

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

Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço
Inoxidável AISI 304L

Luiz Carlos de Cesaro Cavaler

Tese para obtenção do título de Doutor
em Engenharia Metalúrgica

Porto Alegre
2010

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

Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço
Inoxidável AISI 304L

Luiz Carlos de Cesaro Cavaler
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,
Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2010

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração 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. Eng. Jánes Landre Júnior (PUC Minas)

Prof. Dr. Eng. João Henrique Corrêa de Souza (UNIJUÍ)

Prof. Dr. Eng. Alexandre da Silva Rocha (PPGEM - UFRGS)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

Dedico este trabalho ao meu Pai
Glaudino de Cesaro Cavaler (*in
memorian*)

AGRADECIMENTOS

A Deus por eu concluir este trabalho.

A minha esposa Ana Lúcia e ao meu filho Lucas pela paciência no transcórrer deste trabalho.

Ao professor Lirio Schaeffer pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal na realização desta jornada.

Ao amigo e colega Fábio Peruch pelo estímulo e intensa colaboração deste trabalho.

Ao coordenador da Engenharia Mecânica Luciano Dagostin Bilessimo pelo incentivo na realização deste trabalho.

Aos colegas Anderson Daleffe, Jovani Castelan, Alexandre Milanez e Cletson Menegon pela valiosa ajuda nos experimentos práticos.

Aos amigos da sala de pesquisa João Mota Neto, Fernando H. Milaneze, Luciano Luiz Machado e Thiago Fernandes de Aquino pelas boas horas de convívio.

Aos acadêmicos da Engenharia Mecânica da Faculdade SATC Fernando Rampinelli Arns, Joelson Luiz Fernandes Filho, Bruno Carvalho Nazário, Fabrício Wessler, e Fabrício Tadeu Ricardo o meu muito obrigado.

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

Aos colegas engenheiros, José Eduardo Lima (ICON Estampos & Moldes), Valdir de Oliveira da Silva, Edmar Ouriques e Éderson Pereira Américo (Industrial Pagé) pela colaboração significativa neste trabalho.

Aos colegas do LdTM, especialmente aos Eng^{os} Luis Fernando Folle e Rodrigo Patrício Arruda que colaboraram na realização dos ensaios deste trabalho, o meu muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XIV
LISTA DE ABREVIACÕES.....	XVI
RESUMO.....	XX
ABSTRACT	XXI
1. INTRODUÇÃO	1
2. CONSIDERAÇÕES GERAIS DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM.....	4
2.1 Principais Parâmetros para a Caracterização da Matéria-Prima.....	4
2.1.1 Tensão	4
2.1.2 Deformações	5
2.1.3 Ensaio de Tração	9
2.1.4 Curva de Escoamento	12
2.1.5 Índice de Anisotropia	13
2.1.6 Curvas Limite de Conformação - Curvas CLC	14
2.1.7 Curvas CLC Adaptadas para Estampagem Incremental, Diagramas Limite de Estampagem Não-Covencional ou Diagramas Limite de Estampagem por Fratura .	17
2.2 Processo de Estampagem	21
2.2.1 Processo de Estampagem Profunda.....	22
2.3 Rugosidade	25
3. ESTAMPAGEM INCREMENTAL	29
3.1 Processo de Estampagem Incremental.....	30
3.1.1 Estampagem NC sem Matriz.....	30
<i>Blank</i>	30
3.1.2 Estampagem com Ponto Simples	35

3.2 Parâmetros Importantes na Estampagem Incremental	37
3.2.1 Tamanho, Forma e Material da Ferramenta de Estampar.....	38
3.2.2 Material da Geratriz	39
3.2.3 Passo Vertical	40
3.2.4 Rotação da Ferramenta.....	41
3.2.5 Lubrificação	42
3.3 Configurações do Processo e Suporte da Peça e Ferramenta na Estampagem Incremental.....	44
3.4 Máquinas para Estampagem Incremental	46
3.4.1 Centros de Usinagem e Fresadoras.....	46
3.4.2 Máquinas Dedicadas	46
3.4.3 Robôs	51
3.5 Produto	54
3.5.1 Geometria do Produto	54
3.5.2 Tamanho do Produto.....	57
3.5.3 Características do Acabamento da Superfície Estampada	57
3.5.4 Defeitos das Peças	58
3.6 Limitações e Aplicações do Processo	59
3.7 Tendências Mundiais	61
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	64
4.1 Infraestrutura do Trabalho	64
4.1.1 Máquina-Ferramenta	64
4.1.2 Ferramenta de Estampar.....	65
4.1.3 Dispositivo de Estampagem Incremental	66
4.1.4 Corpos de Prova	68
4.1.5 Software Edge CAM.....	69
4.1.6 Equipamentos Auxiliares	69
4.2 Metodologia dos Ensaios	70
4.2.1 Experimentos com Ferramentas Não Revestidas	71
4.2.2 Experimentos com Ferramentas Revestidas.....	72
4.2.3 Experimentos Complementares com Ferramentas Revestidas.....	73

5. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA.....	75
5.1 Ensaio de Tração	75
5.2 Curva de Escoamento	78
5.3 Índice de Anisotropia.....	79
5.4 Curva Limite de Conformação - CLC	80
5.5 Características Metalográficas	82
5.6 Análise da Composição Química	85
6. ENSAIOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	87
6.1 Apresentação e Análise dos Resultados.....	87
6.1.1 Textura e Rugosidade	88
6.1.2 Defeitos nos Corpos de Prova.....	94
6.1.3 Mudanças Microestruturais	95
6.1.4 Deformações	100
6.1.5 Redução da Espessura	107
6.1.6 Guia Prático para Determinação da Curva CLC para a Estampagem Incremental.....	110
6.1.7 Informações Complementares	114
6.1.8. Estudo de Caso.....	117
7. CONCLUSÃO.....	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
ANEXO A	128
ANEXO B	129
ANEXO C	130
ANEXO D	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Dimensões esquemáticas num ensaio de tração (Schaeffer, 2004).	5
Figura 2.2 - Exemplo de deformações que ocorrem em um componente estampado.7	
Figura 2.3 - Medição prática da deformação: a - círculo inicial, b - círculo após a deformação – elipse.	8
Figura 2.4 - Deformação em diferentes posições em uma linha de uma peça estampada (Lange, 1993).	9
Figura 2.5 - Diagrama convencional tensão versus deformação relativa (Schaeffer, 2004).	10
Figura 2.6 - Corpo de prova para ensaio de tração com dimensões em mm (ABNT NBR-6152, 1992).	10
Figura 2.7 - Diferença entre a curva tensão versus deformação relativa dos aços inoxidáveis austenítico - AISI 304 e ferrítico - AISI 430 (Guida, 2004).	11
Figura 2.8 - Curvas CLC para aços de espessura 0,8 mm (Junior, 2006).	15
Figura 2.9 - Curva CLC para o aço inoxidável 304A laminado a frio com espessura de 1,2 mm (Guida, 2004).	16
Figura 2.10 - Curva CLC para alumínio AA1050-0 desenvolvida por (Filice et al., 2002) em estampagem de pirâmides. Ambos os curvas convencional e não-convencional são mostradas (Jeswiet et al., 2005, Park et al., 2003).	18
Figura 2.11 - Sistema de coordenada e grade deformada sobre o corpo de prova para o teste da ranhura reta (Kim et al., 2002).	18
Figura 2.12 - Modificação na microestrutura do aço com grande ângulo de deformação em Estampagem Incremental aximétrica com ponto simples (Micari, 2004).	20
Figura 2.13 - Esquema da ferramenta de estampagem profunda (Schaeffer, 2004).22	
Figura 2.14 - Estampagem profunda de painel lateral externo de uma carroceria automotiva: a - área crítica, b - distribuição de espessuras após a conformação (Damoulis et at. 2003).	23
Figura 2.15 - Transformações ocorrentes na estampagem profunda de um corpo (Schaeffer, 2004).	24
Figura 2.16 - Diferentes estados de tensões em diferentes locais na estampagem de um corpo (Dieter, 1981).	25

Figura 2.17 - Caracterização do parâmetro R_a (Bet, 1999).....	26
Figura 2.18 - Caracterização do parâmetro R_t (Bet, 1999).....	26
Figura 2.19 - Definição da média da rugosidade R_z segundo norma DIN 4768 (König, 1981).....	27
Figura 3.1 - Variantes do processo de Estampagem Incremental de Chapas: a - Estampagem com Ponto Simples, b - Estampagem NC sem Matriz (Hirt et al., 2003).....	30
Figura 3.2 - Sistema de controle da máquina para Estampagem NC sem Matriz (Lamminen et al., 2005).	31
Figura 3.3 - Equipamento para processo de Estampagem NC sem Matriz (Lamminen et al., 2005; Amino, 2007).	31
Figura 3.4 - Princípio do processo de Estampagem NC sem Matriz (Junk et al., 2003).....	32
Figura 3.5 - Vários testes de componentes produzidos por ISF no LWP (Junk et al., 2003).....	33
Figura 3.6 - Redução da espessura da parede em diferentes ângulos “lei do seno” (Junk et al., 2003).	34
Figura 3.7 - Estratégia de estampagem multiestágio 3D (Junk et al., 2003).....	35
Figura 3.8 - Estampagem com ponto simples (Hirt et al., 2003).....	36
Figura 3.9 - Processo de Estampagem Incremental (Mcloughlin, 2005).	37
Figura 3.10 - Ferramentas para atuação no eixo Z: a - diâmetro de 20 mm, b - diâmetro de 10 mm (Lamminen et al., 2005).....	38
Figura 3.11 - Rugosidade R_z sob condições de estampagem padrão (Junk et al., 2003).....	40
Figura 3.12 - Geometria da ferramenta e velocidades do <i>spindle</i> (Jeswiet et al., 2005).....	41
Figura 3.13 - Ponta de ferramenta executando um ciclo de estampagem, utilizando como lubrificante graxa convencional (Alwood et al., 2005).....	43
Figura 3.14 - Configurações do processo de Estampagem Incremental (Alwood et al., 2005).....	44
Figura 3.15 - Tipos de suporte da peça e da ferramenta (Jackson, 2006).	45
Figura 3.16 - Base de estimação de: a - força vertical da ferramenta, b - força horizontal da ferramenta (Alwood et al., 2004).....	48

Figura 3.17 - Máquina do Instituto para Fabricação da Universidade de Cambridge - Reino Unido. (Alwood et al., 2004).....	51
Figura 3.18 - Princípio da Estampagem Incremental com robô (Junk et al., 2003)...	51
Figura 3.19 - <i>Setup</i> teste para Estampagem Incremental com um robô industrial: a - célula do robô; b - mesa de estampagem; c - ferramenta de estampagem (Lamminen, 2005).....	52
Figura 3.20 - CLC obtida na Estampagem Incremental para o aço inoxidável austenítico padrão EN 1.4301 2B. Os valores medidos estão sobre o primeiros círculos de fratura do ensaio. (Lamminen, 2005).....	54
Figura 3.21 - Correlação entre redução da espessura da chapa e dobramento. A espessura final s_1 depende da espessura inicial s_0 e do ângulo de dobramento θ (Junk et al., 2001).	55
Figura 3.22 - Suporte da ferramenta e peças (Lamminen et al., 2005).	56
Figura 3.23 - Banheira e o suporte da ferramenta (Lamminen et al., 2005).....	56
Figura 3.24 - Limites de estampagem em ISF: a - falha dúctil sobre passes do flange, b - desgaste da superfície em estampagem multiestágio (Hirt et al., 2003).....	59
Figura 3.25 - Peça fabricada pelo processo de Estampagem Incremental, mostrando o ângulo de dobramento interno menor que 90° (Alwood et al., 2005).	60
Figura 3.26 - Componente de duto de ar fabricado por ISF em aço DC04 (Fatronik, 2006).....	61
Figura 3.27 - Pára-lamas de automóvel estampado por ISF (Fatronik, 2006).....	62
Figura 3.28 - Painel decorativo (Fatronik, 2006).	63
Figura 4.1 - Centro de Usinagem Vertical Discovery modelo 4022.	65
Figura 4.2 - Ferramenta de estampar montada ao mandril porta-pinça.	66
Figura 4.3 - Dispositivo de Estampagem Incremental.	67
Figura 4.4 - Formato da geratriz.	68
Figura 4.5 - Peça obtida no ensaio de Estampagem Incremental: a - peça em corte, b - peça em 3 dimensões.	68
Figura 4.6 - Simulação da Estampagem Incremental.....	71

Figura 5.1 - Força aplicada F versus deformação absoluta Δl , resultante do ensaio de tração no aço inoxidável AISI 304L.....	76
Figura 5.2 - Tensão normal σ versus deformação relativa ϵ , resultante do ensaio de tração no aço inoxidável AISI 304L.....	77
Figura 5.3 - Comparação das curvas de ensaio de tração entre o fornecedor (ACESITA) e o ensaio prático (SATC).	78
Figura 5.4 - Tensão de escoamento K_f versus deformação verdadeira ϕ	78
Figura 5.5 - Comparação das curvas de escoamento entre UFRGS e SATC.....	79
Figura 5.6 - Curva CLC para o aço inoxidável AISI 304L.....	81
Figura 5.7 - Comparação das curvas CLC entre a literatura (ACESITA) e o ensaio prático (UFRGS).	82
Figura 5.8 - Direções de retiradas das amostras da chapa usada como matéria-prima.	83
Figura 5.9 - Microestrutura do aço inoxidável austenítico AISI 304L na direção superior: a - aumento de 50x, b - aumento de 100x, c- aumento de 200x, d - aumento de 400x.	84
Figura 5.10 - Microestrutura do aço inoxidável austenítico AISI 304L: a - direção longitudinal, aumento de 100x, b - direção longitudinal, aumento de 400x, c- direção transversal, aumento de 100x, d - direção transversal, aumento de 400x.	85
Figura 6.1 - Regiões de textura diferentes: a - ensaio nº 1 $d_z = 0,4$ mm, b - ensaio nº 2 $d_z = 0,6$ mm, c - ensaio nº 3 $d_z = 0,8$ mm.....	88
Figura 6.2 - Regiões de medição da rugosidade R_z	89
Figura 6.3 - Média da rugosidade R_z em função dos parâmetros de estampagem...91	91
Figura 6.4 - Comparação da média da rugosidade R_z entre as tabelas 6.2 e 6.3.91	91
Figura 6.5 - Influência do passo vertical d_z sobre a rugosidade: a - passo grande d_{z1} , b - passo pequeno d_{z2}	92
Figura 6.6 - Superfície estampada rompida no ensaio nº 17.....	94
Figura 6.7 - Enrugamento da superfície estampada ensaio nº 12.....	94
Figura 6.8 - Posição de extração das amostras para a micrografia.96	96
Figura 6.9 - Microestrutura do aço inoxidável AISI 304L depois da conformação: a - ensaio nº 7, b - ensaio nº 8, c- ensaio nº 34, d - ensaio nº 35, e - ensaio nº 39, f - ensaio nº 40, aumento 400x.....	97

Figura 6.10 - Variação da microdureza Vickers com a fração da martensita α' para o aço AISI 304L.....	99
Figura 6.11 - Região de medição das deformações (0° da direção de laminação) no ensaio nº 34.	101
Figura 6.12 - Deformação verdadeira ϕ versus distância do ponto de partida d' a 0° em relação a direção de laminação, no ensaio nº 34.....	103
Figura 6.13 - Deformação verdadeira ϕ versus distância do ponto de partida d' a 90° em relação a direção de laminação, no ensaio nº 34.....	103
Figura 6.14 - Deformação verdadeira ϕ versus distância do ponto de partida d' a 45° em relação a direção de laminação, no ensaio nº 34.....	104
Figura 6.15 - Corpo de prova rompido no ensaio nº 36.....	104
Figura 6.16 - Deformação verdadeira ϕ versus distância do ponto de partida d' a 0° em relação a direção de laminação, no ensaio nº 36.....	105
Figura 6.17 - Deformação verdadeira ϕ versus distância do ponto de partida d' a 90° em relação a direção de laminação, no ensaio nº 36.....	106
Figura 6.18 - Deformação verdadeira ϕ versus distância do ponto de partida d' a 45° em relação a direção de laminação, no ensaio nº 36.....	106
Figura 6.19 - Corpo de prova do ensaio nº 34 seccionado nas três direções de laminação (0° , 90° e 45°).....	108
Figura 6.20 - Espessura medida da chapa s' versus distância do ponto de partida d' no ensaio nº 34.	109
Figura 6.21 - Espessura medida da chapa s' versus distância do ponto de partida d' no ensaio nº 36.	110
Figura 6.22 - Curva CLC para a Estampagem Incremental obtida no ensaio nº 39.	112
Figura 6.23 - Curva CLC para a Estampagem Incremental obtida no ensaio nº 40.	112
Figura 6.24 - Curva CLC para o aço inoxidável austenítico padrão EN 1.4301 2B (Lamminen, 2005).	113
Figura 6.25 - Comparação entre curvas CLC.....	113
Figura 6.26 - Geometria do tampo de reservatório de ar comprimido.....	118
Figura 6.27 - Ferramenta em trabalho no ensaio nº 45.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304L (Guida, 2004).	12
Tabela 2.2 - Valores de maior deformação φ_1 e menor deformação φ_2 para o aço 304A (Guida, 2004).	17
Tabela 3.1 - Propriedades dos revestimentos empregados em matrizes e punções (Rocha, 2005).	39
Tabela 3.2 - Dados técnicos de máquinas de Estampagem NC sem Matriz (Lamminen et al., 2005; Amino, 2007).	47
Tabela 3.3 - Especificação da máquina (Alwood et al., 2004).	50
Tabela 3.4 - Termos e parâmetros empregados (Lamminen, 2005).	53
Tabela 4.1 - Características do Centro de Usinagem Discovery 4022.	64
Tabela 4.2 - Características das ferramentas.	66
Tabela 4.3 - Parâmetros de estampagem com ferramentas não revestidas.	72
Tabela 4.4 - Parâmetros de estampagem com ferramentas revestidas de TiAlN.	72
Tabela 4.5 - Características do revestimento PVD DUROTiN Performa+ (Brasimet, 2009).	73
Tabela 4.6 - Parâmetros de estampagem nos experimentos complementares com ferramentas revestidas.	73
Tabela 5.1 - Parâmetros obtidos no ensaio de tração do aço inoxidável AISI 304L.	76
Tabela 5.2 - Parâmetros médios do ensaio de tração no aço inoxidável AISI 304L.	77
Tabela 5.3 - Valores do índice de anisotropia do aço AISI 304L.	80
Tabela 5.4 - Valores de menor deformação φ_2 e maior deformação φ_1 .	81
Tabela 5.5 - Comparação da composição química dos aços inoxidáveis.	86
Tabela 6.1 – Ensaio em que foram monitoradas a profundidade de início de giro da ferramenta.	87
Tabela 6.2 - Valores de rugosidade R_z com ferramentas não revestidas.	89
Tabela 6.3 - Valores de rugosidade R_z com ferramentas revestidas de TiAlN.	90

Tabela 6.4 - Processo de conformação mecânica versus parâmetro R_z (Adaptado da: ASME B46.1, 1995).	93
Tabela 6.5 - Resumo dos ensaios quanto a ruptura.....	95
Tabela 6.6 - Microdureza Vickers na região conformada.	98
Tabela 6.7 - Fração de martensita α'	99
Tabela 6.8 - Deformações verdadeiras para regiões de medição (0° , 90° e 45° em relação à direção de laminação) no ensaio nº 34.....	102
Tabela 6.9 - Deformações verdadeiras para regiões de medição (0° , 90° e 45° em relação à direção de laminação) no ensaio nº 36.....	105
Tabela 6.10 - Valores máximos da maior deformação ϕ_1	107
Tabela 6.11 - Espessura medida s' em relação a distância ao ponto de partida d' no ensaio nº 34.	108
Tabela 6.12 - Espessura medida s' em relação a distância ao ponto de partida d' no ensaio nº 36.	109
Tabela 6.13 - Deformações verdadeiras para regiões de medição (0° , 90° e 45° em relação à direção de laminação) na região da fratura do ensaio nº 39.	111
Tabela 6.14 - Deformações verdadeiras para regiões de medição (0° , 90° e 45° em relação à direção de laminação) na região da fratura do ensaio nº 40.	111
Tabela 6.15 - Comparação entre os parâmetros para obtenção da curva CLC.	114
Tabela 6.16 - Lei do seno e valores medidos do ângulo de parede e da espessura da chapa na região conformada.....	115
Tabela 6.17 - Cálculo da rotação.	116
Tabela 6.18 - Estimativa da força vertical F_v e força horizontal F_h baseada nas equações 3.3 e 3.4.....	117
Tabela 6.19 - Parâmetros de estampagem no ensaio nº 45.	118

LISTA DE ABREVIAÇÕES

SIGLAS

3D	___	Três dimensões
AISI	___	American Iron and Steel Institute
CAD	___	Computer Aided Design
CAM	___	Computer Aided Manufacturing
CNC	___	Comando Numérico Computadorizado
CLC	___	Curva Limite de Conformação
ISF	___	Incremental Sheet Forming
HV	HV	Hardness Vickers
LdTM	___	Laboratório de Transformação Mecânica
LWP	___	Lehrstuhl für Werkstofftechnologie/Präzisionsformgebung
NC	___	Numerical Control
P&D	___	Pesquisa e Desenvolvimento
SATC	___	Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
SPIF	___	Single Point Incremental Forming
TPIF	___	Two Point Incremental Forming
UFRGS	___	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SÍMBOLOS

α	[°]	Ângulo de parede
α_1	[°]	Ângulo de parede medido
β	[°]	Metade do ângulo interior do cone formado pelo limite de contato entre a ferramenta e a peça de trabalho
β_1	[°]	Ângulo interior do cone formado pelo limite de contato entre a ferramenta e a peça de trabalho
δ	[mm]	Alongamento
Δl	[mm]	Deformação absoluta no comprimento
Δb	[mm]	Deformação absoluta na largura

Δs	[mm]	Deformação absoluta na espessura
Δr	—	Anisotropia planar
ε	[%]	Deformação relativa
ε_l	[%]	Deformação relativa no comprimento
ε_b	[%]	Deformação relativa na largura
ε_s	[%]	Deformação relativa na espessura
θ	[°]	Ângulo de dobramento
σ	[MPa]	Tensão normal
σ_e	[MPa]	Tensão de escoamento convencional
σ_N	[MPa]	Tensão de compressão no prensa-chapas
σ_r	[MPa]	Tensão radial
σ_t	[MPa]	Tensão tangencial
φ	—	Deformação verdadeira
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	—	Deformação verdadeira nas direções 1, 2 e 3
φ_l	—	Deformação verdadeira no comprimento
φ_b	—	Deformação verdadeira na largura
φ_s	—	Deformação verdadeira na espessura
A	[mm ²]	Área instantânea da chapa
A_0	[mm ²]	Área inicial da chapa
b	[mm]	Largura instantânea da chapa
b_0	[mm]	Largura inicial da chapa
b_1	[mm]	Largura final da chapa
C	[MPa]	Constante do material
d	[mm]	Diâmetro do punção
d_0	[mm]	Diâmetro inicial do círculo
d_1	[mm]	Diâmetro da ferramenta
d'	[mm]	Distância do ponto de partida
d_z	[mm]	Passo vertical
d_{z1}	[mm]	Passo vertical grande
d_{z2}	[mm]	Passo vertical pequeno
D	[mm]	Diâmetro da geratriz ou do <i>blank</i>
E	[GPa]	Módulo de elasticidade
F	N	Força aplicada

F_h	N	Força horizontal
F_R	N	Força de repuxo
F_v	N	Força vertical
h	[mm]	Altura do corpo
h_{z1}	[mm]	Altura maior do perfil de rugosidade
h_{z2}	[mm]	Altura menor do perfil de rugosidade
k_f	[MPa]	Tensão de escoamento
l	[mm]	Comprimento instantâneo da chapa
l_0	[mm]	Comprimento inicial da chapa
l_1	[mm]	Comprimento final da chapa
l_e	[μm]	Trajeto unitário de medição
l_m	[μm]	Trajeto total de medição
l_n	[μm]	Trajeto posterior
l_v	[μm]	Trajeto prévio
l_t	[μm]	Trajeto do apalpador
L_{rup}	[MPa]	Limite de ruptura
n	—	Índice de encruamento
N	[min^{-1}]	Freqüência de rotação
r	—	Razão de deformação ou índice de anisotropia
r_m	—	Anisotropia média
R_a	[μm]	Rugosidade Média Aritmética
R_m	[MPa]	Limite de resistência ou tensão máxima
R_t	[μm]	Rugosidade Máxima entre Cumes (Inferior e Superior)
R_T	[mm]	Raio da ponta da ferramenta
R_z	[μm]	Média da Rugosidade
s	[mm]	Espessura instantânea da chapa
s'	[mm]	Espessura medida da chapa
s_0	[mm]	Espessura inicial da chapa
s_1	[mm]	Espessura final da chapa
v_{fh}	[mm/min]	Velocidade de avanço nas direções XY
v_{fz}	[mm/min]	Velocidade de avanço na direção Z
V_0	[mm^3]	Volume inicial
V	[mm^3]	Volume final
X	—	Eixo X da máquina-ferramenta

Y	—	Eixo Y da máquina-ferramenta
Z	—	Eixo Z da máquina-ferramenta
Z _i	[μm]	Rugosidade singular

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo conhecer o comportamento do aço inoxidável austenítico AISI 304L para o processo de Estampagem Incremental de Chapas (ISF - *Incremental Sheet Forming*), baseado nos parâmetros: raio da ferramenta R_T , ângulo de parede α e passo vertical d_z . Os experimentos baseiam-se na variante da Estampagem Incremental denominada Estampagem Incremental com Ponto Simples (SPIF - *Single Point Incremental Forming*). Foram realizados 29 ensaios, em três ferramentas com raios de 5, 8 e 10 mm. Basicamente, a estrutura empregada foi um dispositivo para fixação da chapa, um centro de usinagem vertical e um *software* de CAD/CAM. O melhor acabamento da superfície conformada medido através da média da rugosidade R_z foi alcançado com ferramentas de raio de 10 mm. Após a conformação, os corpos de prova apresentaram um significativo encruamento de seus grãos, o que conduziu parte da microestrutura originalmente austenítica a uma transformação martensítica induzida por deformação (efeito TRIP). Pode-se constatar também, que existe uma tendência do aumento do ângulo de parede aumentar a microdureza da região encruada. Os ensaios de Estampagem Incremental nesta pesquisa mostram que os gráficos das deformações exibem a tendência de que o modo como ocorrem as deformações, aproximam-se muito da deformação plana ($\varphi_2 \cong 0$).

Palavras-chave: Estampagem Incremental, Aço inoxidável AISI 304L, Parâmetro médio da rugosidade R_z , Microestrutura, Deformações.

