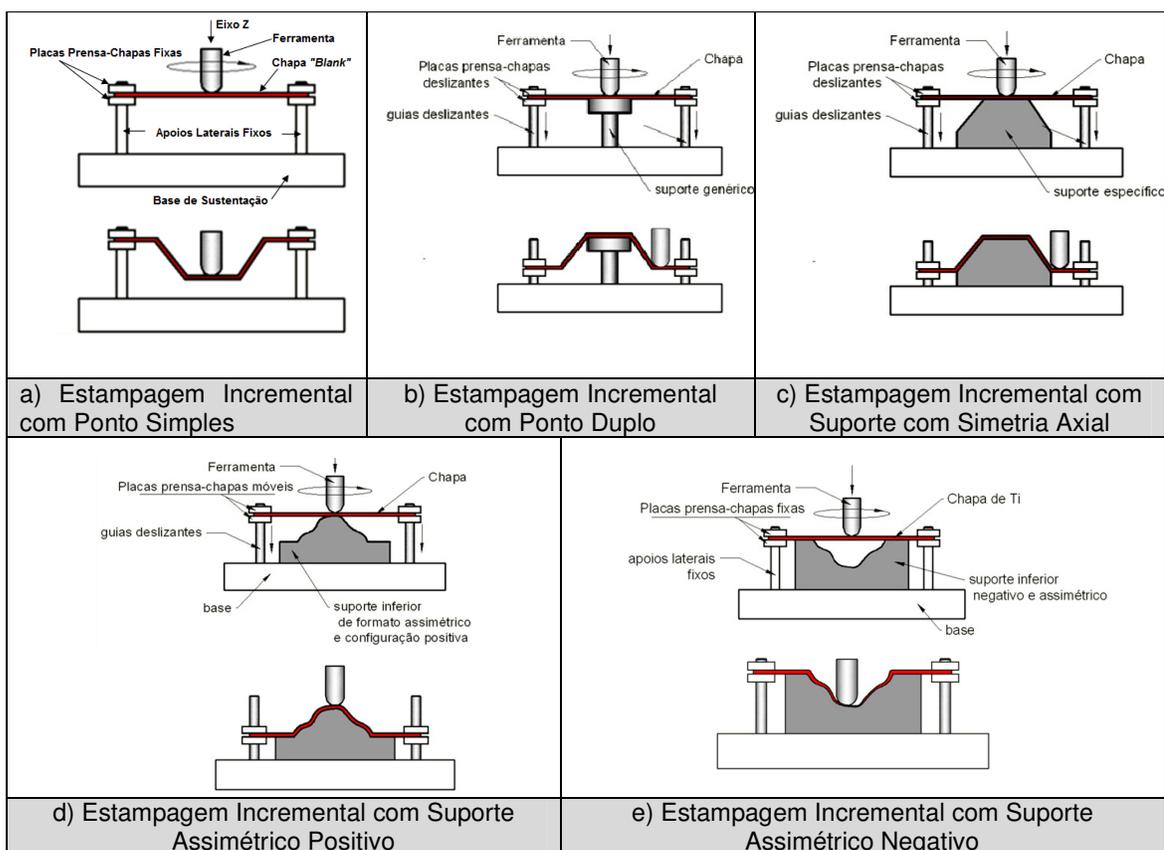


Figura 4.2 - Modalidades da estampagem incremental. Adaptado de (CASTELAN, 2010)

#### 4.3.1 Estampagem Incremental com Ponto Simples (SPIF)

A estampagem incremental de ponto simples (ou de ponto único), definida pela sigla em inglês *SPIF - Single-point Incremental Forming*, provou ser viável para a produção de pequenos lotes de peças de chapa, em uma ampla gama de materiais e formas geométricas, por um grupo de cientistas internacionais em 2005 (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005).

Os trabalhos de (HUSSAIN, GAO, *et al.*, 2009) e (DUFLOU, VERBERT, *et al.*, 2008), definem o processo SPIF como uma chapa plana de metal, presa num dispositivo móvel, que desliza paralelamente ao eixo Z. Uma ferramenta com ponta esférica controlada por CNC desliza sobre a chapa, e de forma gradativa, por meio de incrementos negativos em Z, deformando plasticamente a chapa, transformando-a em uma geometria tridimensional (Figura 4.3), sem a necessidade de uma matriz de apoio com alto custo.

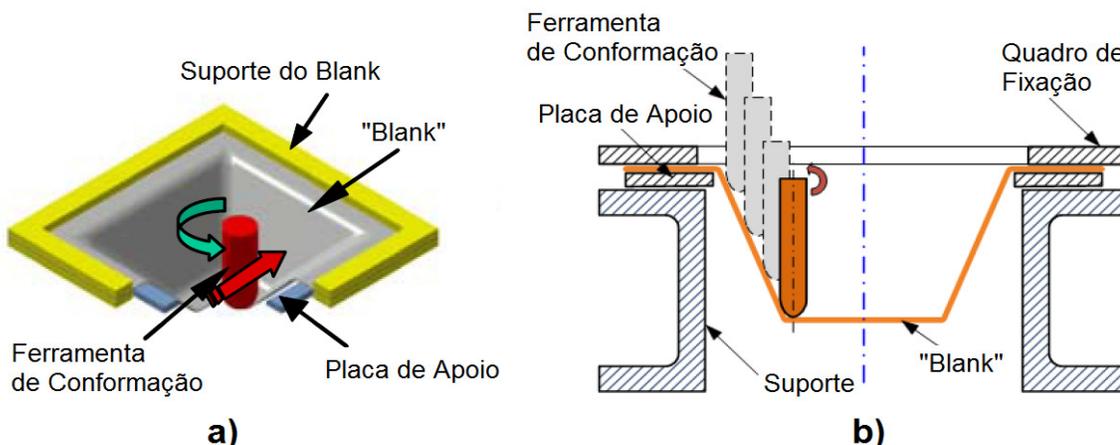


Figura 4.3: Processo de Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF). a) Adaptado de (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005). b) (SY, 2009)

Pelo fato de não utilizar suporte inferior, esta modalidade é comumente chamada de *dieless* – “sem matriz”, como previsto por Leszak em 1967. Por conta dessa característica de conformação *dieless*, (HUSSAIN, GAO, *et al.*, 2009) e (DUFLOU, VERBERT, *et al.*, 2008) afirmam em seus trabalhos, que esta modalidade tem potencial para reduzir significativamente o custo de pequenos lotes e protótipos, como já citado por (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005), haja vista que o tempo de entrega e custo de ferramentas pode ser evitado.

(CASTELAN, 2010), acrescenta que por não haver ponto de apoio inferior, o formato da peça final é determinado somente pelo deslocamento da ferramenta nos 3 eixos (X, Y e Z). A chapa é fixada em suportes laterais que mantém altura constante em relação à base. (HUSSAIN, DAR, *et al.*, 2007), cita em seus estudos, que estes elementos de fixação, evitam o movimento da chapa durante o processo, culminando na sua deformação plástica.

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

A estampagem incremental de dois pontos de apoio, também designada pela sigla inglesa *TPIF – Two Points Incremental Forming*, utiliza além da ferramenta de conformação, um suporte inferior rígido, localizado sob a chapa. Este suporte (que pode ser específico ou semi-específico), é utilizado para expandir as possibilidades geométricas e também melhorar a precisão das peças, ou seja, a correspondência entre peça virtual e peça real (ATTANASIO, CERETTI e GIARDINI, 2006).

A utilização do suporte inferior é particularmente importante para geometrias de forma livre e assimétricas. Como os implantes têm justamente este tipo de geometria, a TPIF se torna a modalidade ideal para a sua fabricação. A Figura 4.4 mostra a TPIF utilizando suporte inferior semi-específico.

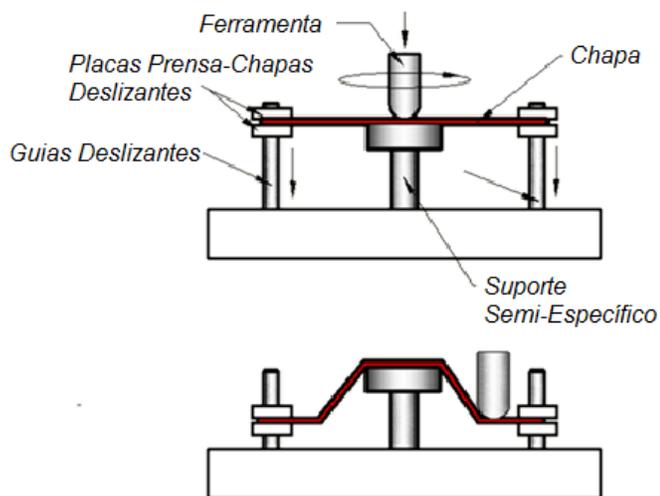


Figura 4.4: Estampagem Incremental com Ponto Duplo (CASTELAN, 2010)

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

Na modalidade SPIF convencional há limitações com a formação máxima do ângulo de parede ( $\psi$ ), distribuição de espessura e precisão geométrica do componente (MALHOTRA, BHATTACHARYA, *et al.*, 2011).

A fim de aumentar os limites de estampagem, intimamente influenciados pelo ângulo de parede ( $\psi$ ), a execução da estampagem incremental em múltiplos passes contribui na ampliação dos limites de conformação para uma variedade de geometrias de peças. A

realização de passes de estampagem intermediários, incrementando o ângulo de parede ( $\psi$ ), pode aumentar o valor final do ângulo ( $\psi$ ), conseqüentemente, aumentando o encruamento, sem ocasionar o rompimento da chapa (DUFLOU, VERBERT, *et al.*, 2008).

A Figura 4.5 apresenta uma estampagem realizada em quatro etapas. À medida que as etapas ocorrem, o ângulo de parede ( $\psi$ ) aumenta, enquanto a espessura ( $s_1$ ) diminui. O detalhe 'A' mostra a ocorrência do encruamento, que aumenta conforme aumenta o ângulo de parede ( $\psi$ ), provocando o aumento da rigidez da chapa, ou seja, ela se torna mais resistente à deformação. Esta mudança no aspecto microscópico dos grãos faz com que a chapa se torne mais tenaz, com isso, exigindo uma maior força para deformar plasticamente a chapa, por conseguinte, prolongando o limite de ruptura (BAMBACH, 2008) *apud* (CASTELAN, 2010).

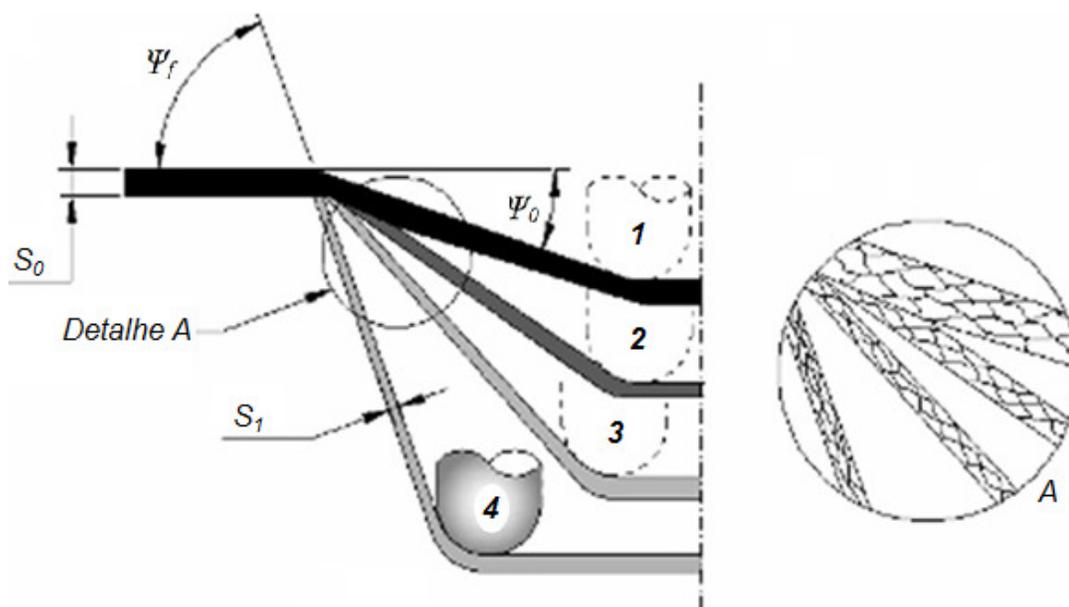


Figura 4.5: Estampagem em múltiplos passes e o efeito do encruamento dos grãos, exemplificado no detalhe A, fenômeno que causa o aumento da resistência ao escoamento (CASTELAN, 2010)

Conforme estudos relatados (DUFLOU, VERBERT, *et al.*, 2008), além do encruamento, a redistribuição de materiais de outras áreas da peças para as áreas da parede, por meio da utilização de múltiplos passes, altera o escoamento do material, resultando num aumento da conformabilidade da chapa.

A Figura 4.6 ilustra os testes práticos realizados (DUFLOU, VERBERT, *et al.*, 2008), e evidencia 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.

De acordo com os dados da Figura 4.6, na estampagem por múltiplos passes 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.

Baseado na 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.

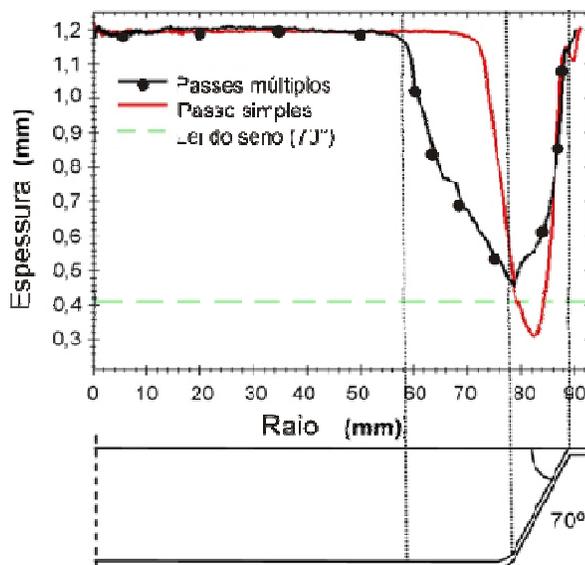


Figura 4.6: Variação da espessura do cone estampado (DUFLOU, VERBERT, et al., 2008).

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

Na estampagem incremental existem valores máximos de ângulos que possibilitam a conformação plástica do material sem ocasionar fraturas.

No caso do SPIF, vários estudos apontam, para um ângulo de parede ( $\psi$ ) de  $65^\circ$  em média, sem que ocorra a ruptura ou, no mínimo, uma diminuição drástica da espessura da chapa, causando uma baixa resistência mecânica localizada (KOPAC e KAMPUS, 2005).

O ângulo de parede ( $\psi$ ) de estampagem é determinado por uma relação entre a espessura da chapa e seu ângulo de conformação, chamada de Lei do Seno (*Sine Law*), expressa pela equação 4-1.

$$S_1 = S_0 \times \sin(90 - \psi) \dots [N] \quad (4-1)$$

Onde  $S_0$  é a espessura original da chapa,  $S_F$  é a espessura da chapa medida em um determinado estágio do processo de conformação e o ângulo de parede ( $\psi$ ) da chapa neste mesmo ponto. A Figura 4.7 ilustra as variáveis citadas na equação 4-1.

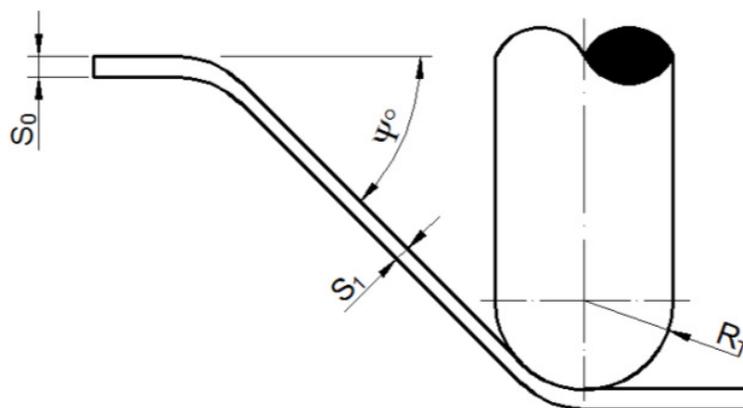


Figura 4.7 Correlação entre redução da espessura da chapa e dobramento. A espessura final  $S_1$  depende da espessura inicial  $S_0$  e do Ângulo de Parede ( $\psi$ ). Adaptado de (CAVALER, 2010).

A Lei do Seno, entretanto, não prevê como ocorre a variação de espessura ao longo do processo de estampagem. A Figura 4.6 mostra claramente a diferença entre a previsão teórica de espessura obtida pela Lei do Seno e a espessura medida através do procedimento experimental.

#### 4.5 Máquinas para Estampagem Incremental de Chapas

Após os trabalhos de Powell e André em Cambridge no início de 1990, Matsubara e Kitazawa, em 1994 iniciaram no Japão importantes estudos sobre ISF, desenvolvido originalmente para as necessidades da indústria automobilística como um método para prototipagem e fabricação de produtos a partir de chapas de metal para pequenas séries (ALLWOOD, HOUGHTON e JACKSON, 2005).

Esta tecnologia de Estampagem NC sem Matriz, é atualmente comercializada pela empresa japonesa *Amino Corporation* (CAVALER, 2010). A Figura 4.8 ilustra a máquina desenvolvida e alguns produtos obtidos.

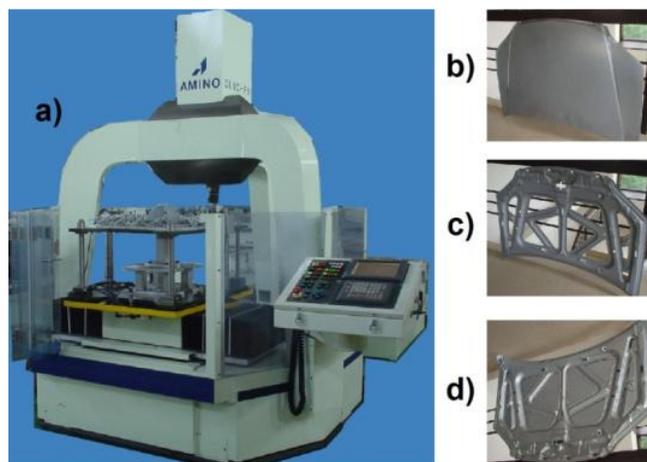


Figura 4.8 - a) Máquina dedicada para ISF desenvolvida pela Amino Corporation; b) Capa externa de um capô de carro; c) Capa interna de um capô de carro; d) Montagem do capô de carro. (AMINO, 2006)

No Reino Unido, precisamente na Universidade de Cambridge também foi desenvolvida uma máquina dedicada a ISF (Figura 4.9).

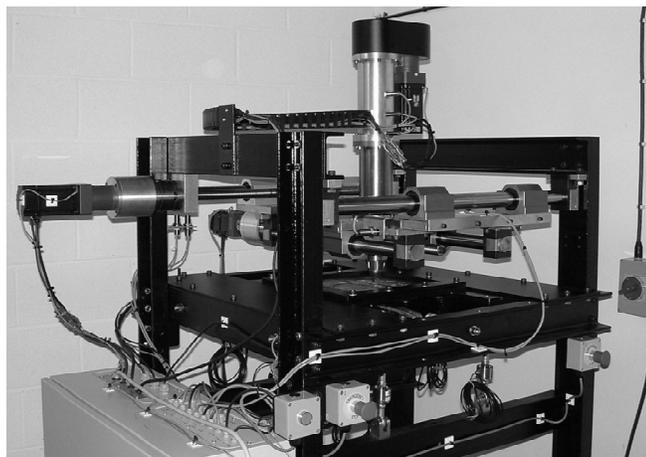


Figura 4.9 - Máquina para ISF de Cambridge. (ALLWOOD, HOUGHTON e JACKSON, 2005)

A máquina dedicada a ISF da Figura 4.9, possui uma área de trabalho útil de aproximadamente 300 mm x 300 mm. Daleffe (2008) cita em seu trabalho que durante a estampagem do processo, o limite do Ângulo de Parede ( $\Psi$ ) não exceda 70°. Contudo, se aplicado em toda a extensão da chapa, requereriam movimento no eixo Z de até 400 mm. Com esta profundidade no eixo Z, se faz necessário uma poderosa árvore, para suportar as altas deformações para uma máxima força horizontal, conforme previstas em literatura. Deste

modo, para não ter uma árvore custosa e que inviabilizasse o projeto, especificou-se o movimento vertical em 100 mm. Também foi especificado o cone máximo de 67,5° para o teste inicial (ALLWOOD, HOUGHTON e JACKSON, 2005).

Castelan (2007), evidencia em seu trabalho máquinas CNC (Centros de Usinagem), utilizadas para executar a estampagem incremental, em suas diversas modalidades. Já (SENA, 2009), credita a aplicação da estampagem incremental em máquinas tridimensionais de comando numérico como o seu principal modo de utilização, consistindo na utilização do *hardware* e *software* de uma fresadora CNC. (SY, 2009) explicita em sua tese a utilização de máquina CNC de três eixos usada nos experimentos com chapas de metal, conforme mostra a Figura 4.10.



*Figura 4.10 - Máquina CNC MAZAK VTC-300C três eixos utilizada na estampagem incremental de chapas de metal. (SY, 2009)*

Além da aplicação de ISF para chapas de metal utilizando máquinas CNC (CAVALER, 2010), (CASTELAN, 2010), (DALEFFE, 2008), (INGARAO, AMBROGIO, *et al.*, 2012), novos estudos (FRANZEN, KWIATKOWSKI, *et al.*, 2009) e (MARQUES, 2010) utilizaram a máquina CNC na aplicação da estampagem incremental em polímeros.

Embora o uso de uma máquina CNC seja atraente devido ao baixo custo adicional do início da operação, estas máquinas geralmente não são projetadas para grandes carregamentos no eixo árvore, possibilitando danificação da máquina durante as operações de estampagem incremental. Também se observa que estes tipos de equipamento não são geralmente munidos de instrumentação para medir as forças nos três eixos na ponta da ferramenta e, a mesa de trabalho da máquina CNC é geralmente sólida, então há um limitado acesso ao lado reverso da peça de trabalho (ALLWOOD, HOUGHTON e JACKSON, 2005).

Devido ao atual desenvolvimento das máquinas-ferramentas controladas numericamente e dos *softwares* CAD (desenho assistido por computador) e CAM (manufatura assistido por computador) este processo torna-se extremamente flexível e com um custo relativamente baixo devido a não utilização de ferramentas(TIBURI, 2007).

#### 4.5.1 Processo de Estampagem Incremental de Chapas por meio de Robôs

Lamminen (2005) descreve em seu trabalho um estudo de estampagem incremental com um robô industrial para estampagem incremental de uma superfície convexa. Para este trabalho, foi usado um robô industrial com braço alcance de 2,55 m e força máxima de 1750 N, um suporte para a fixação da chapa (Figura 4.11). Conforme há a deformação da chapa causada pelo movimento do braço, o suporte se movimenta verticalmente para baixo impulsionado apenas pela gravidade. Todo o movimento do robô é controlado por um dispositivo de controle CNC. O programa contém instruções predeterminadas para controlar o robô, aproveitando os seis graus de liberdade, que são necessários para colocar a ferramenta em um ângulo adequado em cada ponto. A ferramenta é colocada de tal forma que a força de deformação é dirigida perpendicularmente contra a direção da espessura da chapa de metal. As instruções para controlar o caminho do movimento do dispositivo de prensagem são geradas com base no modelo CAD 3D que define a forma tridimensional da peça (LAMMINEN, TUOMINEN e KIVIVUORI, 2005).

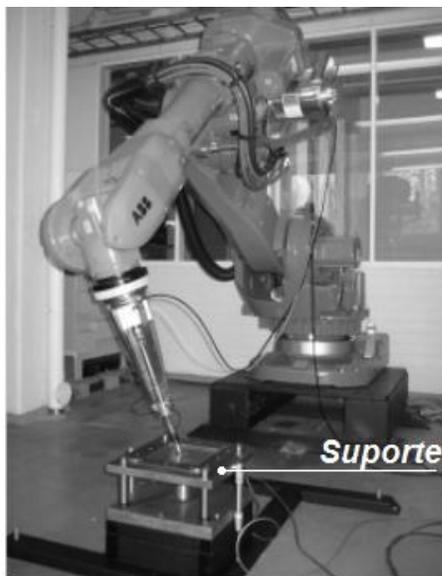


Figura 4.11 - Robô usado na ISF. (LAMMINEN, TUOMINEN e KIVIVUORI, 2005).

Em um comparativo da estampagem por meio de robôs com máquinas de usinagem ou máquinas dedicadas a ISF as diferenças são consideráveis. Tal evidência é devido à flexibilidade no processo de fabricação proporcionada pelo robô, pois o mesmo possibilita a combinação de várias fases da cadeia de produção para a mesma célula de fabricação. Na mesma célula de fabricação, um único robô industrial pode apanhar a chapa e posicioná-la, efetuar o corte com laser e tratamento de superfície (LAMMINEN, TUOMINEN e KIVIVUORI, 2005).

Considerando um máquina CNC de 3 eixos, é pertinente citar que um robô com 6 graus de liberdade (eixos) permite a conformação em processos mais complicados, apenas alterando o ângulo de entrada da ferramenta de conformação (LAMMINEN, TUOMINEN e KIVIVUORI, 2005).

Enquanto os trabalhos citados anteriormente de (LAMMINEN, TUOMINEN e KIVIVUORI, 2005) utilizaram um único robô, (MEIER, BUFF, *et al.*, 2009) desenvolveram estudos sobre ISF com a aplicação de dois robôs, onde o princípio de conformação é baseado nos movimentos sincronizados de dois robôs industriais de seis eixos, cada qual com uma ferramenta simples, sendo uma para a conformação e outra como apoio. Para este trabalho, além de um suporte para a fixação (Figura 4.12 a) da chapa a ser conformada, foram utilizados dois robôs KUKA KR360 (Figura 4.12 a). A forma final produzida se deve ao movimento incremental da ferramenta de conformação contra a chapa, conduzida ao longo do contorno interno programado, seja por camadas paralelas ou em uma trajetória espiral. A ferramenta de apoio (Figura 4.12 b), também feita de uma geometria simples, se mantém na parte de trás da chapa, movendo-se sincronicamente ao longo do contorno exterior, sempre no mesmo nível e em direção oposta a ferramenta de conformação. Dessa forma um espaço predefinido entre as duas ferramentas hemisféricas está sendo gerado.

Tradicionalmente, se tem a estampagem incremental por um único ponto (SPIF) e por dois pontos (TPIF). Com a aplicação de dois robôs na estampagem incremental de chapas, se tem a modalidade como estampagem incremental duplex (DPIF) devido ao deslocamento sincronizado das duas ferramentas em ambos os lados da chapa. (MEIER, MAGNUS e SMUKALA, 2011).

A conformação de chapas por meio de robôs é bastante interessante para prototipagem e produção industrial de pequenos lotes de peças, haja vista a movimentação simples da ferramenta dentro dos 6 graus de liberdade do robô lhe dá alta flexibilidade em relação a formas geométricas alcançáveis (MEIER, BUFF, *et al.*, 2009).

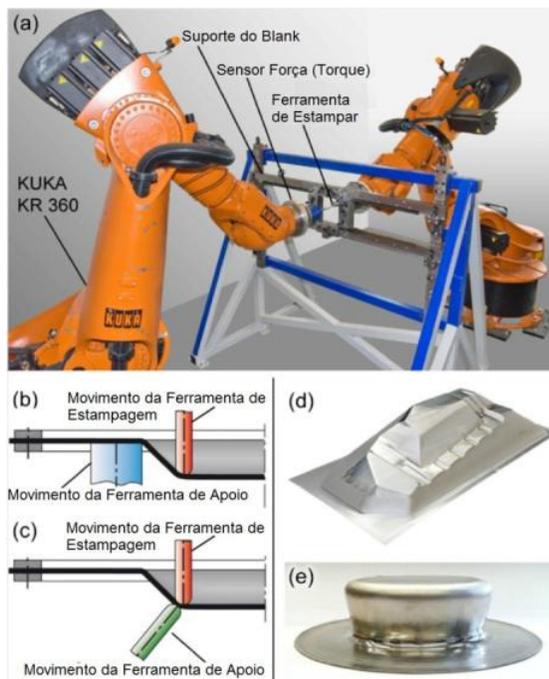


Figura 4.12 - a) Configuração da estampagem por Rôbo, b) Estampagem incremental duplex com suporte periférico (DPIF-P), c) Estampagem incremental duplex com o apoio local (DPIF-L), d) Peças automotivas complexas e) cilindro com ângulo parede inferior a 97°. (MEIER, MAGNUS e SMUKALA, 2011)

#### 4.6 Parâmetros da Estampagem Incremental

Anteriormente foram abordados os equipamentos usados nos estudos sobre este tema. A utilização de robôs (MEIER, MAGNUS e SMUKALA, 2011), até mesmo máquinas dedicadas (ALLWOOD, HOUGHTON e JACKSON, 2005) e (AMINO, 2006), não se equiparam ao número de máquinas-ferramenta CNC (centro de usinagem horizontal 3 eixos) utilizadas na maioria dos trabalhos, onde apresentaram ótima eficiência para a realização do processo de estampagem incremental (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005), (HIRT, JUNK, *et al.*, 2005), (FRANZEN, KWIATKOWSKI, *et al.*, 2009), (HUSSAIN e GAO, 2007), (AMBROGIO, DE NAPOLI, *et al.*, 2005)

(EMMENS e BOOGAARD, 2009) relatam em seu trabalho a utilização máquinas-ferramenta de usinagem para estampar chapas incrementalmente em 1989 pelo japonês H. Iseki, considerado um dos primeiros pesquisadores deste tema, sendo que o controle da máquina era feito manualmente ainda.

Dos parâmetros a serem ajustados na Estampagem Incremental de Chapas, (HIRT, JUNK, *et al.*, 2005) cita em seu trabalho como sendo os mais importantes:

- a) Material, tamanho do Raio da ponta ( $R_T$ ) e forma da ferramenta de estampar,
- b) Material e espessura ( $s$ ) do *blank*;
- c) Estratégia de geração da trajetória da ferramenta, passo vertical ( $\Delta_Z$ ), velocidade da ferramenta ( $V_C$ ) e velocidade de avanço da ferramenta ( $V_{fh}$ );
- d) Força de fixação da geratriz, temperatura, lubrificação.

Destes parâmetros, alguns serão detalhados a seguir.

#### 4.6.1 Velocidade de Avanço

Os valores de velocidade de avanço da ferramenta ( $V_{fh}$ ) encontrados na literatura variaram de 500 a 2000 mm/min (DUFLOU, VERBERT, *et al.*, 2008), (ATTANASIO, CERETTI e GIARDINI, 2006), (HUSSAIN, GAO, *et al.*, 2009) e (INGARAO, AMBROGIO, *et al.*, 2012).

(RAUCH, HASCOET, *et al.*, 2009) comprovaram que quanto maior o avanço ( $V_{fh}$ ), maior será o erro de profundidade (retorno elástico) da chapa conformada, em relação ao modelo CAD correspondente.

A velocidade de avanço ( $V_{fh}$ ) da ferramenta é uma medida direta do atrito entre a ferramenta e a chapa (quantificação do estado de tensões aplicado localmente em uma região da chapa) e tem importante influência sobre a conformabilidade (CASTELAN, 2010).

#### 4.6.2 Profundidade do Passe Vertical

Durante o processo de estampagem incremental, a cada volta, a ferramenta avança negativamente no eixo Z em pequenos passos ( $\Delta_Z$ ).

O tamanho do passo vertical ( $\Delta_Z$ ) tem uma influência significativa sobre a rugosidade da superfície e conformabilidade, observado também por (RAUCH, HASCOET, *et al.*, 2008). Com o aumento do ( $\Delta_Z$ ) o *blank* sofre condições mais elevadas de deformação, com isso, a conformabilidade do *blank* diminui com o tamanho crescente do incremento de passo ( $\Delta_Z$ ), ocasionando discrepâncias geométricas maiores com o modelo CAD. Este aumento também influencia no aumento das forças verticais aplicadas (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005). Contudo, se o passo ( $\Delta_Z$ ), é menor que 0,01 mm, o material é estampado

diversas vezes no mesmo lugar, então há grandes possibilidades do material vir a encruar, ocasionando o cisalhamento da chapa (CERETTI, GIARDINI e ATTANASIO, 2004).

A utilização de um passo ( $\Delta z$ ) constante em uma peça com perfil de calota, causa uma maior rugosidade superficial e diminui a conformidade geométrica (Figura 4.13), comparando-o com a utilização de um passo ( $\Delta z$ ) variável, de acordo com a curvatura da chapa, melhora o processo nestes dois aspectos (ATTANASIO, CERETTI e GIARDINI, 2006).

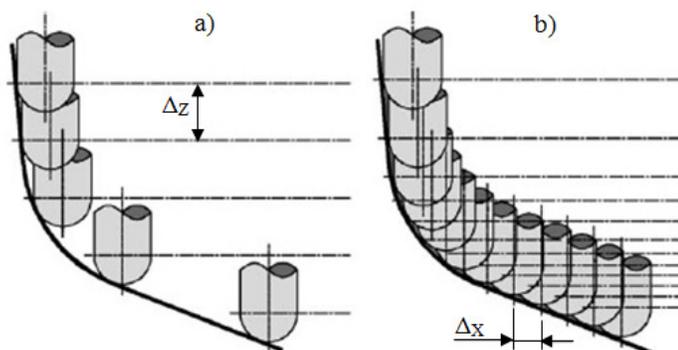


Figura 4.13: a) Passo ( $\Delta z$ ) constante; b) Passo ( $\Delta z$ ) variável, mantendo a mesma distância entre os pontos de contato ( $\Delta x$ ) com a chapa (ATTANASIO, CERETTI e GIARDINI, 2006)

Este controle do passo ( $\Delta z$ ) variável é chamado *Constant Cusp Finishing*, que é continuamente calculado para compensar a inclinação da geometria e manter a rugosidade (altura da crista) constante. Isto produz um acabamento uniforme em toda a superfície estampada (CASTELAN, 2010).

#### 4.6.3 Rotação da Ferramenta

Dentro dos parâmetros que envolvem a estampagem incremental, (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005) ressaltam uma importante diferença na forma como a ferramenta se move enquanto há deformação da chapa.

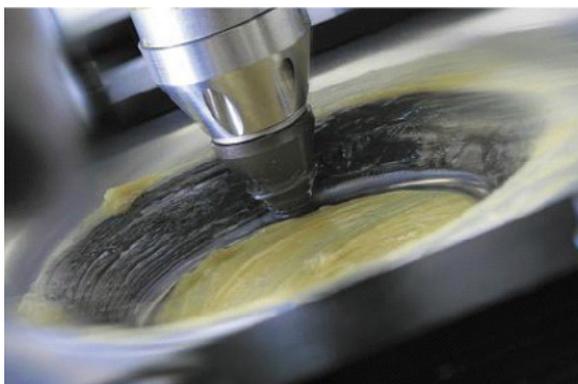
- a) Deslocamento da ferramenta sem rotação ( $v_c = 0$  rpm) do eixo árvore.
- b) Deslocamento da ferramenta com rotação do eixo árvore, variando a velocidade da ferramenta ( $v_c$ ). Controlando a velocidade da ferramenta ( $v_c$ ), se controla o aquecimento da chapa durante a deformação. Com o aumento da temperatura da

chapa, devido ao atrito entre a ferramenta e a chapa, se consegue aumentar a conformabilidade da chapa. Contudo, o aumento da ferramenta resulta em um desgaste maior das superfícies, interferindo na rugosidade da chapa, além de queimar o lubrificante utilizado, ocasionado problemas ambientais (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005).

- c) Deslocamento da ferramenta com a rotação do eixo árvore livre: Em um estudo de caso da fabricação de uma cavidade do forno solar (JESWIET, DUFLOU, *et al.*, 2005) *apud* (CASTELAN, 2010), a rotação do eixo árvore ficou livre, ou seja, a ferramenta rotacionava de acordo com que esta tocava a superfície da chapa, proporcionando menor atrito entre as partes. Esta técnica também foi adotada nos estudos da estampagem incremental em chapas de PVC (FRANZEN, KWIATKOWSKI, *et al.*, 2009), justamente para evitar o atrito entre a ferramenta e a chapa de PVC dos testes. Máquinas dedicadas à estampagem incremental utilizam este método. Nos experimentos práticos realizados para este trabalho, também se utilizou este método.

#### 4.6.4 Lubrificação

O processo de estampagem requer lubrificação na superfície da chapa, pois diminui a fricção entre a ferramenta e a chapa e absorve o calor causado pela deformação. A quantidade do lubrificante depende do material e da espessura da chapa. (CAVALER, 2010). Na Figura 4.14 a seguir é mostrada a ponta de uma ferramenta de estampar em trabalho.



*Figura 4.14: Ferramenta executando um ciclo de ISF, utilizando graxa convencional como lubrificante. (CAVALER, 2010)*

A fim de melhorar o acabamento superficial,(ATTANASIO, CERETTI e GIARDINI, 2006), utilizaram graxa convencional como lubrificante.(JACKSON e ALLWOOD, 2009) empregaram como lubrificante um tipo graxa para alta pressão (Castrol Spheerol L EP2). Já nos trabalhos de (HUSSAIN e GAO, 2007) e (INGARAO, AMBROGIO, *et al.*, 2012) o lubrificante utilizado foi óleo mineral.

A lubrificação é um fator adicional que deve ser levado em conta, independente do tipo de lubrificante. Em todos os casos citados alguma forma de lubrificação é usada, e de modo geral, o tipo de lubrificante não parece ser um fator preponderante no acabamento superficial, mas sim sua aplicação ou não (BRAMLEY, 2001) *apud* (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005).

(ALLWOOD, HOUGHTON e JACKSON, 2005) relatam em seu trabalho que nos experimentos iniciais da máquina dedicada a estampagem incremental construída por eles, observou-se que com a ferramenta sem lubrificação, danos na superfície apareciam logo após o início da deformação. Com a utilização de uma graxa convencional para a lubrificação entre a ferramenta e a superfície da chapa, tais danos não eram constatados.

Para a realização dos experimentos de ISF à quente (AMBROGIO, FILICE e GAGLIARDI, 2012), utilizaram dissulfeto de molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ) como lubrificante nos experimentos para a liga de alumínio AA2024-T3, liga de magnésio AZ31B-O e liga de titânio Ti6Al4V, todas com 1mm de espessura. Trata-se de um composto inorgânico sólido usado para reduzir o atrito entre chapa e ferramenta. Uma camada fina foi pincelada na superfície da chapa antes de cada teste.

#### **4.6.5 Ferramentas para Estampagem Incremental de Chapas**

Normalmente é utilizada uma ferramenta com a ponta semi-esférica fabricada em aço-ferramenta. A ferramenta desliza sobre uma superfície de chapa estampada e causa estiramento e dobramento da chapa (CAVALER, 2010) e (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005).

A ferramenta geralmente é concebida e fabricada pelo usuário, haja vista que ainda não são disponibilizadas no mercado. Com a cabeça da ferramenta sendo semi-esférica (Figura 4.15), se assegura um ponto de contato contínuo entre a chapa e a ferramenta de estampagem (DALEFFE, 2008), (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005).

Para reduzir o atrito durante a estampagem, aumentar a vida útil da ferramenta e aumentar a qualidade superficial da chapa, a ferramenta pode ser feita de metal duro ou ter revestimento em sua superfície esférica.

Com uma fina camada superficial de revestimento nas ferramentas de estampagem, se consegue elevada dureza, mantendo ao mesmo tempo um núcleo com dureza relativamente baixa e boa tenacidade. A superfície de contato da ferramenta possui alta resistência ao desgaste, baixo coeficiente de atrito, alta resistência a esforços de compressão e alta resistência à fadiga (CAVALER, 2010).



Figura 4.15: Ferramentas de metal duro com  $\varnothing 6, 10, 30$  mm, e uma ferramenta de plástico (à direita) (LAMMINEN, WADMAN, *et al.*, 2003)

Os valores de raio da ponta da ferramenta ( $R_T$ ) das ferramentas mais comumente encontrados na literatura variam de 5 a 6mm (DUFLOU, VERBERT, *et al.*, 2008), (DURANTE, FORMISANO, *et al.*, 2009), (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005), (KOPAC e KAMPUS, 2005), (FRANZEN, KWIATKOWSKI, *et al.*, 2009).

(AMBROGIO, FILICE e GAGLIARDI, 2012) utilizaram uma ferramenta de aço rápido com raio da ponta da ferramenta ( $R_T$ ) de 6 mm, onde salientaram que a mesma deve ter boa resistência mecânica em alta temperatura para evitar a sua quebra ou desgaste excessivo durante o processamento do material.

Num estudo comparativo entre a estampagem convencional e a estampagem incremental, (INGARAO, AMBROGIO, *et al.*, 2012) utilizaram uma ferramenta com raio ( $R_T$ ) de 7,5 mm para a execução dos experimentos da ISF.

O raio ( $R_T$ ) afeta a qualidade da superfície e grandes raio da ponta da ferramenta ( $R_T$ ) resultam em superfícies mais lisas bem como as marcas das ferramentas menores.

A utilização de raios da ponta da ferramenta ( $R_T$ ) pequenos provoca concentrações de tensão na zona de deformação da chapa, localizadas abaixo da ferramenta. Raios da ponta da ferramenta ( $R_T$ ) maiores tendem a distribuir a tensão para uma área maior. Conseqüentemente, diminuir o raio da ponta da ferramenta ( $R_T$ ) da ferramenta aumentará o limite de estampagem da chapa. Entretanto, a diminuição do raio da ponta da ferramenta ( $R_T$ ) a tornará mais frágil aos esforços triaxiais que ocorrem na conformação (CASTELAN, 2010).

#### 4.6.6 Tipo de Estratégia da Ferramenta de Conformação

Além dos outros parâmetros citados acima, foram investigadas em literatura diferentes estratégias de usinagem, que combinada com outros parâmetros, pode melhorar a distribuição da espessura da chapa e evitar o rompimento da chapa em ângulos de parede iguais ou próximos a  $90^\circ$ , além diminuir o retorno elástico (efeito *spring back*). Também observou-se que a direção da trajetória de estampagem influencia a conformidade geométrica, semelhança ao modelo CAD original e rugosidade superficial (KOPAC e KAMPUS, 2005).

Salienta-se que as trajetórias usadas pelos sistemas CAM são específicas para a usinagem, e que ainda não existem trajetórias definidas especificamente para estampagem incremental. (RAUCH, HASCOET, *et al.*, 2009),(ROBERT, DELAMÉZIÈRE, *et al.*, 2012).

Nos trabalhos de (BAMBACH, AMES, *et al.*, 2003) *apud* (CASTELAN, 2010), são apresentados quatro estratégias de usinagem (Figura 4.16):

- a) *Convencional (paralela) de contorno*: estratégia em que a movimentação da ferramenta é feita de fora para dentro, ou seja, do maior para o menor diâmetro do cone, descrevendo círculos paralelos decrescentes;
- b) *Cônica de contorno*: a ferramenta move-se do centro para fora, através de incrementos de diâmetro e de passo de profundidade;
- c) *Convencional radial*: de fora para dentro, em direções radiais até o centro da chapa;
- d) *Cônica radial*: de dentro para fora, em direções radiais até a extremidade do desenho da peça.

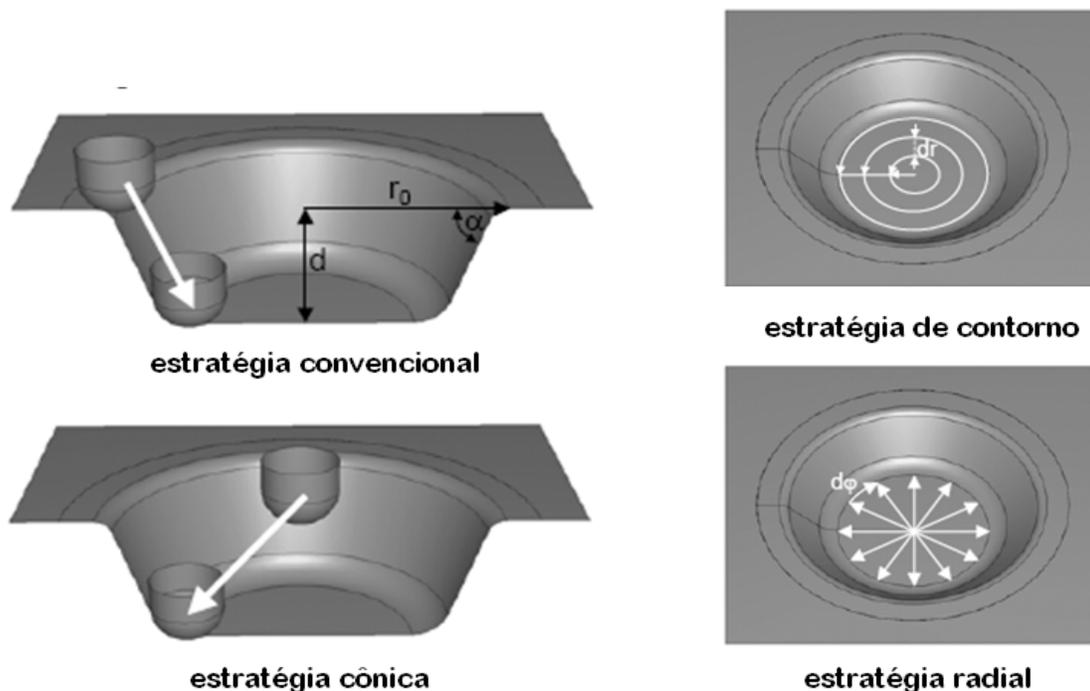


Figura 4.16: Estratégias diferenciadas de estampagem incremental (BAMBACH, AMES, et al., 2003) apud (CASTELAN, 2010)

De acordo com (BAMBACH, AMES, et al., 2003) apud (CASTELAN, 2010), as estratégias radiais provocaram uma considerável redução de espessura no centro da peça além de levar tempo bem maior para serem executadas em relação a estratégia convencional de contorno, que por sua vez obtve uma distribuição de espessura mais homogênea, comparada com a estratégia anterior. Já a estratégia cônica de contorno, que é muito rápida na execução, apresenta um alto efeito de retorno elástico (*spring back*), causando discrepância geométrica entre modelo digital e peça acabada.

Além dos dados descritos acima, a determinação do tipo de estratégia depende da geometria do produto final, das opções disponíveis no *software* CAM e do tipo de máquina CNC utilizada (CERETTI, GIARDINI e ATTANASIO, 2004).

Nos experimentos de Rauch et al. (2009), baseados em um modelo de pirâmide truncada (Figura 4.17) em chapa de liga de alumínio 5086 com 0,6mm de espessura e ferramenta com diâmetro da ponta da ferramenta de 10mm, os parâmetros observados foram: taxa de avanço, incremento axial e estratégia de estampagem, visando primordialmente obter maior produtividade, conformidade e diminuição de custos.

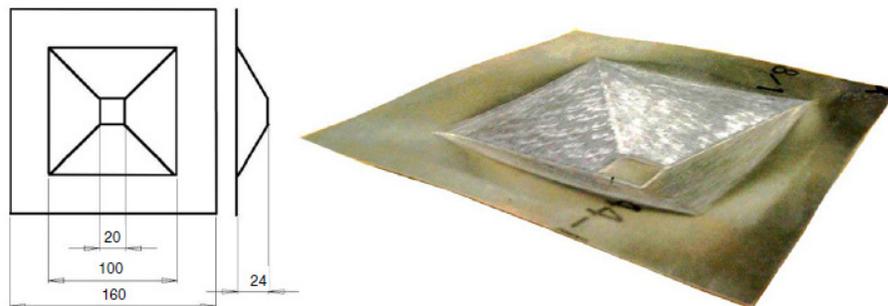


Figura 4.17: Modelo de experimento (RAUCH, HASCOET, et al., 2009).

Neste trabalho, foram testadas e avaliadas três estratégias de usinagem, esquematizadas na Figura 4.18.

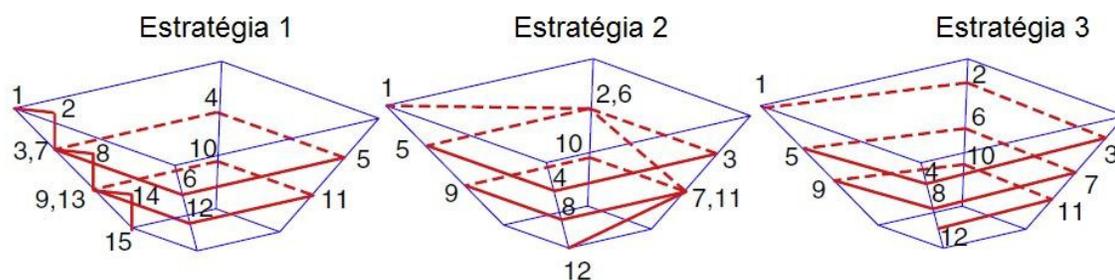


Figura 4.18: Tipos de estratégias (RAUCH, HASCOET, et al., 2009).

- Estratégia 1*: O incremento do passo vertical ( $\Delta z$ ) é feito paralelamente ao eixo (Z) da ferramenta;
- Estratégia 2*: A cada vez, incremento do passo vertical ( $\Delta z$ ) é aumentado gradativamente ao longo de um dos lados da pirâmide truncada;
- Estratégia 3*: O incremento do passo vertical ( $\Delta z$ ) acontece de forma espiral, mantendo a ferramenta em contato constante com a peça

Neste trabalho, Rauch *et al.* (2009) observaram que nenhum experimento atingiu a profundidade projetada (24 mm), independente do tipo de estratégia aplicada, sendo a estratégia 3 a com maior desigualdade no resultado. Também verificaram um “Erro de Deslocamento”, comparando dois pontos marcados na chapa antes de ser conformada com os pontos correspondentes após a estampagem, medindo os deslocamentos nos eixos X e Y

(Figura 4.19). Nestas medições, foi evidenciado o experimento feito pela estratégia 2 apresentou maior discrepância que os demais pontos marcados nos outros experimentos.

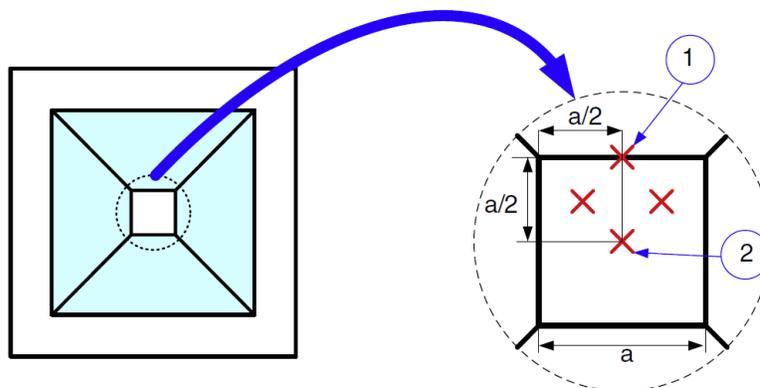


Figura 4.19: Pontos para medição de erro dimensional (RAUCH, HASCOET, *et al.*, 2009).