ABSTRACT

The objective of this work is to study the behavior of austenitic stainless steel AISI 304L during the ISF process (Incremental Sheet Forming). The study was based on the following parameters: tool radius R_T , wall angle α and vertical depth d_z . The tests were based on a variation of the ISF process, called SPIF (Single Point Incremental Forming). A total of 29 tests were performed with 5, 8 and 10 mm of tool radius. Basically, the structure used was a rig for attachment of the sheet, a Vertical Machining Center and a CAD/CAM software. The best surface finish formed, measured by parameter R_z , was obtained with 10 mm of tool radius. After the forming, the specimens presented a significant mechanical hardening of the grains, which induced part of the microstructure originally austenitic to a martensitic transformation induced by deformation (TRIP effect). It can also be verified that there is a tendency that the increase of the wall angle increases the micro hardness of the mechanical hardened area. The graphs of strains show a trend: the deformation mode is very close to plane strain conditions ($\phi_2 \cong 0$).

Key-words: Incremental Forming, AISI 304L steel, Roughness parameter R_z , Microstructure, Strains.

1. INTRODUÇÃO

As indústrias de estampagem de chapas metálicas freqüentemente empregam diferentes métodos de conformação, os quais são baseados no uso de ferramentas com geometria precisa para as peças fabricadas. Estes métodos são normalmente empregados para produção em massa, desde que os custos destas matrizes possam ser diluídos em um grande número de peças estampadas. Entretanto, quando séries pequenas são exigidas, os métodos convencionais de estampagem baseados em matrizes, podem ser substituídos por novos métodos, desenvolvidos com objetivo de cumprir os requisitos impostos pelas indústrias que produzem pequenos lotes (Cerro et al., 2006).

Neste contexto desponta uma nova tecnologia que poderá substituir em parte a estampagem tradicional de chapas metálicas, chamada Estampagem Incremental de Chapas (ISF - *Incremental Sheet Forming*), sendo desenvolvida por renomados institutos de pesquisa tal como o Institut für Bildsame Formgebung - IBF (Bambach et al., 2004). O processo consiste na estampagem de chapas de metal de forma rápida e, com razoável precisão a partir de arquivos de CAD (*Computer Aided Design* - Projeto Assistido por Computador) convertidos em arquivos de CAM (*Computer Aided Manufacturing*) em três dimensões. A trajetória da ferramenta controlada por programa, utilizando a tecnologia CNC, vai formando aos poucos a peça, através de pequenas deformações (Schaeffer, 2004; Mcloughlin, 2005).

O processo de Estampagem Incremental não requer ferramenta complexa, quando comparado com métodos tradicionais de estampagem. Este processo pode ser realizado utilizando-se uma fresadora ou centro de usinagem com controle numérico em três eixos, robôs ou máquinas especiais servocontroladas. Para conformar a peça é empregada uma ferramenta com ponta semi-esférica montada no eixo vertical da máquina e, o movimento desta ferramenta ao longo da trajetória estampa progressivamente a chapa de metal.

A deformação da tira (*blank*) pode ser alcançada de duas formas principais: a ferramenta de conformação tem um apoio abaixo da chapa (*Dieless NC Process Forming* - Processo de Estampagem NC sem Matriz) também chamado (TPIF - *Two-Point Incremental Forming*) ou a ferramenta de conformação é com simples ponto

(SPIF - *Single Point Incremental Forming*), ou seja, não tem um apoio abaixo da chapa (Jeswiet, 2001).

Considerando a faixa de mercado abrangente por esta tecnologia: lotes pequenos, peças customizadas (automóveis antigos, motocicletas, troféus etc.), próteses médicas, pequenas espessuras, geometrias complexas, prototipagem, percebe-se uma nova área tecnológica a ser explorada.

Na seqüência do trabalho são apresentadas as considerações gerais do processo de estampagem de chapas. Também se apresenta uma revisão bibliográfica detalhada relativa à Estampagem Incremental de Chapas. Na parte experimental descrevem-se os equipamentos e ferramentas, a caracterização da chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304L e, apresentam-se os ensaios realizados no processo de Estampagem Incremental juntamente com a análise dos resultados. Finalmente, apresentam-se as conclusões gerais.

Os aços inoxidáveis adequados para a estampagem são os austeníticos (série 300) e os ferríticos (série 400). Como exemplos das séries 300 e 400 pode-se citar respectivamente: AISI 304 e AISI 430. Os aços inoxidáveis da série 300 têm características próprias: grande alongamento e pequena anisotropia média. Estas características divergem quando comparados com a série 400. A maior dificuldade para Estampagem Incremental dos aços da série 300 apesar de apresentar um escoamento adequado é a grande redução de espessura.

O tema levantado pelo autor é de extrema importância, pois as pesquisas nesta área concentram-se em alumínio onde se dispõem de farta literatura, entretanto existe uma carência de informações de parâmetros do processo em Estampagem Incremental para materiais ferrosos com particularidades, tais como a aço inoxidável AISI 304L. A maior contribuição deste trabalho refere-se ao estudo dos parâmetros de estampagem: raio da ferramenta R_T , ângulo de parede α e passo vertical d_z para uso em pesquisas aplicadas em peças comerciais.

Especificamente para este material pretende-se que a tecnologia da Estampagem Incremental possa ser implementada em suportes ortopédicos, fornos solares, peças de barcos a vela, peças customizadas (painéis decorativos) e também na indústria nacional em um espaço de tempo relativamente curto, devido ao baixo custo do ferramental e a grande disponibilidade de máquinas-ferramentas CNC.

Este trabalho teve como objetivo geral conhecer o comportamento do aço inoxidável austenítico AISI 304L para o processo de Estampagem Incremental de Chapas (ISF - *Incremental Sheet Forming*) baseado nos parâmetros: raio da ferramenta R_T , ângulo de parede α e passo vertical d_z .

Foram objetivos específicos desta pesquisa com relação ao processo de Estampagem Incremental de Chapas relacionado ao aço inoxidável AISI 304L:

- Caracterizar o material empregado de acordo com os seguintes ensaios: tração, curva CLC, metalográfico e espectrometria de difração;
- Levantar informações da textura e do parâmetro de rugosidade R_z empregando ferramentas não revestidas e revestidas com TiAlN;
- Verificar o encruamento sofrido no processo de Estampagem Incremental através de ensaio de microdureza e metalográfico;
- Fazer um estudo completo das deformações verdadeiras que ocorreram nos ensaios dos corpos de prova;
- Constatar a validade da Lei do Seno;
- Propor um guia prático para determinação da Curva Limite de Conformação baseado no processo de Estampagem Incremental;
- Relacionar de forma experimental as rotações alcançadas nos ensaios com a temperatura;
- Calcular a espessura máxima da chapa em função da potência do centro de usinagem.

2. CONSIDERAÇÕES GERAIS DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM

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

2.1 Principais Parâmetros para a Caracterização da Matéria-Prima

Os conhecimentos dos parâmetros (tensão, deformação etc.) são necessários para a previsão da forma dos componentes após a conformação, para a previsão de defeitos conjugados com a otimização do fluxo de material durante a fabricação e para a previsão das propriedades mecânicas, bem como previsões sobre a qualidade do produto estampado.

2.1.1 Tensão

A tensão σ é um parâmetro definido como sendo o quociente entre a força F e a área inicial A_0 , sendo definida por:

$$\sigma = \pm \frac{F}{A_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.1)$$

Sendo:

F [N]: Força aplicada

A_0 [mm²]: Área inicial na qual esta força atua

Convencionalmente é definido que o sinal (+) é usado quando a tensão de tração e o sinal (-) quando a solicitação de compressão. A tensão é um parâmetro fundamental para se conhecer o quanto um material resiste durante a conformação ou após a conformação.

2.1.2 Deformações

As deformações podem ser caracterizadas por diversas formas:

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

A figura 2.1 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.

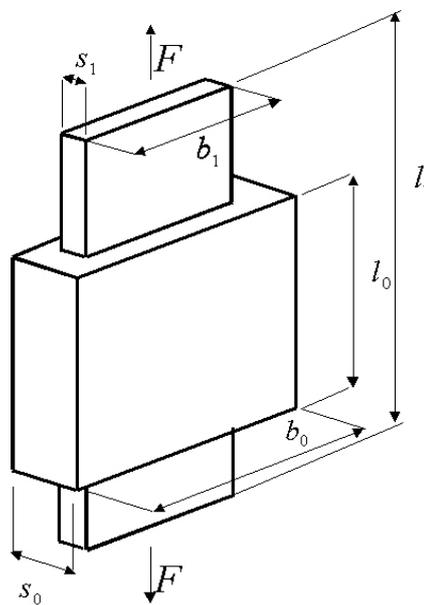


Figura 2.1 - Dimensões esquemáticas num ensaio de tração (Schaeffer, 2004).

A deformação absoluta no comprimento Δl é definida por:

$$\Delta l = l_1 - l_0 \quad [\text{mm}] \quad (2.2)$$

A deformação absoluta na largura Δb é definida por:

$$\Delta b = b_1 - b_0 \quad [\text{mm}] \quad (2.3)$$

A deformação absoluta na espessura Δs é definida por:

$$\Delta s = s_1 - s_0 \quad [\text{mm}] \quad (2.4)$$

A deformação relativa no comprimento ε_l é definida por:

$$\varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.5)$$

A deformação relativa na largura ε_b é definida por:

$$\varepsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.6)$$

A deformação relativa na espessura ε_s é definida por:

$$\varepsilon_s = \frac{s_1 - s_0}{s_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.7)$$

As deformações relativas são também comumente denominadas de deformações de engenharia:

A deformação verdadeira no comprimento φ_l é calculada por:

$$\varphi_l = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (2.8)$$

A deformação verdadeira na largura φ_b é calculada por:

$$\varphi_b = \ln\left(\frac{b}{b_0}\right) \quad (2.9)$$

A deformação verdadeira na espessura φ_s é calculada por:

$$\varphi_s = \ln\left(\frac{s}{s_0}\right) \quad (2.10)$$

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 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).

As deformações em diferentes locais de um componente estampado variam enormemente de um ponto a outro. Estas deformações localizadas podem ser analisadas através da gravação eletroquímica (grades circulares, por exemplo), como na figura 2.2. As grades devem ser gravadas sobre a chapa antes de ocorrer a estampagem (na geratriz).



Figura 2.2 - Exemplo de deformações que ocorrem em um componente estampado.

Após o processo de estampagem avaliam-se as deformações dessa grade as quais darão informações necessárias sobre a variação das deformações em regiões

críticas, figura 2.3. Esta figura mostra um círculo esquemático colocado na geratriz. A elipse é a figura medida após a estampagem. A espessura da chapa tem as dimensões s_0 antes da deformação e s_1 após a deformação (Schaeffer, 2004).

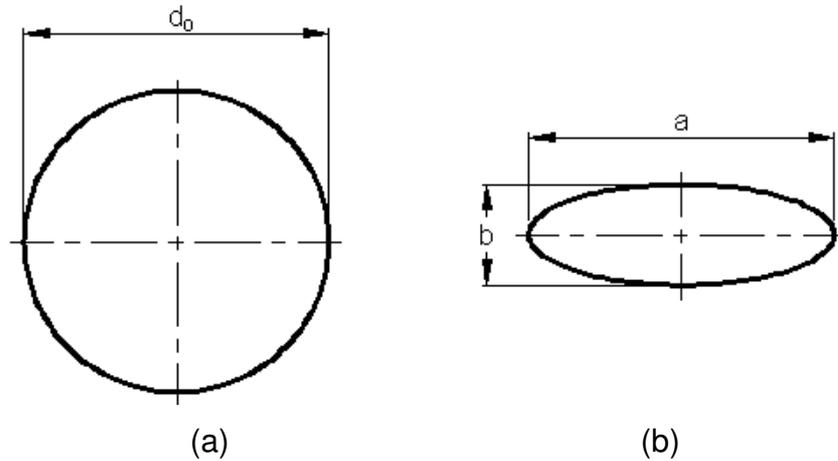


Figura 2.3 - Medição prática da deformação: a - círculo inicial, b - círculo após a deformação – elipse.

As três deformações principais são calculadas por:

$$\varphi_1 = \ln \frac{a}{d_0} \quad (2.11)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{b}{d_0} \quad (2.12)$$

$$\varphi_3 = \ln \frac{s_1}{s_0} \quad (2.13)$$

Considerando a lei de constância de volume tem-se:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (2.14)$$

ou ainda:

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (2.15)$$

As medições na rede deformada levam a uma relação entre as deformações. Na figura 2.4 observa-se como podem ser classificadas as deformações em função das solicitações que ocorreram durante a estampagem.

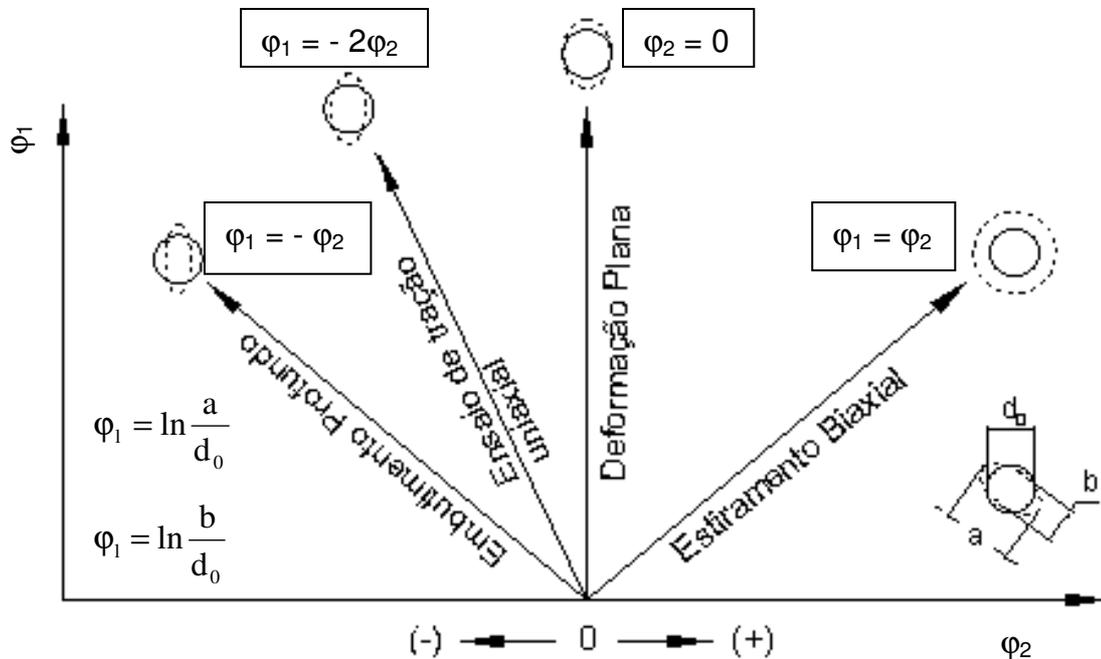


Figura 2.4 - Deformação em diferentes posições em uma linha de uma peça estampada (Lange, 1993).

Mesmo tendo sido quantificado as deformações em um determinado local, nada se pode afirmar sobre quão distante estas deformações estão do limite máximo de deformação.

2.1.3 Ensaio de Tração

O mais comum e tradicional dos testes para definir algumas propriedades mecânicas é o ensaio de tração. Através do ensaio de tração obtém-se (Schaeffer, 2004):

- Módulo de Elasticidade E [GPa];
- Tensão de Escoamento Convencional $\sigma_{0,2}$ ou σ_e [MPa];
- Limite de Resistência ou Tensão Máxima R_m [MPa];
- Limite de Ruptura L_{rup} [MPa];
- Alongamento δ [%].

A figura 2.5 mostra o diagrama convencional tensão versus deformação relativa.

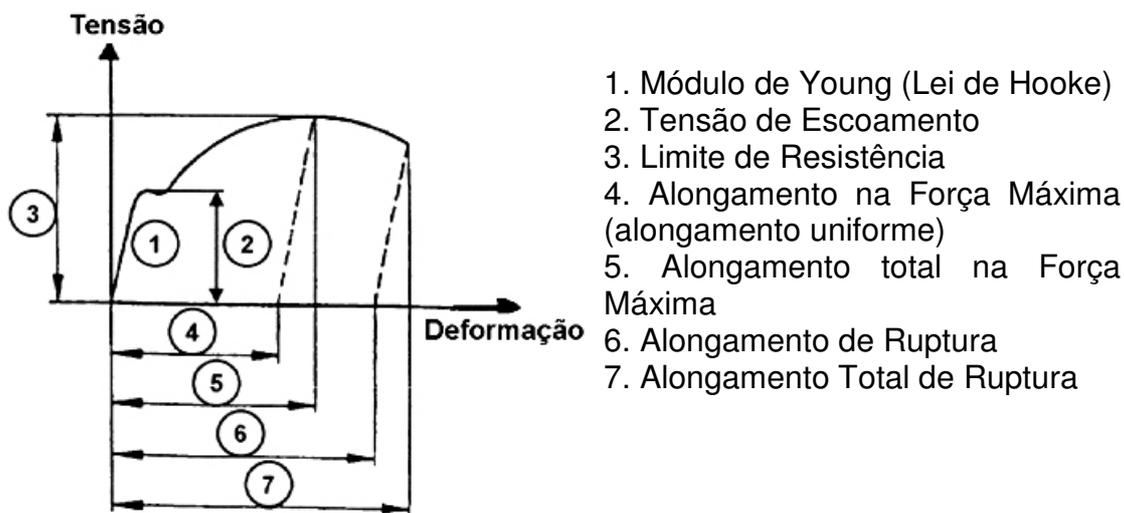


Figura 2.5 - Diagrama convencional tensão versus deformação relativa (Schaeffer, 2004).

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). A figura 2.6 mostra dimensões típicas de corpo de prova para ensaio de tração.

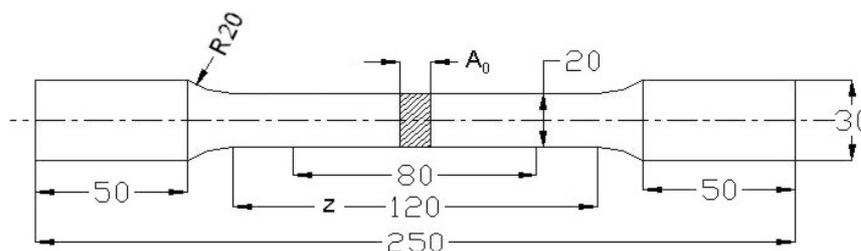


Figura 2.6 - Corpo de prova para ensaio de tração com dimensões em mm (ABNT NBR-6152, 1992).

Com as medições da força F e do comprimento l_1 se obtém a tensão σ e a deformação relativa ϵ em cada instante do ensaio. A tensão σ é calculada por:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.16)$$

Onde:

F [N]: Força aplicada

A_0 [mm²]: Secção inicial do corpo de prova

A deformação relativa é dada por ε é obtida por:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.17)$$

A figura 2.7 mostra resultados do diagrama convencional tensão σ e a deformação relativa ε ($\sigma \times \varepsilon$) para dois tipos de aços inoxidáveis. As curvas apresentadas na figura 2.7 mostram os parâmetros mais significativos para a área de conformação de chapas: a tensão de escoamento (aproximadamente de 297 MPa para o aço inoxidável AISI 304 austenítico e 250 MPa para o aço inoxidável AISI 430 ferrítico) (Acesita, 2007), a tensão máxima e o alongamento total no momento da força máxima.

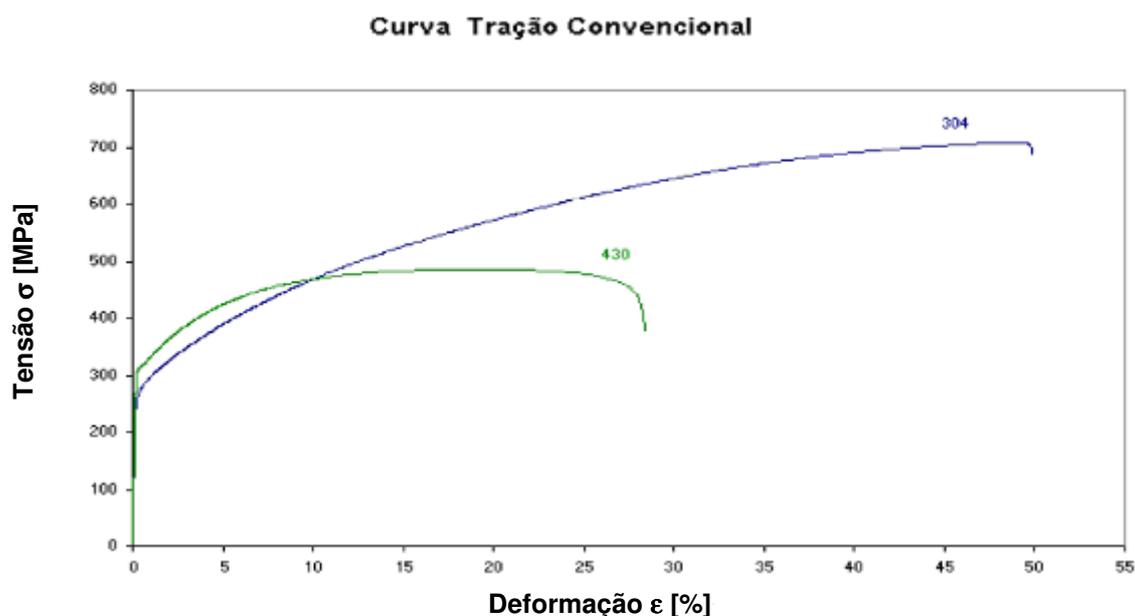


Figura 2.7 - Diferença entre a curva tensão versus deformação relativa dos aços inoxidáveis austenítico - AISI 304 e ferrítico - AISI 430 (Guida, 2004).

Para o aço inoxidável austenítico AISI 304L tem-se os valores das propriedades mecânicas de acordo com a tabela 2.1. Nesta tabela a deformação relativa ε foi calculada para um corpo de prova com comprimento inicial l_0 de 50 mm.

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304L (Guida, 2004).

E [GPa]	σ_e [MPa]	R_m [MPa]	ε [%] em 50 mm
193	300	700	54

2.1.4 Curva 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 φ 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:

$$k_f = \frac{F}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (2.18)$$

Onde:

F [N]: Força aplicada

A [mm²]: Secção ou área instantânea do corpo de prova ao longo do ensaio

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

$$V_0 = V$$

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

Isolando A tem-se que:

$$A = \frac{A_0 \cdot l_0}{l} \quad [\text{mm}^2] \quad (2.19)$$

A deformação verdadeira φ em cada instante é obtida por:

$$\varphi = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (2.20)$$

Onde:

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

l [mm]: 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):

$$kf = C.\varphi^n \quad [\text{MPa}] \quad (2.21)$$

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 (Schaeffer, 2004).

2.1.5 Índice de Anisotropia

O ensaio de tração permite obter o índice de anisotropia. O fenômeno de anisotropia é causado pelo alongamento dos grãos na direção de laminação. Para descrever a anisotropia são usados os índices de anisotropia. Eles são definidos como a razão das 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° , 45° , 90°).

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

$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{b_0 \cdot l_0}{b \cdot l}} \quad (2.22)$$

Onde:

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

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

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

l [mm]: Comprimento instantâneo do corpo de prova no ensaio de tração

Considerando as direções de laminação da chapa, pode-se a partir das três razões de deformação, calcular os valores da anisotropia média e da anisotropia planar respectivamente (Schaeffer, 1999):

$$r_m = \frac{1}{4} \cdot (r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (2.23)$$

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} \quad (2.24)$$

2.1.6 Curvas Limite de Conformação - Curvas CLC

No processo de estampagem profunda, vários parâmetros são necessários definir para a otimização do processo. Ferramental, matéria-prima, lubrificação e equipamento são alguns exemplos de grandes temas que devem ser perfeitamente conhecidos e definidos para que seja realizada uma análise prévia das deformações que irão ocorrer nos componentes a serem estampados. As Curvas Limite de Conformação (CLC) fornecem informações de como a combinação das principais deformações que ocorrerão no processo de fabricação poderão dar origem a uma peça com defeito ou não (Schaeffer, 2004).

Cada tipo de chapa metálica (aço, alumínio, latão, etc...) pode ser deformada até um certo nível para que ocorra a estricção localizada e, a fratura. Este nível depende principalmente da combinação de deformações impostas, ou seja, da relação entre as deformações principais, maior e menor. O nível mais baixo de

deformações ocorre no estado plano de deformações ou próximo dele, isto é, quando a deformação principal menor é zero.

Dentre os ensaios que podem ser utilizados para determinar uma CLC o mais prático é o Nakajima (Schaeffer, 2004). Basicamente este ensaio consiste em estirar corpos de prova com larguras diferenciadas, mantendo os demais parâmetros constantes. Do ensaio fazem parte uma matriz com prensa-chapas e um punção. Os corpos de prova são fixados na matriz pelo prensa-chapas, e se a força utilizada para frear o corpo de prova for insuficiente o mesmo escora para dentro da matriz e se for excedente ele rompe. O punção é forçado contra o corpo de prova provocando o estiramento (Schaeffer, 2004).

Devido a variação do formato dos corpos de prova ocorrem diferentes deformações, similares as que ocorrem num processo de estampagem real. Mede-se estas deformações inserindo-as num diagrama $\varphi_1 \times \varphi_2$ (Schaeffer, 2004). A CLC é um polinômio que passa por baixo da nuvem correspondente as deformações medidas, assumindo que qualquer par de deformações $\varphi_1 \times \varphi_2$ abaixo da curva esteja dentro de condições favoráveis para estampagem e conseqüentemente valores acima já tenham atingido a estricção localizada (Schaeffer, 2004). Curvas para aços fabricados pela empresa USIMINAS podem ser vistas na figura 2.8.

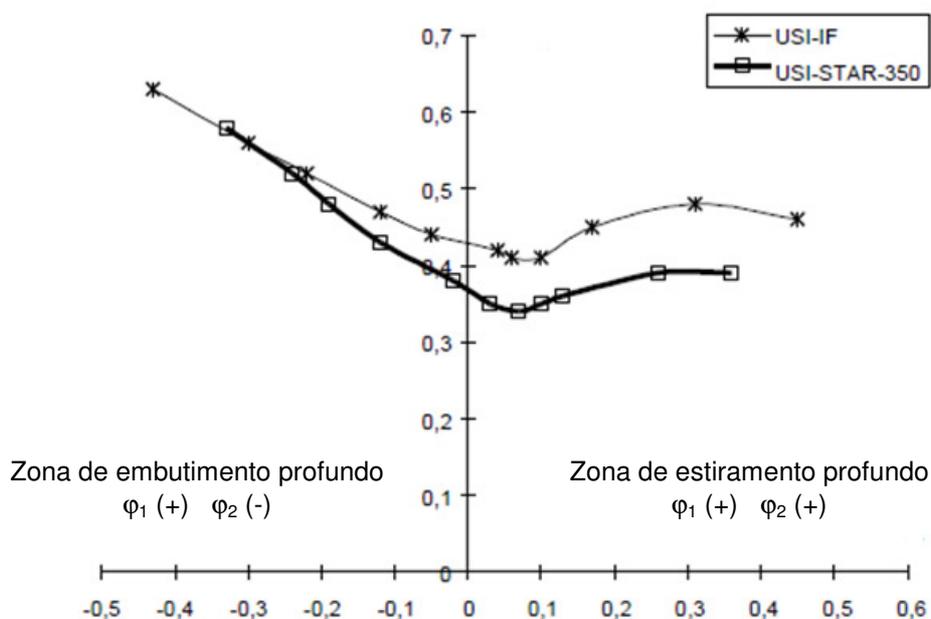


Figura 2.8 - Curvas CLC para aços de espessura 0,8 mm (Junior, 2006).