De acordo com os resultados apresentados por Rauch *et al.* (2009), conclui-se, que a estratégia 1 se apresenta como a melhor solução, no que diz respeito à conformidade geométrica, contudo a execução do passo incremental ( $\Delta z$ ) feita sempre no mesmo ponto pode aumentar a rugosidade superficial e afetar a integridade da peça. A estratégia 3 (espiral) foi a que apresentou maior discrepância.

Contudo, de acordo com os trabalhos de (CERETTI, GIARDINI e ATTANASIO, 2004), estratégias espirais (estratégia 3) são melhores do que estratégias paralelas de contorno (estratégia 1). Tal estratégia também foi aplicada por Hussain *et al.* (2008) e Durante *et al.* (2010) em seus trabalhos.

#### 4.7 Aplicações Industriais da Estampagem Incremental de Chapas

Levando em conta que a Estampagem Incremental abrange um mercado amplo e variado, com características singulares, e se adapta muito bem a algumas das novas exigências do mercado, tais como a agilidade na fabricação de protótipos, a produção de pequenas séries de componentes e a obtenção de peças que, por possuírem elevada complexidade geométrica, se tornariam inviáveis por processos convencionais (PATRÍCIO, MARTINS, *et al.*, 2010).

Dentro deste contexto, (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005) citam aplicabilidade desta tecnologia na fabricação de protótipos rápidos para a indústria automotiva (Figura 4.20 a) e de outras áreas (Figura 4.20 b), tendo as mais variadas formas geométricas alcançadas por este

processo. Também mencionam o uso na área médica. Ainda dentro da área médica, (CASTELAN, DALEFFE, *et al.*, 2010) abordam a aplicação da estampagem incremental na confecção de prótese craniana (Figura 4.20 c).

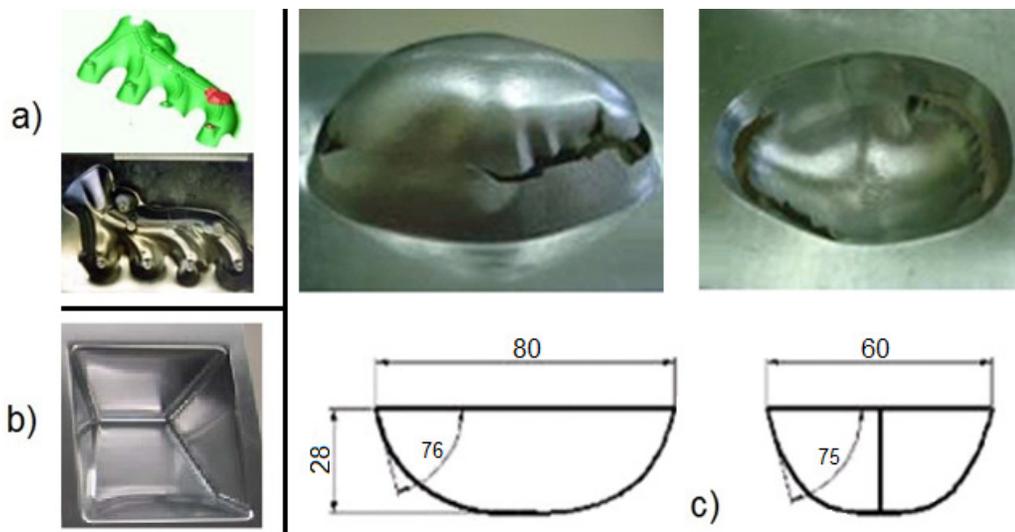


Figura 4.20: Protetor automotivo de calor / ruído; b) Cavidade do forno solar (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005); c) Resultados dos testes preliminares dos protótipos físicos para implante craniano (CASTELAN, DALEFFE, *et al.*, 2010)

O raio da ponta ferramenta ( $R_T$ ) será o valor do raio mínimo estampado na chapa. Todavia, o raio da ponta ferramenta ( $R_T$ ) da ferramenta depende da espessura da chapa, pois, ferramentas com um raio da ponta ( $R_T$ ) pequeno, não são fortes o suficiente para deformar chapas espessas. Fabricantes de máquinas recomendam que o menor raio da ferramenta ( $R_T$ ) usado deve ser 5 mm (LAMMINEN, WADMAN, *et al.*, 2003).

#### 4.8 Rugosidade

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 ( $R_T$ ) da ferramenta (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005).

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 (Figura 4.21). Contudo, pequenos passos ( $\Delta z$ ) levam a tempos maiores de estampagem. Então há uma relação entre tempo de produção e a qualidade de superfície (CERETTI, GIARDINI e ATTANASIO, 2004), (HIRT, JUNK, *et al.*, 2005) e (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005).

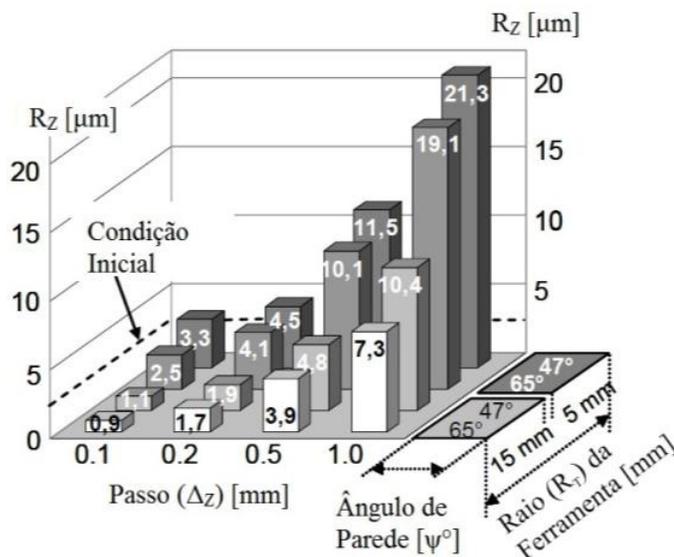


Figura 4.21: Rugosidade  $R_z$  sob condições de estampagem incremental (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005).

Contudo, passos ( $\Delta z$ ) muito pequenos, combinados a estratégia de múltiplos estágios com ferramentas sem rotação ocasionam o desprendimento de filamentos da chapa de metal e aumentando a rugosidade superficial (HIRT, JUNK, *et al.*, 2005).

Jeswiet *et al.* (2005), apresenta os valores ( $R_z$ ) médios de 4 - 12  $\mu\text{m}$  da rugosidade para os produtos decorrentes do processo de estampagem incremental, considerado um ponto fraco comparado aos processos tradicionais. Ainda, considera o padrão de rugosidade resultante de tensões de atrito da superfície com a ferramenta a medida mais útil. (AMBROGIO, FILICE e GAGLIARDI, 2012), além do padrão de rugosidade  $R_z$ , avaliaram a rugosidade média ( $R_a$ ), a altura máxima pico a vale ( $R_{\text{max}}$ ).

Por se tratar de uma aplicação à quente em ISF (AMBROGIO, FILICE e GAGLIARDI, 2012), relatam que com o aumento da temperatura empregada no processo, aumenta a oxidação da chapa, comprometendo a qualidade do acabamento superficial. Também citam que com o aumento do ângulo de parede ( $\psi$ ), aumenta e a área de contato da ferramenta de estampar e a chapa, causando maiores danos na qualidade da superfície.

#### 4.9 Análise das Deformações

Segundo Schaeffer (2004), as deformações podem ser caracterizadas por diversas formas:

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

A Figura 4.22 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.

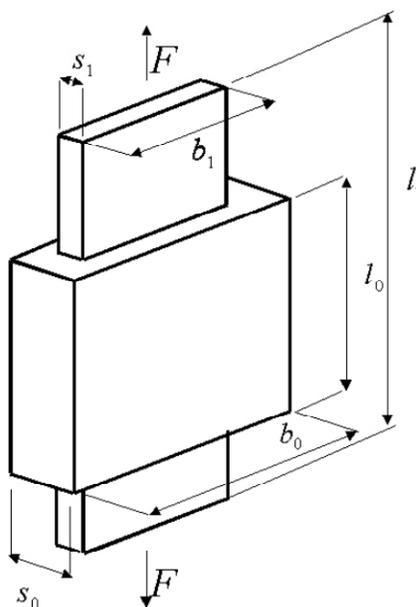


Figura 4.22: Dimensões esquemáticas num ensaio de tração (SCHAEFFER, 2004).

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

$$\Delta l = l_1 - l_0 \quad [mm] \quad (4-2)$$

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

$$\Delta b = b_1 - b_0 \quad [mm] \quad (4-3)$$

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

$$\Delta s = s_1 - s_0 \quad [mm] \quad (4-4)$$

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

$$\varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4-5)$$

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

$$\varepsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4-6)$$

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

$$\varepsilon_s = \frac{s_1 - s_0}{s_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4-7)$$

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 (SCHAEFFER, 2004).

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

$$\varphi_l = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \quad (4-8)$$

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

$$\varphi_b = \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) \quad (4-9)$$

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

$$\varphi_s = \ln\left(\frac{s_1}{s_0}\right) \quad (4-10)$$

Onde:

$l_0$  [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

As deformações em diferentes locais de um componente estampado variam enormemente de um ponto a outro. É de interesse prático a determinação quantitativa dessas deformações, pois pode se analisar as situações das tensões internas, possibilidades de reduzir etapas de processo, conhecimento sobre o limite máximo de deformações, etc (SCHAEFFER, 2004). As deformações verdadeiras que ocorrem na chapa podem ser medidas através do exame de visioplasticidade, que consiste na gravação de pequenos círculos alinhados sobre a chapa, antes da estampagem (Figura 4.23).



*Figura 4.23 - Exemplo de deformações em um componente estampado. (CAVALER, 2010)*

Depois de realizado o processo de estampagem avalia-se as deformações desta rede, sendo a elipse (Figura 4.24) a geometria a ser medida após a estampagem (CASTELAN, 2010).

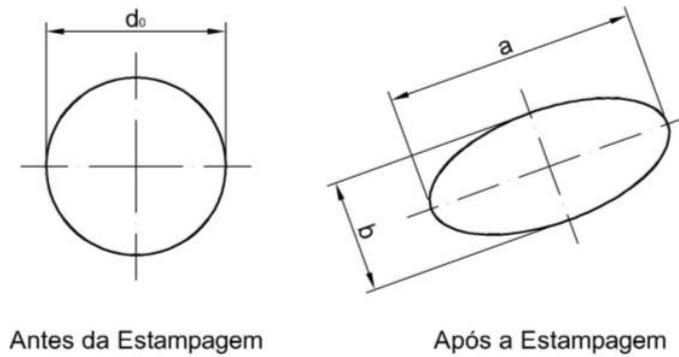


Figura 4.24. Princípio da determinação das deformações. (SCHAEFFER, 2004)

Deste modo, as três deformações principais são calculadas por:

- a)  $\varphi_1$  é a deformação verdadeira na direção do comprimento da elipse (maior deformação - Figura 4.24)

$$\varphi_1 = \ln\left(\frac{a}{d_0}\right) \quad (4-11)$$

- b)  $\varphi_2$  é a deformação verdadeira na direção da largura da elipse (menor deformação - Figura 4.24):

$$\varphi_2 = \ln\left(\frac{b}{d_0}\right) \quad (4-12)$$

- c)  $\varphi_3$  é a deformação verdadeira na espessura:

$$\varphi_3 = \ln\left(\frac{S_1}{S_0}\right) \quad (4-13)$$

Considerando a lei de Constância de Volume se tem:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (4-14)$$

Ou:

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (4-15)$$

As medições na rede deformada levam a uma relação entre as deformações. Na Figura 4.25 observa-se como podem ser classificadas as deformações em função das solicitações que ocorreram durante a estampagem.

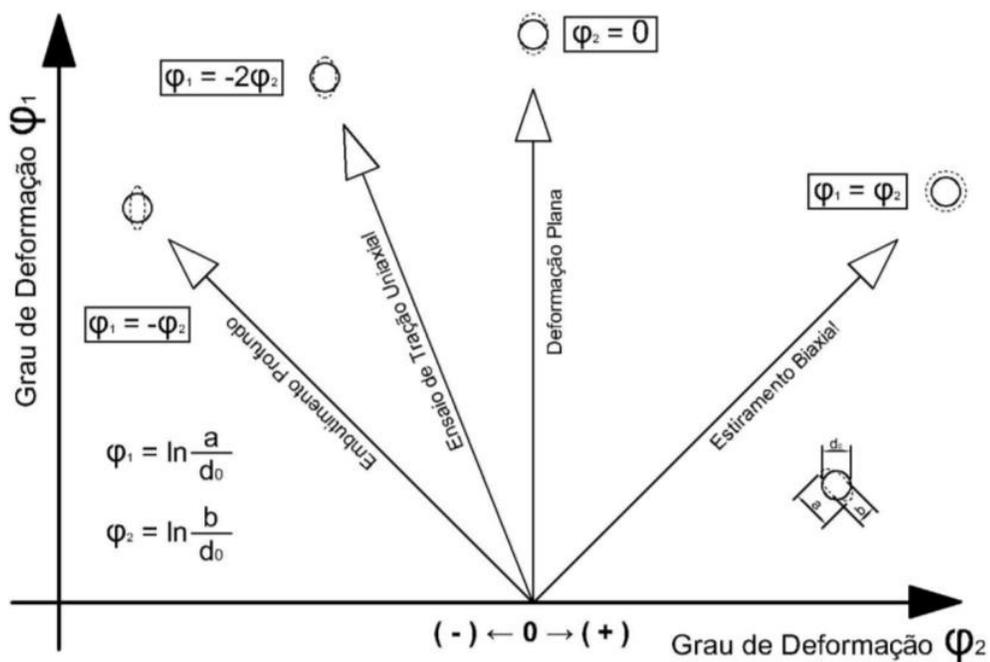


Figura 4.25 - Tipos de deformação em chapa metálica. (SCHAEFFER, 2004)

## 5 RUGOSIDADE

O parâmetro de rugosidade  $R_z$  atual segue a NBR 4287/2002, onde a soma da altura máxima dos picos do perfil ( $Z_p$ ) e a maior das profundidades dos vales do perfil ( $Z_v$ ), no comprimento de amostragem ( $l_m$ ) (ABNT.NBR-4287, 2002).

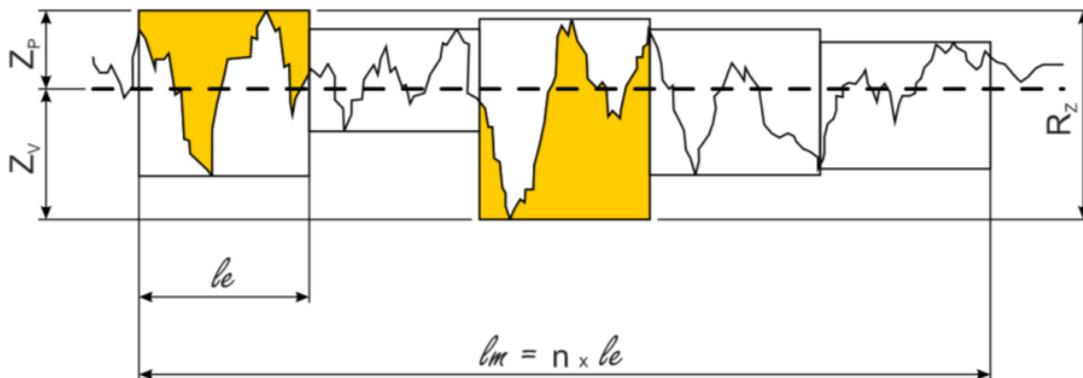


Figura 5.1: Esboço representativo do parâmetro  $R_z$ , conforme NBR4287/2002 (PIRATELLI FILHO, 2011).

Pelo modo anterior, conforme a antiga NBR 6405/1988, o parâmetro  $R_z$  representa a média das distâncias verticais entre a maior protuberância e a maior depressão em cada um dos cinco comprimentos da amostragem ( $l_m$ ). O parâmetro  $R_z$  corresponde à média das distâncias entre duas linhas que tangenciam a protuberância ( $Z_p$ ) mais pronunciada e a depressão ( $Z_v$ ) mais profunda medida dentro de cada comprimento de amostragem ( $l_m$ ) (COUTINHO, 2007).

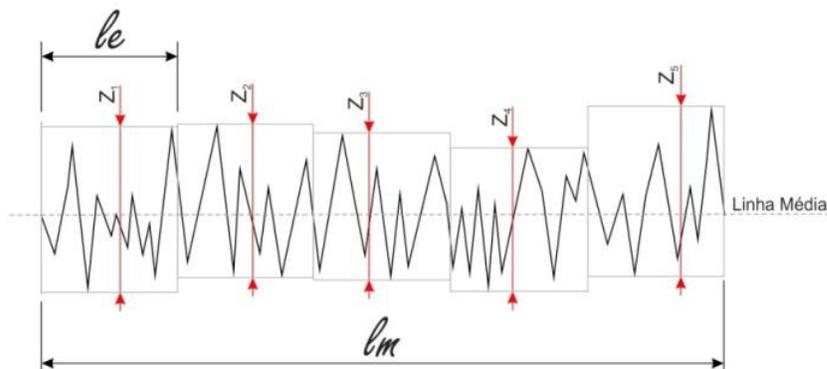


Figura 5.2: Esboço representativo do parâmetro  $R_z$ , conforme a antiga NBR6405/1988 (COUTINHO, 2007).

O uso do parâmetro  $R_z$  tem como vantagens o fato de informar a distribuição média da superfície vertical e é um parâmetro de fácil obtenção. As desvantagens estão relacionadas ao fato deste parâmetro não quantificar nenhuma informação sobre a forma do perfil, bem como da distância entre as ranhuras, além de que a presença de vales profundos compromete o resultado da medição (COUTINHO, 2007) (PIRATELLI FILHO, 2011).

## 6 CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE LATÃO 70/30

Neste capítulo serão abordados os estudos e ensaios a respeito da matéria prima propriamente dita, a chapa de latão 70/30 com 0,5 mm de espessura.

### 6.1 Propriedades Mecânicas do Latão 70/30

Para a caracterização do material, realizada antes dos testes de estampagem incremental, foram utilizados equipamentos e insumos descritos a seguir.

As análises foram feitas no departamento de Engenharia de Materiais do IPAT – Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas da UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense.

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

A chapa de latão 70/30 foi adquirida junto à Servicorte Indústria e Comércio de Metais de Porto Alegre – RS. As chapas usadas tanto nos experimentos, quanto nos ensaios, tem a espessura de 0,5 mm, sendo que para os ensaios foram retirados doze (12) corpos de prova, alternando o sentido de laminação ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ). O formato usado está de acordo com a norma ABNT 6152 / DIN EM 10002, conforme a Figura 6.1.

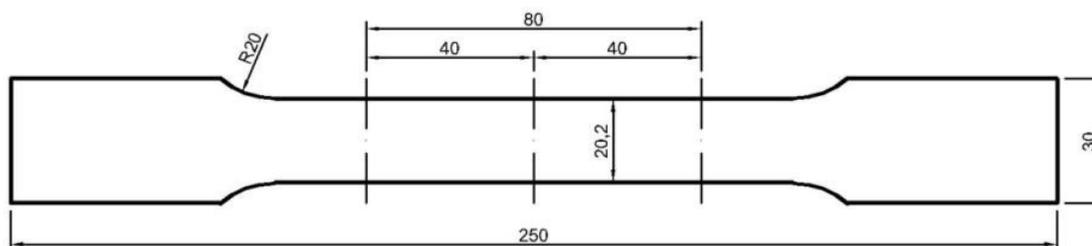


Figura 6.1 - Dimensões do corpo de prova.

Os ensaios foram feitos numa máquina de ensaio de tração EMIC DL 10000 com célula de carga com capacidade de 100 KN.

A Figura 6.2 (a) e (b) ilustram o corpo de prova original e os corpos de provas após o ensaio de tração realizado.

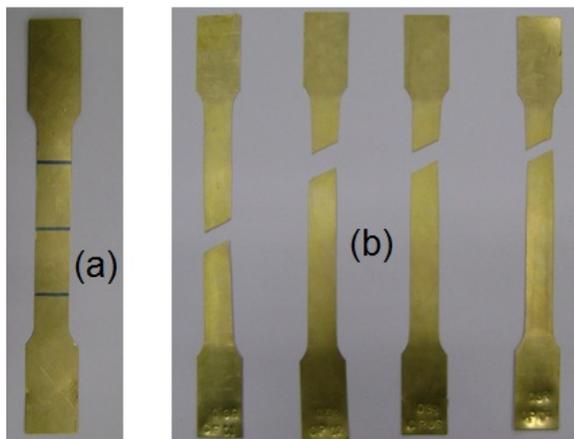


Figura 6.2 - a) Corpo de Prova original; b) Corpos de Prova após ensaio de tração.

Observando-se o tipo de fratura (Figura 6.2 b) constatou-se que a chapa de latão 70/30 apresentou uma fratura do tipo dútil, com estrição visível (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2008).

Para a obtenção da curva “Tensão x Deformação”, foram realizados quatro (4) ensaios de tração por direção de laminação ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ). A Figura 6.3 ilustra a Curva Tensão-Deformação Convencional, obtida com os resultados do ensaio de tração de um dos corpos prova.

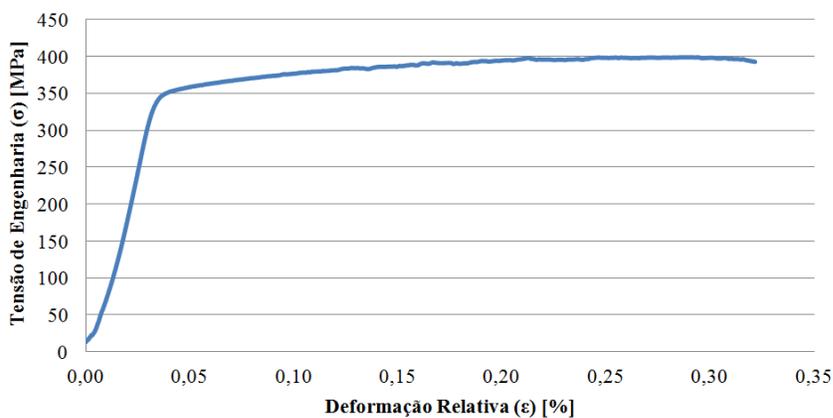


Figura 6.3: Curva Convencional do corpo de prova 01 com sentido de laminação a  $0^\circ$ .

Através 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 (Figura 6.3). Tanto a geração das curvas de todos os ensaios, como os valores calculados, foram geradas

usando o *software Microsoft Office Excel 2007* ®. Os exemplos descritos abaixo, referem ao corpo prova quatro (4) do direção de laminação a 0°.

Os valores de alongamento ( $\delta$ ) e área inicial ( $S_0$ ) foram obtidos por medição na chapa, antes e depois de rompida. As fórmulas usadas seguem descritas a seguir:

- Deformação Relativa ( $\varepsilon$ )

$$\varepsilon = \left( \frac{l - l_0}{l_0} \right) \quad (6-1)$$

$$\varepsilon = \left( \frac{109,63 - 80}{80} \right)$$

$$\varepsilon = 0,37$$

- Alongamento ( $\delta$ )

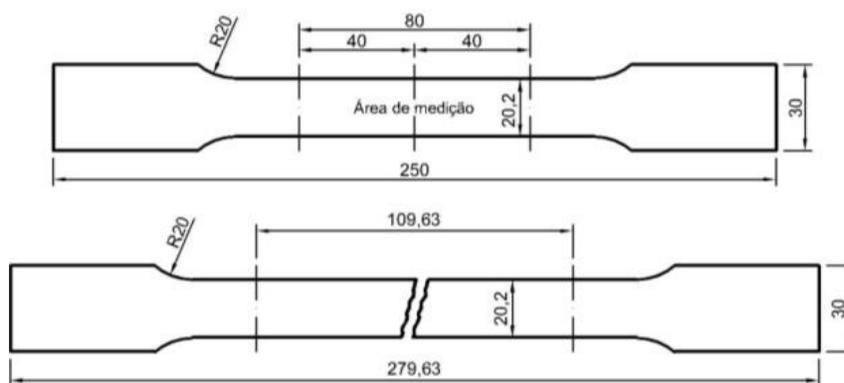


Figura 6.4: Dimensões do corpo de prova antes e depois do ensaio de tração

$$\delta = l - l_0 \quad (6-2)$$

$$\delta = 109,63 - 80$$

$$\delta = 30,63 \text{ mm}$$

- Tensão máxima ( $\sigma_B$ )

$$\sigma_B = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_0} \quad (6-3)$$

$$\sigma_B = \frac{4081,90}{10,25}$$

$$\sigma_B = 398 \text{ MPa}$$

### 6.1.2 Curvas de Escoamento

As curvas de escoamento, que sempre são obtidas experimentalmente, podem ser descritas por uma função matemática. Em geral, na deformação a frio, esta equação tem a seguinte forma (SCHAEFFER, 2004) (SCHAEFFER e ROCHA, 2007):

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (6-4)$$

- C é uma constante do material, para  $\varphi = 1$
- n é o índice de encruamento do material.