Na figura 2.8 o aço USI-STAR-350 é um aço de alta resistência baixa liga destinado à moderada conformação à frio, enquanto o aço USI-IF (*Interstitial Free*), é um aço carbono de alta resistência para estampagem profunda.

Admitindo-se que a curva representa os valores possíveis das combinações de deformação do corpo de prova que apontam sinais de início de ruptura, a curva pode ser interpretada como uma fronteira entre regiões de falha e segurança. A região acima da curva é a região de falha ou ruptura. A região abaixo da curva representa a região de segurança.

Na figura 2.9 é mostrada a curva CLC para o aço inoxidável 304A laminado a quente com espessura de 1,2 mm fabricado pela empresa ACESITA.

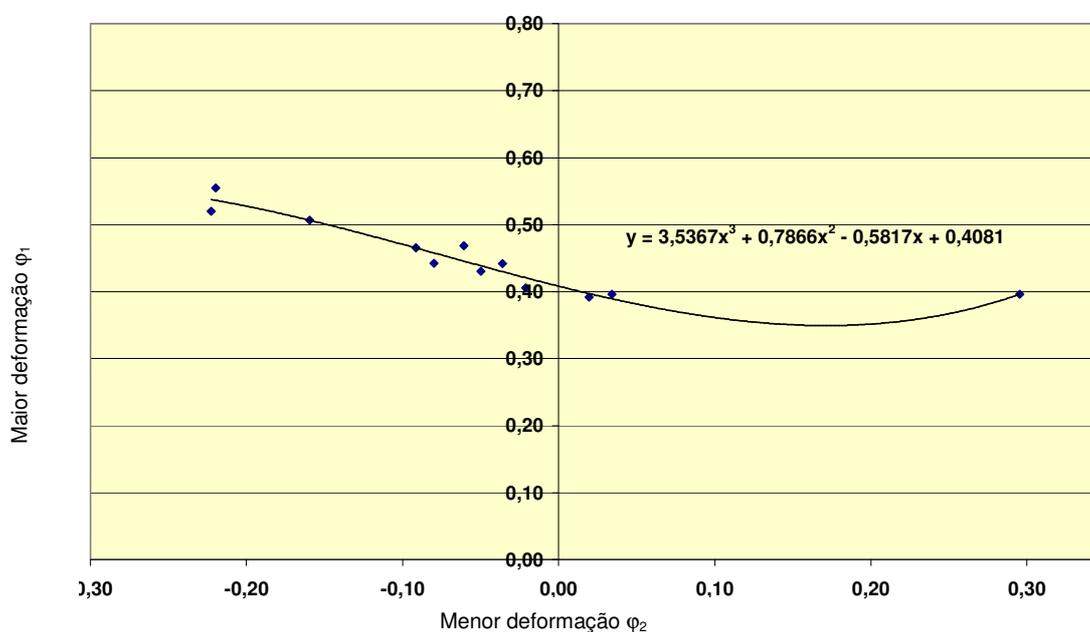


Figura 2.9 - Curva CLC para o aço inoxidável 304A laminado a frio com espessura de 1,2 mm (Guida, 2004).

Para elaborar o gráfico da figura 2.9 utilizaram-se os dados da tabela 2.2.

Os corpos de prova da tabela 2.2 estão apresentados da seguinte forma: os números representam a largura e as letras da seqüência com uma denominação interna da ACESITA. Os 12 pontos foram plotados no gráfico (figura 2.9) e através do *software Excel* foi adicionada uma linha de tendência, ou seja, foi encontrada uma curva que melhor se ajusta aos pontos e que tem a equação $y = 3,5367x^3 + 0,7866x^2 - 0,5817x + 0,4081$ onde x e y são os eixos cartesianos.

Tabela 2.2 - Valores de maior deformação φ_1 e menor deformação φ_2 para o aço 304A (Guida, 2004).

Corpo de Prova	Deformações	
	φ_1	φ_2
40p	0,52	-0,22
40	0,51	-0,16
60	0,55	-0,22
60p	0,47	-0,09
80	0,44	-0,08
100	0,43	-0,05
120	0,44	-0,04
140p	0,47	-0,06
160p	0,41	-0,02
180p	0,39	0,02
200p	0,40	0,03
200pvc	0,40	0,30

2.1.7 Curvas CLC Adaptadas para Estampagem Incremental, Diagramas Limite de Estampagem Não-Covencional ou Diagramas Limite de Estampagem por Fratura

As Curvas CLC usualmente tem uma forma em V mostrada na figura 2.10. Entretanto, uma grande quantidade de pesquisas tem mostrado que não somente são maiores as deformações alcançadas neste processo, mas a Curva Limite de Conformação em SPIF tem uma inclinação negativa como mostrado na figura 2.10 (Filice et al., 2002; Young et al., 2002). A máximas deformações na estampagem foram muito maiores (Filice et al., 2002), porque a chapa de alumínio AA1050-0 empregada nos experimentos foi gravada eletroquimicamente com uma grade; causando concentração de tensões e conseqüente a falha prematura ocorreu.

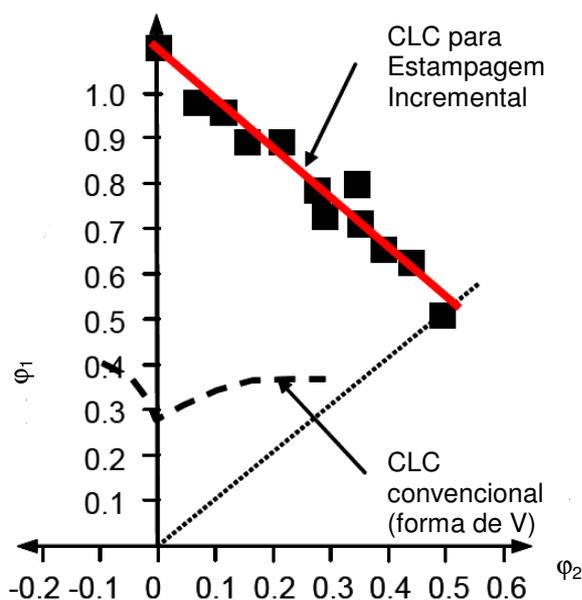


Figura 2.10 - Curva CLC para alumínio AA1050-0 desenvolvida por (Filice et al., 2002) em estampagem de pirâmides. Ambas as curvas convencional e não-convencional são mostradas (Jeswiet et al., 2005, Park et al., 2003).

Com objetivo de medir a deformação, grades circulares e retangulares foram preparadas na chapa. A forma inicial tinha diâmetro de 2,54 mm e foi gravada eletroquimicamente. A estampabilidade foi obtida pelo teste da ranhura reta. Um exemplo dos corpos de prova testados é mostrado na figura 2.11. A ferramenta move-se para trás e para frente ao longo de 40 mm com um avanço constante até que a trinca foi observada. A chapa foi então removida da fixação e, as deformações maiores e menores da grade deformada sobre o lado não contactado foram medidas.

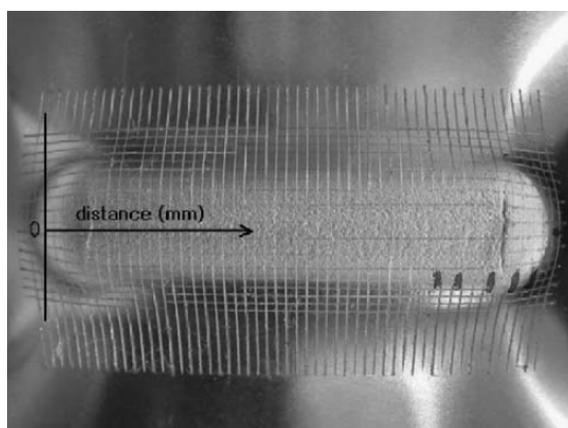


Figura 2.11 - Sistema de coordenada e grade deformada sobre o corpo de prova para o teste da ranhura reta (Kim et al., 2002).

a) Curvas Limite de Conformação versus Diagramas Limite de Estampagem por Fratura

Investigações experimentais relacionando o limite de deformações em SPIF, com o limite das deformações nas Curvas Limites de Conformação (CLC), mostram, que o limite das deformações em SPIF plotados em um gráfico ($\phi_2 \times \phi_1$) são maiores que aqueles dos processos convencional de estampagem de chapas (Jeswiet et al. 2005; Fratini et al, 2004).

A usual conexão entre as deformações da curva CLC com as deformações limites do SPIF presume que o modo de falha nos dois processos são os mesmos, como por exemplo, a estrição é o critério limite. Entretanto, o fato é que as deformações limitantes no SPIF excedem a CLC, podendo ser devido a presunção da estrição como o limite em SPIF sendo um erro (Silva et al., 2008).

A supressão da estrição localizada em SPIF é devido a incapacidade da estrição crescer. Se uma estrição foi para formar uma pequena zona de deformação plástica em contato com a ferramenta de Estampagem Incremental, teria que crescer ao redor circunferencialmente. Mesmo que as condições para estrição localizada pudessem ser encontradas em pequena zona de deformação plástica em contato com a ferramenta, o crescimento seria inibido pelo material ao redor que experimenta consideráveis baixas tensões (Silva et al., 2008).

As condições para supressão da estrição localizada acima não ocorrem em processo de estampagem de chapas de metal devido ao carregamento uniforme e condições de deformação. De fato, diferenças entre regiões vizinhas plasticamente deformadas no processo de estampagem convencional de chapas de metal são muito menores que em SPIF e, portanto, o crescimento e estrição são facilmente asseguradas (Silva et al., 2008).

Em ISF, a área de plastificação é limitada diretamente pela zona de contato entre a ferramenta e a chapa. O material na vizinhança é somente deformado plasticamente e assim o fluxo de material impede do lado de fora para dentro na zona de deformação. O resultado é que com um aumento da superfície durante o processo de estampagem a espessura da chapa tem de decrescer devido a constância de volume. Na prática isto significa que dependendo do material usado estrição e trincas ocorrem em áreas da geometria aonde a inclinação ultrapasse valores em torno de 60 a 65° (Hirt et al., 2006).

Desde que a redução da espessura da chapa em áreas críticas seja uma limitação para possíveis aplicações do processo, várias estratégias foram investigadas para alcançar perfis de espessuras uniformes (Hirt et al., 2006).

b) Materiais e propriedades do material

Trocas na microestrutura do material induzidas pelo processo de Estampagem Incremental tem sido investigadas (Micari, 2004). Os resultados da investigação estão dispostos na figura 2.12. Isto foi feito nos aços comuns DC04 (aço doce) e 1.4301 (AISI 304L). Em ambos os casos, os grãos são significativamente alongados devido a alta deformação.

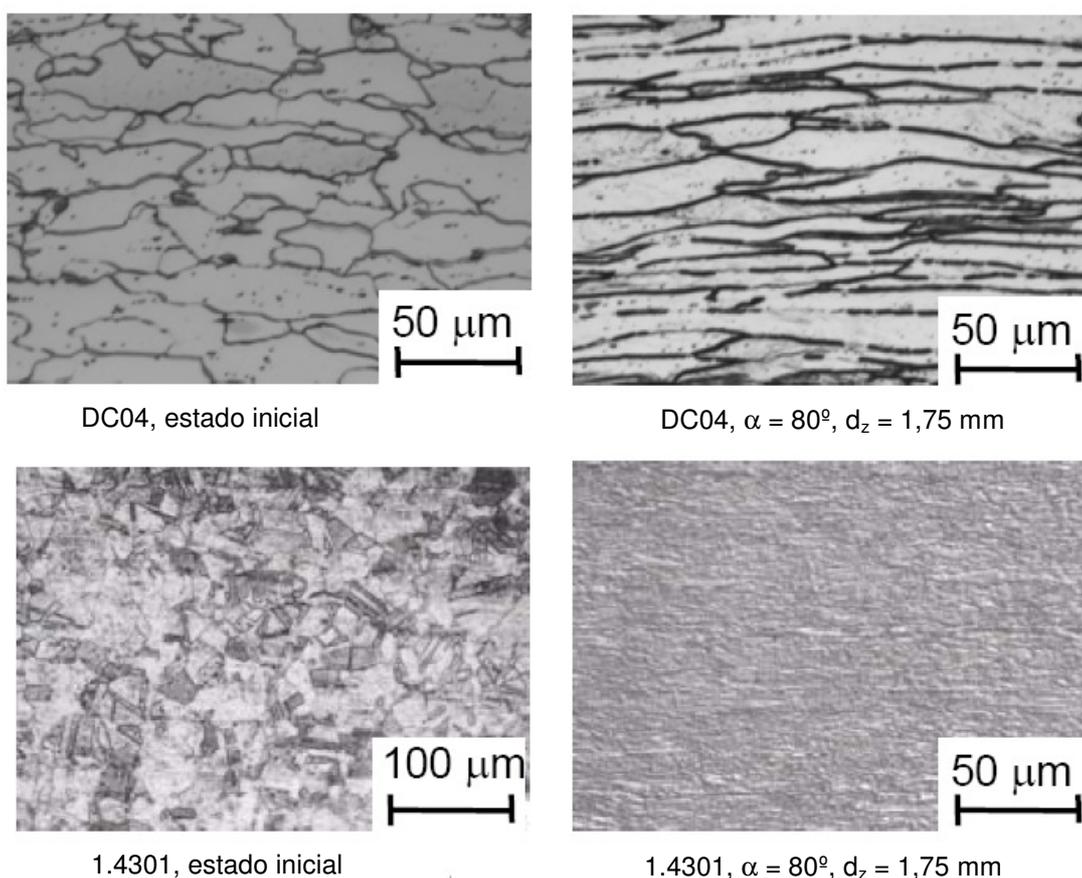


Figura 2.12 - Modificação na microestrutura do aço com grande ângulo de deformação em Estampagem Incremental aximétrica com ponto simples (Micari, 2004).

Além dos aços doces, vários tipos de aços inoxidáveis têm sido empregados para Estampagem Incremental, mas principalmente em propósitos de pesquisa.

(Amino et al., 2002) tem fabricado um incubador de aço inoxidável e peça de exaustor e (Hirt et al., 2002) tem feito várias peças de demonstração de aço inoxidável.

Em geral o aço inoxidável envolve significativamente mais dificuldades que aços doces ou alumínio quando conformados incrementalmente. Isto é principalmente devido ao alto limite de resistência a tração destes aços, ao alto coeficiente de encruamento e a diferente inclinação da curva para a recuperação elástica.

Dependendo da composição química dos aços inoxidáveis, estes podem apresentar ainda transformações de fase induzidas por deformação. Tal característica tende a aumentar a sua resistência mecânica, e em algumas situações pode também melhorar a ductilidade das chapas. Tal fenômeno é conhecido como efeito TRIP (*Transformation Induced Plasticity*).

Quando as chapas destes materiais são solicitadas, ocorre a transformação da austenita (cúbica de face centrada) para martensita ϵ (hexagonal compacta - paramagnética) ou para martensita α' (tetragonal de corpo centrado - ferromagnética) dependendo da composição química do material e da quantidade e temperatura de deformação. Com o gradual aumento da deformação, há um aumento gradativo da quantidade de martensita transformada, e com isto uma maior resistência mecânica é oferecida pelo material. Isto pode permitir a obtenção de peças de maior relação resistência/peso (Lebedev et al., 2000).

No momento da fabricação das chapas, a sua composição pode ser ajustada para aumentar ou diminuir a sua estabilidade microestrutural perante as deformações impostas. O grau de estabilidade da austenita é freqüentemente avaliado pelo parâmetro Md_{30} , que é a temperatura na qual 50% da martensita α' é obtida para uma deformação verdadeira de 0,3 no ensaio de tração. Estudos conduzidos por (Rocha et al., 2007) revelaram uma $Md_{30} = 19^{\circ}\text{C}$ e uma grande tendência a formação de martensita induzida por deformação para o aço 304H.

2.2 Processo de Estampagem

A estampagem, em seu sentido mais exato, compreende todas as operações executadas em prensas, utilizando chapas, incluindo operações de corte e de conformação (Blass, 1985).

A estampagem ou embutimento é um processo de conformação que envolve uma contínua intervenção entre ferramenta, lubrificante, material de conformação e equipamento. Exemplo típico deste processo é o embutimento de recipientes cilíndricos, obtidos a partir de discos planos previamente recortados. A grande vantagem da fabricação de componentes a partir de chapas metálicas é o reduzido custo originado pela minimização do uso da matéria-prima, aliado a baixa necessidade de usinagem. Com o aumento da motorização, a longo prazo, os processos de estampagem tornam-se cada vez mais importantes e significativos (Schaeffer, 2004).

Seguindo a classificação da norma DIN 8580 os processos de estampagem pertencem a dois grupos principais (Schaeffer, 1999):

- Grupo principal dos processos de conformação (nº 2);
- Grupo principal dos processos de separação (nº 3).

Ao grupo principal de conformação pertencem todos os processos que alteram a forma geométrica da peça sem separar ou adicionar material como, por exemplo, a estampagem profunda (embutimento profundo) e o dobramento. Ao grupo principal de separação pertencem os processos de corte como, por exemplo, o cisalhamento e o corte fino.

2.2.1 Processo de Estampagem Profunda

O processo de estampagem profunda ou embutimento profundo é um processo 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-chapas. A figura 2.13 mostra os principais elementos do processo.

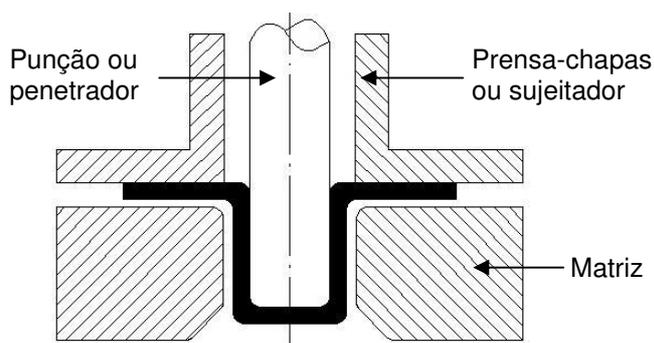


Figura 2.13 - Esquema da ferramenta de estampagem profunda (Schaeffer, 2004).

Durante o processo, o punção obriga a chapa penetrar na matriz movido pela ação de uma força denominada de força de repuxo (F_R). O material da chapa flui para dentro da matriz, configurando gradativamente as paredes laterais da peça (Mesquita et al., 2005).

O processo de estampagem profunda implica simultaneamente em deformações de tração e compressão. Neste processo a pressão do prensa-chapas (anti-ruga) é regulada de maneira a permitir a alimentação constante de material para dentro da matriz. Porém, a pressão ajustada deve ser suficiente para impedir o enrugamento do flange (Guida, 2006).

Na figura 2.14 é mostrado uma estampagem profunda de painel lateral externo de uma carroceria automotiva. As dimensões da chapa metálica são 250 x 150 mm. Usou-se uma chapa de aço St 1405 com espessura de 1 mm, um material de uso comum na indústria automotiva (Damoulis et at. 2003).

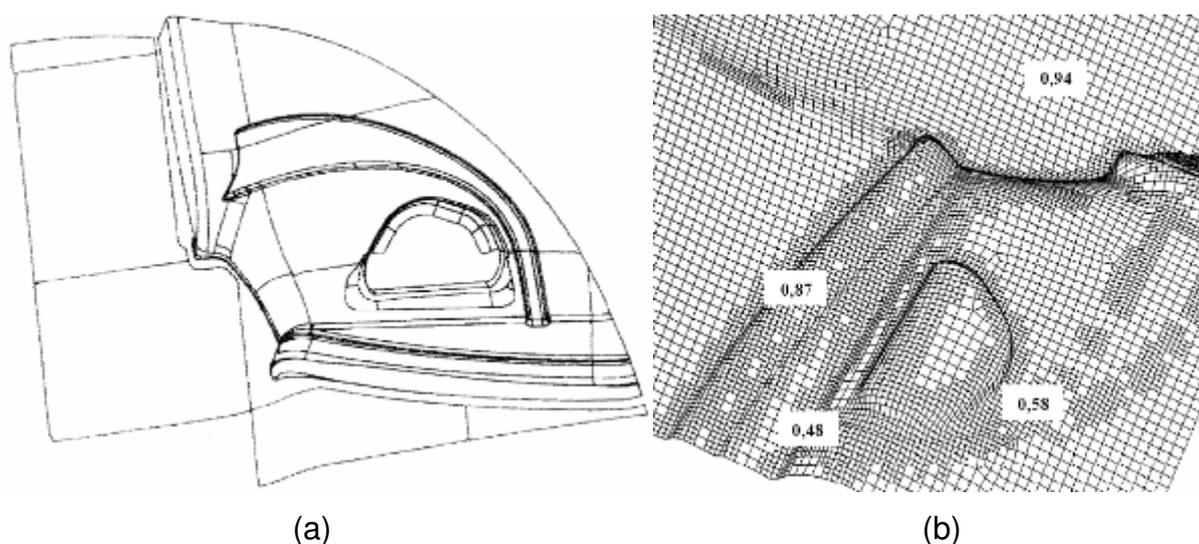


Figura 2.14 - Estampagem profunda de painel lateral externo de uma carroceria automotiva: a - área crítica, b - distribuição de espessuras após a conformação (Damoulis et at. 2003).

Na figura 2.14b nota-se, que em duas regiões a espessura mínima decresce para 0,48 mm, o que leva a uma alta probabilidade de ruptura por rasgamento no local (Damoulis et al. 2003).

Empregando-se um modelo simples como a fabricação de um componente em forma de copo, pode-se observar o principal fenômeno que ocorre no processo

de estampagem profunda, figura 2.15. São triângulos e retângulos existentes na geratriz transformados em retângulos no copo após a conformação. O excesso de material (triângulos) é passado para o corpo do produto estampado graças à função do prensa-chapas, que evita a formação de rugas na região do flange (Schaeffer, 2004).

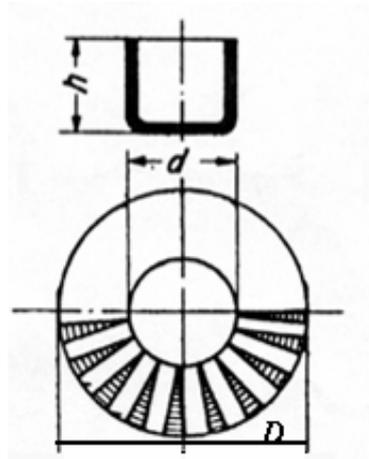


Figura 2.15 - Transformações ocorrentes na estampagem profunda de um corpo (Schaeffer, 2004).

Na figura 2.15, os parâmetros são os seguintes:

D [mm]: Diâmetro da geratriz ou do *blank*

d [mm]: Diâmetro do punção

h [mm]: Altura do corpo

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. Na região do flange onde atua o prensa-chapas figura 2.16, ocorrem as tensões de tração no sentido radial (σ_r), tensões de compressão no sentido circunferencial (σ_t) e na direção da espessura provocada pelo prensa-chapas (σ_N). No corpo lateral e no fundo ocorrem tensões de tração no sentido radial (σ_r) e tensões de compressão no sentido circunferencial (σ_t) (Schaeffer, 2004).

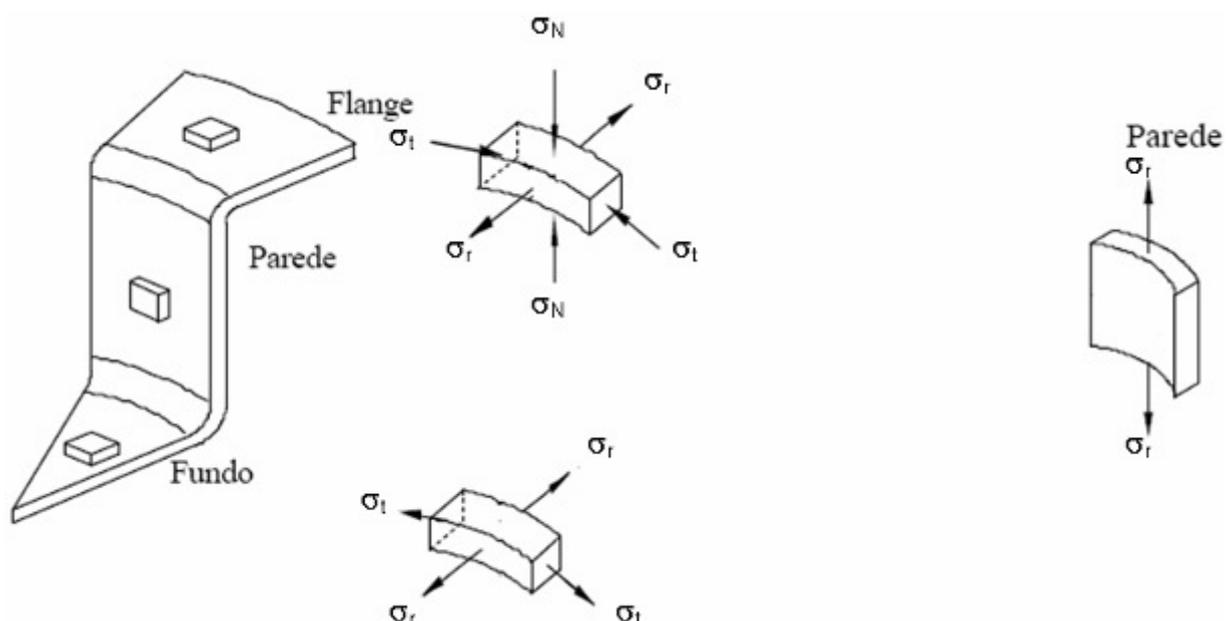


Figura 2.16 - Diferentes estados de tensões em diferentes locais na estampagem de um corpo (Dieter, 1981).

Nas peças com geometria plana o comportamento das deformações origina uma forte redução na espessura (φ_3) dos componentes, fenômeno de certa forma indesejável. As deformações radiais (φ_1) e tangenciais (φ_2) são predominantemente de tração (positivas). Este fato caracteriza uma supremacia do estiramento em relação ao efeito de estampagem profunda (Schaeffer, 2004).

O modo que rege a deformação em Estampagem Incremental com Ponto Simples é tema de controvérsia na comunidade de estampagem de metal. Alguns autores reivindicam que a deformação ocorre por estiramento ao invés de cisalhamento enquanto outros reivindicam o oposto, mas afirmações são principalmente baseadas sobre similaridades com processos conhecidos de estampagem e cisalhamento-repuxamento em lugar de resultados alcançados ou evidência experimental (Silva et al., 2007).

2.3 Rugosidade

Na fabricação de peças por estampagem não é possível produzir superfícies ideais. A superfície de uma peça é, se observada ao microscópio, dotada de regiões com maior ou menor planicidade que é definida como sendo rugosidade da peça,

mesmo que estas peças, num aspecto macroscópico, sejam completamente lisas (König., 1981).

Para analisar a qualidade da superfície de uma peça existem os parâmetros de rugosidade. Os mais comumente utilizados pela indústria são: R_a , R_t e R_z .