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

- A deformação relativa no instante de tensão máxima  $\varepsilon = 0,33$  (de acordo com Figura 6.3)
- Para o instante da tensão máxima, tem-se que a deformação ( $\varphi$ ) é igual ao coeficiente de encruamento ( $n$ ).

$$\varphi = n \quad (6-5)$$

A deformação verdadeira correspondente à tensão máxima é calculada com o valor da deformação relativa no instante de tensão máxima ( $\varepsilon = 0,33$ ) retirado do ensaio de tração (Figura 6.3):

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (6-6)$$

$$\varphi = \ln(1 + 0,33)$$

$$\varphi = 0,285$$

Portanto:

$$\varphi = n = 0,285$$

Tensão verdadeira ( $k_f$ ) correspondente a tensão máxima do material:

$$k_f = \sigma_B(1 + \varepsilon) \quad (6-7)$$

$$k_f = 398(1 + 0,33)$$

$$k_f = 529 \text{ MPa}$$

Desta maneira já é possível obter a constante C:

$$k_f = C \cdot \varphi^n$$

$$529 = C \cdot 0,285^{0,285}$$

$$C = 756,53 \text{ MPa}$$

Deste modo, a curva de escoamento ( $k_f \times \varphi$ ) do latão 70/30 pode ser definida matematicamente por:

$$k_f = 756,53 \cdot \varphi^{0,285}$$

A Figura 6.5 representa a equação  $k_f$  descrita anteriormente:

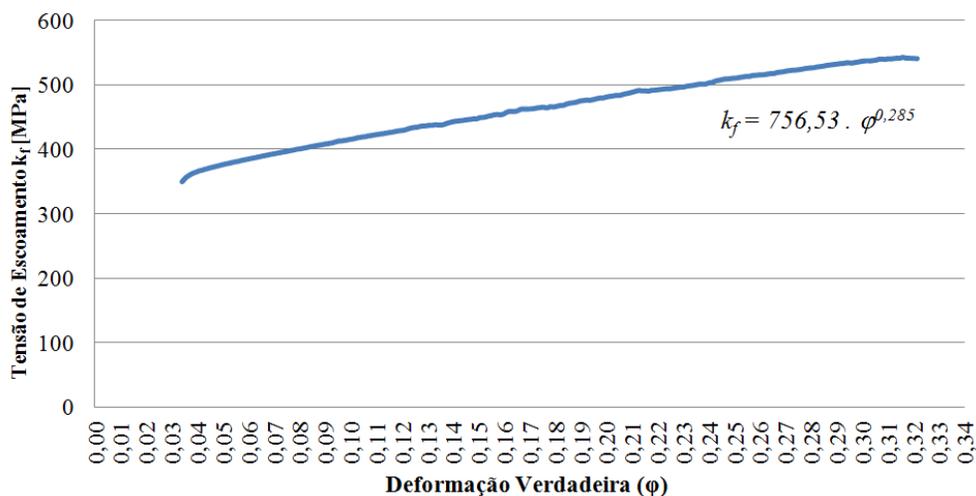


Figura 6.5: Curva de Escoamento do corpo de prova 01 com sentido de laminação a 0°.

Plotando a curva de escoamento em escala logarítmica, pode-se obter o índice de encruamento ( $n$ ) do material. Normalmente se obtém uma reta e o valor de  $n$  é dado pela inclinação desta reta (Figura 2.3). A Figura 6.6 apresenta a plotagem logarítmica e o valor de  $n$ :

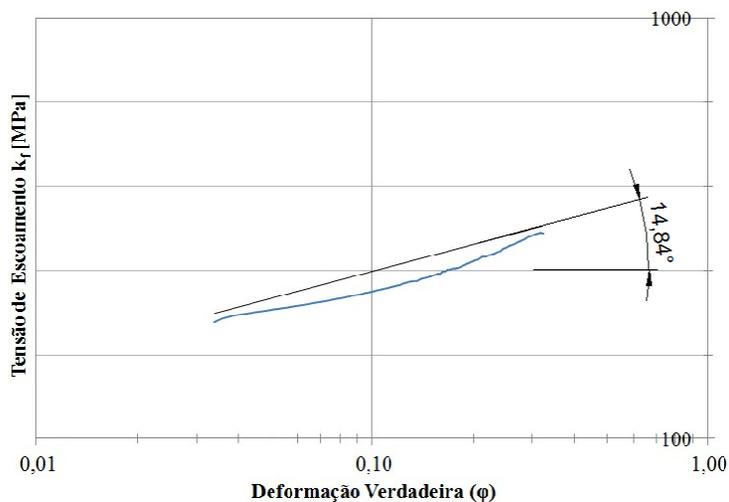


Figura 6.6: Curva de Escoamento em escala logarítmica do corpo de prova 01 com sentido de laminação a  $0^\circ$ .

$$n = \operatorname{tg} \alpha \quad (6-8)$$

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

$$n = 0,26$$

Estes mesmos procedimentos foram repetidos para os demais ensaios realizados, culminando numa lista de tabelas a seguir com todos os valores obtidos nos ensaios dos respectivos sentidos de laminação.

Tabela 6.1: Propriedades mecânicas obtidas a partir do Latão 70/30 ensaiado a  $0^\circ$ .

Ensaio	Sentido de Laminação: $0^\circ$						
	$C$ [MPa]	$\varphi^n$	$\sigma_B$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\epsilon$	$\delta$ [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>
<b>Equação Média da curva de escoamento do Latão 70/30 para direção de laminação <math>0^\circ</math>:</b>					<b><math>k_f = 750,02 \cdot \varphi^{0,281}</math></b>		

Tabela 6.2: Propriedades mecânicas obtidas a partir do Latão 70/30 ensaiado a 45°.

Ensaio	Sentido de Laminação: 45°						
	C [MPa]	$\varphi^n$	$\sigma_B$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\epsilon$	$\delta$ [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>
<b>Equação Média da curva de escoamento do Latão 70/30 para direção de laminação 45°:</b>					<b><math>k_f = 711,96 \cdot \varphi^{0,291}</math></b>		

Tabela 6.3: Propriedades mecânicas obtidas a partir do Latão 70/30 ensaiado a 90°.

Ensaio	Sentido de Laminação: 90°						
	C [MPa]	$\varphi^n$	$\sigma_B$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\epsilon$	$\delta$ [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>
<b>Equação Média da curva de escoamento do Latão 70/30 para direção de laminação 90°:</b>					<b><math>k_f = 713,07 \cdot \varphi^{0,261}</math></b>		

### 6.1.3 Microdureza

Por meio de um microdurômetro Future Tech FM 700, foram feitos ensaios de microdureza Vickers. Na superfície de uma amostra não estampada da chapa de latão 70/30, foram realizadas três medições de microdureza (134,40; 130,90; 142,50 HV<sub>0,2</sub>) obtendo uma microdureza média de 135,93 HV<sub>0,2</sub>. Também foram realizados ensaios de microdureza na espessura da chapa antes de ser estampada. A microdureza média obtida dos três ensaios (136,00; 150,10; 140,80 HV<sub>0,2</sub>) foi de 142,30 HV<sub>0,2</sub>.

A matéria prima utilizada nos ensaios fora comprada junto à Servicorte Indústria e Comércio de Metais, no qual emitiu junto o certificado de qualidade onde apresenta o valor da microdureza de 127,00 HV.

### 6.1.4 Índice de Anisotropia

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 ( $90^\circ$ ):

Tabela 6.4: Valores do índice de anisotropia do latão 70/30

Direção	Corpo de Prova	$b_0$ [mm]	$b$ [mm]	$l_0$ [mm]	$l$ [mm]	$r$	$r_m$	$\Delta r$
$0^\circ$	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		
$45^\circ$	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		
$90^\circ$	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 anisotropia planar  $\Delta r$  mede a variação de  $r$  entre as direções longitudinal e transversal de laminação. Já a anisotropia média  $r_m$  é assim chamada porque mede a resistência à deformação na espessura da chapa, ou seja, é anisotropia plástica através da espessura. Um coeficiente  $r_m = 1$  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 (LORA, 2009). Para o latão 70/30 encontrou-se  $r_m = 0,9$  e  $\Delta r = 0,2$  (ASM, 1993)

### 6.1.5 Análise Química

A Tabela 6.5 traz os valores da análise química da chapa de latão 70/30, extraídos do certificado de qualidade emitido pelo fornecedor. Os valores dos elementos listados a seguir estão expressos em porcentagem (%):

*Tabela 6.5 - Análise química. Fonte: Servicorte Indústria e Comércio de Metais*

<i>Cu</i>	<i>Pb</i>	<i>Fe</i>	<i>Outros</i>	<i>Zn</i>
67,2400	0,0280	0,0268	0,0000	32,7052

A Tabela 6.6 traz os valores limites de composição química da chapa de latão 70/30, extraídos da literatura (ASM, 1992). Os valores dos elementos listados a seguir estão expressos em porcentagem (%):

*Tabela 6.6 - Limites de composição química do Latão 70/30. (ASM, 1992)*

<i>Cu</i>	<i>Pb</i>	<i>Fe</i>	<i>Outros</i>	<i>Zn</i>
68,5 – 71,5	Máx. 0,07	Máx. 0,05	Máx. 0,15	Restante (28,2 – 31,5)

Comparando os resultados emitidos pelo fornecedor (Tabela 6.5) com os limites especificados pela literatura (Tabela 6.6), observam-se os valores de Cobre na composição abaixo do especificado.

Todavia, salienta-se que os 0,15% mencionados em literatura (Tabela 6.6) para outros compósitos na liga, não estão presentes no laudo do fornecedor (Tabela 6.5).

Diante da disparidade de alguns valores confrontados entre as Tabela 6.5 e Tabela 6.6, a análise química da chapa de latão 70/30 foi efetuada. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.7.

*Tabela 6.7 – Resultado da análise química do Latão 70/30 realizado no espectrômetro.*

<i>Cu</i>	<i>Pb</i>	<i>Fe</i>	<i>Outros</i>	<i>Zn</i>
63,36	0,0161	0,0945	Máx. 0,15	34,89

Confrontando a Tabela 6.5, Tabela 6.6 e Tabela 6.7, observa-se diferenças consideráveis nos principais compósitos da liga.

Baseando-se na Tabela 6.6 (ASM), percebe-se o teor de Cu bem abaixo do mínimo especificado. Do mesmo modo o teor de Zn na composição está acima do máximo previsto. Também é apresentado um nível maior do que o especificado no teor de Fe.

Tais observações remetem a não veracidade do material proposto na pesquisa, podendo, deste modo, ocorrer incoerências nos resultados dos ensaios realizados comparados a resultados extraídos em literatura.

### 6.1.6 Análise Metalográfica

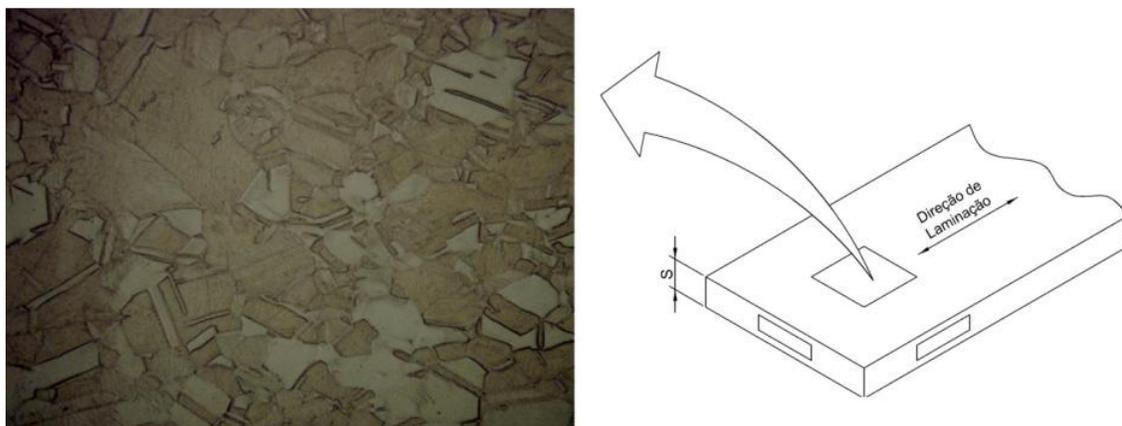
Para a execução da análise metalográfica da chapa de latão 70/30, duas amostras do material foram embutidas em resina de poliéster, uma evidenciando a superfície do material e a outra sua seção.

As amostras embutidas foram lixadas e polidas em uma lixadeira elétrica circular.

Para o lixamento das amostras foram utilizadas lixas de 400, 600, 1200 e 2000 *mesh* com água corrente. Para cada troca de lixa, as amostras passavam por um banho de água e álcool a fim de remover partículas do abrasivo, da resina de embutimento e da própria amostra.

No processo de polimento, fora utilizado o mesmo equipamento, onde a utilizado pasta de diamante com granulometria de 1  $\mu\text{m}$ .

Para a análise metalográfica, foi feita uma mistura, em temperatura ambiente, de 5 partes de  $\text{HNO}_3$ , 5 partes de ácido acético, 1 parte de  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , onde a amostra fica imersa durante 3 s nesta solução (ASM, 2004). A análise metalográfica revelou a matriz  $\alpha$  do latão 70/30 ensaiado, mostrado nas Figura 6.7.



*Figura 6.7 - Micrografia da chapa de latão 70/30 aumentada 500x.*

A Figura 6.7 mostra a disposição dos grãos em forma de maclas, deste modo, esta formação dos grãos confere ao latão 70/30 uma característica de grande capacidade de deformação.

## 7 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os testes iniciais, em caráter experimental, visaram no primeiro momento avaliar o ângulo de parede ( $\psi$ ) suportado pela chapa de latão 70/30 com 0,5 mm de espessura, em passe único na modalidade SPIF, sem apresentar ruptura.

Ao todo foram feitos 7 (sete) experimentos preliminares mudando apenas o ângulo de parede ( $\psi$ ) e depois mais 11 (onze) experimentos finais. Como não foi encontrado literaturas a respeito da aplicação de ISF em chapas de latão especificamente, os experimentos preliminares basearam-se num comparativo com os trabalhos de (CASTELAN, 2007).

Além do objetivo primordial, os testes iniciais nos experimentos preliminares também visaram avaliar a comunicação computador-máquina CNC.

### 7.1 Dispositivos Usados nos Experimentos Preliminares

Para a execução da ISF, foi usado um Centro de Usinagem Vertical Discovery 4022, fabricado pela empresa Romi. A Tabela 7.1 apresenta as características técnicas da máquina.

*Tabela 7.1 – Características técnicas do Centro de Usinagem usado nos experimentos.*

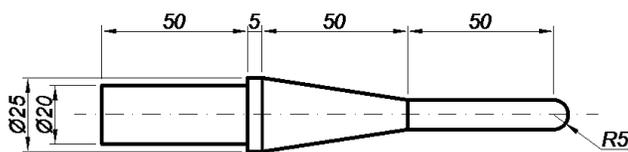
<i>Potência</i>	<i>15 kVA</i>
<i>Potência do Motor Principal</i>	<i>7,5 CV</i>
<i>Comando CNC</i>	<i>Mach - 9</i>
<i>Cone da Árvore</i>	<i>ISO 40</i>
<i>Dimensões da Mesa</i>	<i>840,00 x 360,00</i>
<i>Curso Longitudinal (Eixo X)</i>	<i>599,00 mm</i>
<i>Curso Transversal (Eixo Y)</i>	<i>406,00 mm</i>
<i>Curso Vertical (Eixo Z)</i>	<i>508,00 mm</i>
<i>Resolução de Posicionamento</i>	<i>0,001 mm</i>
<i>Avanço Rápido dos Eixos X, Y e Z</i>	<i>1500 mm/min</i>
<i>Faixa de Rotação</i>	<i>60 a 6.000 rpm</i>

Também foi usado um dispositivo para estampagem incremental para os experimentos, bem como uma ferramenta para estampar com diâmetro 10 mm. A Figura 7.1 ilustra os dispositivos usados.



Figura 7.1 - Centro de Usinagem usado nos experimentos.

Nos experimentos preliminares foi usado uma ferramenta de estampar com ponta semi-esférica com raio  $R_T$  de 5 mm, (Figura 7.2) 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)



b)

Figura 7.2: a) Desenho Projetivo da Ferramenta de Estampar, b) Ferramenta de Estampar

Além dos dispositivos físicos descritos, também foram utilizados os recursos computacionais, *software* CAD/CAM e cabo serial RS-232 para a comunicação entre computador e centro de usinagem.

## 7.2 Metodologia Aplicada nos Experimentos Preliminares

A metodologia empregada nos experimentos preliminares foi baseada na modalidade de estampagem incremental denominada SPIF, ou seja, movimentação da ferramenta em Z e o *blank*, sem apoio na sua face inferior, movimentando-se nas direções XY.

Como se trata de estudos iniciais sobre a aplicação da estampagem incremental em chapa de latão 70/30, visando conferir o limite do ângulo de parede ( $\psi$ ) antes do rompimento, a modalidade SPIF foi utilizada nos experimentos, haja vista que comparada às outras modalidades de ISF, é a mais simples e a que necessita de menos material para produzir o dispositivo de estampagem.

O modelo de estudo foi baseado num tronco de pirâmide de base quadrada com 220 mm de lado e 40 mm de profundidade e raios de concordância de 10 mm. Visando medir a rugosidade na parte deformada, este modelo com laterais planas é melhor para ser analisado do que o modelo tronco de cone que possui laterais curvas (HUSSAIN, GAO, *et al.*, 2008), (DURANTE, FORMISANO, *et al.*, 2009), (DURANTE, FORMISANO e LANGELLA, 2010).

Para o projeto deste *blank* foi utilizado o *software* CAD SolidWorks 2010 ® (Figura 7.3).

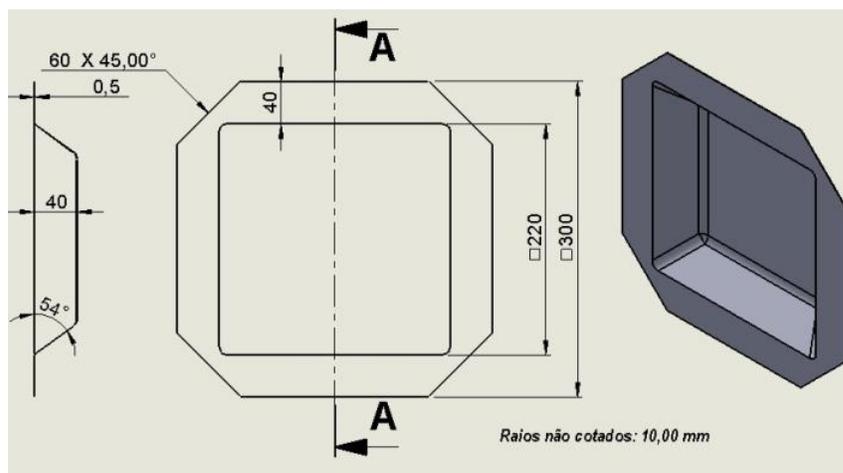


Figura 7.3: Desenho Projetivo do *blank*.

Para as estratégias de usinagem foi empregado o *software* EdgeCAM 2011 ® (Figura 7.4). Foram usadas as estratégias convencional de usinagem e espiral (DURANTE, FORMISANO e LANGELLA, 2010).

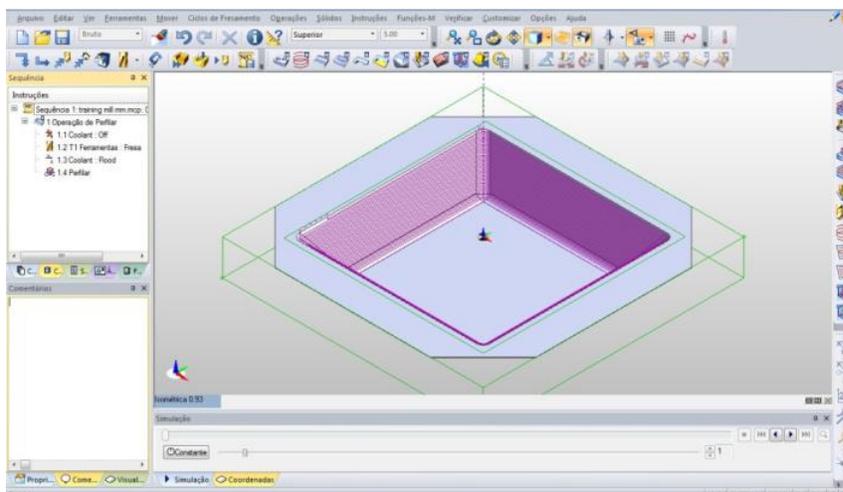


Figura 7.4: Simulação da estampagem incremental.

Como não foi encontrado literaturas a respeito da estampagem incremental em chapa de latão, os parâmetros dos experimentos foram baseados em outros trabalhos pesquisados (DURANTE, FORMISANO, *et al.*, 2009), (HUSSAIN, GAO, *et al.*, 2008), (DURANTE, FORMISANO, *et al.*, 2009), (CASTELAN, 2010), (CAVALER, 2010), (HIRT, JUNK, *et al.*, 2005), (HUSSAIN, GAO, *et al.*, 2009).

Inicialmente, foram feitos 7 (sete) testes iniciais, chamados de Experimentos Preliminares, onde buscou-se estudar inicialmente o limite do ângulo de parede ( $\psi$ ) suportado pelo material proposto sem rompimento. Os parâmetros fixos usados nos experimentos foram:

- Raio da ponta ferramenta  $R_T$ : 5 mm;
- Passo vertical  $\Delta_z$ : 1 mm;
- Velocidade de avanço  $V_{fh}$  em XY: 1000 mm/min;
- Velocidade de mergulho  $V_z$  em Z: 300 mm/min;
- Velocidade da ferramenta  $V_C$ : 0 rpm (ou seja, ferramenta livre),

Como parâmetro variável foi usado apenas o tipo da Estratégia de Usinagem (Convencional e Espiral).

Baseado nos resultados dos Experimentos Preliminares foi proposto 11 (onze) novos ensaios, chamados de Experimentos Finais, onde, da forma geométrica, apenas a profundidade de 40 mm foi alterada para 100 mm. Também se alterou o passo vertical ( $\Delta_z$ ) de 1,00 mm para 0,50 mm. Demais parâmetros mantiveram-se conforme os utilizados nos

Experimentos Preliminares. A Tabela 7.2 apresenta todos os parâmetros usados em cada experimento.

Tabela 7.2: Parâmetros usados nos experimentos

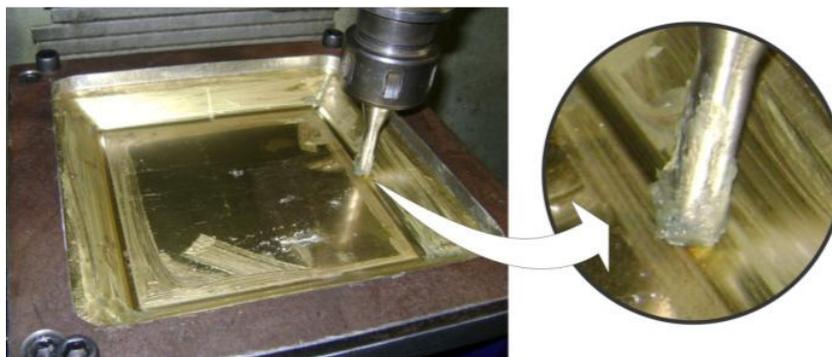
Experimento	Raio ( $R_T$ ) [mm]	Passo Vertical ( $\Delta_z$ ) [mm]	Velocidade $V_{fz}$ [mm/min]	Velocidade $V_z$ [mm/min]	Velocidade $V_C$ [rpm]	Ângulo de Parede ( $\psi^\circ$ )	Estratégia	
<i>Preliminar</i>	1	5,00	1,00	1000	300	0	60	Convencional
	2	5,00	1,00	1000	300	0	45	Convencional
	3	5,00	1,00	1000	300	0	52	Convencional
	4	5,00	1,00	1000	300	0	55	Convencional
	5	5,00	1,00	1000	300	0	53	Convencional
	6	5,00	1,00	1000	300	0	54	Convencional
	7	5,00	1,00	1000	300	0	54	Espiral
<i>Final</i>	8	5,00	1,00	1000	300	0	54	Espiral
	9	5,00	1,00	1000	300	0	55	Espiral
	10	5,00	1,00	1000	300	0	56	Espiral
	11	5,00	1,00	1000	300	0	60	Espiral
	12	5,00	1,00	1000	300	0	58	Espiral
	13	5,00	1,00	1000	300	0	59	Espiral
	14	5,00	1,00	1000	300	0	57	Espiral
	15	5,00	0,50	1000	300	0	57	Espiral
	16	5,00	0,50	1000	300	0	58	Espiral
	17	5,00	0,50	1000	300	0	56	Espiral
	18	5,00	0,50	1000	300	0	55	Espiral

### 7.3 Lubrificação

A fim de reduzir o aquecimento e principalmente o atrito entre a chapa e a ferramenta de estampar, (TIBURI, 2007) utilizou graxa para rolamentos a base de lítio.

Nos trabalhos desenvolvidos por (CASTELAN, 2010) e (CASTELAN, 2007), (CAVALER, 2010) e (DALEFFE, 2008), também fora usado utilizada graxa sintética sabão à base de lítio.