Pode-se definir R_a como o desvio médio aritmético, isto é, média dos valores absolutos das ordenadas do perfil em relação à linha média, num determinado comprimento de amostragem. Matematicamente, tem-se a definição da eq. 2.25:

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (2.25)$$

A figura 2.17 mostra o parâmetro de rugosidade R_a .

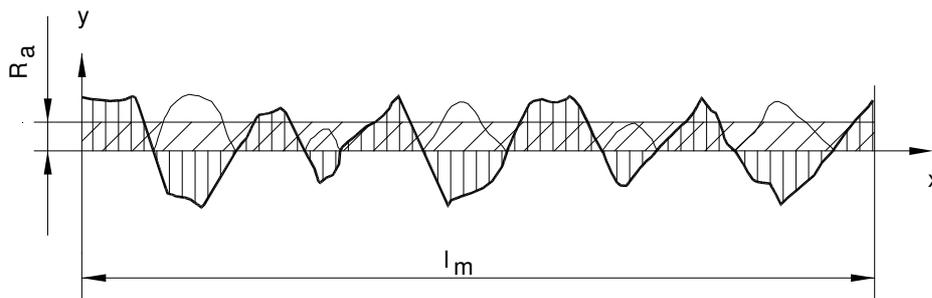


Figura 2.17 - Caracterização do parâmetro R_a (Bet, 1999).

A profundidade de rugosidade R_t é definida como sendo a distância vertical entre o ponto mais alto e mais baixo do perfil filtrado, dentro do comprimento amostral total l_m . (Bet, 1999; König, 1981). O parâmetro de rugosidade R_t está mostrado na figura 2.18.

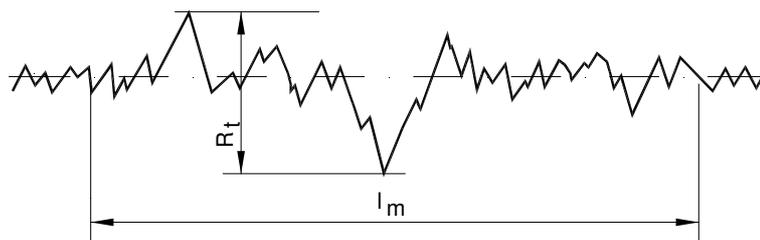


Figura 2.18 - Caracterização do parâmetro R_t (Bet, 1999).

A média da rugosidade R_z é definida como sendo a média aritmética das rugosidades singulares dos cinco trechos de medição sucessivos. Matematicamente, tem-se a definição da equação 2.26 (König, 1981):

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Z_i \quad (2.26)$$

A rugosidade singular Z_i ($Z_i = Z_1$ até Z_5) é definida como sendo o afastamento de duas linhas paralelas a linha média (perfil médio), que ocorrem em um dos trechos de medição singular, que tangenciam o perfil de rugosidade no ponto mais elevado e mais baixo, figura 2.19.

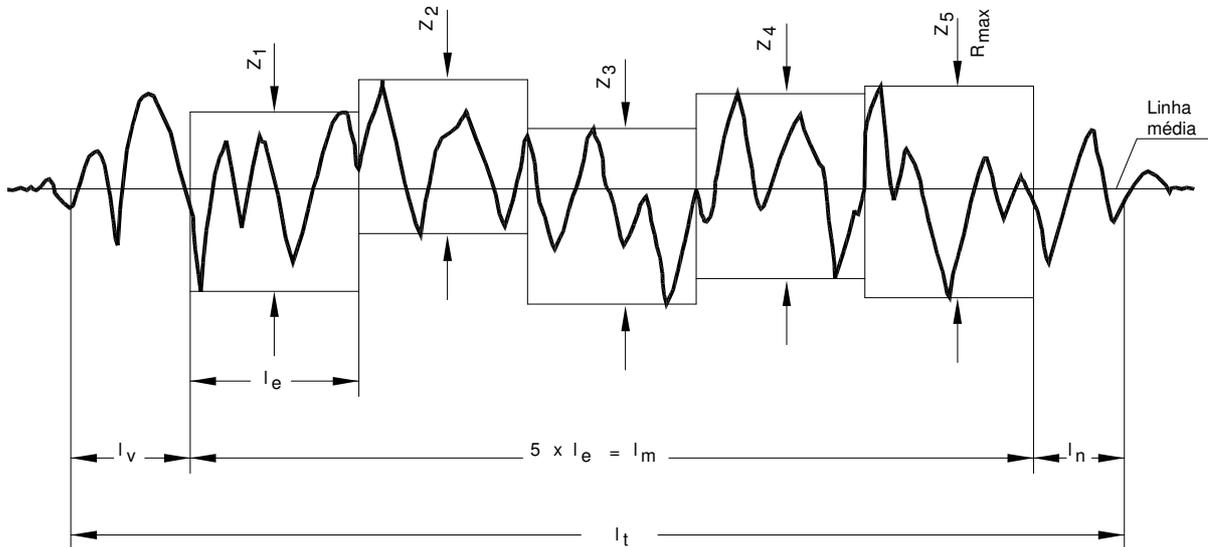


Figura 2.19 - Definição da média da rugosidade R_z segundo norma DIN 4768 (König, 1981).

O *cut-off* é a distância medida em milímetros de cada um dos 7 intervalos l_e que o rugosímetro mede. Após o processo de medição, é filtrado o primeiro e o último intervalo que poderiam influenciar no valor da medida.

Na figura 2.19 os campos são os seguintes:

l_v [μm]: Trajeto prévio

l_e [μm]: Trajeto unitário de medição

l_m [μm]: Trajeto total de medição

l_n [μm]: Trajeto posterior

l_t [μm]: Trajeto do apalpador

Para efeito de comparação com a literatura técnica optou-se neste trabalho em utilizar o parâmetro R_z .

3. ESTAMPAGEM INCREMENTAL

A Estampagem Incremental de Chapas (ISF) é um inovador e acessível processo de estampagem de chapas de metal no qual um *blank* é conformado por um punção de tamanho pequeno comandado por CNC. Devido ao fato 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.

A Estampagem Incremental de Chapas é um termo que descreve uma série de métodos de estampagem de chapas de metal. Em comum estes métodos tem uma capacidade de formar geometrias axisimétricas com ferramentas simples ou até com ausência delas e a baixo custo. ISF não requer ferramentas caras para produzir peças complicadas de chapas de metal e o equipamento de estampagem é adequado para uma grande quantidade de produtos sem grandes trocas ou grandes investimentos (Alwood et al., 2005).

Diversos grupos de P&D tem feito pesquisas na área de Estampagem Incremental. A maior parte destas pesquisas é relatada para máquinas comerciais de ISF ou estampagem ISF utilizando fresadoras NC ou similar (Lamminen, 2005).

As variações de ISF podem ser divididas dentro de duas categorias principais: estampagem de superfícies convexas ou superfícies côncavas. (Kitazawa et al., 2001; Kitazawa et al. 1997) tem focado Estampagem Incremental com um torno. (Jeswiet et al., 2001), (Kim et al, 2001) e (Leach et al., 2001) tem estudado a aplicação da tecnologia de Estampagem Incremental CNC para formas não simétricas formada sobre superfícies côncavas. Neste processo o *blank* permanece estacionário e a estampagem ocorre usando controle CNC da ferramenta.

A estampagem de superfície convexa foi a primeira variação da ISF. Conhecida como Estampagem NC sem Matriz (*Dieless NC Process Forming*), foi introduzida no Japão por (Matsubara, 1994), como um método para prototipagem e fabricação de produtos a partir de chapas de metal para pequenas séries. O método foi originalmente desenvolvido para as necessidades da indústria automobilística mas agora é usada para outras indústrias também (Lamminen, 2005). A tecnologia Estampagem NC sem Matriz tem sido comercializada pela empresa japonesa Amino Corporation.

3.1 Processo de Estampagem Incremental

Na Estampagem Incremental um *blank* de metal é fixado dentro de um suporte retangular e é formado por um movimento contínuo de uma ferramenta simples de estampar com ponta esférica. A trajetória da ferramenta é prescrita por dados NC, que é gerado por um programa modelado no CAD, do componente a ser conformado. Partindo do ponto mais alto, a ferramenta percorre uma seqüência ao longo das linhas de contorno com um passo vertical entre cada nível da trajetória da ferramenta. Algumas variantes do processo são possíveis: por exemplo, uma matriz positiva simplificada representando áreas críticas da superfície do componente a ser produzido pode ser fixado abaixo da chapa (Estampagem NC sem Matriz), mas a estampagem pode ser também executada com apenas um ponto de contato (Estampagem com Ponto Simples), conforme figura 3.1.

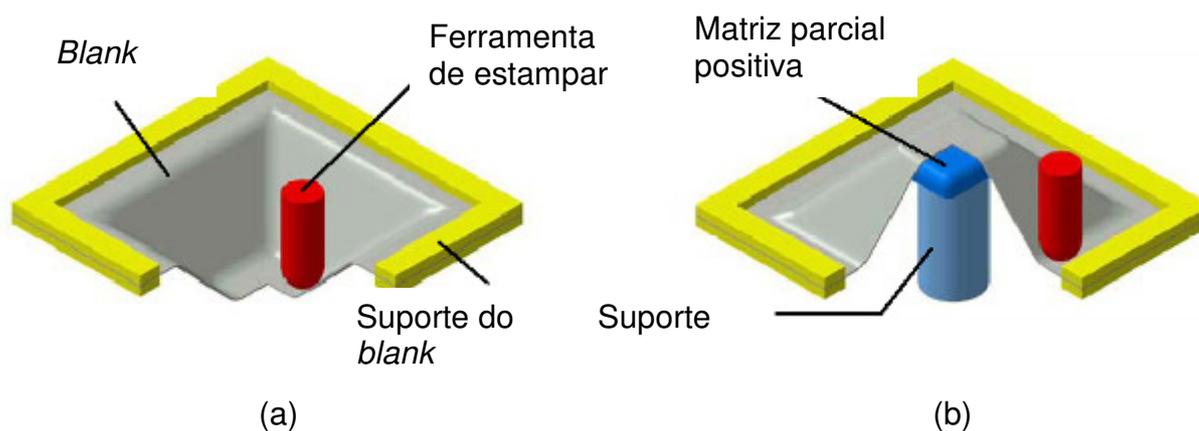


Figura 3.1 - Variantes do processo de Estampagem Incremental de Chapas: a - Estampagem com Ponto Simples, b - Estampagem NC sem Matriz (Hirt et al., 2003).

3.1.1 Estampagem NC sem Matriz

A Estampagem NC sem Matriz é um processo de Estampagem Incremental controlada numericamente que pode estampar vários materiais dentro de formas complexas. O método permite estampar sem matrizes grandes e caras, usando somente uma ferramenta de apoio sobre uma peça estampada. Isto faz o método ficar muito econômico. A Estampagem NC sem Matriz é um método alternativo de fabricação para pequenos lotes e para prototipagem (Lamminen et al., 2005). Apesar

do método ser chamado de Estampagem NC sem Matriz, há uma matriz parcial positiva (abaixo do *blank*) que serve como um contra-ponto.

A geometria da peça é convertida do CAD através dos dados do NC do CAM. Então, esta geometria é transferida digitalmente para uma máquina com sistema servocontrolado em três eixos como mostra a figura 3.2. O equipamento usado para Estampagem NC sem Matriz é mostrado na figura 3.3. O *blank* é fixado num suporte quadrado, onde não há possibilidade de desprender-se dos sujeitadores. A ferramenta em Z é atuada nas direções Y e Z e o suporte é contrabalaneado pelo movimento vertical da ferramenta e é atuado na direção X (Lamminen et al., 2005).

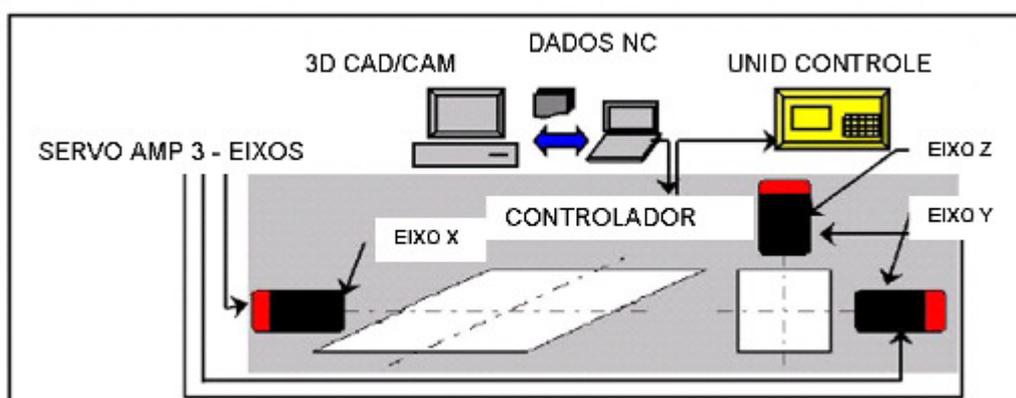


Figura 3.2 - Sistema de controle da máquina para Estampagem NC sem Matriz (Lamminen et al., 2005).

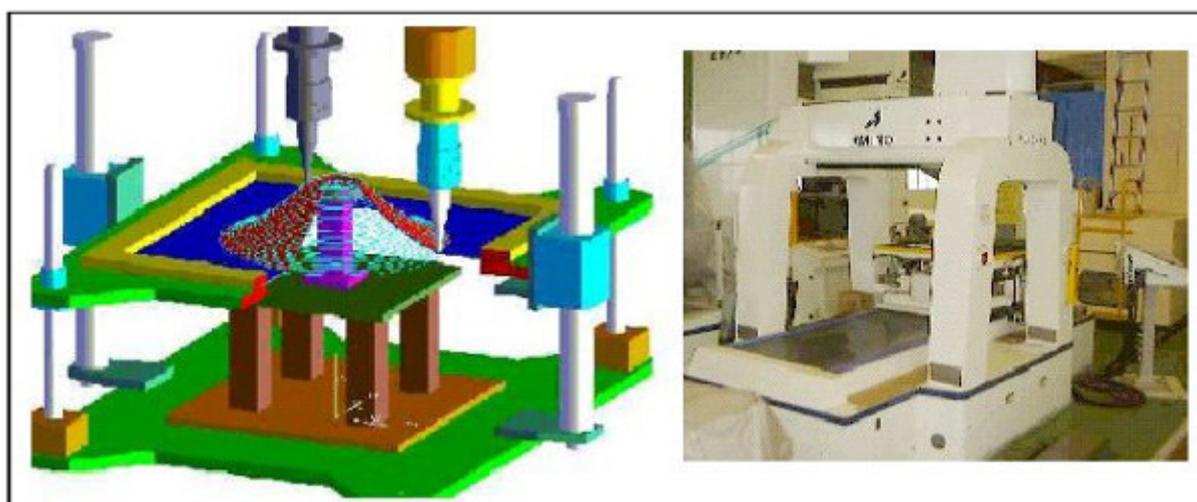


Figura 3.3 - Equipamento para processo de Estampagem NC sem Matriz (Lamminen et al., 2005; Amino, 2007).

Neste processo a chapa a ser processada é fixada em um suporte de *blank* retangular, o qual pode se efetuar movimentos controlados na direção vertical. A fixação da chapa é realizada por um certo número de pinças de um modo que o fluxo de material na direção da zona de processamento é impossível. Na figura 3.4, abaixo da chapa está uma matriz positiva que está fixada, o qual melhor representa áreas críticas da superfície do componente a ser produzido. Subseqüente uma ferramenta simples com ponta esférica é usada para executar a forma do componente de chapa, pelo movimento contínuo que é prescrito pelos dados do CNC e baseado sobre modelamento em CAD.

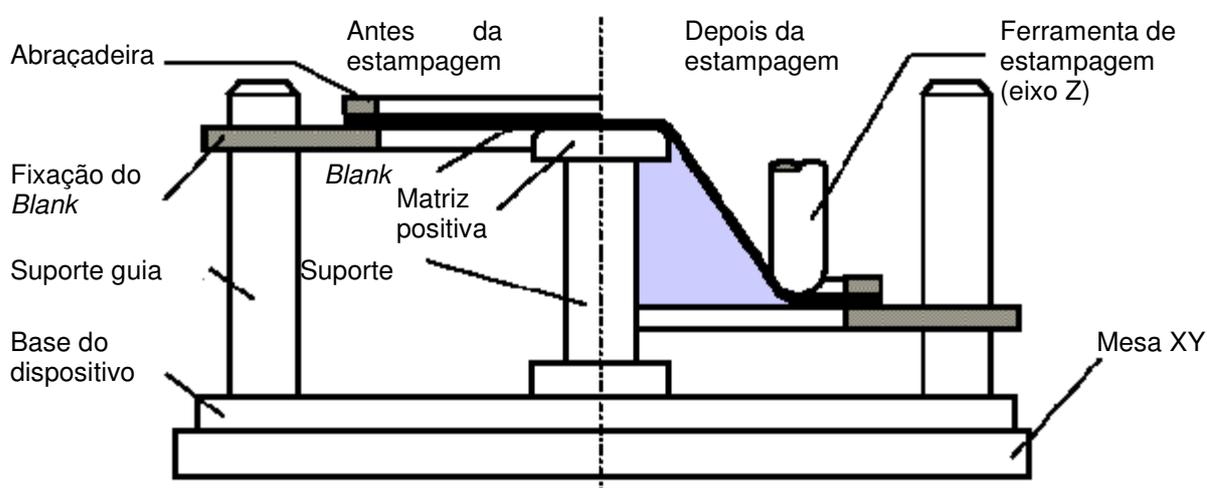


Figura 3.4 - Princípio do processo de Estampagem NC sem Matriz (Junk et al., 2003).

O movimento da ferramenta começa no ponto mais alto do componente e move-se em volta do contorno exterior do componente.

Até agora foram usadas trajetórias, a qual foram geradas usando métodos muito similares ao comum nível Z de usinagem no caso do processo de fresamento. Neste caso, a estampagem percorre ao longo do contorno do componente camada por camada com um passo vertical (incremento) para baixo entre cada nível da trajetória da ferramenta. Usando esta estratégia de estampagem, é óbvio que há um número relativamente grande de parâmetros de processo ajustáveis. A influência deles sobre o resultado da estampagem tem sido estudada na produção em vários componentes demonstrados na figura 3.5.

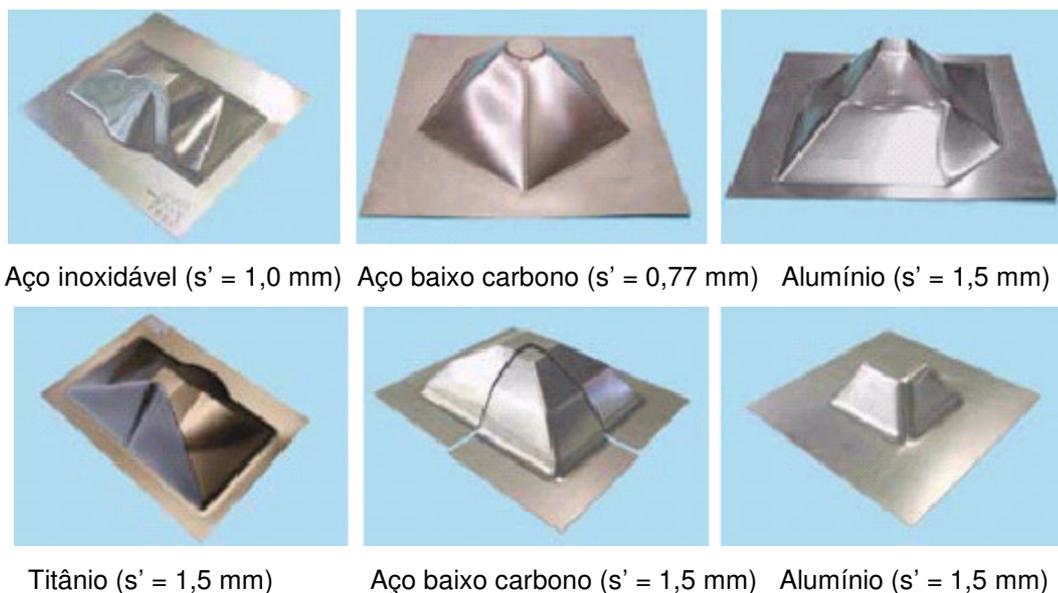


Figura 3.5 - Vários testes de componentes produzidos por ISF no LWP (Junk et al., 2003).

Em contraste com os métodos clássicos de estampagem de chapas, a zona de deformação na ISF é muito pequena e estritamente limitada a área de contato entre a ferramenta e a peça de trabalho. Uma avaliação visual plástica de peças de demonstração também mostra que sobre superfícies planas, o modo é mais próximo das condições de deformação plana. Portanto, a constância de volume conduz a uma relação direta entre a espessura da parede e o ângulo de parede (figura 3.6), o qual tem sido comumente referenciado como “lei do seno” e que leva a um afinamento extremo da chapa, ou falha no caso de aplicar grandes ângulos em um único passe (Junk et al., 2003).

A lei do seno, válida tanto para o processo de Estampagem NC sem Matriz quanto para a Estampagem com Ponto Simples, é definida por:

$$s_1 = s_0 \cdot \text{sen}(90^\circ - \alpha) \quad [\text{mm}] \quad (3.1)$$

Onde:

s_1 [mm]: Espessura final da chapa

s_0 [mm]: Espessura inicial da chapa

α [°]: Ângulo de parede

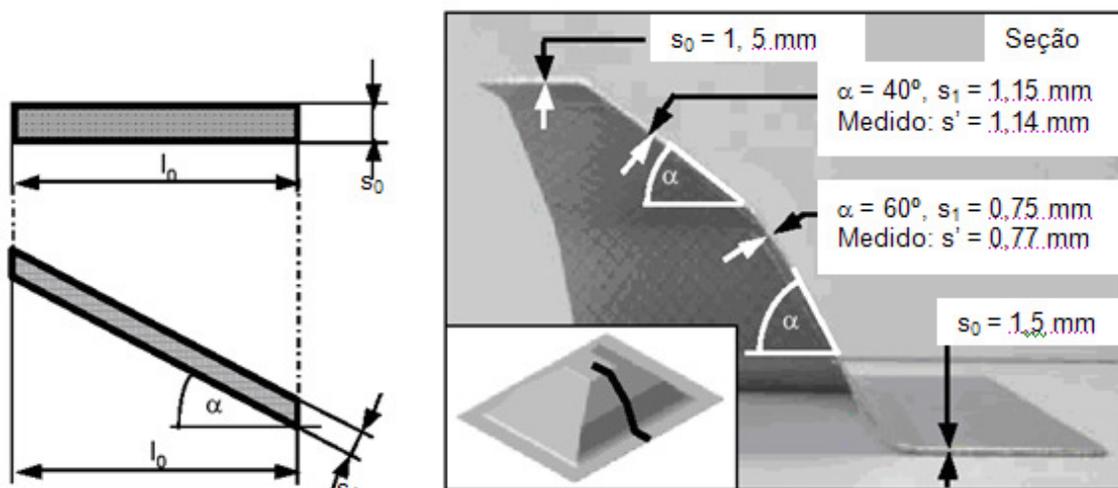


Figura 3.6 - Redução da espessura da parede em diferentes ângulos “lei do seno” (Junk et al., 2003).

Inspirado nas idéias de estampagem multiestágio para componentes axisimétricos (Kitazawa et al., 1999), uma estratégia de estampagem multiestágio modificada tem sido desenvolvida para componentes não axisimétricos com flanges largos. Esta nova concepção supera o limite de estampagem dada pela “lei do seno” tendo sido testada com sucesso (figura 3.7) na produção de várias pirâmides retangulares com flanges largos ($\alpha = 81^\circ$) enquanto a estratégia padrão falha com ângulos acima de 65° .

O fluxo de processo da estratégia multiestágio como é mostrado na figura 3.7, é composto por uma seqüência de vários passos como é mostrado a seguir:

- No primeiro “estágio pré-estampagem”, figura 3.7a, o *blank* é fixado no suporte e preformado com um ângulo de 45° , sendo produzido pelo uso de uma matriz parcial e o processo regular ISF, no qual a ferramenta começa no topo e descende durante a estampagem;
- Depois que o suporte do *blank* está fixado na posição mais baixa, um número de estágios seguem no qual o passo do movimento da ferramenta de estampagem alterna para cima (figura 3.7b, a ferramenta de estampagem começa na base do componente e vai ao topo) e para baixo (figura 3.7c a ferramenta de estampagem começa no topo e alcança a base similar ao processo regular de ISF).

- De um estágio para outro a trajetória da ferramenta é geralmente projetada com um gradual aumento no ângulo de parede de 3 a 5°. Isto significa que 7 a 12 estágios são necessários para produzir um ângulo de cerca de 80° (figura 3.7).