Nos experimentos práticos desenvolvidos no presente trabalho, foi utilizada a mesma graxa como forma de lubrificação, chamada UNILIT MPA-2. Suas características são: consistência 2 (NLGI-2), com temperaturas de aplicação de até 130 °C e com ponto de gota de 185 °C. A aplicação foi feita manualmente com pincel (Figura 7.5). Considerando o emprego desse lubrificante nos trabalhos citados anteriormente sem nenhum relato de adversidade no processo, não foram testados outros lubrificantes, haja vista, não ser o foco do trabalho.

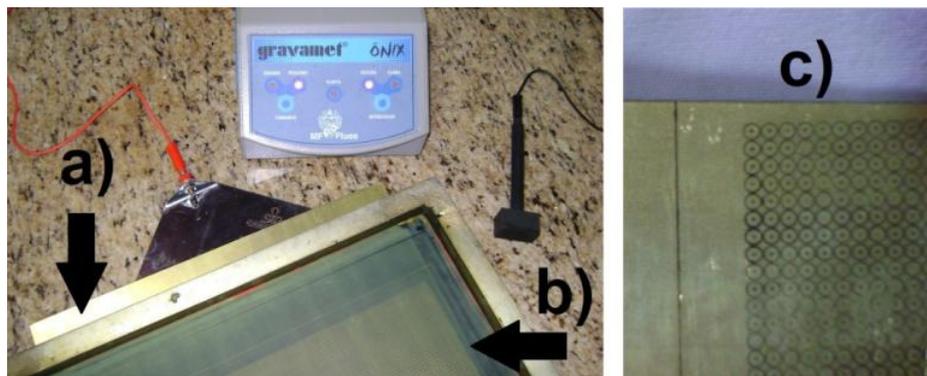


*Figura 7.5 – Experimento com lubrificante aplicado.*

De acordo com as características geométricas da ferramenta e da chapa, o contato entre estas envolve apenas um ponto tangencial, se configurando como uma lubrificação elastohidrodinâmica. Neste tipo de lubrificação, a tensão na zona de contato será bem maior do que aquela encontrada em condições de lubrificação hidrodinâmica, onde as áreas de contato são grandes (CASTELAN, 2010).

#### 7.4 Deformações

Para poder medir as deformações  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$ , inicialmente, todas as chapas tiveram em suas superfícies inferiores círculos com diâmetro inicial ( $d_0$ ) de 2,5 mm gravados, antes de serem conformadas, por meio de um processo eletroquímico. Neste processo foi usado um gravador de metais Gravamet Ônix, uma tela de serigrafia com círculos com diâmetro de 2,5 mm desenhados (Figura 5.9), além de um ácido próprio para latão.



*Figura 7.6 – Equipamentos usados no processo de gravação eletroquímica. a) Chapa de latão; b) Tela de serigrafia; c) Chapa de latão gravada.*

Deste modo, após o ensaio, as marcas circulares na superfície da chapa acompanham as deformações ocorridas na chapa, assumindo uma geometria elíptica (Figura 4.24), onde o eixo com maior deformação (a), corresponde a deformação do comprimento ( $\varphi_1$ ) e o eixo com menor deformação (b), corresponde a deformação da largura ( $\varphi_2$ ).

Nos cálculos das deformações do comprimento ( $\varphi_1$ ), é usada a equação (4-11), enquanto para calcular as deformações da largura ( $\varphi_2$ ) utiliza-se a equação (4-12). A deformação da espessura ( $\varphi_3$ ) é calculada através da lei da constância do volume expressa pela equação (4-15).

## 7.5 Equipamentos de Medição

Nos experimentos n<sup>os</sup> 6, 8, 10, 12, 14, 15, 16 e 17 (Tabela 7.2) foram feitas as medições do perfil da chapa. Para medir a conformidade geométrica entre a chapa estampada e o modelo CAD correspondente, empregou-se uma máquina de medição tridimensional Mitutoyo modelo BRM (Figura 7.7), coletando pontos previamente organizados, conforme ilustrado na Figura 8.19 do capítulo Conformidade Geométrica.



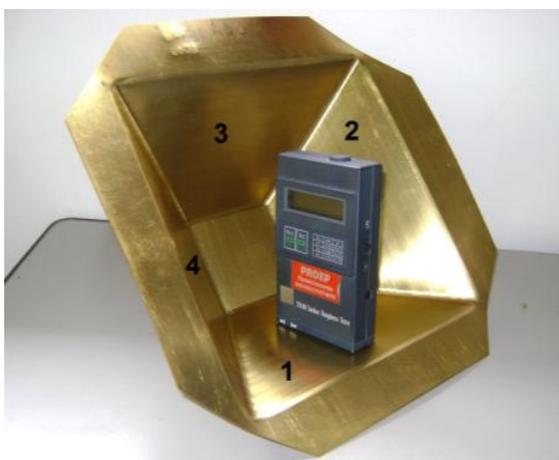
*Figura 7.7: Equipamento de medição de coordenadas.*

Para medir a distribuição de espessura foi utilizado um micrômetro externo Mitutoyo, com resolução de 0,01 mm, com extremidades em forma de ponta, para medição de forma precisa. Para a medição da espessura final ( $s_1$ ) após a análise das deformações ( $\varphi$ ), os experimentos n<sup>os</sup> 12 e 16 (Tabela 8.4 e Tabela 8.5, respectivamente) foram cortados a 0°, 90° e a 45° em relação à direção de laminação. Na realização da medição das espessuras, o centro de cada elipse foi medido, partindo-se da mesma elipse inicial na análise das deformações.

## 7.6 Medição da Rugosidade Superficial

Por meio de um rugosímetro digital portátil *TR 100 Surface Roughness Tester*, os n<sup>os</sup> 6, 8, 10, 12, 14, 15, 16 e 17 (Tabela 7.2), com ângulo de parede ( $\psi$ ) de 58°, 57°, 56° e 54°, tiveram em suas faces internas as medições da rugosidade superficial do tipo  $R_z$  com uma precisão de 0,25 mm, com o objetivo de verificar a rugosidade produzida pela ferramenta na região de estampagem.

Como o formato dos experimentos trata-se um tronco de pirâmide, foram feitas as medições da rugosidade  $R_z$  em três (3) pontos distintos de cada face, conforma a Figura 7.8.



*Figura 7.8: Numeração das faces de medição da rugosidade superficial  $R_z$ .*

## 8 RESULTADOS

### 8.1 Metodologia e Resultados dos Experimentos Preliminares

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados referentes aos experimentos de n<sup>os</sup> 1 a 18 de estampagem incremental na modalidade SPIF.

Os experimentos de n<sup>os</sup> 1 a 7 dizem respeito aos ensaios preliminares, onde o objetivo principal era definir o ângulo de parede ( $\psi$ ) limite do material estudado.

Os experimentos de n<sup>os</sup> 8 a 18 dizem respeito aos ensaios finais, onde além da mudança do ângulo de parede ( $\psi$ ), houve a alteação da estratégia do caminho da ferramenta de estampar e do passo vertical ( $\Delta z$ ).

A metodologia dos experimentos foi baseada em estudos de outros materiais, haja vista que não se encontrou dados a respeito da aplicação de ISF em chapas de latão.

A Tabela 8.1 apresenta os resultados obtidos nos 18 experimentos realizados.

*Tabela 8.1 - Parâmetros analisados nos experimentos.*

<i>Experimento</i>	<i>Profundidade [mm]</i>	<i>Passo Vertical (<math>\Delta z</math>) [mm]</i>	<i>Ângulo de Parede (<math>\psi</math>) [°]</i>	<i>Estratégia</i>	<i>Resultados</i>	
<i>Preliminar</i>	1	40,00	1,00	60	Convencional	Rompimento com 6 mm
	2	40,00	1,00	45	Convencional	Não rompeu
	3	40,00	1,00	52	Convencional	Não rompeu
	4	40,00	1,00	55	Convencional	Rompimento com 13 mm
	5	40,00	1,00	53	Convencional	Não rompeu
	6	40,00	1,00	54	Convencional	Rompimento com 15 mm
	7	30,00	1,00	54	Espiral	Não rompeu
<i>Final</i>	8	100,00	1,00	54	Espiral	Não rompeu
	9	100,00	1,00	55	Espiral	Não rompeu
	10	100,00	1,00	56	Espiral	Não rompeu
	11	100,00	1,00	60	Espiral	Rompimento com 14 mm
	12	100,00	1,00	58	Espiral	Rompimento com 23 mm
	13	100,00	1,00	59	Espiral	Rompimento com 12 mm
	14	100,00	1,00	57	Espiral	Não rompeu
	15	100,00	0,50	57	Espiral	Não rompeu
	16	100,00	0,50	58	Espiral	Não rompeu
	17	100,00	0,50	56	Espiral	Não rompeu
	18	100,00	0,50	55	Espiral	Não rompeu

No primeiro experimento, optou-se por um ângulo de parede ( $\psi$ ) de  $60^\circ$  e profundidade de 40 mm. Contudo, com 6 mm de profundidade houve um pequeno rompimento da chapa inicialmente no segundo arco após a descida da ferramenta (Figura 8.1 b), e em seguida com a nova descida da ferramenta (Figura 8.1 c) houve um novo rompimento e o experimento foi interrompido.

Nos estudos de Silva (2011), é descrito dois possíveis tipos de ruptura: Tipo Fratura e Tipo Rasgo.

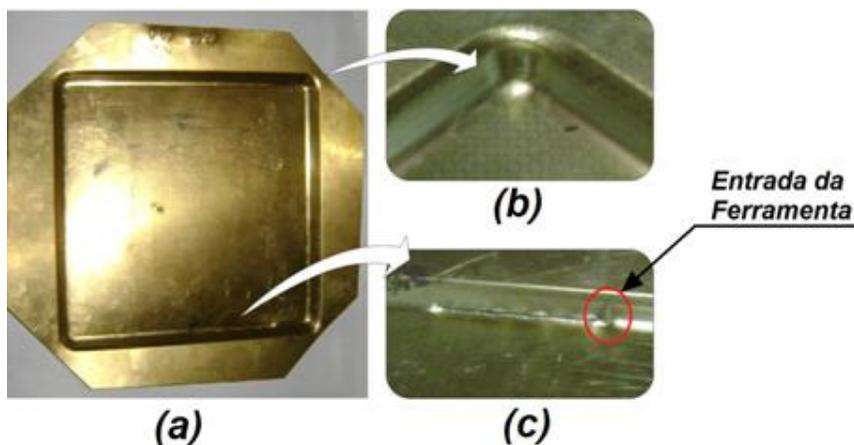


Figura 8.1 - a) Experimento n° 1; b) Primeira fratura c) Segunda fratura

No caso do experimento n° 1 (Figura 8.1), observa-se o rompimento tipo fratura. Isto ocorre quando o ângulo de parede ( $\psi$ ) da estampagem é grande, quando a chapa não é apropriada para o processo e quando o passo vertical ( $\Delta z$ ) está muito elevado e a chapa não consegue conformar e acaba rompendo. As características deste rompimento tipo fratura aparenta ser uma trinca que se propaga na medida em que a estampagem vai acontecendo (SILVA, 2011).

Com o rompimento do ângulo de parede ( $\psi$ ) de  $60^\circ$  no primeiro teste, optou-se por um ângulo de parede ( $\psi$ ) de  $45^\circ$  no segundo experimento e uma profundidade de 40 mm. Não houve rompimento e o experimento foi concluído até o final (Figura 8.2). Do mesmo modo, mantendo todos os parâmetros iguais aos experimentos 1 e 2, e apenas alterando o ângulo de parede ( $\psi$ ), obteve-se sucesso com os experimentos n° 3, cujo ângulo de parede ( $\psi$ ) foi de  $52^\circ$ , e n° 5, cujo ângulo de parede ( $\psi$ ) foi de  $53^\circ$ .

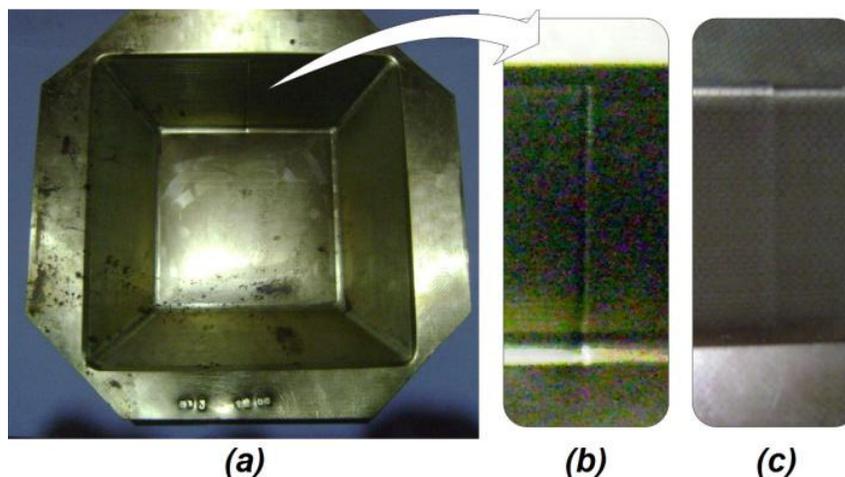


Figura 8.2: a) Experimento 2; b) Ponto de entrada da ferramenta em Z; c) Marca do Ponto de entrada da ferramenta em Z na parte externa.

No experimento n° 4, o ângulo de parede ( $\psi$ ) testado foi de  $55^\circ$ . Contudo, com 13 mm de profundidade houve um rompimento da chapa no último arco após a decida da ferramenta em Z (Figura 8.3 b), e o experimento foi interrompido.

Neste caso, o tipo de ruptura constatado foi tipo Rasgo. Neste caso, Silva (2011) descreve como o rompimento geralmente observado quando não se utiliza matriz dedicada no processo e quando o tamanho da ferramenta é grande, ou apenas não é o melhor tamanho para aquela estampagem. As características deste rompimento tipo rasgo apresentam a aparência de um rompimento por pressão e que não interfere na continuação da estampagem, pois este rompimento geralmente ocorre após a ferramenta ter conformado este ponto.

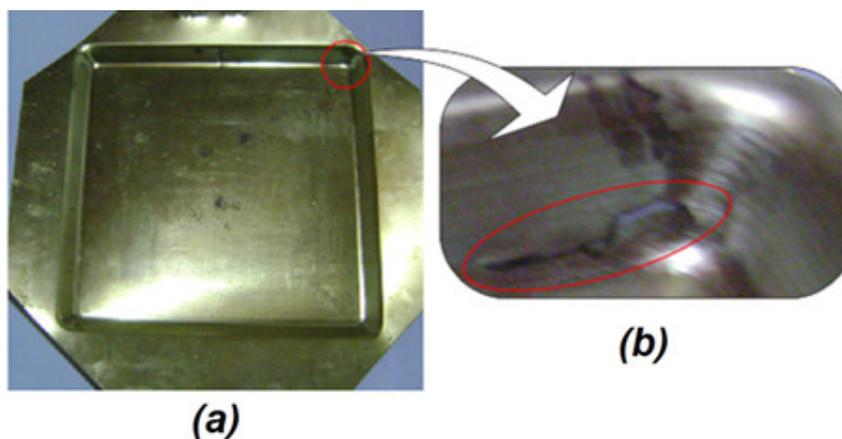


Figura 8.3: Experimento 4; b) Detalhe ampliado da região fraturada.

No experimento n° 6, o ângulo de parede ( $\psi$ ) testado foi de  $54^\circ$ . Contudo, com 15 mm de profundidade houve um rompimento da chapa no segundo arco após a decida da ferramenta (Figura 8.4 b). Como este experimento não foi interrompido, a fratura foi aumentando até o final do experimento (Figura 8.4 b, c). Este tipo de fratura é designado como “rompimento do tipo rasgo” no trabalho Silva (2011), onde cita que é geralmente observado quando não se utiliza matriz dedicada no processo. As características deste rompimento tipo rasgo apresentam a aparência de um rompimento por pressão e que não interfere na continuação da estampagem, pois este rompimento geralmente ocorre após a ferramenta ter conformado este ponto.

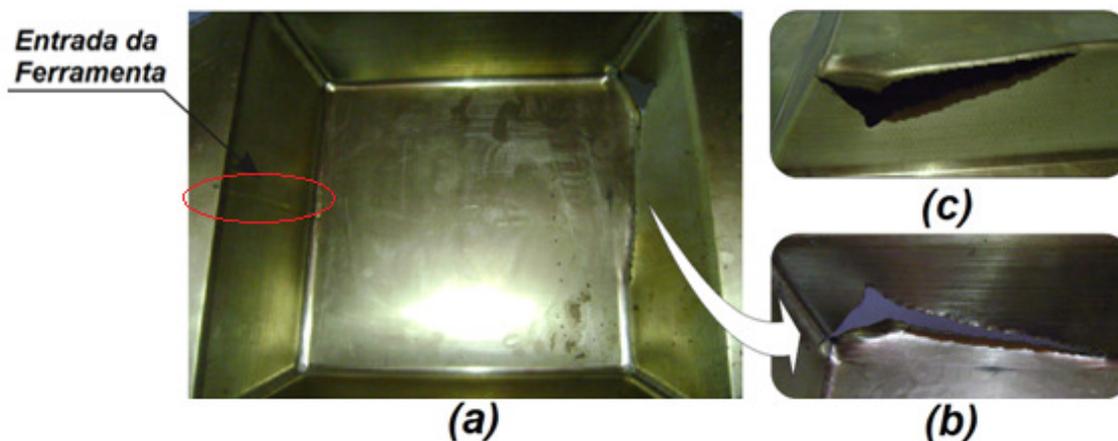
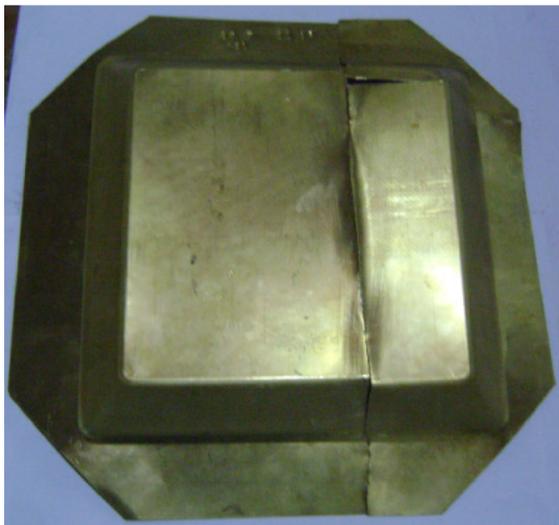


Figura 8.4: Experimento 6; b) Fratura da chapa (vista interna) c) Fratura da chapa (vista externa); d) Ponto de entrada da ferramenta em Z.

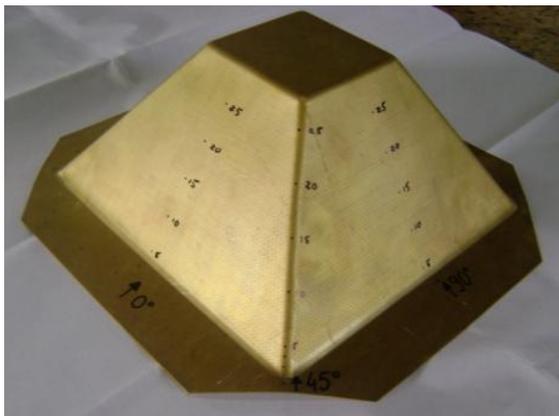
No experimento n° 7, o ângulo de parede ( $\psi$ ) testado foi de  $54^\circ$  novamente, e com o mesmo passo vertical ( $\Delta_z$ ) de 1,00 mm. Entretanto, a estratégia de conformação foi alterada de convencional para espiral. Com a mudança do tipo de estratégia, houve um aumento considerável no tamanho do arquivo CAM gerado que impossibilitava a comunicação com a máquina. Por conta disto, a profundidade de 40 mm projetada inicialmente para o experimento, foi diminuída para 30 mm. Nesta nova situação, não houve rompimento da chapa (Figura 8.5), diferentemente do experimento n° 6. Outro detalhe a ser ressaltado é que nesta nova estratégia de usinagem, a chapa não fica com as marcas de entrada da ferramenta em Z.



*Figura 8.5: Experimento 7 partido para as medições de espessuras e deformações.*

Devido a esse não rompimento da chapa do experimento nº 7, graças a alteração da estratégia de conformação, os experimentos nº 8 a 18, tratados como ensaios finais, foram todos executados com a estratégia de conformação espiral e com profundidade de 100 mm.

Nos experimentos nº 8, 9, 10 e 14 (Figura 8.6), cujo o passo vertical ( $\Delta_z$ ) foi de 1,00 mm e nos experimentos nº 15 a 18, cujo o passo vertical ( $\Delta_z$ ) foi de 0,50 mm, não houve rompimento da chapa.



*Figura 8.6: Experimento 10 sem fraturas durante o processo de ISF.*

Nos experimentos nº 12 a 14, ocorreu rompimento da chapa. A Figura 8.7, Figura 8.8 e Figura 8.9 ilustram os experimentos realizados, e com suas respectivas áreas de rupturas ampliadas. Neste caso, observaram-se para estes três experimentos as rupturas com sendo do tipo fratura.

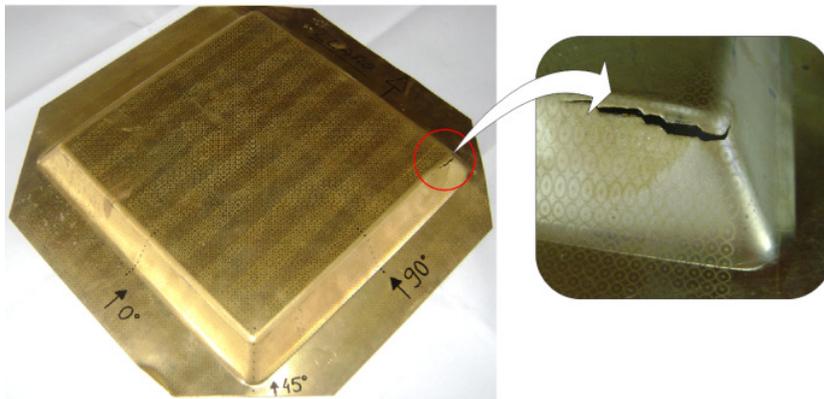


Figura 8.7: Experimento 12. Fratura da chapa em detalhe ampliado. ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta z: 1,00 \text{ mm}$ ).

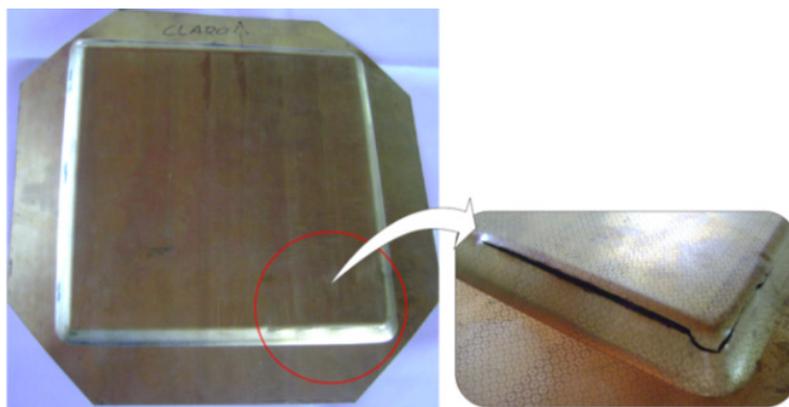


Figura 8.8: Experimento 13. Fratura da chapa em detalhe ampliado. ( $\psi: 59^\circ \mid \Delta z: 1,00 \text{ mm}$ ).

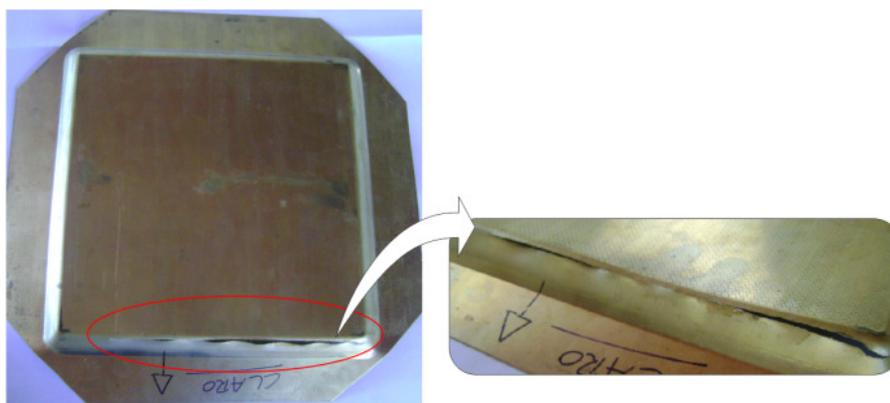


Figura 8.9: Experimento 11. Fratura da chapa em detalhe ampliado. ( $\psi: 60^\circ \mid \Delta z: 1,00 \text{ mm}$ ).

### 8.1.1 Medição das Deformações Verdadeiras

Como mencionado anteriormente, o método empregado para medir as deformações foi a gravação eletroquímica de uma malha de círculos, com diâmetro inicial ( $d_0$ ) de 2,5 mm, na face inferior do corpo de prova.

Com a deformação da malha ao término do ensaio, 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 ( $\varphi_1$ ) e da largura ( $\varphi_2$ ) são calculadas pelas equações (4-5) e (4-6) respectivamente, e a deformação da espessura ( $\varphi_3$ ), pela equação (4-9).

Para medir a variação da geometria foi utilizada uma régua flexível transparente e graduada com as deformações para a grade circular de 2,5 mm de diâmetro, isto é, ela permite ler diretamente a deformação relativa e a verdadeira. A régua, por ser flexível, acompanha o formato do corpo de prova e sua transparência possibilita a visualização das linhas da malha.

Os experimentos analisados foram os n<sup>os</sup> 12 e 16 (Tabela 8.1), ambos com o ângulo de parede ( $\psi$ ) máximo alcançado de 58°.

Os valores de deformação verdadeira ( $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  e  $\varphi_3$ ) explícitos na Tabela 8.2, correspondem à direção longitudinal de laminação (0°), direção transversal de laminação (90°), a 45° da direção de laminação da chapa (Figura 8.10).

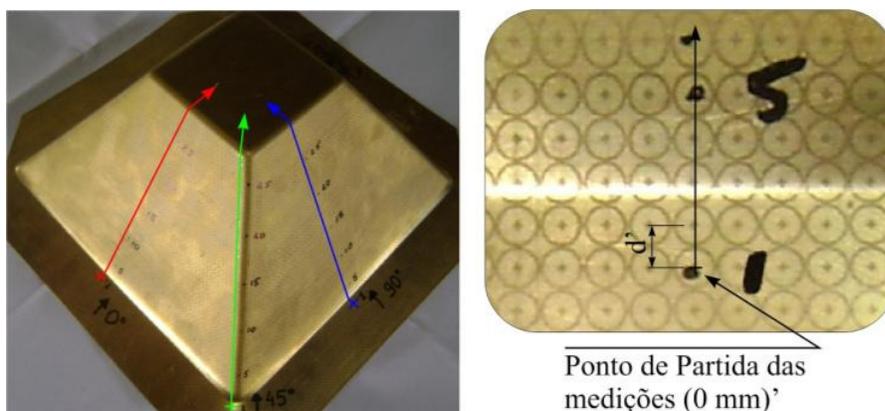


Figura 8.10: Região de medição das deformações no ensaio n° 16 ( $\psi$ : 58° |  $\Delta z$ : 0,50 mm).

Além das deformações ( $\varphi_1$  e  $\varphi_2$ ) medidas de cada elipse, também foi medida a distância ( $d'$ ) do centro da primeira elipse medida (base do experimento) à cada centro das outras elipses medidas (Figura 8.10). Para isto, convencionou-se  $d'=0$  como primeiro ponto medido (Tabela 8.2). Para a execução das medições dos centros, empregou-se um recorte de

transparência colada com fita adesiva ao longo da região de deformação do corpo de prova, e com a ponta seca de um compasso cada centro foi marcado no recorte de transparência. Ao término, os recortes de transparência foram retirados e colados (planificados) num vidro com luz focando de baixo para cima e, mediu-se a distância dos pontos com um paquímetro digital.

Tabela 8.2 - Deformações verdadeiras de acordo com o sentido de laminação ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $45^\circ$ ) no ensaio nº 16. ( $\psi$ :  $58^\circ$  |  $\Delta z$ :  $0,50$  mm).

Pontos Medidos	$0^\circ$				$90^\circ$				$45^\circ$			
	$d'$ [mm]	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$d'$ [mm]	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$d'$ [mm]	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2,10	-0,02	0,00	0,02	2,44	-0,08	0,00	0,08	3,70	-0,06	-0,04	0,10
3	7,70	-0,11	-0,02	0,13	4,66	0,02	-0,02	0,00	7,54	0,11	-0,04	-0,07
4	11,40	0,08	-0,02	-0,06	7,44	0,10	-0,04	-0,05	11,22	0,42	0,10	-0,51
5	16,70	0,51	-0,04	-0,47	10,82	0,57	-0,06	-0,50	16,54	0,41	0,10	-0,50
6	21,90	0,67	-0,06	-0,61	16,06	0,64	-0,04	-0,60	20,60	0,39	0,11	-0,51
7	26,90	0,68	-0,08	-0,60	21,22	0,63	-0,08	-0,55	26,44	0,39	0,11	-0,51
8	32,44	0,68	-0,13	-0,56	26,18	0,64	-0,11	-0,54	32,12	0,41	0,13	-0,54
9	37,62	0,68	-0,13	-0,56	31,88	0,64	-0,11	-0,54	37,56	0,41	0,11	-0,52
10	42,88	0,68	-0,13	-0,56	37,12	0,64	-0,11	-0,54	41,12	0,34	0,10	-0,43
11	48,46	0,68	-0,13	-0,56	42,44	0,64	-0,11	-0,54	46,88	0,41	0,15	-0,55
12	53,32	0,68	-0,13	-0,56	46,98	0,63	-0,13	-0,50	52,56	0,42	0,17	-0,58
13	58,44	0,68	-0,13	-0,56	52,44	0,63	-0,11	-0,53	57,94	0,41	0,11	-0,52
14	63,74	0,68	-0,13	-0,56	57,00	0,64	-0,11	-0,54	64,04	0,42	0,15	-0,57
15	69,00	0,68	-0,13	-0,56	62,74	0,63	-0,13	-0,50	69,62	0,41	0,10	-0,50
16	74,12	0,68	-0,13	-0,56	67,92	0,64	-0,11	-0,54	75,12	0,46	0,13	-0,59
17	79,66	0,68	-0,13	-0,56	72,84	0,63	-0,13	-0,50	81,08	0,47	0,15	-0,62
18	84,34	0,68	-0,13	-0,56	78,12	0,64	-0,11	-0,54	86,72	0,46	0,15	-0,61
19	89,92	0,68	-0,13	-0,56	82,84	0,64	-0,11	-0,54	92,44	0,46	0,15	-0,61
20	94,82	0,68	-0,13	-0,56	87,66	0,64	-0,13	-0,51	98,90	0,32	0,17	-0,49
21	99,76	0,68	-0,13	-0,56	93,00	0,64	-0,11	-0,54	104,52	0,43	0,18	-0,61
22	105,62	0,67	-0,13	-0,55	98,66	0,63	-0,11	-0,53	110,32	0,48	0,18	-0,66
23	110,34	0,67	-0,13	-0,55	103,54	0,63	-0,08	-0,55	116,34	0,46	0,18	-0,64
24	115,52	0,65	-0,13	-0,52	108,54	0,59	-0,11	-0,48	122,04	0,48	0,20	-0,68
25	121,52	0,64	-0,11	-0,54	113,72	0,59	-0,08	-0,50	127,52	0,39	0,15	-0,54
26	125,28	0,61	-0,08	-0,53	118,88	0,58	-0,08	-0,49	133,56	0,23	0,11	-0,34
27	128,00	0,15	-0,04	-0,11	123,74	0,23	-0,04	-0,19	139,00	0,02	0,15	-0,17
28	130,72	-0,04	0,00	0,04	127,84	0,02	0,00	-0,02	144,44	0,00	0,00	0,00
29	133,22	0,00	0,00	0,00	130,06	0,00	0,00	0,00	149,22	0,00	0,00	0,00

Nas figuras Figura 8.11, Figura 8.12 e Figura 8.13 estão plotados os resultados da Tabela 8.2, de acordo com os sentidos de laminação já descritos. Os gráficos mostram uma tendência, que o modo como ocorrem às deformações aproximam-se muito da deformação plana ( $\varphi_2 = 0$ ). Contudo, enquanto os valores das deformações medidas no sentido de laminação  $0^\circ$  e  $90^\circ$  (Figura 8.11 e Figura 8.12 respectivamente) apresentaram valores

negativos, os valores das deformações medidas no sentido de laminação à 45° (Figura 8.13) apresentaram valores positivos e mais expressivos que os anteriores. Tal diferença pode ser atribuída à forma geométrica das regiões medidas, onde as regiões do sentido de laminação 0° e 90° são “planas” e a região de medição no sentido de laminação 45° é exatamente sobre a “curva” de concordância entre as faces do tronco da pirâmide. Ainda pode se observar a os valores máximos de deformação de 0,68 e 0,64 (0° e 90° respectivamente), valores próximos entre si, e de 0,48 no sentido 45° em relação à direção de laminação.

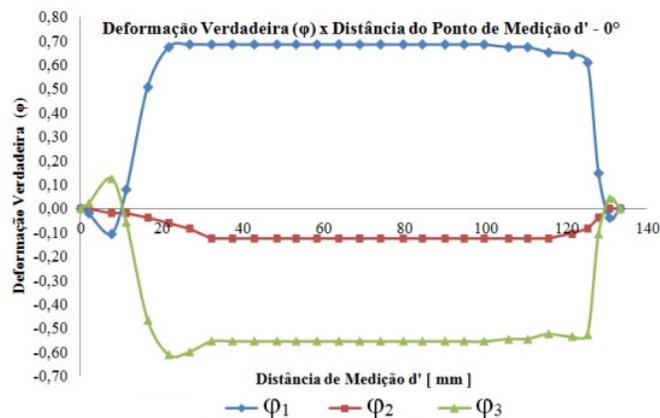


Figura 8.11: Deformação verdadeira ( $\varphi$ ) x Distância do ponto de partida  $d'$  a 0° em relação a direção de laminação, no experimento n°16. ( $\psi$ : 58° |  $\Delta z$ : 0,50 mm).

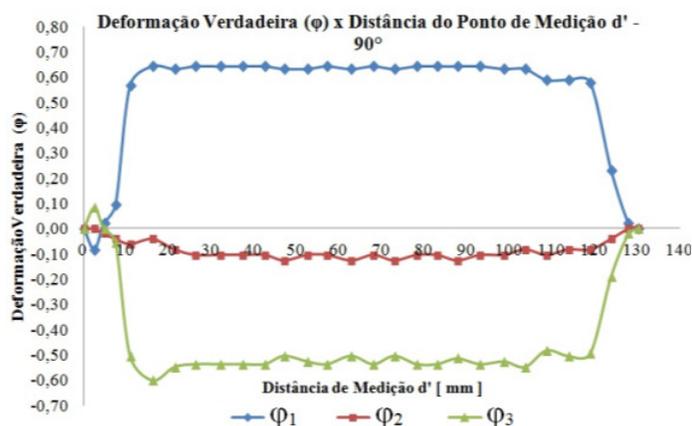


Figura 8.12: Deformação verdadeira ( $\varphi$ ) x Distância do ponto de partida  $d'$  a 90° em relação a direção de laminação, no experimento n°16. ( $\psi$ : 58° |  $\Delta z$ : 0,50 mm).

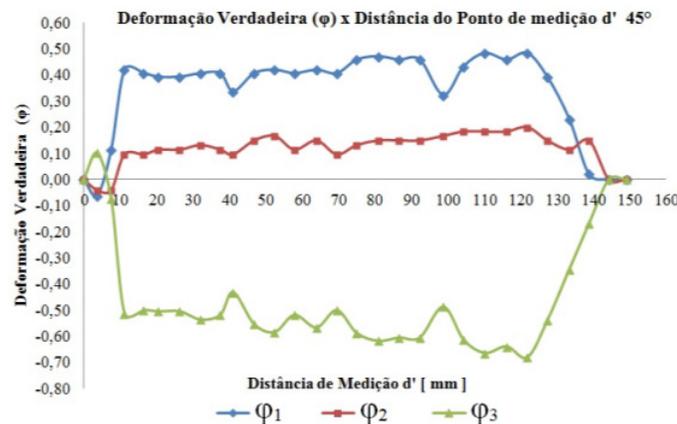


Figura 8.13: Deformação verdadeira ( $\varphi$ ) x Distância do ponto de partida  $d'$  a  $45^\circ$  em relação a direção de laminação, no experimento n°16 ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta z: 0,50 \text{ mm}$ ).

Do mesmo modo, foram feitas as medições das deformações no experimento n° 12. As Figuras 8.14, Figura 8.15 e Figura 8.16 mostram os valores plotados dos resultados da Tabela 8.3.

Do mesmo modo que as análises das deformações do experimento n° 16 aproximam-se muito da deformação plana ( $\varphi_2 = 0$ ), as análises das deformações do experimento n° 12 demonstraram o mesmo comportamento.

As mesmas considerações feitas sobre as análises do experimento n° 16, observam-se no experimento n° 12.

Os valores máximos de deformação de 0,65 e 0,63 ( $0^\circ$  e  $90^\circ$  respectivamente), valores próximos entre si, e de 0,42 no sentido  $45^\circ$  em relação à direção de laminação.

Tabela 8.3 - Deformações verdadeiras de acordo com o sentido de laminação ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $45^\circ$ ) no ensaio n° 12. ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta z: 1,00 \text{ mm}$ ).

Pontos Medidos	$0^\circ$			$90^\circ$			$45^\circ$					
	$d'$ [mm]	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$d'$ [mm]	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$d'$ [mm]	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2,24	-0,04	-0,02	0,06	2,54	-0,08	-0,02	0,10	2,96	-0,08	0,02	0,06
3	4,82	0,04	-0,02	-0,02	4,74	0,02	0,06	-0,08	7,12	0,29	0,11	-0,41
4	7,26	0,36	-0,04	-0,32	7,72	0,08	-0,02	-0,06	12,92	0,52	0,10	-0,61
5	10,54	0,61	-0,04	-0,57	11,66	0,54	-0,04	-0,50	17,94	0,36	0,10	-0,46
6	14,54	0,65	0,00	-0,65	16,28	0,63	-0,04	-0,59	23,78	0,39	0,10	-0,49
7	19,88	0,62	-0,04	-0,58	21,48	0,60	-0,04	-0,56	29,82	0,41	0,08	-0,48
8	25,32	0,58	-0,04	-0,54	27,04	0,63	-0,04	-0,59	35,44	0,11	0,06	-0,17
9	30,22	0,11	-0,02	-0,09	31,84	0,35	0,02	-0,37	38,92	0,00	0,00	0,00
10	34,46	0,00	0,00	0,00	35,72	0,02	0,00	-0,02		0,00	0,00	0,00
11	37,28	0,00	0,00	0,00	37,72	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00

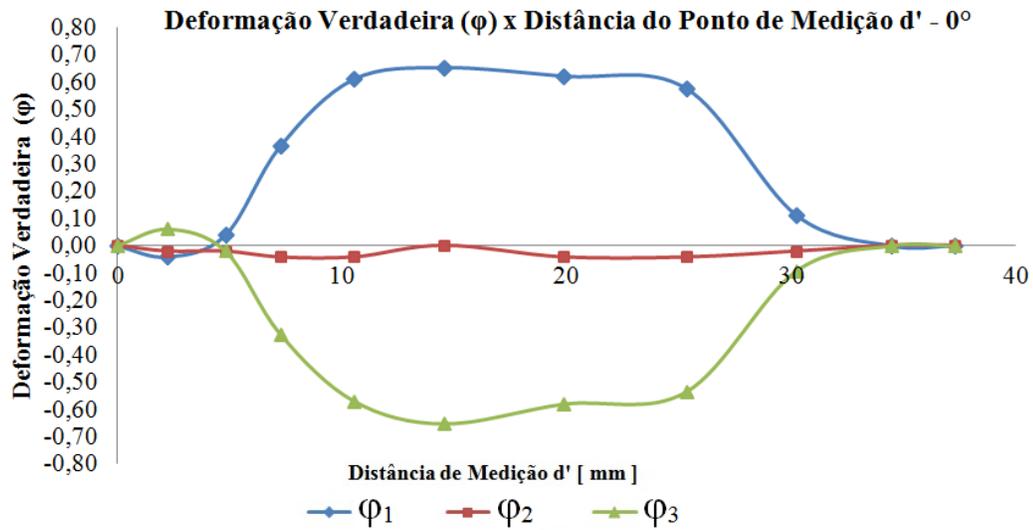


Figura 8.14: Deformação verdadeira ( $\varphi$ ) x Distância do ponto de partida  $d'$  a  $0^\circ$  em relação a direção de laminação, no experimento nº12 ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta z: 1,00$  mm).

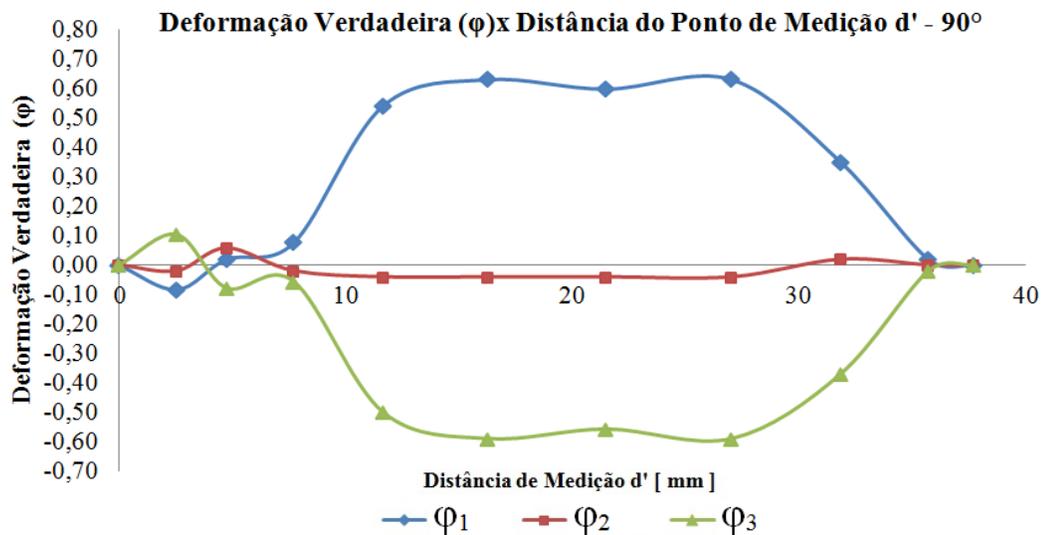


Figura 8.15: Deformação verdadeira ( $\varphi$ ) x Distância do ponto de partida  $d'$  a  $90^\circ$  em relação a direção de laminação, no experimento nº12 ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta z: 1,00$  mm).

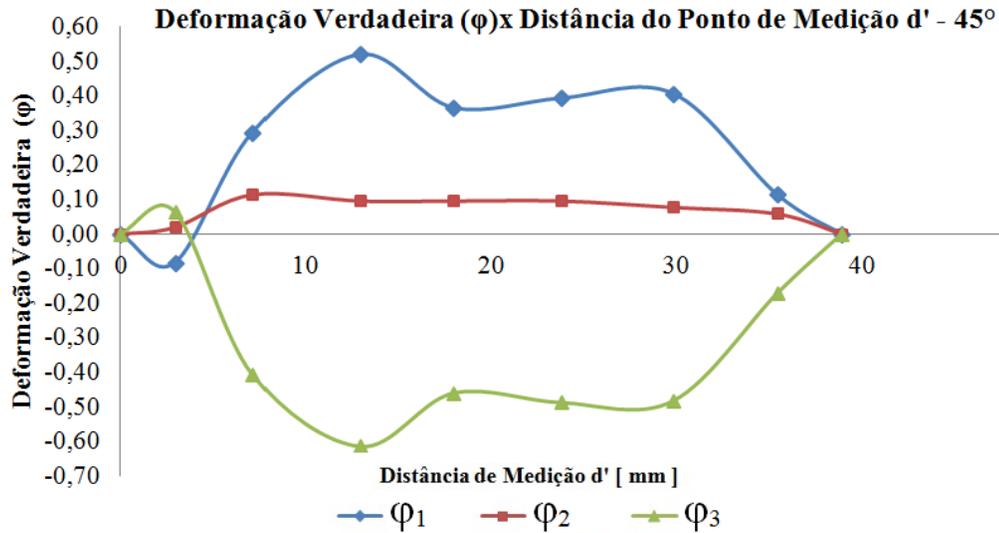


Figura 8.16: Deformação verdadeira ( $\phi$ ) x Distância do ponto de partida  $d'$  a 45° em relação a direção de laminação, no experimento n°12 ( $\psi$ : 58° |  $\Delta_Z$ : 0,1,00 mm).

### 8.1.2 Medição das Espessuras após a ISF

As tabelas Tabela 8.4 e Tabela 8.5 apresentam os valores medidos dos experimentos n°s 12 e 16, respectivamente, na espessura final ( $s_1$ ) da chapa após a análise das deformações ( $\phi$ ). As figuras Figura 8.17 e Figura 8.18 ilustram a variação das espessuras a partir do ponto de medição  $d'$ .

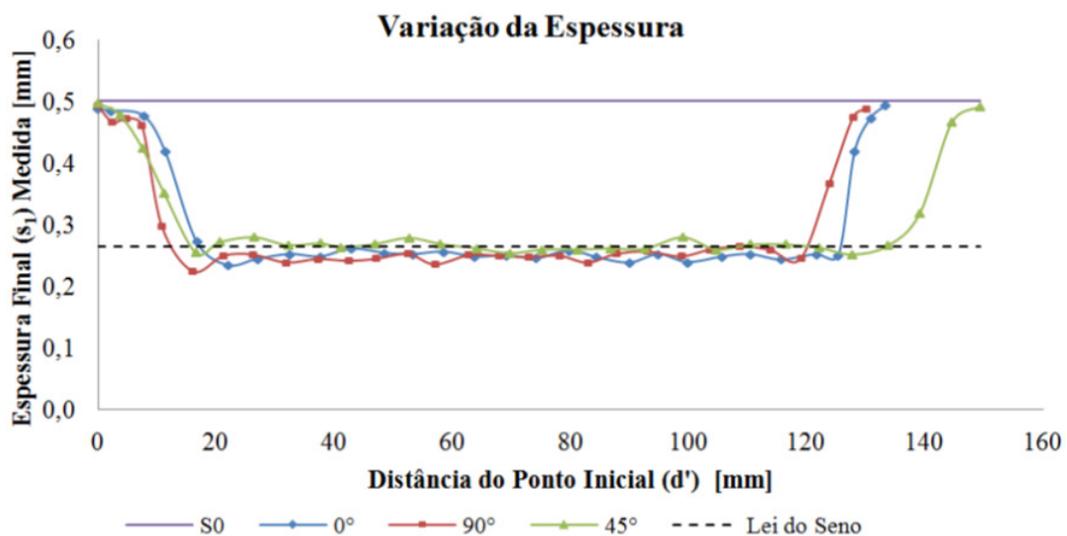


Figura 8.17: Gráfico Variação das Espessuras do experimento n°16 ( $\psi$ : 58° |  $\Delta_Z$ : 0,50 mm).

Tabela 8.4: Espessura Final ( $s_1$ ) medida em relação a distância ao ponto de partida  $d'$  no experimento nº16 ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta z: 0,50 \text{ mm}$ ).

Sentido de Laminação	0°		90°		45°	
	$d' [\text{mm}]$	$S_1$	$d' [\text{mm}]$	$S_1$	$d' [\text{mm}]$	$S_1$
1	0,00	0,488	0,00	0,493	0,00	0,497
2	2,10	0,485	2,44	0,466	3,70	0,478
3	7,70	0,477	4,66	0,472	7,54	0,424
4	11,40	0,418	7,44	0,462	11,22	0,351
5	16,70	0,272	10,82	0,298	16,54	0,255
6	21,90	0,234	16,06	0,225	20,60	0,272
7	26,90	0,244	21,22	0,250	26,44	0,280
8	32,44	0,252	26,18	0,252	32,12	0,267
9	37,62	0,248	31,88	0,239	37,56	0,270
10	42,88	0,261	37,12	0,245	41,12	0,264
11	48,46	0,254	42,44	0,242	46,88	0,269
12	53,32	0,252	46,98	0,245	52,56	0,279
13	58,44	0,256	52,44	0,253	57,94	0,269
14	63,74	0,248	57,00	0,236	64,04	0,262
15	69,00	0,250	62,74	0,251	69,62	0,254
16	74,12	0,245	67,92	0,250	75,12	0,260
17	79,66	0,258	72,84	0,248	81,08	0,260
18	84,34	0,247	78,12	0,250	86,72	0,262
19	89,92	0,238	82,84	0,239	92,44	0,261
20	94,82	0,252	87,66	0,253	98,90	0,280
21	99,76	0,239	93,00	0,257	104,52	0,260
22	105,62	0,248	98,66	0,249	110,32	0,268
23	110,34	0,252	103,54	0,260	116,34	0,268
24	115,52	0,243	108,54	0,265	122,04	0,263
25	121,52	0,252	113,72	0,260	127,52	0,252
26	125,28	0,250	118,88	0,245	133,56	0,266
27	128,00	0,418	123,74	0,366	139,00	0,318
28	130,72	0,473	127,84	0,475	144,44	0,466
29	133,22	0,493	130,06	0,488	149,22	0,492

Dos dados apresentados acima, salienta-se que o valor obtido pelo cálculo da Lei do Seno (4-1) para o ângulo de parede ( $\psi$ ) de  $58^\circ$  do experimento nº 16 é de  $\approx 0,26 \text{ mm}$ . Contudo, no sentido longitudinal de laminação da chapa ( $0^\circ$ ) e no sentido transversal de laminação da chapa ( $90^\circ$ ) alcançou-se uma espessura de  $0,23 \text{ mm}$ , e a  $45^\circ$  do sentido de laminação da chapa, a menor espessura medida foi  $0,25 \text{ mm}$ . Nos estudos de Duflou *et al.*, (2008) também se observou um alcance maior de conformação além do limite estabelecido pela lei do seno (Figura 4.6).