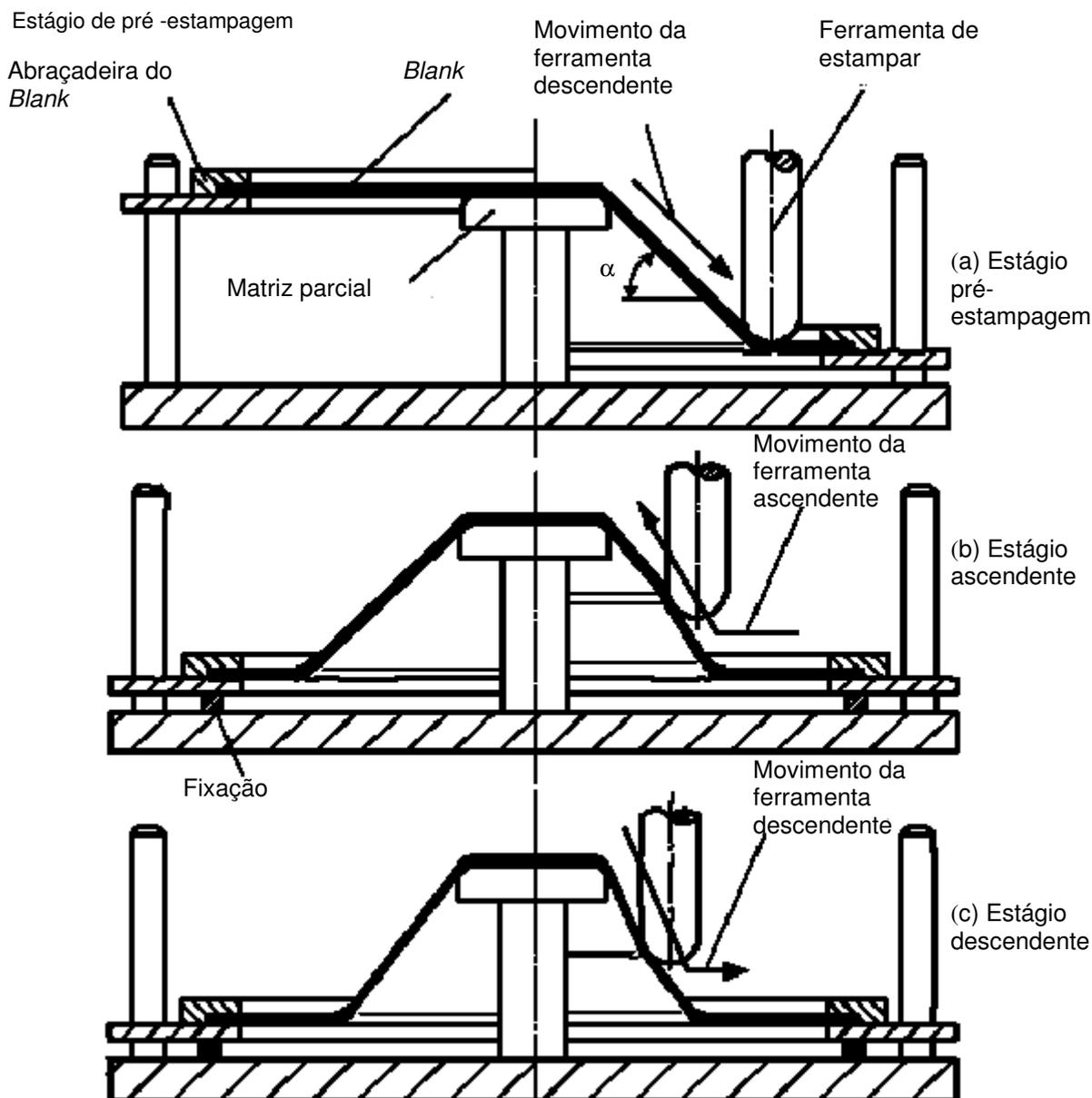
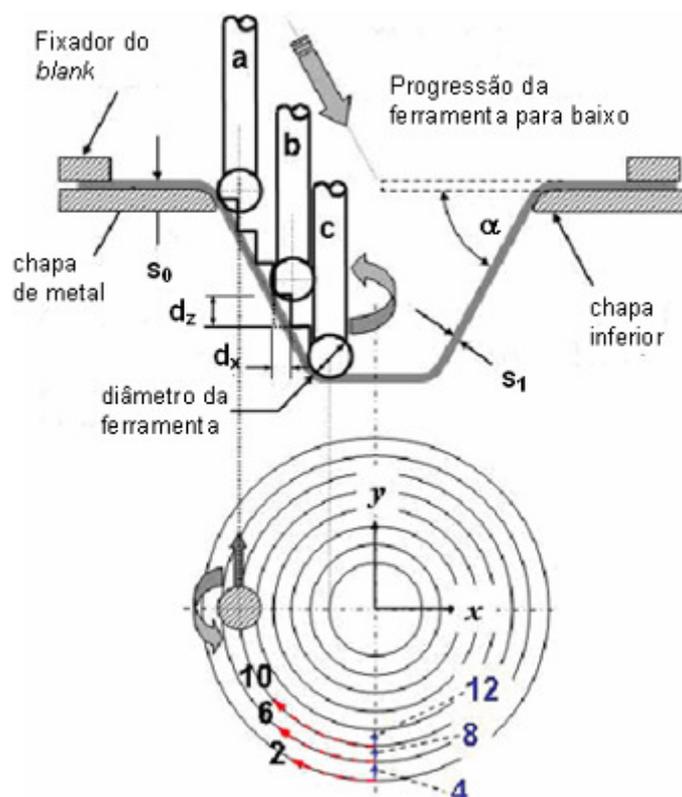


Figura 3.7 - Estratégia de estampagem multiestágio 3D (Junk et al., 2003).

3.1.2 Estampagem com Ponto Simples

Pode-se fazer um comparativo entre Estampagem NC sem Matriz e Estampagem com Ponto Simples. Na Estampagem NC sem Matriz é às vezes

chamada estampagem com 2 pontos, porque há 2 pontos de contato com a chapa, entre a chapa e a ferramenta de estampagem e entre a chapa e a ferramenta suporte. Na estampagem com Ponto Simples a ferramenta suporte é eliminada e somente a ferramenta que estampa está em contato com a chapa. O princípio do método é mostrado na figura 3.8.



s_0 [mm]: Espessura inicial da chapa

s_1 [mm]: Espessura final da chapa

d_x [mm]: Passo horizontal

d_z [mm]: Passo vertical

α [°]: Ângulo de parede

Figura 3.8 - Estampagem com ponto simples (Hirt et al., 2003).

O processo de Estampagem Incremental com ponto simples é utilizado para conformar chapas de metal dentro de formas complicadas sem o uso de matrizes macho e fêmea (Jeswiet, 2001).

Jeswiet tem usado uma fresadora CNC com três eixos junto com um *software* CAM para controlar a ferramenta de estampagem (Jeswiet, 2001; Jeswiet et al.,

2002), figura 3.9. A chapa é fixada em um quadro suporte na mesa da fresadora. A ferramenta de estampagem é um cilindro com uma ponta semi-esférica que é montada na árvore da máquina. O quadro suporte movimenta-se nas direções X e Y e a ferramenta de estampagem (direção Z) empurra para dentro da chapa, deformando plasticamente causando uma micro-deformação local. Durante o processo, a ferramenta descende em pequenos passos (incrementos d_z) depois de cada volta e, tende a aproximar-se do centro da peça através dos incrementos d_x (Jeswiet, 2001). A espessura da chapa s_0 é reduzida para s_1 na superfície inclinada da peça que possui um ângulo α em relação a direção horizontal.



Figura 3.9 - Processo de Estampagem Incremental (Mcloughlin, 2005).

3.2 Parâmetros Importantes na Estampagem Incremental

Os parâmetros mais importantes a serem ajustados na Estampagem Incremental de Chapas são (Junk et al., 2003):

- Tamanho e forma da ferramenta de estampar, material da ferramenta;
- Material da geratriz e espessura;
- Estratégia de geração da trajetória da ferramenta, passo vertical, rotação da ferramenta;
- Força de fixação da geratriz, temperatura, lubrificação etc.

Na seqüência serão abordados alguns destes itens de forma detalhada.

3.2.1 Tamanho, Forma e Material da Ferramenta de Estampar

Normalmente a ferramenta para atuar no eixo Z é fabricada de aço-ferramenta endurecido ou metal-duro e a ponta desta ferramenta é semi-esférica, figura 3.10. A ferramenta desliza sobre uma superfície de chapa estampada e causa estiramento e dobramento da chapa. Normalmente o diâmetro mínimo empregado na ferramenta é 6 mm. O diâmetro afeta a qualidade da superfície e grandes diâmetros resultam em superfícies mais lisas bem como as marcas das ferramentas são menores. A força de estampagem depende da espessura da chapa e material. A força tem que exceder a tensão de escoamento para criar uma deformação plástica (Lamminen et al., 2005). Na figura 3.10 são mostrados dois tipos de ferramentas.



(a)

(b)

Figura 3.10 - Ferramentas para atuação no eixo Z: a - diâmetro de 20 mm, b - diâmetro de 10 mm (Lamminen et al., 2005).

a) Revestimentos

Os revestimentos possibilitam as ferramentas de estampagem com uma fina camada superficial, 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.

Além do aumento da vida útil das ferramentas, revestimentos PVD propiciam um melhor acabamento dos produtos conformados (Vencovsky et al., 2010).

Os revestimentos mais empregados em ferramentas de conformação são: TiN, (Nitreto de Titânio), CrN (Nitreto de Cromo) e TiCN (Carbonitreto de titânio).

As principais propriedades destes revestimentos constam da tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades selecionadas das camadas de TiN, CrN e TiCN depositadas pelo processo de PVD a arco (Vencovsky et al., 2010).

Camada	TiN	CrN	TiCN
Dureza [HV 1N]	2500	2300	2900
Carga crítica [N] ¹	60	45	50
Temperatura de oxidação [°C]	550	650	450
Coefficiente de atrito	0,55	0,55	0,50
Ductilidade relativa ² (%)	1,09	0,2 – 0,3	-
Espessura [µm]	4	20	4
Rugosidade R _a [µm]	0,20	0,18	0,20

1- É um indicativo de aderência, obtida através de ensaio de riscamento com indentador HRC.

2- Realizado pelo método de dobramento com sensor acústico para detectar início de trincamento.

3.2.2 Material da Geratriz

A Estampagem NC sem Matriz tem sido testada com chapas de baixo carbono, aço inoxidável, alumínio ligado, titânio e aços revestidos. Os melhores resultados foram alcançados na estampagem de aço, em relação à geometria final e efeito mola. O aço inoxidável requer grande força de estampagem, o qual leva a chapas mais finas que quando estampadas chapas de aços normais. O aço inoxidável também tem forte efeito mola e a geometria do produto é facilmente retorcida durante a estampagem. O aço inoxidável requer bastante lubrificação durante a estampagem, e a velocidade de estampagem tem que ser mantida baixa (Lamminen et al., 2005).

A estampabilidade do alumínio depende da liga utilizada. Alumínio puro A1000 e A1100-0 são facilmente estampados. Alumínio ligado A6XXX, que tem magnésio e silício, tem estampabilidade ruim e tem forte efeito mola. Alumínio puro é recomendado para estampagem, se ele for adequado para o produto (Lamminen et al., 2005).

O titânio aquece durante a estampagem e tende a enrugar. A estampagem de chapas revestidas é difícil, porque o revestimento destaca-se do substrato ficando debaixo da ferramenta de estampagem. Se a chapa puder ser estampada no lado reverso, o revestimento no lado da face permanece intocado.

Também é possível estampar aço perfurado usando Estampagem NC sem Matriz. Então a folga mínima na parede é cerca de 45° . Os furos estiram quando a chapa estira, mas quando o ângulo de folga e o raio do círculo é mantido grande, a chapa não rasga durante a estampagem.

O material ideal para Estampagem Incremental seria aquele que tivesse uma reduzida tensão de escoamento σ_e e uma grande tensão máxima R_m , associado a um grande deformação relativa ϵ .

3.2.3 Passo Vertical

Sob as circunstâncias de estampagem padrão um contato suave na superfície tem sido observada sob certas condições (por exemplo pequeno passo vertical d_z e grande diâmetro da ferramenta). Na figura 3.11 a influência do passo vertical d_z , ângulo de parede α e o raio da ferramenta R_T sobre a rugosidade final sob condições de estampagem com simples passe padrão é mostrado. Pode ser observado que a qualidade da superfície aumenta com o decréscimo do passo vertical como também com grande diâmetro da ferramenta e ângulo de parede ascendente (Junk et al., 2003).

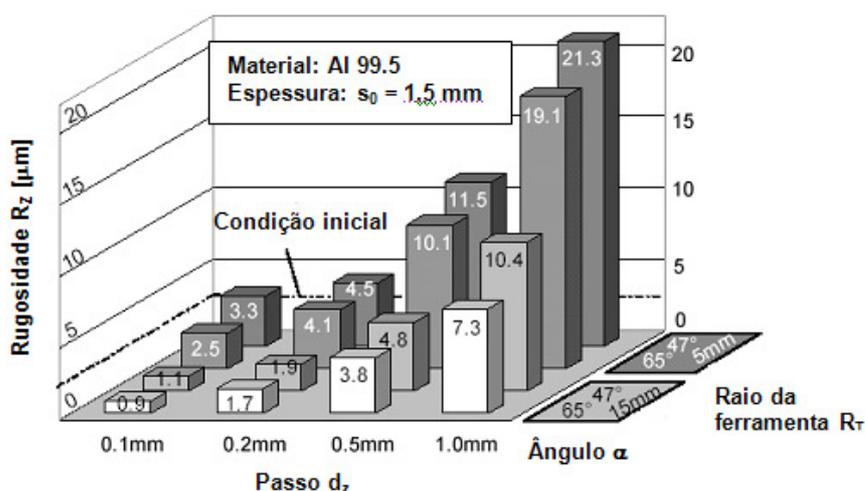


Figura 3.11 - Rugosidade R_z sob condições de estampagem padrão (Junk et al., 2003).

3.2.4 Rotação da Ferramenta

Uma das maiores diferenças entre os diferentes processos de Estampagem Incremental descrito por (Hagan, et al., 2003) e outros usuários do processo (Kim et al, 2001), é o modo como move-se a ferramenta enquanto deforma a chapa. No caso de SPIF ocorrem as seguintes situações: 1) O *spindle* movimenta-se sem rotação própria. Neste caso a movimentação é imposta pelo movimento da mesa e a ferramenta move-se de forma passiva, 2) O *spindle* move-se com rotação e a ferramenta também.

Um método é rotacionar o *spindle*, então, a ferramenta de estampagem gira sobre a superfície da chapa. Controlando esta variável, controla-se o aquecimento da chapa durante a deformação. O modelo de cálculo baseia-se em uma ferramenta com forma hemisférica, a qual é pressionada contra o material para causar deformação, figura 3.12.

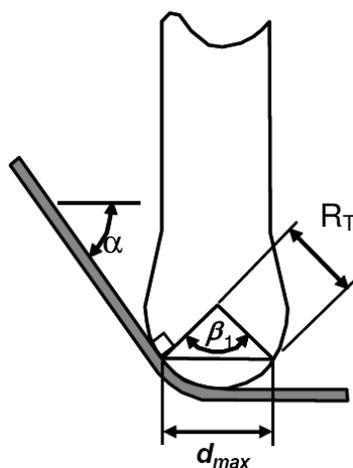


Figura 3.12 - Geometria da ferramenta e velocidades do *spindle* (Jeswiet et al., 2005).

Considerando a lei do co-seno tem-se que:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \beta_1$$

Ajustando de acordo com a figura 3.12 tem-se que: $c = d_{\text{máx}}$; $a = b = R_T$; $\beta_1 = 2\alpha$

$$d_{\max} = r\sqrt{2(1 - \cos\beta_1)}$$

$$\bar{d} = \frac{d_{\max}}{2}$$

$$\bar{d} = r\sqrt{\frac{1}{2}(1 - \cos\beta_1)}$$

$$\bar{d} = r\sqrt{\frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha)}$$

Sabendo que N = rotação da ferramenta, tem-se que:

$$N = \frac{v_{fh}}{\pi d_1}$$

$$N = \frac{v_{fh}}{\pi R_T \sqrt{\frac{1}{2}(1 - 2\cos 2\alpha)}} \quad [\text{rpm}] \quad (3.2)$$

Onde:

v_{fh} [mm/min]: Velocidade de avanço nas direções XY

R_T [mm]: Raio da ferramenta

α [°]: Ângulo de parede

No estudo de caso de fabricação da cavidade de um forno solar, o *spindle* pode rotacionar livremente na fresadora CNC (Micari et al., 2004). Isto permite a fricção na interface ferramenta/peça rotacionar a ferramenta automaticamente de acordo com o movimento da mesa da máquina. Este método é também usado em máquinas construídas especialmente para Estampagem Incremental (Hirt, 2004).

3.2.5 Lubrificação

O processo de estampagem requer lubrificação na superfície da chapa. A lubrificação 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. A estampagem de aço inoxidável e chapas espessas requer mais lubrificantes que chapas espessas de alumínio. Na figura 3.13 a seguir é mostrada a ponta de uma ferramenta de estampar em trabalho.

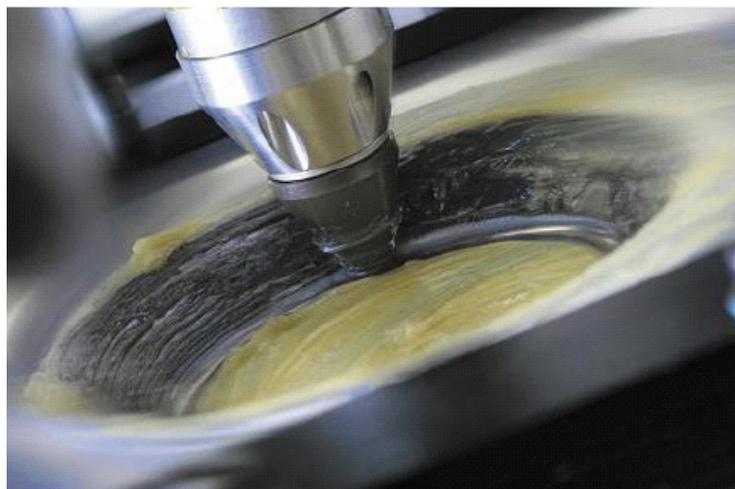


Figura 3.13 - Ponta de ferramenta executando um ciclo de estampagem, utilizando como lubrificante graxa convencional (Alwood et al., 2005).

A lubrificação diminui o trabalho para estampagem, e o potencial para a superfície tornar-se danificada pela fricção (Hagan, et al., 2003). (Reagan et al., 1991), discutem diferentes maneiras para a lubrificação, o qual dependem do tipo de material e a temperatura do ambiente. Os três lubrificantes tradicionais são: sebo, utilizado na fabricação de velas, sebo misturado com óleo e sabão misturado com óleo (Hagan, et al., 2003). O sebo de velas é aplicado diretamente no material, enquanto as outras duas misturas devem ser preparadas antes, de forma manual. Um bom lubrificante permanece na superfície do *blank* e é aplicado frequentemente em pequenas quantidades.

Estudos conduzidos por (Avitzur et al., 1960), (Kobayashi et al., 1961) e (Kalpakcioglu, 1961), nos anos 60 focalizaram nas forças envolvidas no embutimento. Um estudo realizado por (Ismail et al., 1994) acrescenta o efeito da lubrificação sobre a tolerância, acabamento da superfície e forças de estampagem. Esta análise enfoca o lubrificante dentro, fora e em ambas as superfícies de formação do cone de embutimento, para lubrificantes de três diferentes viscosidades. Os resultados mostraram um decréscimo na força na direção de avanço para aumentos da viscosidade do lubrificante. Aplicando lubrificante exclusivamente na superfície interna, mantém-se a espessura da parede com os valores próximos do esperado (Ismail et al., 1994).

3.3 Configurações do Processo e Suporte da Peça e Ferramenta na Estampagem Incremental

Basicamente existem quatro configurações do processo de Estampagem Incremental.

Na figura 3.14a observa-se uma ferramenta com movimentação nas direções X, Y e Z, entretanto o *blank* permanece estático, processo chamado de Estampagem com Ponto Simples. Nas figuras 3.14b e 314c tem-se o processo de Estampagem NC sem Matriz. Na figura 3.14b ambas, ferramenta e contraponto tem movimento nas direções X, Y e Z com o *blank* parado. Na figura 3.14c a ferramenta tem movimentos nas três direções, entretanto, o contraponto somente em Z e o *blank* nas direções X e Y. Na figura 3.14d novamente a ferramenta movimenta-se nas direções X, Y e Z com o *blank* permanecendo imóvel sobre uma plataforma.

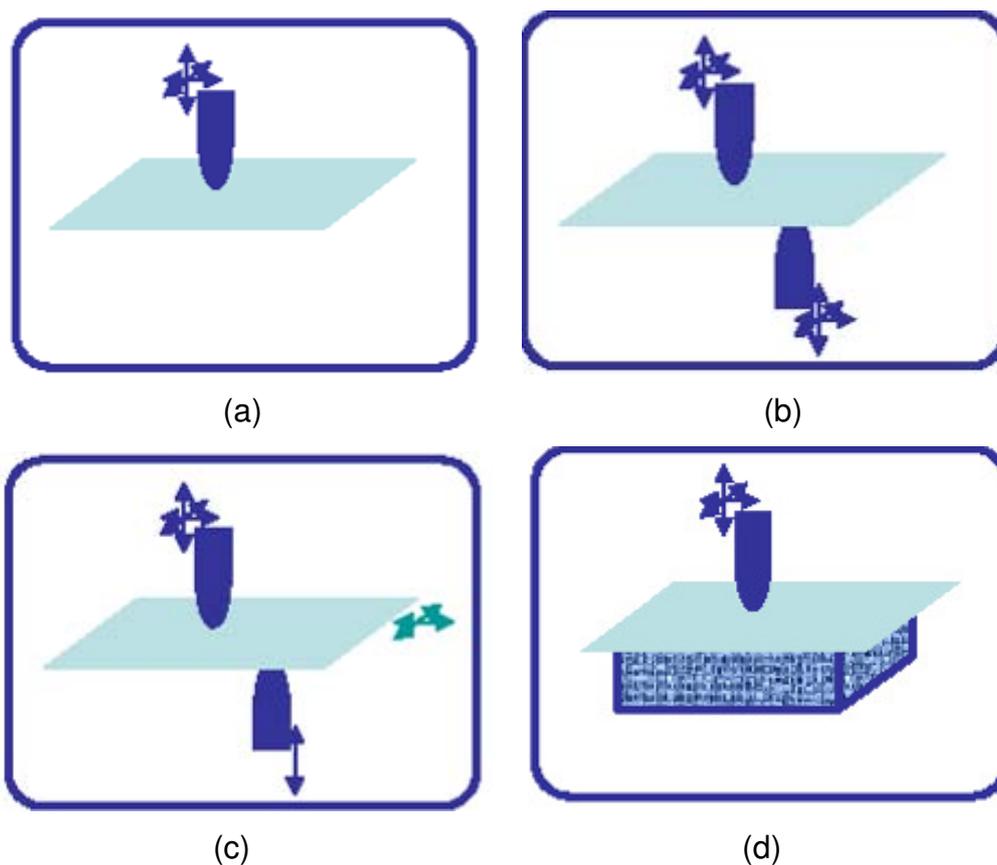


Figura 3.14 - Configurações do processo de estampagem incremental (Alwood et al., 2005).

Na figura 3.15 tem-se os tipos de suporte da peça e da ferramenta. Como dito no início deste capítulo o processo de ISF pode ser dividido em duas categorias principais: geração de superfícies convexas e côncavas.

Nas figuras 3.15c, 3.15d e 3.15e tem-se a geração de superfícies convexas com diferentes formatos do contraponto. O processo gerado nestas figuras chama-se Estampagem NC sem Matriz.

Nas figuras 3.15a, 3.15b, 3.15f e 3.15g obtém-se superfícies côncavas através da geração da trajetória da ferramenta. O processo gerado nestas figuras com exceção da figura 3.15g chama-se Estampagem com Ponto Simples. A diferença básica entre as figuras 3.15a e 3.15b é o tipo de sujeição da chapa. Na figura 3.15f tem um processo de ISF similar ao embutimento. Finalmente na figura 3.15g tem-se uma variação da Estampagem NC sem matriz que gera uma superfície côncava.

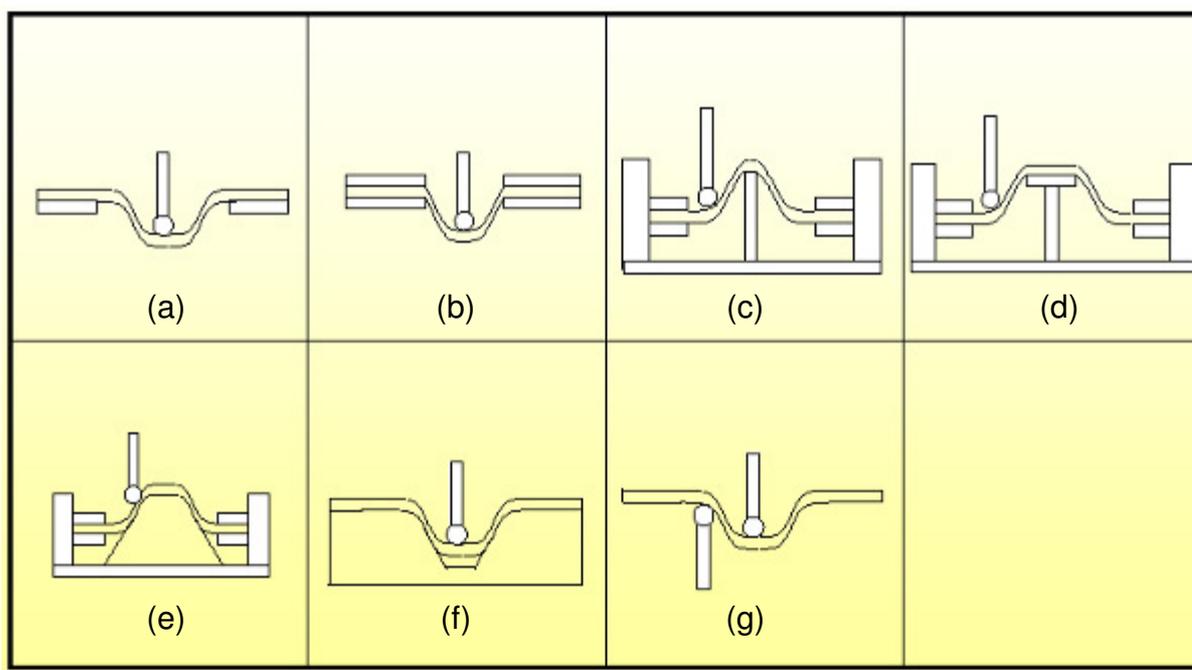


Figura 3.15 - Tipos de suporte da peça e da ferramenta (Jackson, 2006).

A estampagem começa no topo da peça, onde também a ferramenta suporte é colocada. A ferramenta que atua no eixo Z faz uma trajetória circular ao redor da ferramenta suporte, fazendo passos (incrementos) para aprofundar a cavidade de forma.

3.4 Máquinas para Estampagem Incremental

As máquinas para Estampagem Incremental são: Centros de Usinagem e fresadoras CNC, máquinas dedicadas e robôs industriais. O motivo da escolha deve-se a: disponibilidade, tamanho da peça, forma construtiva da máquina, capacidade do comando da máquina etc.

3.4.1 Centros de Usinagem e Fresadoras

Máquinas-ferramentas com comando CNC são utilizadas na tecnologia de Estampagem Incremental. Estas máquinas dividem-se em fresadoras e Centros de Usinagem (fresadoras com estoque e troca automática de ferramentas). Em Estampagem Incremental estas máquinas normalmente possuem conectadas a elas, cabos de fibra ótica que transmitem programas elaborados por *softwares* CAD/CAM. A razão do modelamento da superfície da peça via um software de CAD é devido normalmente a complexidade de um desenho em 3 dimensões. Dada esta complexidade da superfície da peça, quando faz-se a simulação da estampagem observa-se uma grande quantidade de operações que resultarão em um programa extenso. Em face disto torna-se necessário um programa de CAM para auxiliar neste trabalho. Programas extensos tornam-se caros e inviáveis se forem elaborados de forma manual, devido a grande quantidade de homens-hora utilizada.

3.4.2 Máquinas Dedicadas

Enquanto o uso de máquina CNC é atrativo por causa dos baixos custos de início de operação, ela trás algumas desvantagens: 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, máquinas CNC não são geralmente providas 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. Existem máquinas comerciais e máquinas didáticas e os exemplos mostrados neste trabalho são respectivamente da Amino Corporation e da Universidade de Cambridge.

Em termos de operação, a máquina de Estampagem NC sem Matriz da Amino Corporation é muito similar a fresadoras CNC's e Centros de Usinagem. Utiliza um *software* de uso simples que traduz diretamente para trajetória da ferramenta em código G. Depois de fazer o *download* do código G e o referenciamento, a máquina NC sem Matriz opera completamente sem a interferência do homem. A medida que o *spindle* completa a trajetória, o *blank* é abaixado sobre a fixação, deixando pronto para o *spindle* fazer outro passe, continuando até alcançar a forma final (Amino, 2007). Informações detalhadas do funcionamento desta máquina foram contempladas no item 3.1.1 Estampagem NC sem Matriz.