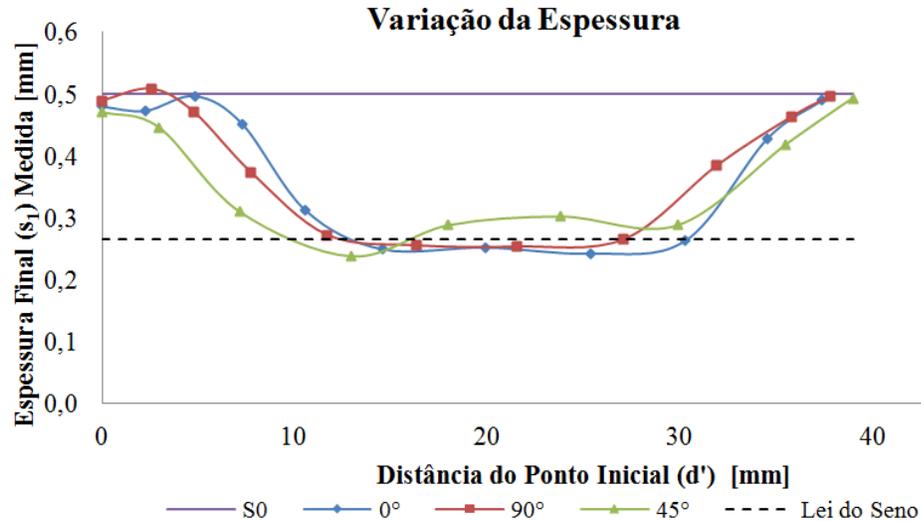


Figura 8.18: Gráfico Variação das Espessuras do experimento n°12 ( $\psi$ : 58° |  $\Delta z$ : 1,00 mm).

Tabela 8.5: Espessura Final ( $s_1$ ) medida em relação a distância ao ponto de partida  $d'$  no experimento n°16 ( $\psi$ : 58° |  $\Delta z$ : 1,00 mm).

Sentido de Laminação	0°		90°		45°	
	$d'$ [mm]	$S_1$	$d'$ [mm]	$S_1$	$d'$ [mm]	$S_1$
1	0,00	0,480	0,00	0,489	0,00	0,470
2	2,24	0,473	2,54	0,508	2,96	0,445
3	4,82	0,497	4,74	0,471	7,12	0,310
4	7,26	0,452	7,72	0,373	12,92	0,238
5	10,54	0,312	11,66	0,272	17,94	0,288
6	14,54	0,249	16,28	0,255	23,78	0,302
7	19,88	0,252	21,48	0,253	29,82	0,288
8	25,32	0,242	27,04	0,265	35,44	0,418
9	30,22	0,263	31,84	0,384	38,92	0,493
10	34,46	0,428	35,72	0,463		
11	37,28	0,490	37,72	0,496		

Assim como no experimento n° 16, também constatou-se espessuras (SF) abaixo do limite estabelecido pela Lei do Seno para o ângulo de parede ( $\psi$ ) de 58° ( $\equiv$  0,26 mm). Para o sentido longitudinal de laminação da chapa (0°) e para 45° do sentido de laminação da chapa, alcançou-se uma espessura de 0,24 mm, e para o sentido transversal de laminação da chapa (90°), a menor espessura medida foi 0,25 mm.

## 8.2 Conformidade Geométrica

A avaliação da conformidade geométrica entre o modelo de referência (CAD) e as peças estampadas foi realizada medindo as coordenadas XYZ de pontos colineares sobre a superfície interna (lado da estampagem). As medições foram feitas na direção longitudinal (X) de laminação e transversal (Y) de laminação com alinhamento passando pelo centro da peça estampada. A Figura 8.19 ilustra os pontos de medição usados.

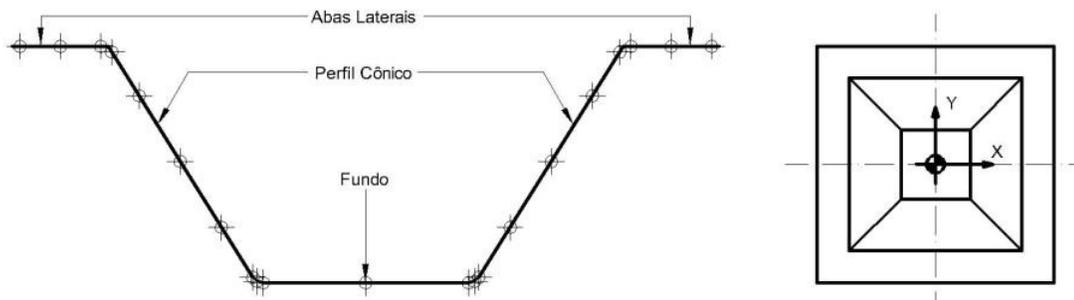


Figura 8.19: Modelo com a organização dos Pontos coletados e os eixos cartesianos.

Após as medições, os valores coletados foram usados no *software* AutoCAD 2011 ® e gerados os perfis. Este desenho foi comparado com a vista Frontal do arquivo CAD de referência.

Abaixo seguem as imagens comparativas entre o perfil CAD e o perfil medido com a variação do Passo Vertical ( $\Delta_z$ ) em 1,00 mm e 0,50 mm e nos Ângulos de Parede ( $\psi$ ) com  $58^\circ$  no sentido longitudinal (X) e transversal (Y) de laminação, todos resultantes da estratégia espiral (Estratégia 3 exemplificada da Figura 4.18). Nos Apêndices A e B constam respectivamente os gráficos do perfil CAD e perfil medido dos ensaios n<sup>os</sup> 10, 14, 15 e 17.

(ALLWOOD, BRAUN e MUSIC, 2010) relatam que as exigências industriais de precisão em componentes de chapa são tipicamente  $\pm 0,2$  milímetros, onde os atuais processos de ISF são capazes de uma precisão de apenas  $\pm 3$ mm.

A Figura 8.20 e Figura 8.21, referentes ao experimento n<sup>o</sup>12, mostram uma sutil variação na conformidade dos perfis cônicos da peça, todavia, uma enorme discrepância no que seria o fundo deste perfil de tronco de pirâmide, onde dos 100 mm projetados, apenas pouco mais de 23 mm foram conformados até o ocasionamento da fratura.

Nas abas laterais, onde não houve a aplicação da ISF, mas apenas a ação do prensa-chapas, também constatou irregularidades na chapa após o termino do processo de ISF.

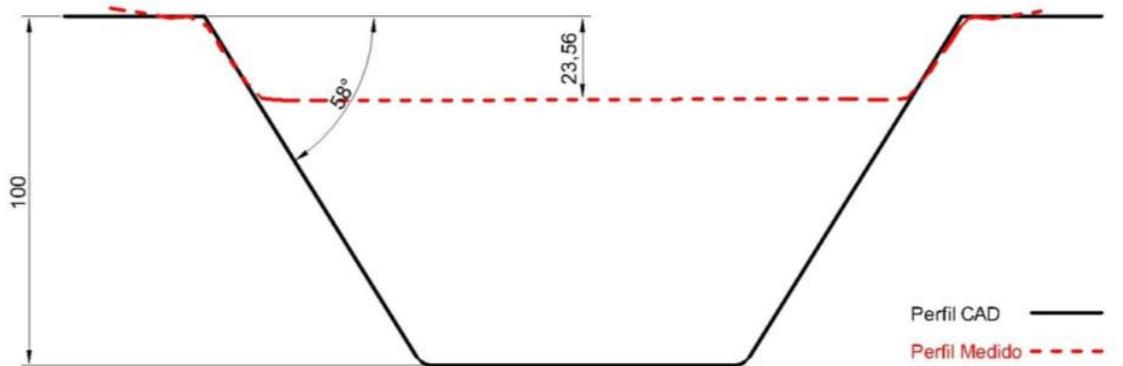


Figura 8.20: Perfil do experimento nº 12 no sentido Longitudinal. ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta z: 1,00 \text{ mm}$ ).

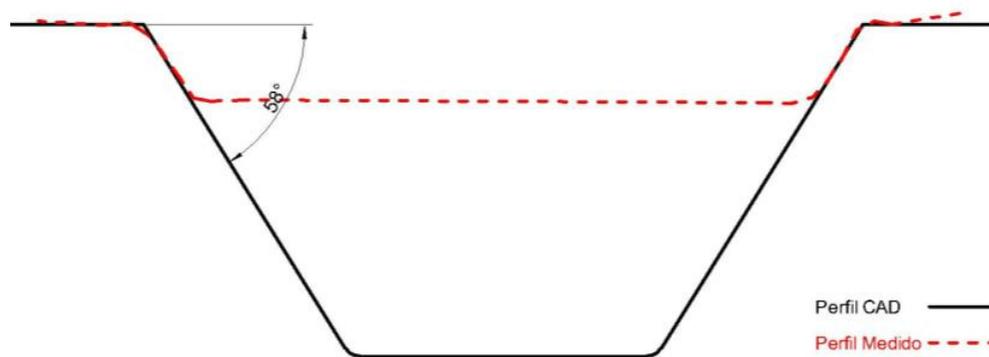


Figura 8.21: Perfil do experimento nº 12 no sentido Transversal. ( $\psi: 58^\circ \mid \Delta z: 1,00 \text{ mm}$ ).

A Figura 8.22 e Figura 8.23, referentes ao experimento nº12, mostram uma variação na conformidade dos perfis cônicos da peça maior do que as do experimento nº16, sobretudo na região próxima à concordância entre o perfil cônico e o fundo do experimento. No entanto, a profundidade projetada foi praticamente atingida sem a ocorrência de fraturas. Malhotra *et al.*, (2011) relata que na modalidade SPIF convencional há limitações com a precisão geométrica do componente.

Nas abas laterais, também se evidenciou irregularidades na chapa após o termino do processo de ISF. Tal fato já foi descrito por (AMBROGIO, DE NAPOLI, *et al.*, 2005) (ALLWOOD, BRAUN e MUSIC, 2010), onde relataram que dependendo da geometria produzida, as regiões externas da chapa que não sofrem a ação do punção se deformam após o

relaxamento dos fixadores (devido ao acúmulo de tensões residuais), causando discrepâncias dimensionais.

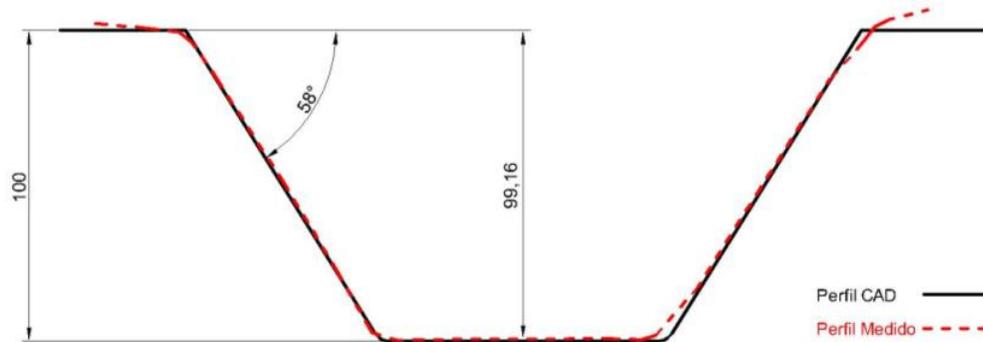


Figura 8.22: Perfil do experimento nº 16 no sentido Longitudinal. ( $\psi$ :  $58^\circ$  |  $\Delta_Z$ : 0,50 mm).

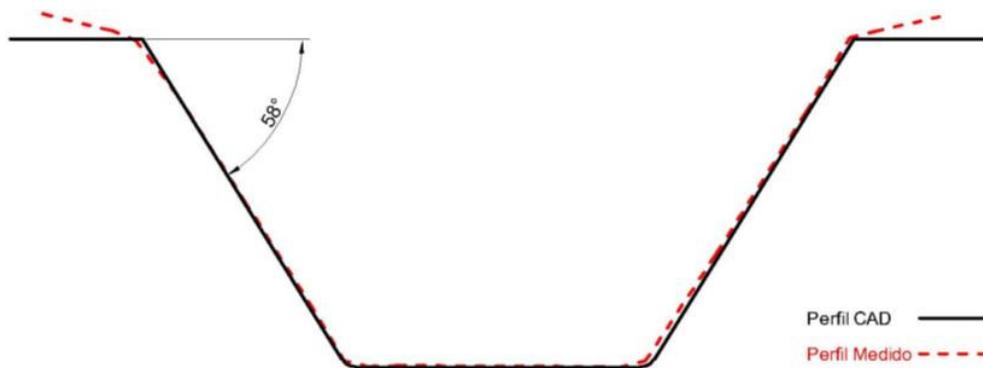


Figura 8.23: Perfil do experimento nº 16 no sentido Transversal. ( $\psi$ :  $58^\circ$  |  $\Delta_Z$ : 0,50 mm).

Tanto no experimento nº 16 quanto no experimento nº 12, o ângulo de parede ( $\psi$ ) é de  $58^\circ$ . Contudo, apenas no experimento nº 12 houve rompimento da chapa. A utilização do Passo Vertical ( $\Delta_Z$ ) de 0,50 mm e 1,00 mm, nos experimentos nº 16 e nº 12, respectivamente, confirma os relatos de Rauch *et al.*, (2008) e Jeswiet *et al.*, (2005), onde citam que o tamanho do Passo Vertical ( $\Delta_Z$ ) tem uma influência significativa sobre a rugosidade da superfície e conformabilidade, além de que, com o aumento do Passo Vertical ( $\Delta_Z$ ) o *blank* sofre condições mais elevadas de deformação, com isso, a conformabilidade do *blank* diminui com o tamanho crescente do incremento de Passo Vertical ( $\Delta_Z$ ), ocasionando discrepâncias geométricas maiores com o modelo CAD.

Os procedimentos descritos anteriormente, também foram aplicados nos experimentos nº 8 e nº 6, onde o Ângulo de Parede ( $\psi$ ) de  $54^\circ$  e o Passo Vertical ( $\Delta_Z$ ) de 1,00

mm eram comuns a ambos. Neste caso, como diferencial, está sendo confrontado a estratégia espiral (experimento n° 8) e a estratégia paralela de contorno (experimento n° 6), respectivamente estratégia 3 e estratégia 1 exemplificadas na Figura 4.18.

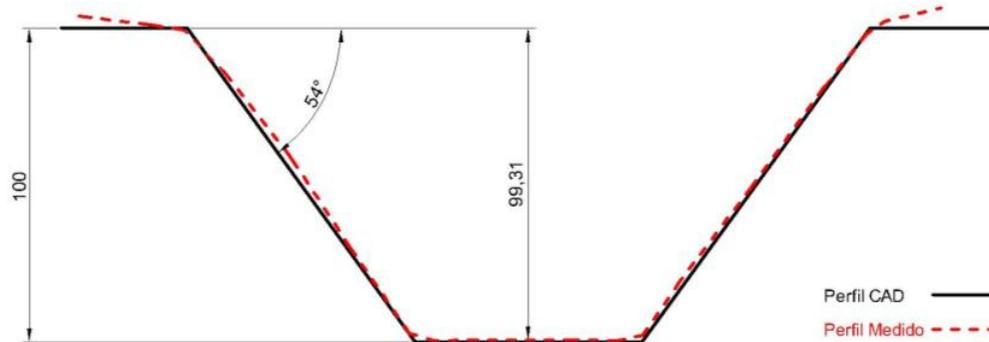


Figura 8.24: Perfil do experimento n° 8 no sentido Longitudinal. ( $\psi: 54^\circ \mid \Delta z: 1,00 \text{ mm} \mid$  Trajetória Espiral).

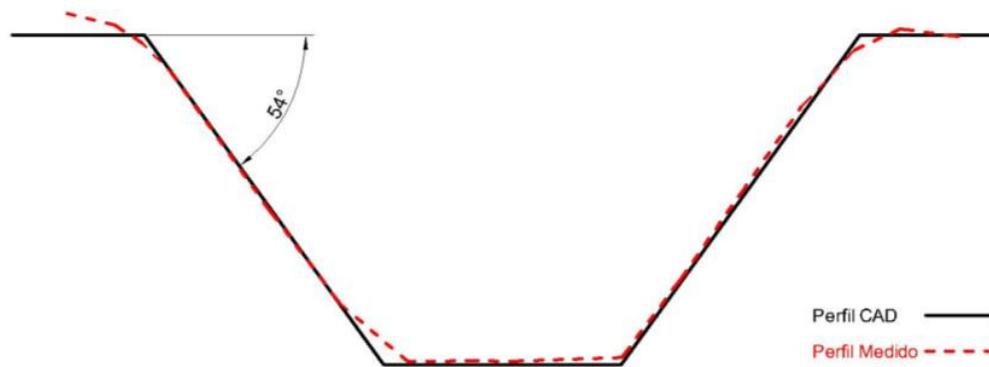


Figura 8.25: Perfil do experimento n° 8 no sentido Transversal. ( $\psi: 54^\circ \mid \Delta z: 1,00 \text{ mm} \mid$  Trajetória Espiral).

Do mesmo modo que nos experimentos n° 12 e n° 16, também foi constatado as irregularidades na chapa na região das abas laterais. Inconformidade geométrica maior, comparada aos experimentos descritos anteriormente.

Os resultados colhidos do experimento n° 6, mostram uma discrepância na conformidade geométrica muito maior do que os resultados apresentados até então. Ressalta-se que neste experimento, cuja profundidade inicial proposta era de 40 mm, houve uma fratura da chapa com aproximadamente 15 mm de profundidade (Figura 8.4), entretanto, o experimento foi levado até o final.

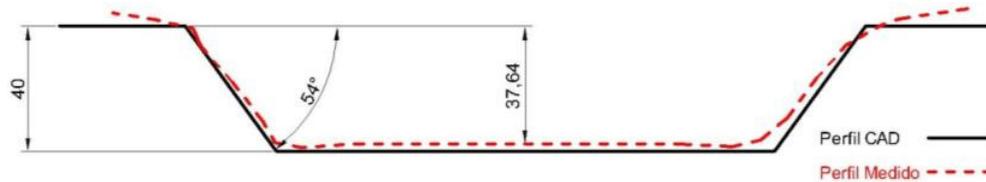


Figura 8.26: Perfil do experimento nº 6 no sentido Longitudinal. ( $\psi: 54^\circ \mid \Delta z: 1,00 \text{ mm} \mid$  Trajetória Paralela de Contorno)



Figura 8.27: Perfil do experimento nº 6 no sentido Transversal. ( $\psi: 54^\circ \mid \Delta z: 1,00 \text{ mm} \mid$  Trajetória Paralela de Contorno)

Nos trabalhos de (KOPAC e KAMPUS, 2005), (RAUCH, HASCOET, *et al.*, 2009) e (ROBERT, DELAMÉZIÈRE, *et al.*, 2012), citam que diferentes estratégias de usinagem combinadas com outros parâmetros, pode melhorar a distribuição da espessura da chapa e evitar o rompimento, além diminuir o retorno elástico e influenciar na conformidade geométrica e rugosidade superficial. Neste caso, o experimento nº 8, com estratégia espiral, dadas as combinações de Passo Vertical ( $\Delta z$ ) e Ângulo de Parede ( $\psi$ ), obteve-se o melhor resultado no que diz respeito à conformidade geométrica, contrariando os resultados obtidos por Rauch *et al.* (2009). Todavia, este mesmo autor relata e nenhum experimento atingiu a profundidade projetada independente do tipo de estratégia aplicado, fato este, também visto nos experimentos práticos deste trabalho.

### 8.3 Rugosidade Superficial

Além das faces cônicas, a rugosidade superficial também foi medida na área plana limpa da chapa que não houve deformação por conta da ferramenta de estampagem. Neste caso constatou-se um parâmetro de rugosidade superficial média de  $0,97 \mu\text{m}$ , com um desvio padrão de  $0,15 \mu\text{m}$ .

Também foi feita a medição na área plana com a marcação circular da visioelasticidade. Os valores obtidos encaixam-se dentro dos valores da rugosidade superficial da área plana limpa.

A Figura 8.28 aponta como o maior valor do parâmetro de rugosidade superficial  $R_z$  como sendo de 2,80  $\mu\text{m}$ , com o menor valor de 2,00  $\mu\text{m}$ , e com valor médio da rugosidade superficial  $R_z$  de 2,39  $\mu\text{m}$ . O desvio padrão foi de 0,26  $\mu\text{m}$  entre os dados analisados. Os experimentos avaliados foram os n<sup>os</sup> 12 e 16.

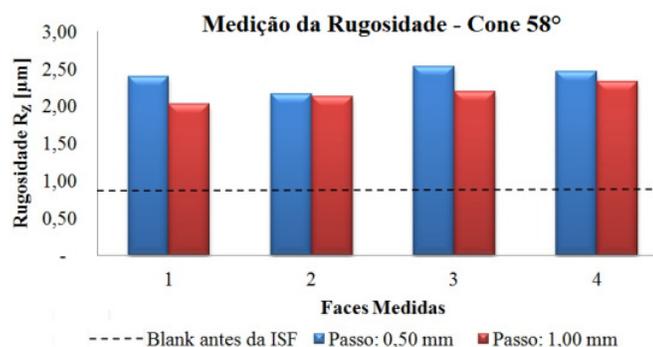


Figura 8.28: Variação da rugosidade superficial de acordo com a face medida [ $\psi$ : 58°].

A Figura 8.29 aponta como o maior valor do parâmetro de rugosidade superficial  $R_z$  como sendo de 3,20  $\mu\text{m}$ , com o menor valor de 1,70  $\mu\text{m}$ , e com valor médio da rugosidade superficial  $R_z$  de 2,38  $\mu\text{m}$ . O desvio padrão foi de 0,49  $\mu\text{m}$  entre os dados analisados. Os experimentos avaliados foram os n<sup>os</sup> 14 e 15.

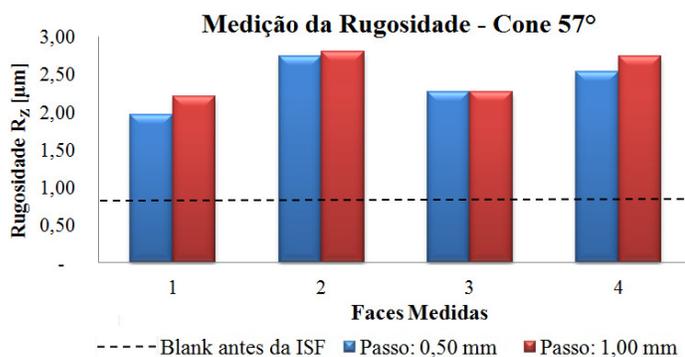


Figura 8.29: Variação da rugosidade superficial de acordo com a face medida [ $\psi$ : 57°].

A Figura 8.30 aponta como o maior valor do parâmetro de rugosidade superficial  $R_z$  como sendo de 2,80  $\mu\text{m}$ , com o menor valor de 1,90  $\mu\text{m}$ , e com valor médio da rugosidade

superficial  $R_z$  de 2,33  $\mu\text{m}$ . O desvio padrão foi de 0,32  $\mu\text{m}$  entre os dados analisados. Os experimentos avaliados foram os n<sup>os</sup> 10 e 17.

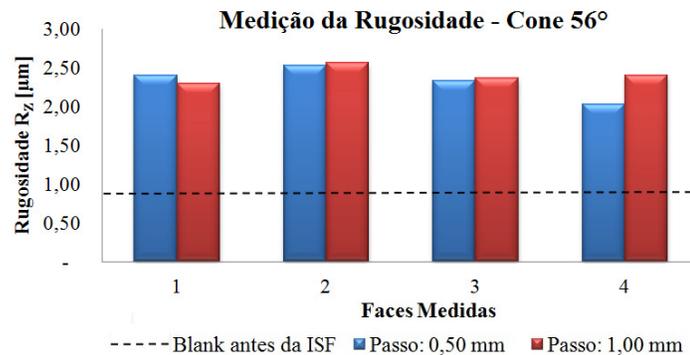


Figura 8.30: Variação da rugosidade superficial de acordo com a face medida [ $\psi$ : 56°].

A Figura 8.31 retrata a variação do valor médio da rugosidade superficial  $R_z$  em cada experimento. Observa-se um leve aumento da rugosidade com a diminuição do ângulo de parede ( $\psi$ ) para os experimentos realizados com o passo  $\Delta_z$  de 1,00 mm. Para os experimentos realizados com o passo  $\Delta_z$  de 0,50 mm, observa-se o contrário com a diminuição do ângulo de parede ( $\psi$ )

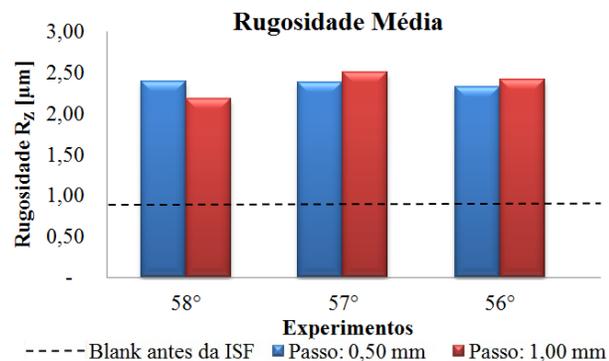


Figura 8.31: Variação da rugosidade superficial média de acordo com o experimento.

A Figura 8.32 retrata a variação do parâmetro  $R_z$  nos experimentos realizados com ângulo de parede ( $\psi$ ) de 54° e com o passo  $\Delta_z$  de 1,00 mm, mas com a estratégia de usinagem espiral e convencional.

Neste caso, a medição no experimento produzido pela estratégia de trajetória espiral, aponta como o maior valor do parâmetro de rugosidade superficial  $R_z$  como sendo de 2,70  $\mu\text{m}$ , como o menor valor 1,80  $\mu\text{m}$ , e com valor de  $R_m$ : 2,24  $\mu\text{m}$ . Desvio padrão de 0,27  $\mu\text{m}$  entre os dados analisados.