Embora a Estampagem NC sem Matriz é ideal para prototipagem rápida, esta é também adequada para a produção de peças de serviço. Com esta máquina, incontável número de matrizes podem ser eliminadas. Além de estampar superfícies côncavas e convexas, a máquina NC sem Matriz pode até mesmo acabar e montar a peça, executando operações como rebarbação, dobramento e dobramento de borda (Amino, 2007).

Dados técnicos das máquinas fabricadas pela Amino Corporation encontram-se na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Dados técnicos de máquinas de Estampagem NC sem Matriz (Lamminen et al., 2005; Amino, 2007).

		Uso em pesquisa		Uso comercial		
Modelo		DLNC - RA	DLNC - RB	DLNC - PA	DLNC - PB	DLNC - PC
Máximo tamanho do <i>blank</i> (mm)		400x400	600x600	1100x900	1600x1300	2100x1450
Máximo tamanho de estampagem (mm)		300x300	500x500	1000x800	1500x1200	2000x1350
Máxima profundidade de estampagem (mm)		150	250	300	400	500
Curso em X (mm)		330	550	1100	1600	2100
Curso em Y (mm)		330	550	900	1300	1450
Curso em Z (mm)		200	300	350	450	550
Máximo tamanho do suporte de fixação do <i>blank</i>		700x750	1000x950	1300x1100	1800x1500	2300x1650
Máxima espessura da chapa (mm)	Aço inoxidável	0,5 - 1,0	0,5 - 1,0	0,5 - 1,5	0,5 - 2,0	0,5 - 2,0
	Alumínio	0,5 - 3,0	0,5 - 3,0	0,5 - 4,0	0,5 - 5,0	0,5 - 5,0

A seguir é mostrada uma máquina especialista projetada na Universidade de Cambridge.

a) Especificação da máquina

A chave do projeto de uma máquina de Estampagem Incremental é a predição das forças da ferramenta durante a estampagem. Na época do projeto desta máquina, os resultados da predição das forças não estavam disponíveis, então as forças foram previstas por um cálculo aproximado e verificadas por medidas de torque sobre um protótipo comandado manualmente. A figura 3.16 ilustra dois casos extremos de carregamento da ferramenta: (a) a ferramenta percorre normalmente a chapa, causando uma indentação esférica sobre a chapa, (b) durante a deformação, a ferramenta move-se horizontalmente por toda a área deformada existente da chapa, criando um canal de um lado.

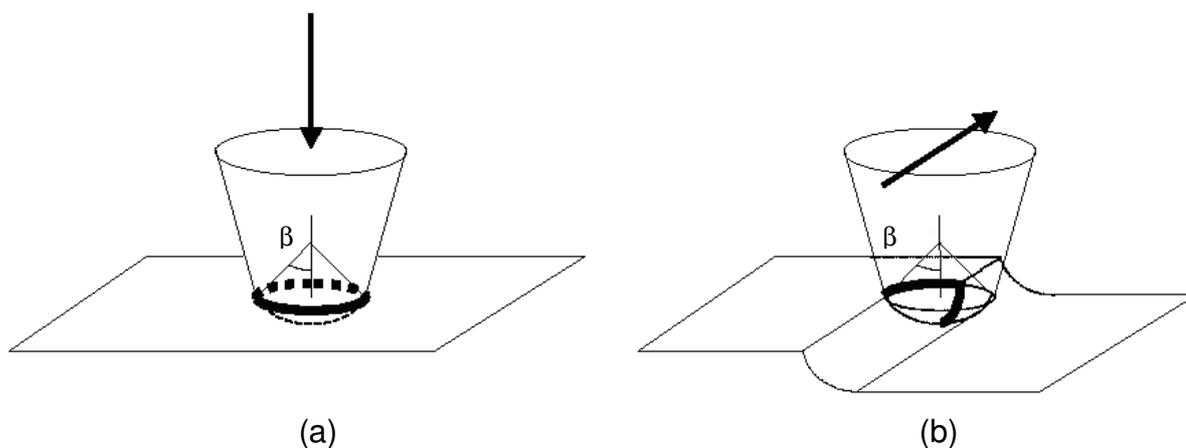


Figura 3.16 - Base de estimação de: a - força vertical da ferramenta, b - força horizontal da ferramenta (Alwood et al., 2004).

Assumindo o raio da ferramenta R_T , a tensão de escoamento σ_e , a espessura do material s_0 , e a metade do ângulo interior do cone formado pelo limite de contato entre a ferramenta e a peça de trabalho β , a força vertical da ferramenta F_V foi estimada para o caso (a) como:

$$F_V = \pi R_T s_0 \sigma_e \text{sen} \beta \quad [\text{N}] \quad (3.3)$$

e a força horizontal da ferramenta para o caso (b) como:

$$F_h = R_T s_0 \sigma_e (\sin \beta + 1 - \cos \beta) \quad [\text{N}] \quad (3.4)$$

No primeiro caso, a força é calculada assumindo que o movimento vertical do punção, um disco de raio $R_T \sin \beta$, através da chapa, resistida por uma tensão de cisalhamento de $\sigma_e/2$. No segundo caso, a força é calculada assumindo que o movimento é resistido pela tensão compressiva na chapa indeformada diretamente a frente do material (Junk et al., 2003).

Dada a necessidade por dados experimentais sobre as forças da ferramenta, a máquina foi projetada com o objetivo de prover medições de forças precisas para uma faixa de materiais. Como os painéis do corpo do carro são feitos de aço baixo carbono de 1,6 mm de espessura, este foi selecionado como o mais forte material para teste. Então, utilizando a tensão de escoamento $\sigma_e = 350 \text{ N/mm}^2$ e considerando raio da ferramenta até 15 mm com $\beta = \pi/6$, as forças horizontal e vertical da ferramenta previstas das equações 3.3 e 3.4 foram $F_v = 13,2 \text{ kN}$ e $F_h = 5,3 \text{ kN}$.

As dimensões planares da peça de trabalho foram escolhidas pela comparação com aproximações existentes de 300 x 300 mm. Trabalhos existentes (Jeswiet et al., 2002), sugerem que o limite de estampagem do processo ocorrem para um ângulo do cone de não mais que 70° o qual, se aplicado na área inteira da peça de trabalho, requereriam movimento no eixo Z de até 400 mm. Entretanto, como altas deformações para uma máxima força horizontal prevista acima, requereriam uma poderosa árvore, o qual iria além de orçamento do projeto, então uma especificação de movimento vertical de 100 mm foi selecionada. O ângulo do cone também limita o projeto do eixo vertical para ficar dentro de um ângulo de cone escolhido a partir de um ponto de contato. Um ângulo de cone máximo de 67,5° foi especificado para o teste inicial, mas a possibilidade de projetos de novas pontas de ferramenta quando as medidas de forças precisas foram realizadas, permitirão subseqüentes projetos de estender as ferramentas para ângulos de cone agudos (Alwood et al., 2004).

Trabalhos anteriores sobre Estampagem Incremental de Chapas usando máquinas fresadoras CNC têm permitido a exploração de várias velocidades de

rotação da ferramenta. Evidências de (Leach et al., 2001) sugerem que a qualidade da superfície é melhor quando as velocidades de rotação da ferramenta são escolhidas para corresponder com o rolamento da ferramenta (em oposição ao arraste) através da peça de trabalho. Para a nova máquina, portanto foi decidido usar uma ferramenta não movimentada ou ferramenta passiva, montada em rolamentos de baixa fricção, então, não há nenhuma fricção significativa entre a peça e os lados da ferramenta que irão conduzir ao movimento relativo de rolamento. Fica claro de trabalhos anteriores que a forma da ferramenta é um importante parâmetro em Estampagem Incremental, deste modo a máquina deve ser projetada para trocas relativamente simples das pontas da ferramenta.

A especificação completa da ferramenta é dada na tabela 3.3. O projeto tinha orçamento previsto de £ 10.000 para o custo de todos os componentes.

Tabela 3.3 - Especificação da máquina (Alwood et al., 2004).

Área útil para a peça de trabalho	300 x 300 [mm]
Material	Até 1,6 [mm] aço carbono
Força vertical	< 13 [kN]
Força horizontal	< 6,5 [kN]
Velocidade da ponta da ferramenta	< 40 [mm/s]
Raio da ponta da ferramenta	5, 10, 15 [mm]
Ângulo do cone máximo	67,5°
Curso máximo do eixo vertical	100 mm

Na figura 3.17, é mostrada a máquina de estampagem incremental dedicada, projetada e fabricada pelo Instituto para Fabricação da Universidade de Cambridge.

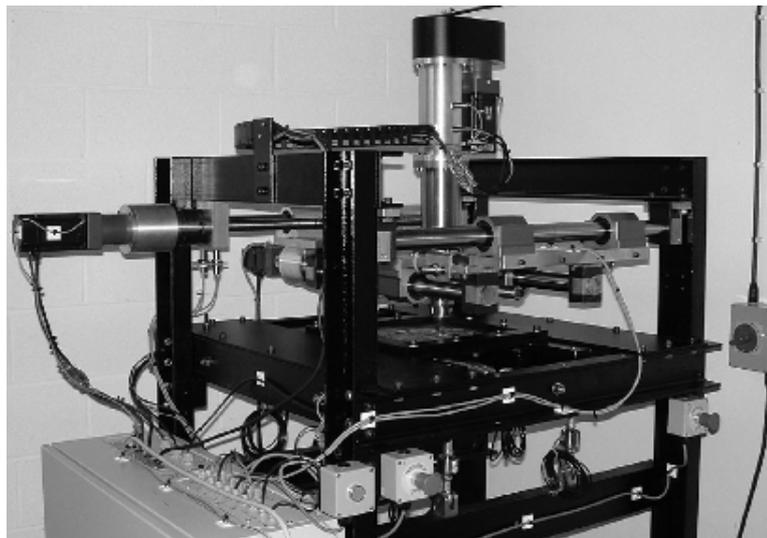


Figura 3.17 - Máquina do Instituto para Fabricação da Universidade de Cambridge - Reino Unido. (Alwood et al., 2004).

3.4.3 Robôs

A aplicação com robô utilizando tecnologia de Estampagem Incremental é para geração de superfícies convexas, figura 3.18. O processo começa com o modelo 3D em CAD do produto, o qual é então fatiado em camadas horizontais no *software* de CAM e transferido para a linguagem de programação do robô. O procedimento é muito similar com outros métodos de ISF, exceto que é usado o robô em vez de um torno, máquina CNC ou máquina especial para ISF (Lamminen, 2005).

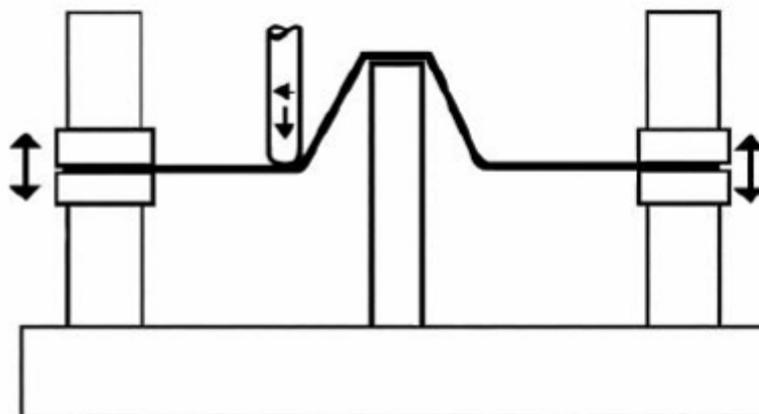


Figura 3.18 - Princípio da Estampagem Incremental com robô (Junk et al., 2003).

Os benefícios do robô comparados a estampagem com máquinas fresadoras ou máquinas ISF são notáveis. O robô trás flexibilidade ao processo de fabricação e possibilita a combinação de várias fases da fabricação dentro da cadeia da mesma célula de fabricação. O *blank* é apanhado e posicionado, o corte com laser e os tratamentos de superfície podem ser integrados na mesma célula de fabricação operado por um único robô industrial (Lamminen, 2005).

O equipamento usado no teste neste estudo é mostrado na figura 3.19. Consiste de um robô industrial com braço (figura 3.19a) e uma mesa de estampagem (figura 3.19b). A capacidade de manipulação do robô é de 175 kg e ao alcance de 2,55 m. O *blank* é fixado ao suporte, o qual move-se verticalmente ao longo de quatro guias a cada canto da mesa. O movimento vertical do suporte é causado somente pela gravidade e não controlado por nenhum dispositivo. O suporte move-se para baixo como procede a estampagem. Dois cilindros pneumáticos estão fixados ao suporte do *blank* para facilitar a fixação do *blank*. Neste equipamento de teste a máxima dimensão de trabalho é 200 x 200 mm (Lamminen, 2005).

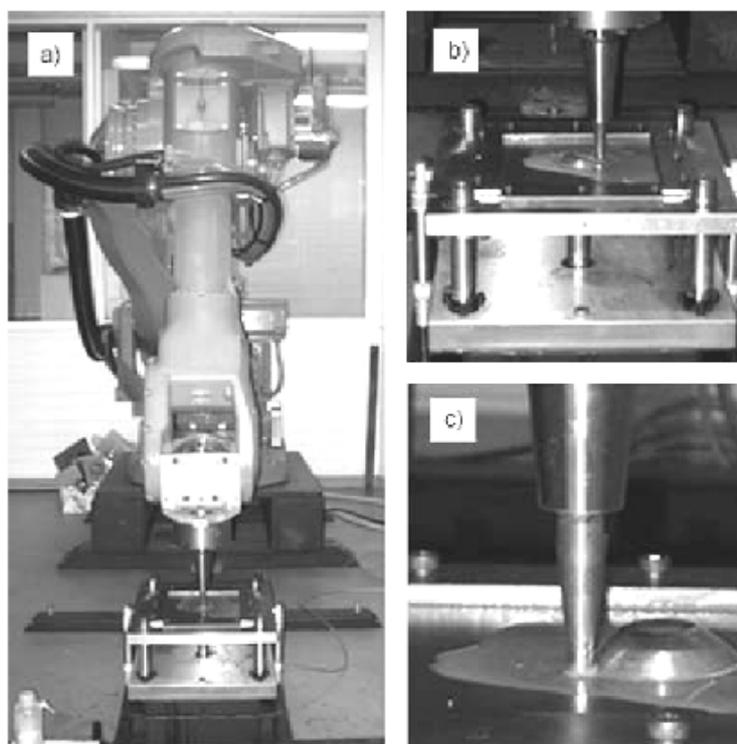


Figura 3.19 - *Setup* teste para Estampagem Incremental com um robô industrial: a - célula do robô; b - mesa de estampagem; c - ferramenta de estampagem (Lamminen, 2005).

Há um suporte da ferramenta abaixo da chapa de metal formada, o suporte é a mais alta parte do componente. Neste estudo foi utilizado três diferentes suportes de ferramenta com diferentes seções transversais: circular (diâmetro de 32 mm), hexagonal (largura de aresta de 36 mm) e quadrado (largura do lado de 40 mm)

A ferramenta de estampagem (figura 3.19c) é fixada ao pulso do robô com um ângulo de 90° para obter a máxima força na ferramenta e manter os movimentos dos eixos e motores do robô na máxima faixa de trabalho deles. Os testes têm sido feitos usando uma ferramenta de aço hemisférica endurecida, com diâmetro de 10 mm (Lamminen, 2005).

A estampagem é iniciada no ponto mais alto da geometria formada e continua incrementalmente, camada por camada, conforme a trajetória de estampagem pré-determinada similarmente com os outros métodos de Estampagem Incremental. As peças de teste neste estudo têm sido estampadas com um passe incremental de 0,2 mm e a velocidade da ferramenta é de 100 mm/s. Na tabela 3.4 encontram-se os parâmetros empregados nesta pesquisa.

Tabela 3.4 - Termos e parâmetros empregados (Lamminen, 2005).

Material empregado	Aço inoxidável austenítico padrão EN 1.4301 2B
Abreviatura do material	RST07
Espessura	0,7 mm
<i>Hydraulic bulging</i>	Teste com pressão hidráulica empregado para obter valores de referência quanto a estampabilidade do material testado
ISF A	Cone circular
ISF D	Cone quadrado
Ângulo α	63°
d_z	0,2 mm
Velocidade da ferramenta	100 mm/s

Um suporte cilíndrico foi empregado para formatos circulares e elípticos e um suporte quadrado para cones quadrados. Os alongamentos foram medidos usando uma grade marcada sobre a a chapa com círculos de 5 mm de diâmetro. A grade foi marcada do lado oposto ao contato da ferramenta (Lamminen, 2005).

As deformações do corpo de prova foram medidas após a conformação. Os resultados mostram que os alongamentos nas peças conformadas com ISF foram muito maiores que com métodos convencionais. Os alongamentos são mostrados na figura 3.20. Pode ser visto que para o ensaio com prensa hidráulica houve um alongamento somente 50% do original, enquanto que na Estampagem Incremental os alongamentos foram acima de 100% (Lamminen, 2005).

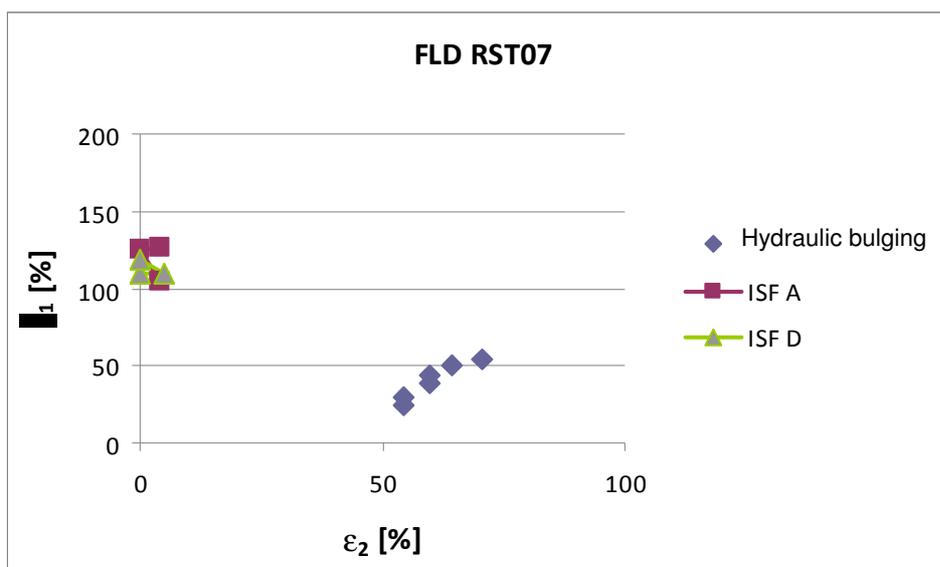


Figura 3.20 - CLC obtida na Estampagem Incremental para o aço inoxidável austenítico padrão EN 1.4301 2B. Os valores medidos estão sobre o primeiros círculos de fratura do ensaio. (Lamminen, 2005).

3.5 Produto

Neste item são apresentados exemplos de produtos fabricados pelo processo de Estampagem Incremental contendo: geometrias, tamanho, características do acabamento e defeitos.

3.5.1 Geometria do Produto

A Estampagem NC sem Matriz é um método adequado para produzir formas tridimensionais complicadas. A geometria do produto possui forma livre, mas há poucas limitações com ela, dependendo da espessura da chapa e do equipamento usado.

O tamanho da ferramenta define o raio mínimo do círculo, o qual é metade do diâmetro da ferramenta. O tamanho da ferramenta depende da espessura da chapa, porque ferramentas pequenas e finas não são fortes o suficiente para as forças de estampagem requeridas com chapas espessas. Como as menores ferramentas usadas tem um diâmetro de 6 mm, o raio mínimo de círculo é 3 mm. Entretanto, fabricantes de máquinas recomendam que o menor raio de círculo usado deve ser 5 mm (Lamminen et al., 2005).

A ferramenta opera somente na direção Z. Isto torna impossível formas dobradas internas. O ângulo de dobramento θ é limitado pela espessura de chapa. Quanto mais a chapa é dobrada, mais ela estira, como mostrado na figura 3.21. A espessura final s_1 depende da espessura inicial s_0 e do ângulo de dobramento θ .

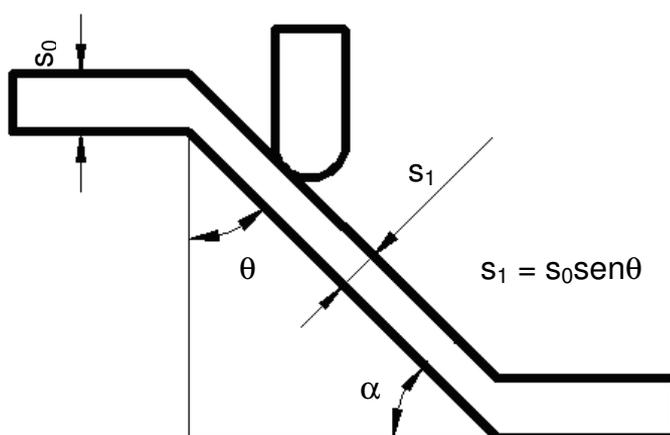


Figura 3.21 - Correlação entre redução da espessura da chapa e dobramento. A espessura final s_1 depende da espessura inicial s_0 e do ângulo de dobramento θ (Junk et al., 2001).

A geometria do produto define a necessidade e complexidade da ferramenta suporte. Ferramentas simples podem ser usadas em produtos onde a parede não inclui superfícies horizontais. Então a chapa pode ser suportada sobre o ponto mais alto do produto e a forma da parede sem nenhum suporte extra.

Exemplos destes tipos de produtos e ferramentas suportes são mostrados na figura 3.22 e 3.23. Na figura 3.23 a banheira tem aproximadamente 1500 x 1000 mm.



Figura 3.22 - Suporte da ferramenta e peças (Lamminen et al., 2005).



Figura 3.23 - Banheira e o suporte da ferramenta (Lamminen et al., 2005).

Se o produto tem superfície planar precisa, há necessidade de ser suportado por baixo. A ferramenta que atua no eixo Z pode ser programada para estampar uma superfície também sem ferramenta suporte debaixo, mas isto deforma os resultados facilmente. Quando a estampagem ocorre no ponto onde a parede dobra novamente, a chapa dobra em vez de esticar, a superfície planar retorce se nada suporta a borda. A figura 3.23 mostra uma banheira estampada com Estampagem NC sem Matriz e a ferramenta suporte usada na estampagem. Na ferramenta suporte em todas as superfícies planares, os raios arredondados são suportados,

enquanto os restos das paredes são formados livremente. A peça mais complexa é, onde a mais detalhada ferramenta suporte deve ser usada. Em alguns casos a ferramenta suporte pode ser detalhada no produto final (Lamminen et al., 2005).

3.5.2 Tamanho do Produto

O tamanho máximo de produto é definido pelo modelo da máquina. Há cinco diferentes modelos de máquinas para pesquisa e uso de produção (Lamminen et al., 2005). Os dados técnicos destas máquinas foram mostrados na tabela 3.2.

A máxima espessura de chapa é diferente para cada máquina. O fator crítico é a força necessária para estampagem. Como a tensão de escoamento varia de acordo com o material, a força de estampagem e assim a máxima espessura de chapa depende do material e da máquina usada. Como pode ser visto na tabela 3.2, a espessura de material compreende entre 0,5 a 2 mm para aço inoxidável e 0,5 a 5 mm para alumínio.

3.5.3 Características do Acabamento da Superfície Estampada

A ferramenta que atua no eixo Z deixa marcas sobre a superfície estampada em cada volta de estampagem. As marcas da ferramenta podem ser diminuídas usando ferramenta com grande diâmetro e diminuindo o passo de estampagem. Passos (incrementos) pequenos levam a tempos maiores de estampagem, então há um relação entre tempo de produção e a qualidade de superfície. Se o passo é menor que 0,01 mm, o material é estampado diversas vezes no mesmo lugar, então há grandes possibilidades do material vir a encruar. Este problema ocasionará o cisalhamento da chapa.

Superfícies curvadas leves e grandes são difíceis de estampar. As marcas da ferramenta são claras, porque o movimento horizontal em cada passo torna-se tão grande, quanto uma curva muito suave. As marcas das ferramentas podem ser prevenidas usando um chapa de sacrifício no topo da chapa atual no processo de estampagem. A chapa de sacrifício toma as marcas da ferramenta mas, transfere a geometria para a chapa atual debaixo. A geometria não é tão precisa quanto aquela na qual a ferramenta está diretamente em contato, mas a qualidade da superfície é melhor. A chapa atual pode ser estampada novamente sem usar a chapa de

sacrifício e os detalhes ficam aguçados no produto. Estes resultados freqüentemente satisfazem a qualidade (Lamminen et al., 2005).

(Junk et al., 2001) tem estudado como a estampagem afeta a rugosidade da superfície. Quando o diâmetro da ferramenta aumenta, a rugosidade da superfície diminui. A rugosidade da superfície pode também ser diminuída pela troca da direção de estampagem sobre cada círculo e diminuindo o passo de estampagem. Como todas as partes dos produtos não são formadas muito com as outras, algumas partes ficam completamente indeformadas, e a rugosidade da superfície não é constante sobre a superfície do produto. Superfícies planares são sempre indeformadas, deste modo a rugosidade da superfície permanece a mesma que a rugosidade da superfície no material original. Ângulos de paredes íngremes requerem mais estampagem e pequenos passos, assim a rugosidade da superfície é diminuída durante a estampagem.

3.5.4 Defeitos das Peças

Dois tipos de limites de estampagem podem ser identificados para ISF: ruptura e desgaste por deslizamento (Hirt et al., 2003).

a) Ruptura

Em um simples passe de estampagem onde a chapa é levada para dentro até a forma final por um simples movimento para baixo da ferramenta, a fratura dúctil é devido a grande deformação plástica, parecendo ser o fator limitante. Como o modo de deformação em superfícies planas é muito limitado para condições de deformações planas, a constância do volume conduz para uma relação direta entre espessura da parede e o ângulo de parede, o qual limita com respeito a ângulos grandes. Com esta convencional estratégia de estampagem, o ângulos da borda são limitados em aproximadamente 65° para Al99.5 e DC04. Este limite pode ser dominado por estratégia de estampagem multi-estágio onde a pré-forma com um ângulo de parede no lado pequeno pode ser transformado para uma forma final com ângulos de muitos passes por uma seqüência de simples passes de estampagem (Chouvalova et al., 2003). Ao mesmo tempo, atenção deve ser prestada para repetir a interação de deslizamento com a ferramenta de estampagem. A figura 3.24a mostra detalhes deste tipo de falha.

b) Desgaste por deslizamento

Em estampagem multi-estágio com ferramenta não rotativa a superfície da chapa é exposta a uma seqüência de interações de contato com a ferramenta. Como consequência, a delaminação de lâminas finas pode algumas vezes ser observada, figura 3.24b. De acordo com (Yan et al., 2002), contatos de deslizamentos cíclicos conduzem a acúmulo de deformação plástica perto das regiões da superfície. A falha local ocorre quando as deformações acumuladas excedem o limite de ductilidade do material.

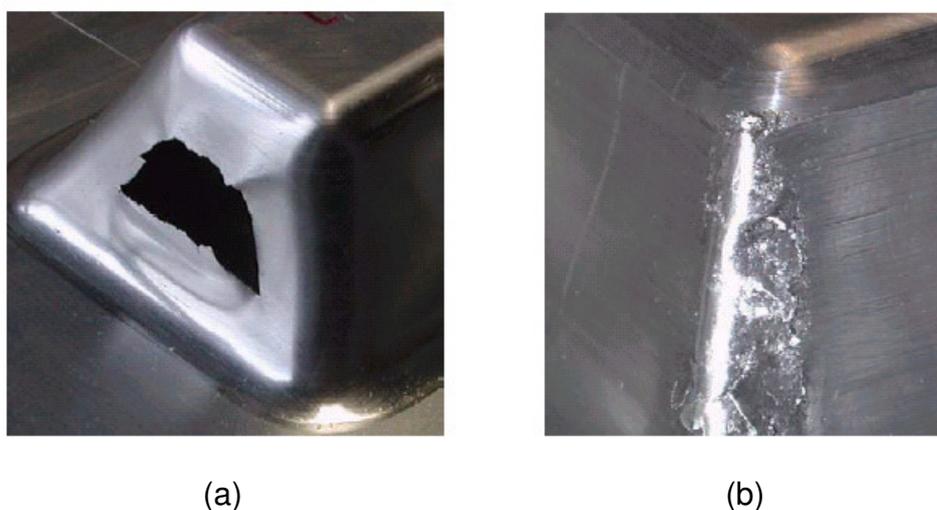


Figura 3.24 - Limites de estampagem em ISF: a - falha dúctil sobre passes do flange, b - desgaste da superfície em estampagem multiestágio (Hirt et al., 2003).

3.6 Limitações e Aplicações do Processo

A máxima capacidade de produção da máquina para Estampagem NC sem Matriz é cerca de 50 peças/mês, variando amplamente de acordo com o tamanho e a geometria dos produtos conformados (Lamminen et al., 2005). As formas internas não podem exceder um ângulo de 90°. A figura 3.25 mostra um exemplo de uma peça fabricada por ISF mostrando o ângulo de dobramento interno menor que 90°.

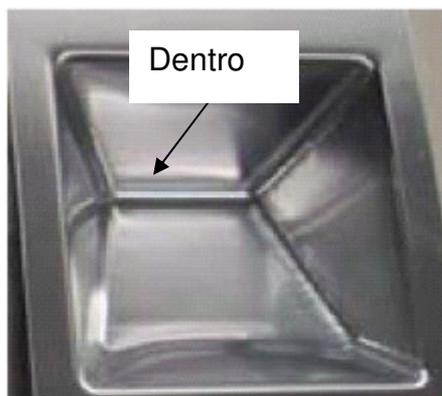


Figura 3.25 - Peça fabricada pelo processo de Estampagem Incremental, mostrando o ângulo de dobramento interno menor que 90° (Alwood et al., 2005).

Enquanto os processos convencionais de estampagem estão voltados para grandes escalas de produção com matrizes complexas e de alto custo, o processo de Estampagem Incremental pode ser utilizado para prototipagem rápida (painéis da carroceria de automóveis), lotes pequenos ou baixos volumes de produção (Schaeffer, 2004; Mcloughlin, 2005 e Lamminen et al., 2005). Pode ser também empregado na fabricação de produtos customizados na área médica e de decoração (Alwood et al, 2005).

O processo tem a vantagem de ser uma operação de estampagem sem matriz, o qual requer uma mínima ferramenta especial (Schaeffer, 2004; Mcloughlin, 2005), sendo também um processo sem geração de cavaco, produzindo um mínimo desperdício de material na fabricação (Mcloughlin, 2005).

Os custos no processo de Estampagem Incremental são cerca de 5 a 10% dos custos de processo tradicional de prensagem, mas a velocidade de produção é também mais baixa. Apesar da baixa velocidade de produção o método é mais eficiente quando produz peças únicas ou lotes pequenos.

Quando utiliza-se a Estampagem NC sem Matriz na produção de peças de reposição, uma economia significativa pode ser alcançada quando o estoque de moldes grandes não é necessário. O armazenamento de moldes é um problema especialmente na indústria automotiva, porque as peças são grandes e o ciclo de vida do produto é relativamente grande. Isto conduz a grandes custos e tempos de estoque (Lamminen et al., 2005).

3.7 Tendências Mundiais

As aplicações mais importantes da tecnologia ISF são nos setores: aeronáutico, automotivo; prototipagem rápida etc.

No setor aeronáutico a tecnologia ISF não deve ser considerada como uma substituta das tecnologias existentes. Esta deve ser considerada como um complemento ou, para fabricação de componentes específicos. A tecnologia deve ser flexível o suficiente para ser adaptada a diferentes: geometrias, materiais (alumínio, titânio etc.) e condições. Em geral deve ser utilizada para componentes específicos que requerem um reduzido número de peças. Pode também ser utilizado para fabricação de componentes de aeronaves (Fatronik, 2006).

A figura 3.26 mostrada a seguir, pode-se notar um exemplo de um componente aeronáutico fabricado pela tecnologia ISF.



Figura 3.26 - Componente de duto de ar fabricado por ISF em aço DC04 (Fatronik, 2006).

No setor automotivo as companhias de estampagem de peças normalmente não fabricam pequenos lotes, tornando importante a aplicação de ISF. Em face disto algumas montadoras utilizam estas facilidades nos seus produtos. Como por exemplo, pode-se citar a Honda que produziu um veículo conceito (Honda Fit HB7), com capota e pára-lamas fabricado por ISF.

Atualmente algumas peças automotivas são fabricadas em materiais não metálicos (como por exemplo poliéster), porque a fabricação de chapas metálicas

não é possível, prova disto são peças fabricadas para painéis e acabamentos de carrocerias de ônibus.

Uma outra aplicação da tecnologia ISF é a indústria de *tuning*, (personalização de veículos automotores) que requer alta customização de seus produtos.

Pode-se dizer que uma grande vantagem da tecnologia ISF é reduzir o problema do estoque do molde de peças grandes com um longo ciclo de vida.

Estima-se um mercado potencial no setor automotivo europeu (dados de fevereiro de 2006) para pequenos lotes a serem fabricados por ISF em aproximadamente 4 bilhões de euros.

Na figura 3.27 é mostrado um pára-lamas de automóvel conformado pelo método de ISF. Os problemas apontados nesta figura constam da zona 1 e 2 onde aparecerem respectivamente marcação de linhas e flangeamento. Apesar destes problemas a superfície apresentou boa qualidade.

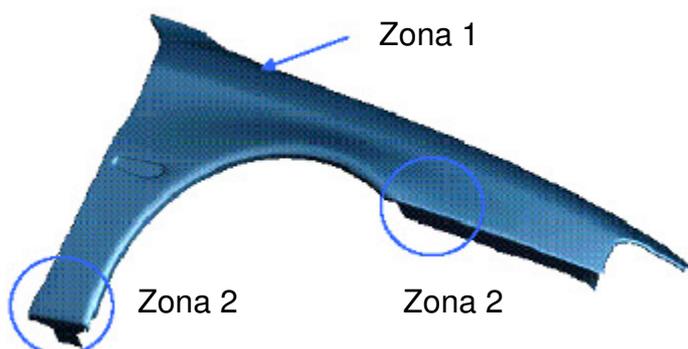


Figura 3.27 - Pára-lamas de automóvel estampado por ISF (Fatronik, 2006).

A ISF tem algumas restrições no estágio de prototipagem porque o *know-how* obtido durante a prototipagem é necessário para a fabricação da matriz. A ISF pode ser utilizada em paralelo com o estágio de estampagem para reduzir o “tempo do cliente”, mas a viabilidade econômica não é clara (Fatronik, 2006).

No setor de prototipagem rápida as companhias que estão trabalhando são principalmente dedicadas ao setor automotivo, então, eles têm os mesmos problemas mostrados antes para a aplicação da tecnologia ISF. Este setor desenvolve muitos protótipos em materiais não-metálicos desde que não tenham tecnologia apropriada para transformar chapas de metal. Sob o ponto de vista do

setor de prototipagem, seria interessante aplicar a tecnologia ISF em diferentes materiais tais como: plásticos ou fibras.

Nos outros setores que utilizam a tecnologia ISF há demanda alta por customização de seus produtos (móveis, decoração, arte etc.). Devido a esta customização, pequenos lotes de fabricação são exigidos. No setor biomédico, os produtos são normalmente fabricados com as necessidades específicas dos pacientes.

Na figura 3.28 mostrada a seguir, pode-se notar um painel decorativo, fabricado com aço A1050 e com espessura de 1 mm.



Figura 3.28 - Painel decorativo (Fatronik, 2006).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão explanados os equipamentos, ferramentas, corpos de prova, *software* etc. empregados nos ensaios de Estampagem Incremental do aço inoxidável austenítico AISI 304L. Na segunda parte deste capítulo será descrita a metodologia empregada nos ensaios.

4.1 Infraestrutura do Trabalho

A infraestrutura do trabalho é composta basicamente da máquina-ferramenta, das ferramentas de estampar, do dispositivo para Estampagem Incremental, do *software* EdgeCAM® além de equipamentos auxiliares.

4.1.1 Máquina-Ferramenta

A instituição SATC dispõe de um Centro de Usinagem com características adequadas a serem utilizadas no processo de Estampagem Incremental. Na tabela 4.1 são apresentadas as características técnicas do centro e usinagem empregado no trabalho.

Tabela 4.1 - Características do Centro de Usinagem Discovery 4022.

Curso Longitudinal eixo X	599 mm
Curso transversal eixo Y	406 mm
Curso vertical eixo Z	508 mm
Cone da árvore	ISO 40
Potência do motor principal	7,5 CV
Faixa de rotação	60 a 6.000 rpm
Avanço rápido dos eixos X, Y e Z	15/15/15 m/mim
Dimensões da mesa	360 x 840 mm
Potência	15 kVA
Comando CNC	Mach - 9

Na figura 4.1 é apresentado o Centro de Usinagem Vertical Discovery 4022, fabricado pela empresa ROMI. Pode-se notar que sobre a mesa de trabalho está montado o dispositivo de Estampagem Incremental e no cone porta-pinça da máquina a ferramenta de estampar.



Figura 4.1 - Centro de Usinagem Vertical Discovery modelo 4022.

4.1.2 Ferramenta de Estampar

Conforme a literatura técnica, existe uma variedade de tipos e materiais utilizados em ferramentas de estampar. Devido a característica do trabalho envolver uma quantidade limitada de recursos para a pesquisa, optou-se em utilizar três ferramentas de metal-duro da classe K (K10 – K30) com a ponta semi-esférica. A rugosidade da ponta da ferramenta não foi medida, pois não se conseguiu viabilizar um instrumento com as características desejadas para a referida medição.

A figura 4.2 mostra a ferramenta de estampar montada ao mandril porta-pinça, e também o dispositivo de medição do batimento e o balanço. Entende-se por batimento a excentricidade da ferramenta e por balanço, a dimensão da ferramenta compreendida entre a extremidade da pinça de fixação e a extremidade semi-

esférica da ferramenta. O batimento foi medido com um relógio comparador enquanto que o balanço com um paquímetro de profundidade.

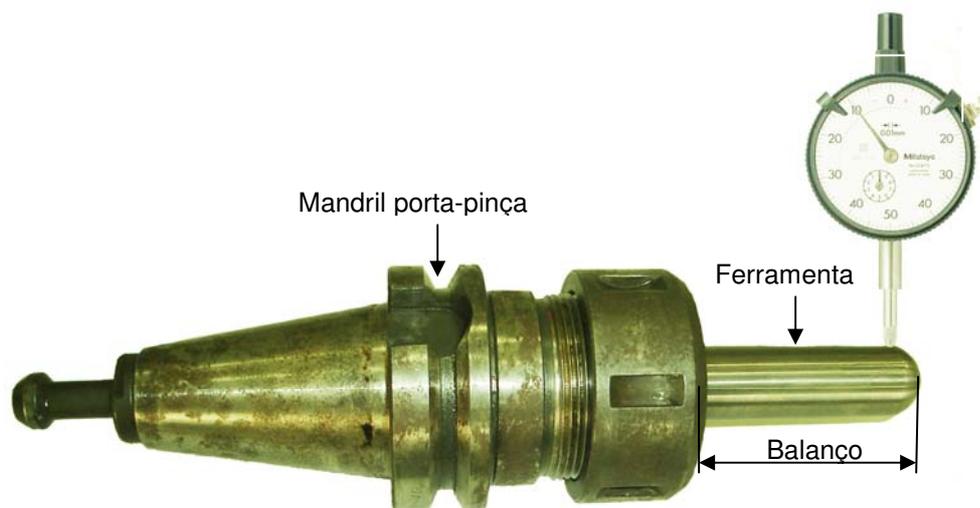


Figura 4.2 - Ferramenta de estampar montada ao mandril porta-pinça.

As características das ferramentas empregadas constam da tabela 4.2. Nesta mesma tabela pode-se notar o batimento e o balanço das ferramentas montadas no cone porta-pinça.

Tabela 4.2 - Características das ferramentas.

Ferramenta nº	Raio da ferramenta R_T [mm]	Comprimento total [mm]	Batimento [mm]	Balanço [mm]
1	5	98,4	0,04	74
2	8	98,4	0,04	74
3	10	147,6	0,05	74

4.1.3 Dispositivo de Estampagem Incremental

O dispositivo de Estampagem Incremental projetado no *software* CAD 3D da Solidworks® é bastante simples. Escolheu-se fazer um dispositivo em que a chapa permanecesse fixa à mesa da máquina-ferramenta, obedecendo aos comandos de trajetória impostos pelo *software*. Este dispositivo é apresentado na figura 4.3.

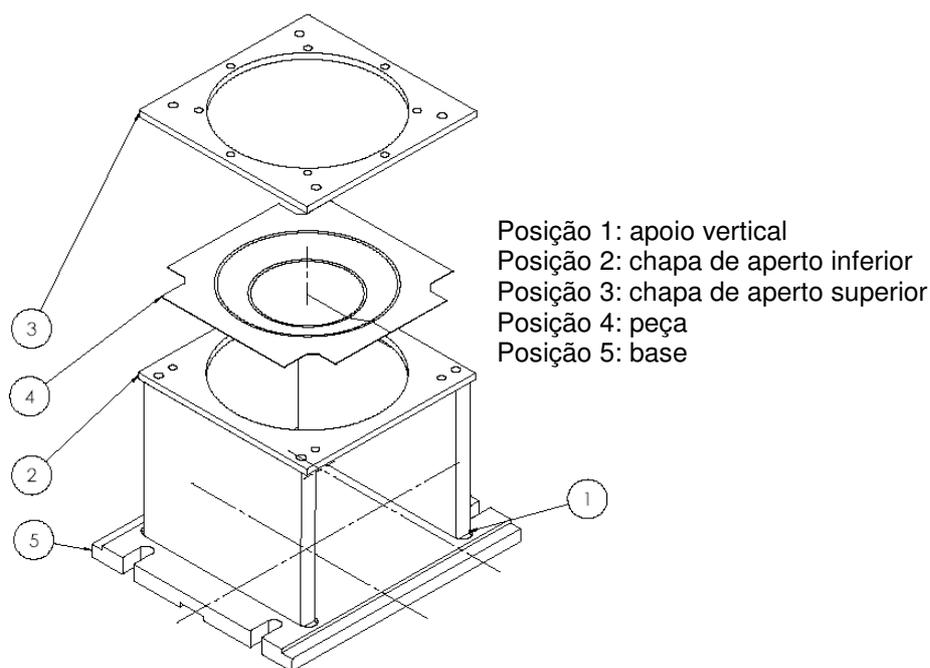


Figura 4.3 - Dispositivo de Estampagem Incremental.

O dispositivo de Estampagem Incremental está dividido em 4 posições. Na posição 5 tem-se a base com dimensões de 350 x 400 mm, com quatro rasgos. Estes rasgos têm função de encaixar parafusos prisioneiros, para fixação na mesa da máquina-ferramenta através de porcas tês.

Na posição 1 observa-se o apoio vertical, composto de duas chapas nas dimensões 25 x 240 x 275 mm parafusadas à base.

Nas posições 2 e 3 tem-se respectivamente a chapa de aperto inferior e superior, com superfícies usinadas nos contornos. Entre as chapas encontra-se o *blank* (posição 3) com dimensões de 295 x 295 mm. A chapa de aperto inferior é fixada ao apoio vertical através de quatro parafusos sextavados M12 x 40 mm. O *blank* é fixado contra a chapa de apoio inferior através de oito parafusos sextavados M10 x 40 mm. Ambas as chapas de aperto são móveis o que garante a flexibilidade do dispositivo. A configuração atual permite somente a estampagem de superfícies de revolução, entretanto trocando as referidas chapas pode-se também estampar superfícies que tenham contorno quadrado ou retangular.

4.1.4 Corpos de Prova

A geometria da peça conformada pelo processo de Estampagem Incremental foi escolhida em função da facilidade de fabricação do dispositivo de fixação e da trajetória da ferramenta.

Nos ensaios utilizaram-se geratrizes de aço inoxidável AISI 304L com dimensões de 0,5 x 295 x 295 mm. As geratrizes possuem um chanfro de 70x45° nos cantos para possibilitar a montagem no dispositivo de estampagem (figura 4.4). Devido aos cuidados tomados na preparação das geratrizes e nos testes, estimou-se em um corpo de prova por ensaio como sendo adequado para uma pesquisa confiável.



Figura 4.4 - Formato da geratriz.

Para um melhor entendimento da peça estampada, na figura 4.5 são mostrados: a peça em corte (figura 4.5a) e em 3 dimensões (figura 4.5b). Na figura 4.5a está um exemplo de uma peça, com ângulo de parede α de 60°, complementar de 120°. Em todos os ensaios as cotas (figura 4.5a) são fixas, entretanto modificou-se o ângulo de parede α .

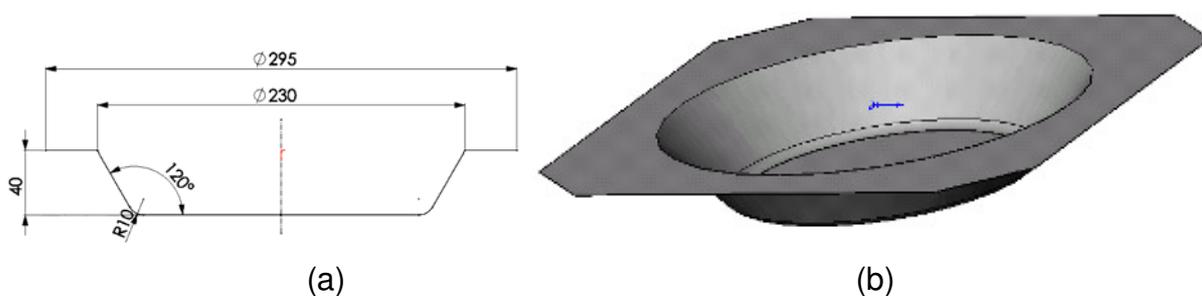


Figura 4.5 - Peça obtida no ensaio de Estampagem Incremental: a - peça em corte, b - peça em 3 dimensões.

4.1.5 Software Edge CAM

O *software* Edge CAM apresenta ciclos avançados de usinagem, permitindo trabalhar desde a geometria mais simples até a mais complexa. Além disso, possui algumas características que são muito úteis para a adaptação para Estampagem Incremental (SKA, 2007) apud (Castelan, 2007):

- Apresenta movimentos suaves de aproximação, conexão e fresamento trocoidal. Esse sistema faz com que a área de contato entre a ferramenta e a peça (chapa) se mantenha uniforme, melhorando o acabamento e mantendo a força de corte constante. As entradas e saídas da ferramenta são tangenciais à superfície, evitando um contato brusco que poderia danificar a chapa e/ou a ferramenta;
- Possui o recurso *Constant Cusp Finishing*, que mantém o incremento de corte lateral constante. Isto produz um acabamento consistente e constante em toda a superfície estampada;
- Ciclos *parallel lace* e *profiling* podem ser controlados pelo incremento lateral, pelo incremento vertical, pela altura da crista e pelos ângulos de contato máximos e mínimos entre ferramenta e chapa. A correta combinação destes ciclos, de acordo com a geometria, material da chapa e material da ferramenta pode gerar superfícies muito bem acabadas (com baixa rugosidade superficial).

4.1.6 Equipamentos Auxiliares

Para medir a rugosidade foi utilizado um rugosímetro portátil DIGIMESS TR100.

Com a finalidade de constatar a redução de espessura dos corpos de prova conformados empregou-se um micrômetro externo Mitutoyo para medir roscas com resolução de 0,01 mm adaptado com terminais cônicos e extremidades em forma de ponto, para medição de forma precisa.

Para o ensaio de microdureza Vickers empregou-se o microdurômetro Shimatzu.

Para medir o ângulo de parede real α_1 , empregou-se uma máquina de medição tridimensional Mitutoyo modelo BRM.

Para o corte a laser empregou-se a máquina BYSTRONIC modelo Bysprint 3015, com os seguintes parâmetros de corte: velocidade de corte de 2000 mm/min,

potência do laser na perfuração de 100%, potência do laser no corte de 100% e pressão do ar comprimido de 7,0 bar.

Os ensaios de tração foram realizados na máquina de tração EMIC modelo DL10000 capacidade 100 kN utilizando a célula de carga Trd 28.

Os ensaios para obtenção da curva CLC foram realizados em uma prensa hidráulica de duplo efeito da marca Dan-Pressa com capacidade de até 20 t (6 t no punção inferior).

Os equipamentos para análise metalográfica empregados foram: máquina de embutir, politriz e microscópio Union série MS para observação dos corpos de prova. No microscópio empregaram-se as objetivas M5, M10, M20 e M40 em conjunto com as oculares de 10x.

Para a caracterização da composição química do aço AISI 304L empregou-se o Espectrômetro de Emissão Ótica - Spectrolab LAVMB08B.

4.2 Metodologia dos Ensaios

A metodologia empregada nos ensaios foi baseada no processo de Estampagem Incremental denominado SPIF (*Single Point Incremental Forming*) ou Estampagem Incremental com Ponto Simples. Neste sistema observa-se a ferramenta com movimentação na direção Z e o *blank* movimenta-se simultaneamente nas direções X e Y sem apoio pela sua face inferior. Considerando a experiência adquirida em alguns ensaios preliminares optou-se em colocar a rotação nula na ferramenta, ou seja livre.

A superfície gerada é um cone truncado com profundidade de 40 mm. Para tanto foi empregada uma estratégia de usinagem denominada helicoidal cônica através do *software* EdgeCAM®. Neste tipo de estratégia a ferramenta executa uma trajetória helicoidal cônica e está sempre em contato com o *blank*.

A figura 4.6 mostra a simulação da estampagem feita através do *software* EdgeCAM®.

Para lubrificação da interface ferramenta/peça foi utilizada uma graxa para lubrificar rolamentos com sabão a base de lítio, chamada UNILIT MPA-2. Esta graxa apresenta as seguintes características: consistência 2 (NLGI-2), com temperaturas de aplicação de até 130 °C e com ponto de gota de 185 °C. Não foram testados

outros lubrificantes, pois, o foco do trabalho eram os parâmetros de conformação: raio da ferramenta R_T , ângulo de parede α e passo vertical d_z .

Todos os experimentos foram realizados empregando as ferramentas mostradas na figura 4.2 e as características das ferramentas de acordo com a tabela 4.2.

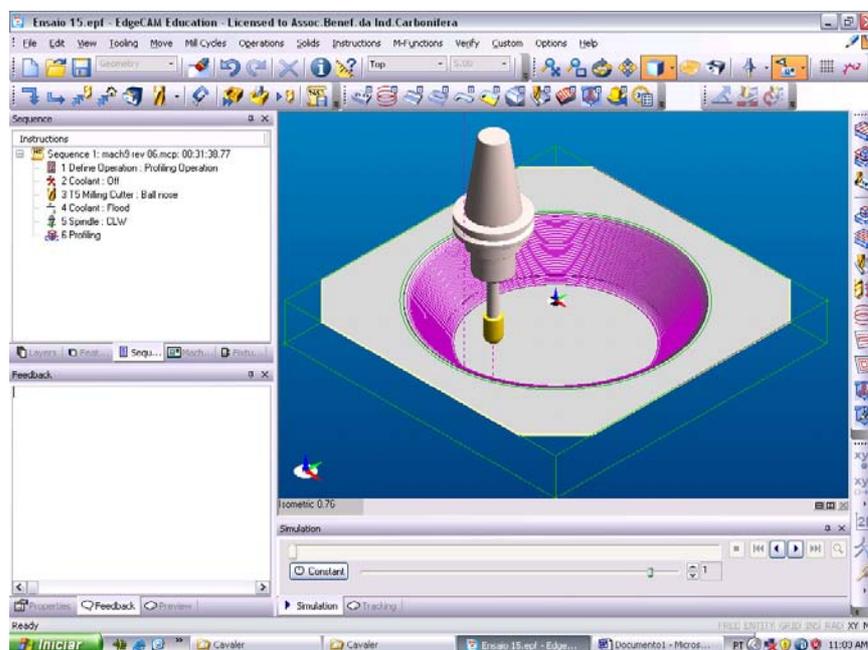


Figura 4.6 - Simulação da Estampagem Incremental.

4.2.1 Experimentos com Ferramentas Não Revestidas

Os parâmetros inicialmente propostos para os experimentos com ferramentas não revestidas constam da tabela 4.3. O planejamento envolvia três ferramentas ($R_T = 5, 8$ e 10 mm) variando-se o ângulo de parede α e o passo vertical d_z .

Na tabela 4.3 considera-se v_{fh} e v_{fz} as velocidades de avanço nas direções XY e na direção Z respectivamente. O avanço de mesa v_{fh} foi fixado experimentalmente, a um nível onde o processo permanecesse estável, em um valor de 1500 mm/min. Este parâmetro foi baseado em testes preliminares em uma fase anterior da pesquisa (Schaeffer et al., 2007).

O passo vertical d_z é o incremento da profundidade por rotação que a ferramenta executa na peça.

Tabela 4.3 - Parâmetros de estampagem com ferramentas não revestidas.

Ensaio n ^o	Raio da ferramenta R _T [mm]	Ângulo de parede α [°]	Passo vertical d _z [mm]	v _{fh} [mm/min]	v _{fz} [mm/min]
1	5	45	0,4	1.500	375
2	5	45	0,6	1.500	375
3	5	45	0,8	1.500	375
4	8	45	0,4	1.500	375
5	8	45	0,6	1.500	375
6	8	45	0,8	1.500	375
7	10	45	0,4	1.500	375
8	10	45	0,6	1.500	375
9	10	45	0,8	1.500	375
10	5	60	0,4	1.500	375
11	5	60	0,6	1.500	375
12	5	60	0,8	1.500	375
13	8	60	0,4	1.500	375
14	8	60	0,6	1.500	375
15	8	60	0,8	1.500	375
16	10	60	0,4	1.500	375
17	10	60	0,6	1.500	375
18	10	60	0,8	1.500	375

4.2.2 Experimentos com Ferramentas Revestidas

Com objetivo de refinar o trabalho foram propostos ensaios, com as mesmas ferramentas, somente com revestimento PVD de TiAlN na ponta semi-esférica, conforme tabela 4.4. Os objetivos principais do revestimento são aumento de dureza da ferramenta e redução do atrito na interface corpo de prova/ferramenta.