Já o experimento produzido pela estratégia de trajetória convencional, aponta como o maior valor do parâmetro de rugosidade superficial  $R_z$  como sendo de  $3,50 \mu\text{m}$ , como o menor valor  $2,40 \mu\text{m}$ , e com valor de  $R_m$ :  $2,77 \mu\text{m}$ . Desvio padrão de  $0,31 \mu\text{m}$  entre os dados analisados.

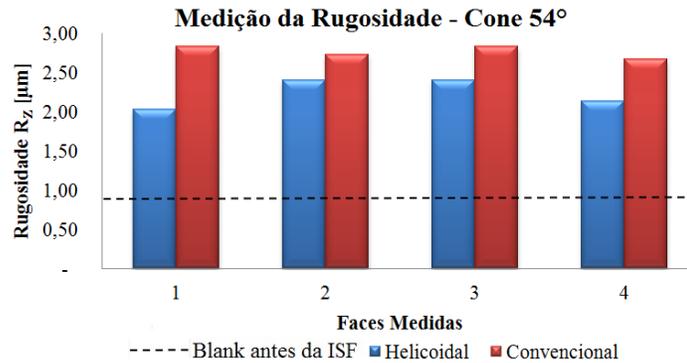


Figura 8.32: Variação da rugosidade superficial de acordo com a estratégia.

Os valores observados no experimento com a estratégia de trajetória espiral enquadram-se dentro dos valores coletados nos outros experimentos com as mesmas características ( $\psi = 58^\circ$ ,  $57^\circ$  e  $56^\circ$ ). Contudo, mesmo sendo um único experimento avaliado, os valores medidos no experimento com a estratégia de trajetória convencional apresentam um leve aumento em relação aos experimentos com a estratégia de trajetória espiral. A Tabela 8.6 traz de forma resumida os valores medidos nos experimentos.

Tabela 8.6: Valores de Rugosidade  $R_z$  medido nos experimentos [ $\mu\text{m}$ ].

$\psi$	$\Delta_z$	Maior Valor ( $R_z$ )	Menor Valor ( $R_z$ )	Média ( $R_z$ )	Desvio Padrão
$58^\circ$	0,50	2,80	2,00	2,39	0,26
	1,00	2,70	1,80	2,18	0,26
$57^\circ$	0,50	3,20	1,70	2,38	0,49
	1,00	3,20	1,70	2,50	0,43
$56^\circ$	0,50	2,80	1,90	2,33	0,32
	1,00	2,90	2,00	2,41	0,30
$54^\circ$	Espiral	2,70	1,80	2,24	0,27
	Convencional	3,50	2,40	2,77	0,31

Todos os valores colhidos nos experimentos descritos anteriormente estão ligeiramente abaixo do mínimo relatado nos estudos de Jeswiet *et al.* (2005), onde apresenta os valores médios de  $4 - 12 \mu\text{m}$  para os produtos decorrentes do processo de estampagem incremental.

## 9 CONCLUSÕES

Por meio da realização dos experimentos práticos, ficou demonstrado 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.

O processo de estampagem incremental em chapas de baixa espessura é uma necessidade atual do mercado, dado o aumento de necessidade de fabricação de peças únicas, personalizadas, com baixo custo, prazo e um com nível de qualidade aceitável.

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.

De acordo com os experimentos realizados, usando uma ferramenta de estampar com raio ( $R_T$ ) de 5,00 mm, os ensaios mostraram que o ângulo máximo ( $\psi$ ) de conformação da chapa de latão 70/30 com 0,50 mm de espessura varia de acordo com a estratégia de conformação e com o passo vertical ( $\Delta_Z$ ). Constatou-se que com a alteração da estratégia convencional para a estratégia espiral, houve um ganho no ângulo de parede de ( $\psi$ ) 4° (Experimento n° 5 versus n° 14) sem rompimento da chapa. Também ficou comprovado que com a diminuição do passo vertical ( $\Delta_Z$ ) para 0,50 mm, houve um ganho no ângulo de parede de ( $\psi$ ) 1°, concluindo um produto (Experimento n° 16) de 100 mm de profundidade sem rupturas.

Nas medições do parâmetro de rugosidade superficial  $R_Z$  nos experimentos realizados, mostrou-se uma tendência de menor rugosidade nas superfícies estampadas, para passo vertical ( $\Delta_Z$ ) é 0,50 mm. Ainda, evidenciou-se que a maior rugosidade medida e rugosidade média, ficaram por conta do experimento n° 7, cuja a estratégia de usinagem foi a convencional, deste modo, para uma melhor qualidade superficial, a trajetória espiral teve o melhor desempenho.

As análises das deformações nos experimentos realizados, indicam uma deformação planar ( $\varphi_2 = 0$ ), sobretudo nas direções 0° e 90° em relação ao sentido de laminação da chapa. Na direção a 45° do sentido de laminação da chapa, ocorrem deformações maiores do que nas direções 0° e 90° em relação ao de laminação da chapa, haja vista que esta se dá exatamente sobre o raio de concordância das faces cônicas da peça.

Produtos com uma pequena profundidade estampada (menor que 10 mm), como os espelhos para fechaduras, citados no começo do trabalho, podem ser produzidos, desde que, além do ângulo de parede ( $\psi$ ) de  $60^\circ$  como limite, suas características geométricas e precisão geométrica sejam atendidas.

## 10 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Pela inexistência de trabalhos ligados à ISF aplicados a chapa de latão 70/30, e a forte utilização deste material na indústria de ferragens para construção civil (espelhos, rosetas, etc...) e de enfeites, o estudo deste material em Estampagem Incremental com Ponto Duplo (TPIF), tanto com matriz positiva quanto negativa.

Utilização de estratégias multi-estágio (MSPIF) na programação da trajetória da ferramenta, com o objetivo de se verificar a ocorrência de maiores ângulos de trabalho para os troncos de pirâmide.

A confecção de produtos de latão 70/30 por ISF, ou a customização destes, conforme modelos já existentes no mercado e confrontar os dados técnicos e econômicos de cada um.

Experimentos em ISF utilizando outras ligas de latão, sobretudo, das ligas bifásicas ( $\alpha+\beta$ ) e de fase  $\beta$ , não contempladas neste trabalho.

Para a verificação de conformidade geométrica dos experimentos com o modelo CAD projetado, a utilização de um escâner 3D para poder digitalizar cada experimento realizado e compará-lo ao modelo digital mostra-se muito mais eficaz do que o modo utilizado neste trabalho.

A utilização de outras formas de estratégia de usinagem e o sentido de estampagem, visando melhores resultados no acabamento superficial e aumento do ângulo de parede. Também é interessante a execução de ISF por meio de um equipamento *High Speed*.

A análise metalográfica e de microdureza das áreas que sofreram a ação direta da ISF, e que não foram contempladas neste trabalho.

A utilização de ferramentas com diferentes raios ( $R_T$ ) e fluido lubrificante, dos usados neste trabalho, além da utilização de diferentes tipos de revestimentos na área de contato da mesma, visando obter novos conceitos sobre o acabamento superficial na chapa ensaiada.

## 11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT.NBR-4287. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.** Rio de Janeiro, p. 18. 2002.

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

ALLWOOD, J. M. *et al.* **A novel method for the rapid production of inexpensive dies and moulds with surfaces made by incremental sheet forming.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 2006 220: 323, p. 323-327, 2005.

ALLWOOD, J. M.; BRAUN, D.; MUSIC, O. **The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming.** Journal of Materials Processing Technology, Cambridge, United Kingdom, p. 1501–1510, 2010. doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.04.008.

ALLWOOD, J. M.; HOUGHTON, N. E.; JACKSON, K. P. **The Design of an incremental sheet forming machine.** Advanced Materials Research, p. 471 - 478, 2005.

AMBROGIO, G. *et al.* **Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing.** Journal of Materials Processing Technology, p. 156 - 162, 2005.

AMBROGIO, G.; FILICE, L.; GAGLIARDI, F. **Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming.** Materials and Design, Rende (CS), Italy, p. 501–508, 2012.

AMINO. **Dieless NC Forming.** Amino Corporation. Fujinomiya, p. 30. 2006.

ARRUDA, R. P. D. **Estampagem Incremental na Conformação de Chapas para Fabricação de Coletores Solares Planos.** UFRGS. Porto Alegre, p. 111. 2009. Tese de Doutorado.

ASM, I. **ASM HANDBOOK - Properties and Selection: Nonferrous Alloys an Special-Purpose Materials.** USA: ASM INTERNATIONAL, v. 2, 1992. 3470 p.

ASM, I. **ASM HANDBOOK - Forming and Forging.** USA: ASM International, v. 14, 1993. 2110 p.

ASM, I. **ASM HANDBOOK - Metallography and Microstructures.** USA: ASM International, v. 9, 2004. 2733 p.

ATTANASIO, A.; CERETTI, E.; GIARDINI, C. **Optimization of tool path in two points incremental forming.** Journal of Materials Processing Technology, p. 409-412, 2006.

BACKOFEN, W. A. **Deformation Processing.** Mielinik, E.M.: Metalworking Science and Engineering, McGraw-Hill, 1991.

- BAMBACH, M. **Process Strategies and Modelling Approaches for Asymmetric Incremental Sheet Forming**. Int Journal of Materials Processing Technology, Shaker Verlag. Aachen, 2008.
- BAMBACH, M. *et al.* **Initial Experimental and Numerical Investigations Into a Class of New Strategies for Single Point Incremental Sheet Forming (SPIF)**. Saarland University, Saarbrücken, Germany, 2003.
- BAMBACH, M.; HIRT, G.; AMES, J. Modeling of **Optimization Strategies in the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process**. Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP), Germany, p. 6, 2004. Saarland University.
- BRAGA, M. T. **Análise Comparativa da Recuperação Elástica de Chapas Dobradas pelos Processos Convencional e Não Convencional Utilizando Elastômero**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA. São José dos Campos, p. 169. 2009. Dissertação de Mestrado.
- BRAMLEY, A. N. **Incremental Sheet Forming Process for Small Batch and Prototype Parts**. Idee-Vision-Innovation, Verlag Meisenbach, p. 95-102, 2001. ISSN ISBN 3-87525-149-0.
- CASTELAN, J. **Utilização das Tecnologias CAD/CAM para Estampagem Incremental do Alumínio Série 1000**. Porto Alegre. 2007. Dissertação de Mestrado.
- CASTELAN, J. **Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano**. UFRGS. Porto Alegre. 2010. Tese de Doutorado.
- CASTELAN, J. *et al.* **Development of Cranial Implant Through Incremental Sheet Forming for Medical Orthopedic Applications**. International Journal of Materials Engineering and Technology, v. 4, n. 1, p. 63-80, 2010.
- CAVALER, L. C. D. C. **Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço Inoxidável AISI 304L**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, p. 74. 2010. Tese de Doutorado.
- CERETTI, E.; GIARDINI, C.; ATTANASIO, A. **Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines**. Journal of Materials Processing Technology, Brescia, Italy, p. 176–184, Março 2004.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, v. II, 1977. 315 p.
- COUTINHO, M. P. **INFLUÊNCIA DA MORFOLOGIA DA SUPERFÍCIE NA MOLHABILIDADE DO TITÂNIO COMERCIALMENTE PURO**. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, p. 84. 2007.
- DALEFFE, A. **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapa de Alumínio Puro**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre - RS. 2008. Dissertação de Mestrado.
- DIETER, G. E.; BACON, D. **Mechanical Metallurgy - SI Metric**. 2. ed. Londres: McGraw-Hill Book Company, 1988. 751 p.

- DOEGE†, E.; BEHRENS, B.-A. **Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen**. 2. ed. Hannover: 3, 2010. 916 p. Leibniz Universität Hannover, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen.
- DUFLOU, J. R. *et al.* **Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, p. 253–256, 2008.
- DURANTE, M. *et al.* **The influence of tool rotation on an incremental forming process**. Journal of Materials Processing Technology, Naples, Italy, p. 4621–4626, 2009.
- DURANTE, M.; FORMISANO, A.; LANGELLA, A. **Comparison between analytical and experimental roughness values of components created by incremental forming**. Journal of Materials Processing Technology, Naples, Italy, p. 1934–1941, 2010.
- EMMENS, W. C.; BOOGAARD, A. H. V. D. **An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming**. Journal of Materials Processing Technology, p. 3688–3695, 2009.
- FOLLE, L. F. **Metodologia de Medição do Coeficiente de Atrito em Estampagem e Avaliação da Influência da Lubrificação e Condições Superficiais Via Simulação Numérica**. UFRGS/LdTM. Porto Alegre, p. 65. 2008. Dissertação de Mestrado.
- FRANZEN, V. *et al.* **Single point incremental forming of PVC**. Journal of Materials processing technology, Dortmund, Germany, p. 462-469, 2009.
- GALDINO, A. **Estampagem Profunda**. Faculdade de Tecnologia Mogi Mirim / SP. Mogi Mirim, p. 116. 2010.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. D. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 247 p. Reimpressão.
- HIRT, G. *et al.* **Forming strategies and process modeling for CNC incremental sheet forming**. CIRP Annals, p. 203-206, 2004.
- 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.
- HIRT, G.; AMES, J.; BAMBACH, M. **Economical and ecological benefits of CNC incremental sheet forming (ISF)**. Institute of Materials Science/Precision Forming (LWP), Saarland University Building, 2003.
- 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. 94 – 98, 2007.
- HUSSAIN, G. *et al.* **Tool and lubrication for negative incremental forming of a commercially pure titanium sheet**. Journal of Materials Processing Technology, China, p. 193–201, 2008.

- HUSSAIN, G. *et al.* **A new formability indicator in single point incremental forming.** Journal of Materials Processing Technology, p. 4237–4242, 2009.
- HUSSAIN, G.; GAO, L. **A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, p. 419–435, 2007.
- HUSSAIN, G.; GAO, L.; ZHANG, Z. Y. **Formability evaluation of a pure titanium sheet in the cold incremental forming process.** Int Adv Manufacturing Technology 37, p. 920–926, 2008.
- INC., C. D. A. **Copper Development Association Inc.**, 2011. Disponível em: <<http://www.copper.org/resources/properties/microstructure/brasses.html>>. Acesso em: 28 Junho 2011.
- INGARAO, G. *et al.* **A sustainability point of view on sheet metal forming operations: material wasting and energy consumption in incremental forming and stamping processes.** Journal of Cleaner Production, Palermo, Itália, p. 28, 2012. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.01.012.
- JACKSON, K.; ALLWOOD, J. **The mechanics of incremental sheet forming.** Journal of Materials Processing Technology, p. 1158–1174, 2009.
- JESWIET, J. *et al.* **Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal.** Katholieke Universiteit Leuven, p. 27, 2005.
- JESWIET, J. *et al.* **Custom Manufacture of a Solar Cooker – a case study.** Journal Advanced Materials Research, v. 6-8, p. 487-492., May 2005.
- KOPAC, J.; KAMPUS, Z. **Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool.** Journal of Materials Processing Technology, p. 622–628, 2005. University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenia.
- LAMMINEN, L. **Incremental Sheet Forming with an Industrial Robot – Forming Limits and Their Effect on Component Design.** Trans Tech Publications - TTP, p. 457-464, 2005.
- LAMMINEN, L. *et al.* **Prototyping and low volume production of sheet metal components:** Research Report, 2003. Disponível em: <<http://www.nordicinnovation.net/prosjekt.cfm?id=1-4415-127>>. Acesso em: 16 Novembro 2011.
- LAMMINEN, L.; TUOMINEN, T.; KIVIVUORI, S. **Incremental Sheet forming with an Industrial Robot.** Institute of Materials Engineering Australasia Ltd, p. 331-335, 2005.
- LESZAK, E. **Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming.** 3,342,051, 19 Setembro 1967.
- 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, p. 65. 2009. Dissertação de Mestrado.

- MALHOTRA, R. *et al.* **A new methodology for multi-pass single point incremental forming with mixed toolpaths.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011.
- MARCONDES, P. V. P. **Manufatura de chapas metálicas - dobramento.** Ferramental - Revista Brasileira da Indústria de Ferramentas, p. 27-32, 01 Agosto 2009.
- MARQUES, A.; FERNANDES, A. Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Técnica de Lisboa. <http://www.demat.ist.utl.pt/>, **01 Outubro 1998.** Disponível em: <<http://www.demat.ist.utl.pt/departamento/jornal/jornal1/jornal1.html>>. Acesso em: 18 Janeiro 2011.
- MARQUES, T. A. F. **Estampagem Incremental de Polímeros.** Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, p. 109. 2010. Dissertação de Mestrado.
- MARTINS, P. A. F. *et al.* **Theory of single point incremental forming,** p. 247–252, 2008.
- MCLOUGHLIN, K. <http://www.irishscientist.ie>. **Institute of Technology Tallaght.,** 2005.
- MEIER, H. *et al.* **Increasing the part accuracy in dieless robot-based incremental sheet metal forming.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, p. 233-238, 2009.
- MEIER, H.; MAGNUS, C.; SMUKALA, V. **Impact of superimposed pressure on dieless incremental sheet metal forming with two moving tools.** CIRP Annals-Manufacturing Technology, p. 4, 2011.
- MICARI, F.; AMBROGIO, G.; FILICE, L. **Shape and dimensional accuracy in Single Point Incremental Forming: State of the art and future trends.** Journal of Materials Processing Technology, p. 390-395, 2007.
- MORO, N.; AURAS, A. P. **Processos de Fabricação: Conformação Mecânica II - Extrusão, Trefilação e Conformação de Chapas.** Florianópolis: CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE SANTA CATARINA, 2006.
- PANTAZOPOULOS, G.; VAZDIRVANIDIS, A. **Characterization of the Microstructural Aspects of Machinable  $\alpha$  -  $\beta$  Phase Brass.** MICROSCOPY AND ANALYSIS, p. 13 - 16, 2008.
- PASEBANI, S. *et al.* **Textural evolution of nano-grained 70/30 brass produced by accumulative roll-bonding.** Materials Science and Engineering A, p. 2050-2056, 2010.
- PATRÍCIO, L. F. S. **Estampagem Incremental de Chapas: Aplicação em Aço Comercial Automotivo.** PUC Minas. Belo Horizonte, p. 235. 2012. Tese de Doutorado.
- PATRÍCIO, L. F. S. *et al.* **A estampagem incremental como alternativa para a conformação em pequenas séries.** Corte & Conformação, p. 26-44, Outubro 2010.
- PIRATELLI FILHO, A. **Rugosidade Superficial.** III Seminário Metrologia. Brasília: [s.n.]. 2011. p. 41. UnB - Universidade de Brasília.
- RAUCH, M. *et al.* **A new approach for toolpath programming in Incremental Sheet Forming.** Int J Mater Form, Suppl 1, Springer/ESAFORM, p. 1191-1194, 2008.

- RAUCH, M. *et al.* **Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications.** Computer-Aided Design, Saint Nazaire, France, p. 877 - 885, 2009.
- ROBERT, C. *et al.* **Comparison between incremental deformation theory and flow rule to simulate sheet-metal forming processes.** Journal of Materials Processing Technology, Angers Cedex, France, p. 9, 2012. doi:10.1016/j.jmatprotec.2011.12.021.
- RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica.** [S.l.]: Escolar, 2005.
- SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica.** 1. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 1999. 167 p.
- SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas.** Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 193 p.
- SCHAEFFER, L.; ROCHA, A. D. S. **Conformação Mecânica: Cálculos Aplicados em Processos de Fabricação.** Porto Alegre: Imprensa Livre, 2007. 243 p. ISBN: 978-85-7697-073-6.
- SENA, J. I. V. D. **Estampagem incremental: Um novo conceito de produção.** Universidade de Aveiro. Aveiro - Portugal, p. 102. 2009. Dissertação de Mestrado.
- SILVA, P. J. D. **Estampagem Incremental Utilizada para Prototipagem de Carenagem de Aerogerador.** UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. Brasília, p. 113. 2011. Dissertação de Mestrado.
- SPINELLI, D. *et al.* **Metais - Uma visão Objetiva.** 1. ed. São Carlos: Suprema Gráfica e Editora Ltda, v. 1, 2004. 264 p.
- SY, L. V. **Modeling of Single Point Incremental Forming Process for Metal and Polymeric Sheet.** Università degli Studi di Padova. Padova, p. 205. 2009. Tese de Doutorado.
- TIBURI, F. **Aspectos do Processo de Estampagem Incremental.** UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 96. 2007. Dissertação de Mestrado.

**APÊNDICE A: Perfil do tronco de pirâmide com  $\psi: 57^\circ$ .**

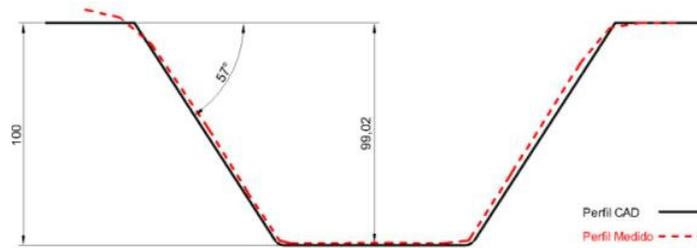


Figura 11.1: Perfil do tronco de pirâmide no sentido Longitudinal. ( $\psi: 57^\circ \mid \Delta_Z: 1,00 \text{ mm}$ )

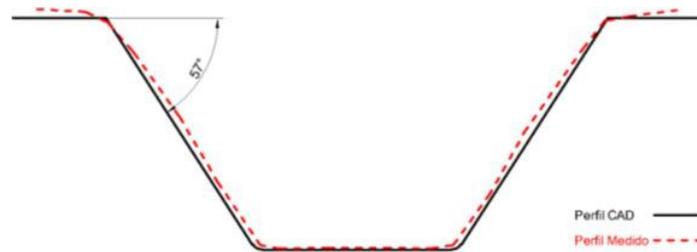


Figura 11.2: Perfil do tronco de pirâmide no sentido Transversal. ( $\psi: 57^\circ \mid \Delta_Z: 1,00 \text{ mm}$ )

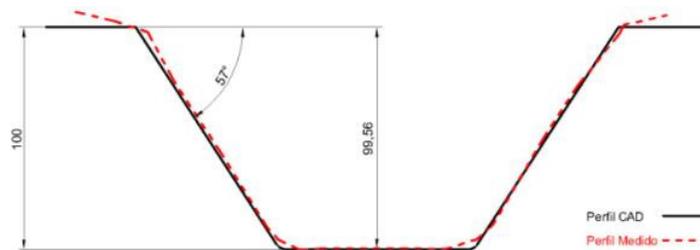


Figura 11.3: Perfil do tronco de pirâmide no sentido Longitudinal. ( $\psi: 57^\circ \mid \Delta_Z: 0,50 \text{ mm}$ )



Figura 11.4: Perfil do tronco de pirâmide no sentido Transversal. ( $\psi: 57^\circ \mid \Delta_Z: 0,50 \text{ mm}$ )

**APÊNDICE B: Perfil do tronco de pirâmide com  $\psi: 56^\circ$ .**

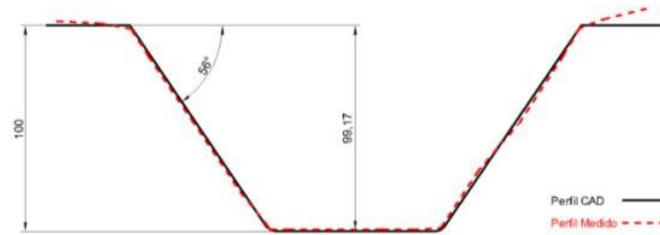


Figura 11.5: Perfil do tronco de pirâmide no sentido Longitudinal. ( $\psi: 56^\circ \mid \Delta z: 1,00 \text{ mm}$ )

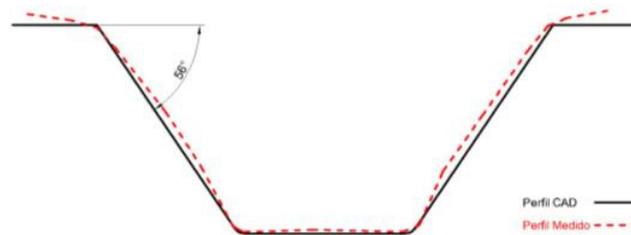


Figura 11.6: Perfil do tronco de pirâmide no sentido Transversal. ( $\psi: 56^\circ \mid \Delta z: 1,00 \text{ mm}$ )

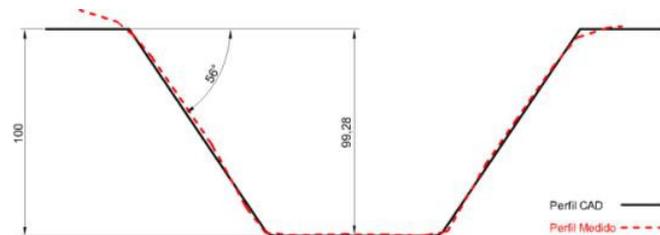


Figura 11.7: Perfil do tronco de pirâmide no sentido Longitudinal. ( $\psi: 56^\circ \mid \Delta z: 0,50 \text{ mm}$ )

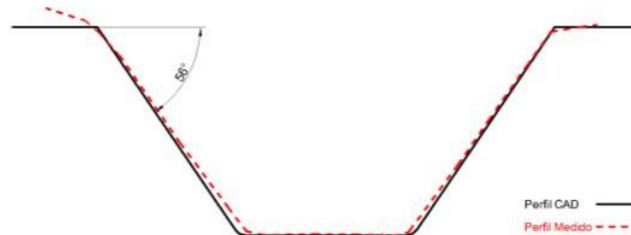


Figura 11.8: Perfil do tronco de pirâmide no sentido Transversal. ( $\psi: 56^\circ \mid \Delta z: 0,50 \text{ mm}$ )