Os ensaios n^o 19 a 30 não foram executados, pois estes eram com raio da ferramenta R_T (5, 8 e 10 mm) e ângulo de parede $\alpha = 45^\circ$ e raio da ferramenta R_T = 5 mm e ângulo de parede $\alpha = 60^\circ$ condições não consideradas críticas e, que não mostrariam com clareza o desempenho do revestimento da ferramenta na rugosidade R_z da peça.

Tabela 4.4 - Parâmetros de estampagem com ferramentas revestidas de TiAlN.

Ensaio n ^o	Raio da ferramenta R _T [mm]	Ângulo de parede α [°]	Passo vertical d _z [mm]	v _{fh} [mm/min]	v _{fz} [mm/min]
31	8	60	0,4	1.500	375
32	8	60	0,6	1.500	375
33	8	60	0,8	1.500	375
34	10	60	0,4	1.500	375
35	10	60	0,6	1.500	375
36	10	60	0,8	1.500	375

O revestimento das ferramentas foi feito pela empresa BRASIMET e comercialmente chama-se DUROTIN Performa+. Este é composto de camadas alternadas de Nitreto de Titânio Alumínio e dlc (*diamond like carbon*) me-DLC (TiAlN + WC:H). Alia as propriedades do DUROTIN Performa com as propriedades tribológicas do DUROTIN Diamante (baixo coeficiente de atrito e propriedades de lubrificante sólido).

A tabela 4.5 mostra as características do revestimento DUROTIN Performa+.

Tabela 4.5 - Características do revestimento PVD DUROTIN Performa+ (Brasimet, 2009).

Denominação comercial	Arquitetura da camada	Dureza (HV 0,025)	Espessura da camada (μm)	Coeficiente de atrito (contra o aço 52100)	Temperatura de revestimento ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura máxima de utilização ($^{\circ}\text{C}$)	Cor
DUROTIN Performa+.	AlTiN + WC:H (camada composta)	3300 - 1200	1 - 6	0,2	500	800	Grafite

4.2.3 Experimentos Complementares com Ferramentas Revestidas

Para finalizar os ensaios deste trabalho empregaram-se novamente as ferramentas revestidas. O objetivo destes ensaios é mapear Curvas Limites de Conformação na Estampagem Incremental para o aço inoxidável AISI 304L. Estes ensaios constam da tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Parâmetros de estampagem nos experimentos complementares com ferramentas revestidas.

Ensaio n ^o	Raio da ferramenta R_T [mm]	Ângulo de parede α [$^{\circ}$]	Passo vertical d_z [mm]	v_{th} [mm/min]	v_{tz} [mm/min]
37	8	70	0,4	1.500	375
38	8	70	0,6	1.500	375
39	10	70	0,4	1.500	375
40	10	70	0,6	1.500	375

Como alternativa, caso os ensaios n^{os} 37, 38, 39 e 40 não rompessem planejou-se os ensaios 41, 42, 43 e 44 com os mesmos parâmetros que os anteriores somente com ângulo de parede de 80°. Entretanto não foi necessário realizar estes testes, pois se alcançou o objetivo, ou seja, os corpos de prova romperam.

5. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

Na escolha do material dos corpos de prova usaram-se os seguintes critérios: estampabilidade, informações técnicas e facilidade de obtenção.

O aço inoxidável empregado é o aço AISI 304L austenítico. Apresenta a seguinte composição química: 18% Cr, 8% Ni, 0,04% C, 0,4% Si, 1,1% Mn, 0,002% S e 0,05% N (Guida, 2004). Foi utilizada a espessura de 0,5 mm, devido a capacidade da máquina-ferramenta.

Para a caracterização dos corpos de prova do aço inoxidável AISI 304L adotaram-se quatro tipos de ensaios: tração, curva CLC, metalográfico e espectrometria de difração.

5.1 Ensaio de Tração

Para se construírem os gráficos: força aplicada F versus deformação absoluta Δl (figura 5.1), tensão normal σ versus deformação relativa ε (figura 5.2) e tensão de escoamento k_f versus deformação verdadeira φ (figura 5.4) empregaram-se os dados do ensaio mostrados na tabela 5.1. Todos os dados foram do corpo de prova nº1 cortado na direção longitudinal (0º em relação a direção de laminação), pois nos ensaios apresentou os maiores valores de força para romper.

Os valores fixos da tabela 5.1 são o comprimento inicial $l_0 = 120$ mm e a área inicial $A_0 = 10$ mm². A máquina de ensaio de tração forneceu os dados da força F [N] e da deformação absoluta Δl [mm]. A partir destes dois parâmetros foram calculados os outros parâmetros da seguinte forma:

- A deformação relativa ε foi calculada por:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.17)$$

- A tensão normal principal σ foi calculada por:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.16)$$

- A área instantânea A foi calculada por:

$$A = \frac{A_0 \cdot l_0}{l} \quad [\text{mm}^2] \quad (2.19)$$

- A tensão de escoamento k_f foi calculada por:

$$k_f = \frac{F}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (2.18)$$

- A deformação verdadeira φ foi calculada por:

$$\varphi = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (2.20)$$

Tabela 5.1 - Parâmetros obtidos no ensaio de tração do aço inoxidável AISI 304L.

Δl [mm]	F [N]	ε [%]	σ [MPa]	A [mm ²]	k_f [MPa]	φ
0,0	3	0,0	0	10,0	0	0,0
0,0	113	0,0	11	10,0	11	0,0
0,1	244	0,1	24	10,0	24	0,0
0,1	369	0,1	37	10,0	37	0,0
0,2	500	0,1	50	10,0	50	0,0
0,2	646	0,2	65	10,0	65	0,0
0,3	809	0,2	81	10,0	81	0,0
0,7	2401	0,6	240	9,9	242	0,0
1,9	3005	1,6	301	9,8	305	0,0
4,5	3553	3,8	355	9,6	369	0,0
10,3	4338	8,6	434	9,2	471	0,1
21,8	5421	18,2	542	8,5	641	0,2
34,5	6549	28,8	655	7,8	843	0,3
47,2	7439	39,3	744	7,2	1036	0,3
59,9	7858	49,9	786	6,7	1178	0,4
63,0	7837	52,5	784	6,6	1195	0,4

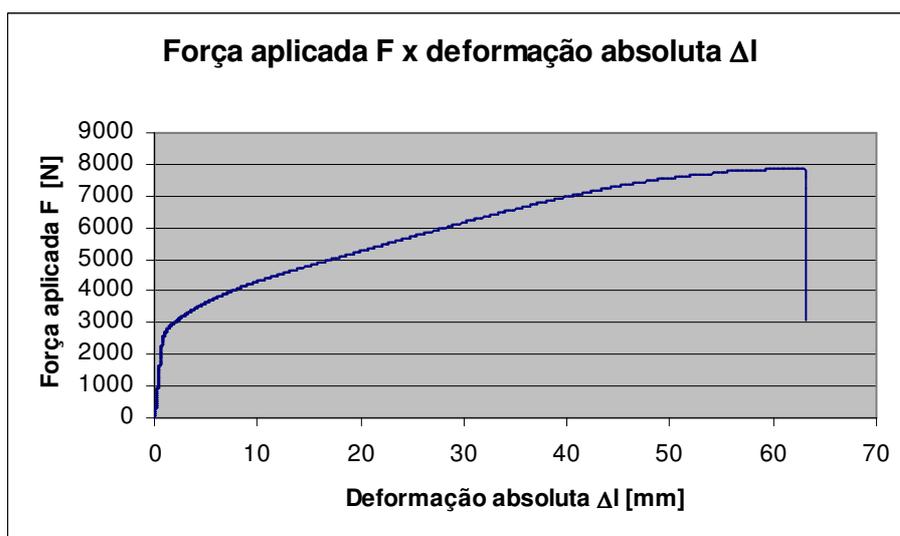


Figura 5.1 - Força aplicada F versus deformação absoluta Δl , resultante do ensaio de tração no aço inoxidável AISI 304L.

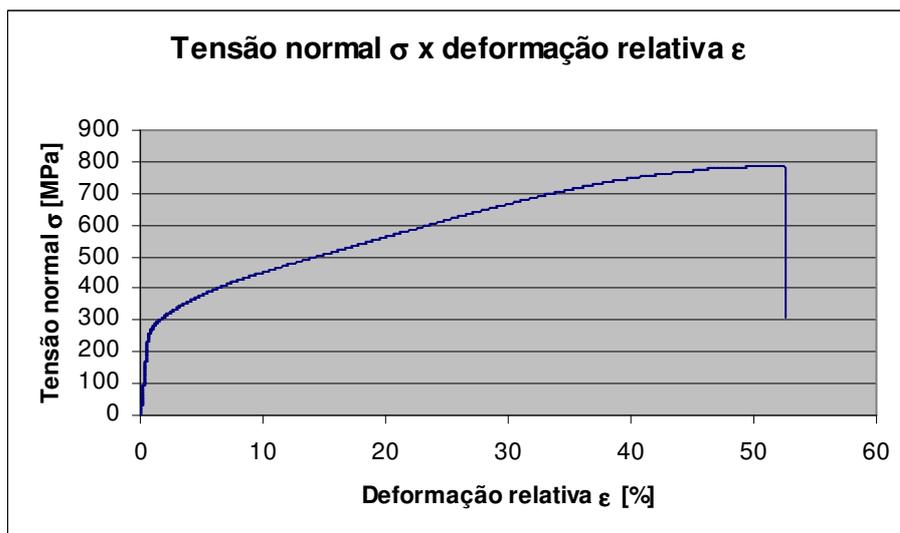


Figura 5.2 - Tensão normal σ versus deformação relativa ϵ , resultante do ensaio de tração no aço inoxidável AISI 304L.

Foram retirados três corpos de prova por direção de laminação na chapa, três na direção longitudinal (0° em relação a direção de laminação), três na direção transversal (90° em relação a direção de laminação) e três na direção oblíqua, ou seja, a 45° em relação a direção de laminação.

A tabela 5.2 mostra os resultados com valores médios, dos corpos de prova descritos acima. Os valores da tensão de escoamento convencional σ_e , tensão máxima R_m foram retirados do diagrama convencional tensão convencional σ versus deformação relativa ϵ .

Tabela 5.2 - Parâmetros médios do ensaio de tração no aço inoxidável AISI 304L.

Direção	σ_e [MPa]	R_m [MPa]	ϵ [%]
Longitudinal	258	785	53
Transversal	245	743	58
Oblíqua (45°)	238	723	59

A comparação do resultado do ensaio de tração realizado na SATC (figura 5.2), com o ensaio do fornecedor da matéria-prima ACESITA (figura 2.7), é visto na figura 5.3.

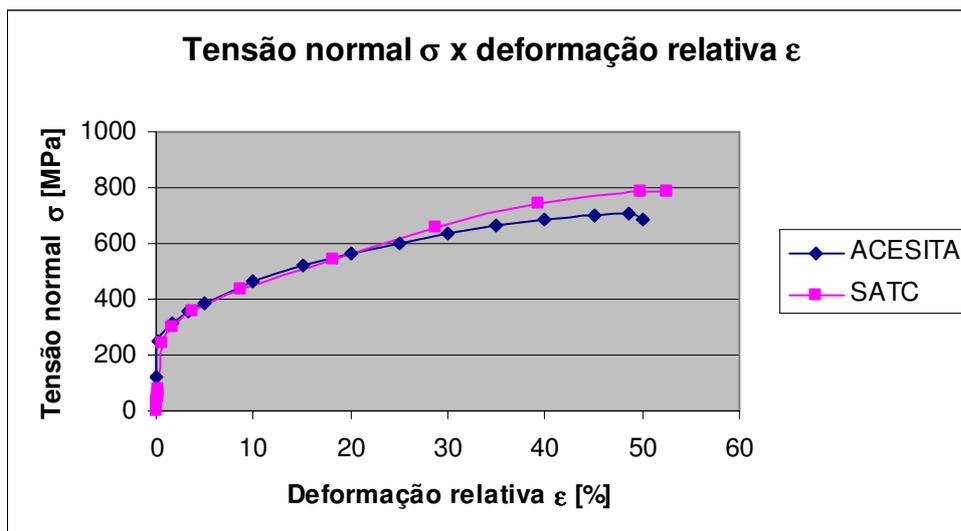


Figura 5.3 - Comparação das curvas de ensaio de tração entre o fornecedor (ACESITA) e o ensaio prático (SATC).

Analisando a figura 5.3 pode-se mostrar que o ensaio prático aproximou-se muito da literatura técnica especialmente até uma deformação relativa de 25%.

5.2 Curva de escoamento

A curva de escoamento resultante do ensaio de tração da tabela 5.1 está representada na figura 5.4.

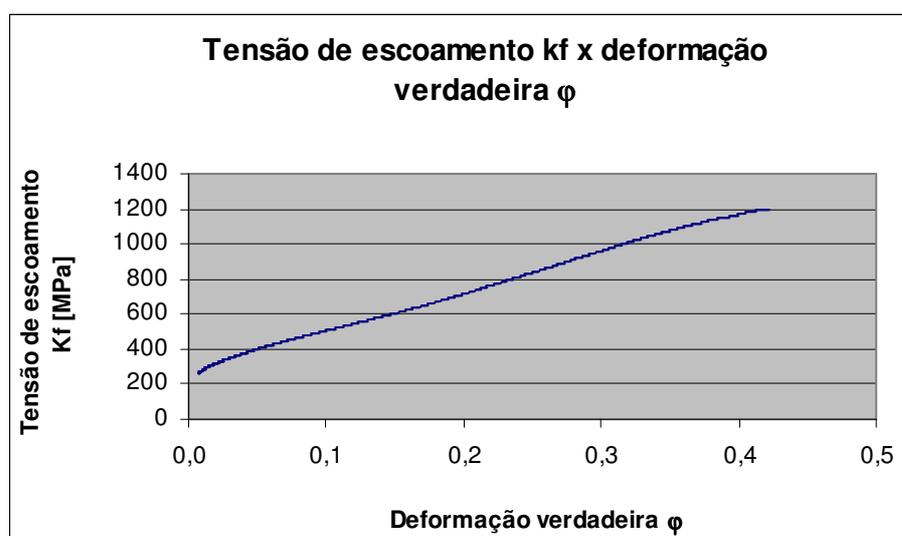


Figura 5.4 - Tensão de escoamento K_f versus deformação verdadeira ϕ .

Comparando-se a curva de escoamento gerada na SATC, 0º em relação a direção de laminação (figura 5.4), para o aço inoxidável AISI 304L, com a curva de escoamento gerada na UFRGS por (Ferrarini, 2004) para o aço AISI 304, também a 0º em relação a direção de laminação, tem-se a figura 5.5.

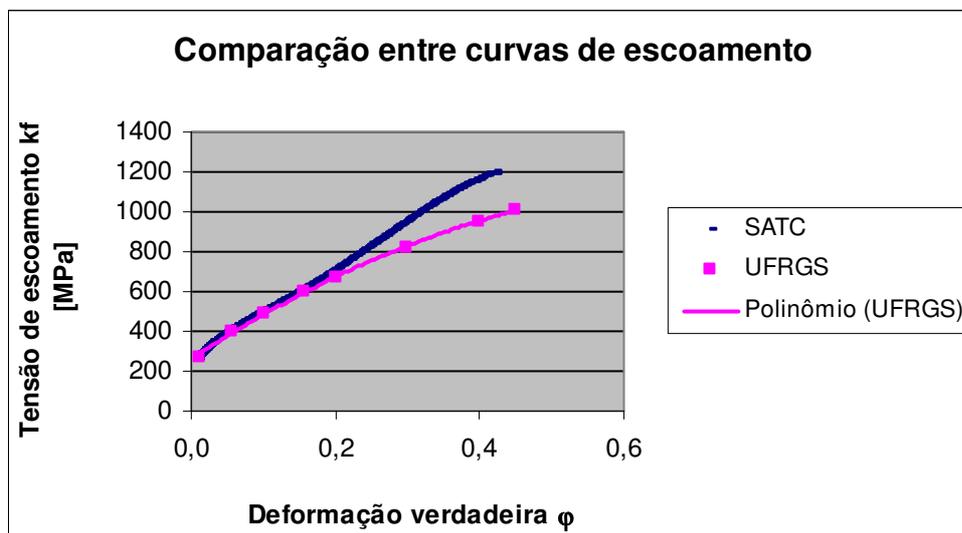


Figura 5.5 - Comparação das curvas de escoamento entre UFRGS e SATC.

Analisando a figura 5.5 pode-se mostrar que o ensaio executado na SATC coincide com o ensaio realizado por (Ferrarini, 2004) UFRGS, especialmente até uma deformação verdadeira de 0,2. A causa da diferença é que o aço empregado por (Ferrarini, 2004) e este trabalho apresentam carbono C respectivamente de 0,04 e $<0,0015$.

5.3 Índice de Anisotropia

Para o aço AISI 304L os valores calculados do índice de anisotropia podem ser vistos na tabela 5.3. Novamente os resultados são os valores médios de três corpos de prova por direção de laminação.

Tabela 5.3 - Valores do índice de anisotropia do aço AISI 304L.

Direção	b_0 [mm]	b [mm]	l_0 [mm]	l [mm]	r	r_m	Δr
0°	20,0	15,7	120,0	183,5	1,30	1,18	-0,004
90°	20,0	15,8	120,0	189,7	1,04		
45°	20,0	15,6	120,0	190,8	1,17		

A anisotropia planar Δr 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 (Guida, 2004). 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. O que se deseja para um aço de boa embutibilidade é que este tenha um elevado r_m (alta preferência de deformar-se no plano da chapa e pouco na espessura) e, um Δr próximo de zero (mínimo de variação planar). Para o aço inoxidável AISI 304L alcança-se um $r_m = 1,14$ e $0,99$ respectivamente (Guida, 2004) e (Ferrarini, 2004).

5.4 Curva Limite de Conformação - CLC

Com o objetivo de conhecer quais regiões são seguras para a estampagem procedeu-se a elaboração da curva CLC para o aço inoxidável AISI 304L, segundo o método Nakajima.

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 convencional 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 (Folle et al., 2008).

Foram ensaiadas 2 famílias de corpos de prova e para cada família foram medidas duas elipses (lado 1 e lado 2), uma de cada lado da estrição. A elipse medida deve ser a mais próxima da estrição e que esteja completa, ou seja, que sua linha de contorno seja contínua. A régua é posta sobre a elipse a ser medida e a leitura é feita quando uma das linhas transversais da graduação está sobre o eixo que está sendo medido e as linhas longitudinais de graduação estão sobrepostas às linhas de contorno da elipse medida (Folle et al., 2008).

A tabela 5.4 mostra os valores que formam a nuvem de pontos e que foram plotados na curva CLC.

Considera-se que há um erro nas medições de aproximadamente 5% da deformação verdadeira, que seria o erro pela leitura analógica, compatível com os erros de engenharia.

Tabela 5.4 - Valores de menor deformação φ_2 e maior deformação φ_1 .

Corpo de Prova	1ª Família				2ª Família			
	Lado 1		Lado 2		Lado 1		Lado 2	
	φ_2	φ_1	φ_2	φ_1	φ_2	φ_1	φ_2	φ_1
1	-0,11	0,41	-0,11	0,38	-0,13	0,44	-0,13	0,35
2	-0,11	0,51	-0,15	0,51	-0,20	0,53	-0,15	0,52
3	-0,13	0,48	-0,08	0,49	-0,13	0,51	-0,13	0,43
4	-0,11	0,47	-0,11	0,43	-0,13	0,49	-0,11	0,48
5	-0,08	0,42	-0,08	0,48	-0,08	0,49	-0,11	0,54
6	-0,02	0,46	-0,11	0,42	-0,08	0,41	-0,11	0,46
7	0,00	0,39	0,04	0,41	0,02	0,47	0,02	0,46
8	0,13	0,44	0,18	0,46	0,13	0,44	0,18	0,46

A figura 5.6 mostra a curva CLC para o aço inoxidável AISI 304L.

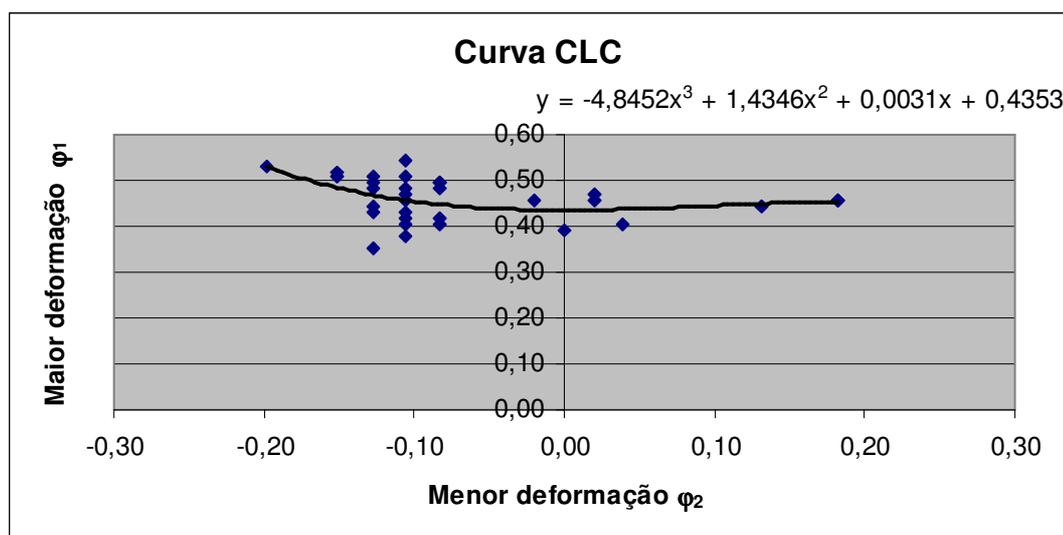


Figura 5.6 - Curva CLC para o aço inoxidável AISI 304L.

Comparando-se o ensaio prático realizado no LdTM (UFRGS) figura 5.6, com o ensaio da literatura técnica, figura 2.9 (ACESITA), tem-se a figura 5.7.

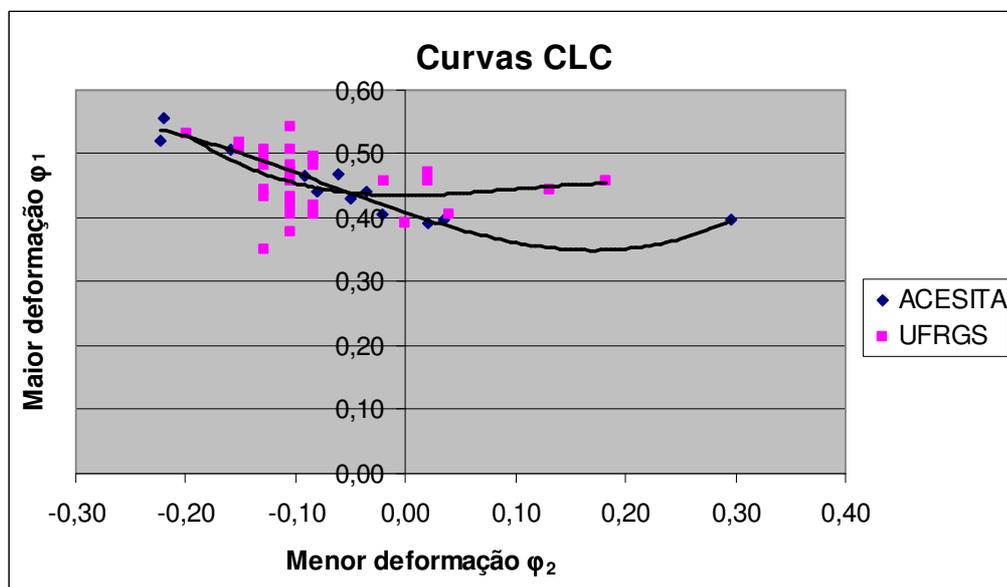


Figura 5.7 - Comparação das curvas CLC entre a literatura (ACESITA) e o ensaio prático (UFRGS).

Pode-se notar uma diferença entre as curvas, a razão é que o material ensaiado pela ACESITA é o aço inoxidável AISI 304A laminado a frio com espessura de 1,2 mm, e no ensaio prático (UFRGS) empregou-se o aço inoxidável AISI 304L com espessura de 0,5 mm.

As comparações são importantes para obter referências, haja visto que existe uma dificuldade em encontrar curvas CLC com materiais e espessuras iguais.

5.5 Características Metalográficas

As investigações na metalografia permitem definir a influência das deformações na estrutura do aço inoxidável austenítico AISI 304L e, em particular determinar as modificações na estrutura metalográfica em relação a forma e tamanho dos grãos de austenita.

Para comprovar a microestrutura austenítica foram feitas micrografias de amostras retiradas na chapa não conformada. Foram retiradas 3 amostras da chapa em direções diferentes. A figura 5.8 mostra as direções de retiradas das amostras.

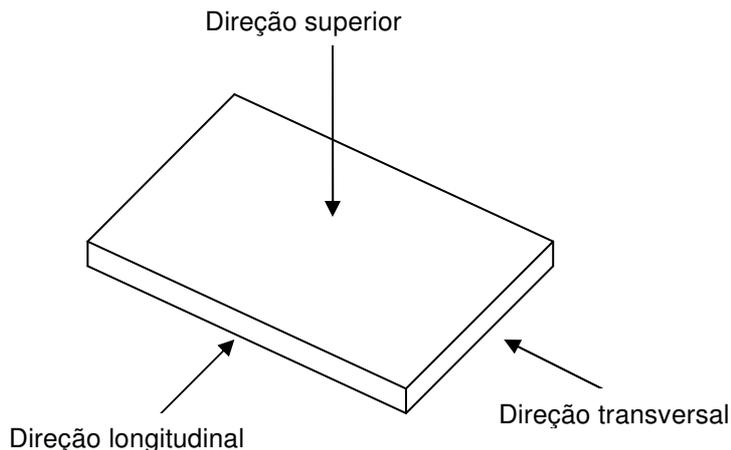


Figura 5.8 - Direções de retiradas das amostras da chapa usada como matéria-prima.

Antes do ataque verificou-se inclusões dispersas (óxido globular), tamanho de grão TG 8, diâmetro médio do grão de $22\ \mu\text{m}$ e grãos poligonais de austenita. Ficou evidenciado o alinhamento de inclusões, provavelmente causada pelo processo de laminação da chapa.

Todas as amostras foram embutidas a quente e, preparadas através do processo de lixamento e polimento empregando alumina com granulometria de $0,25\ \mu\text{m}$. A seguir foram atacadas durante 1 minuto e 40 segundos com uma solução de HCl (ácido clorídrico) e HNO_3 (ácido nítrico) na razão de 5 ml para 2,5 ml respectivamente.

As micrografias da figura 5.9 mostram a microestrutura na direção superior.

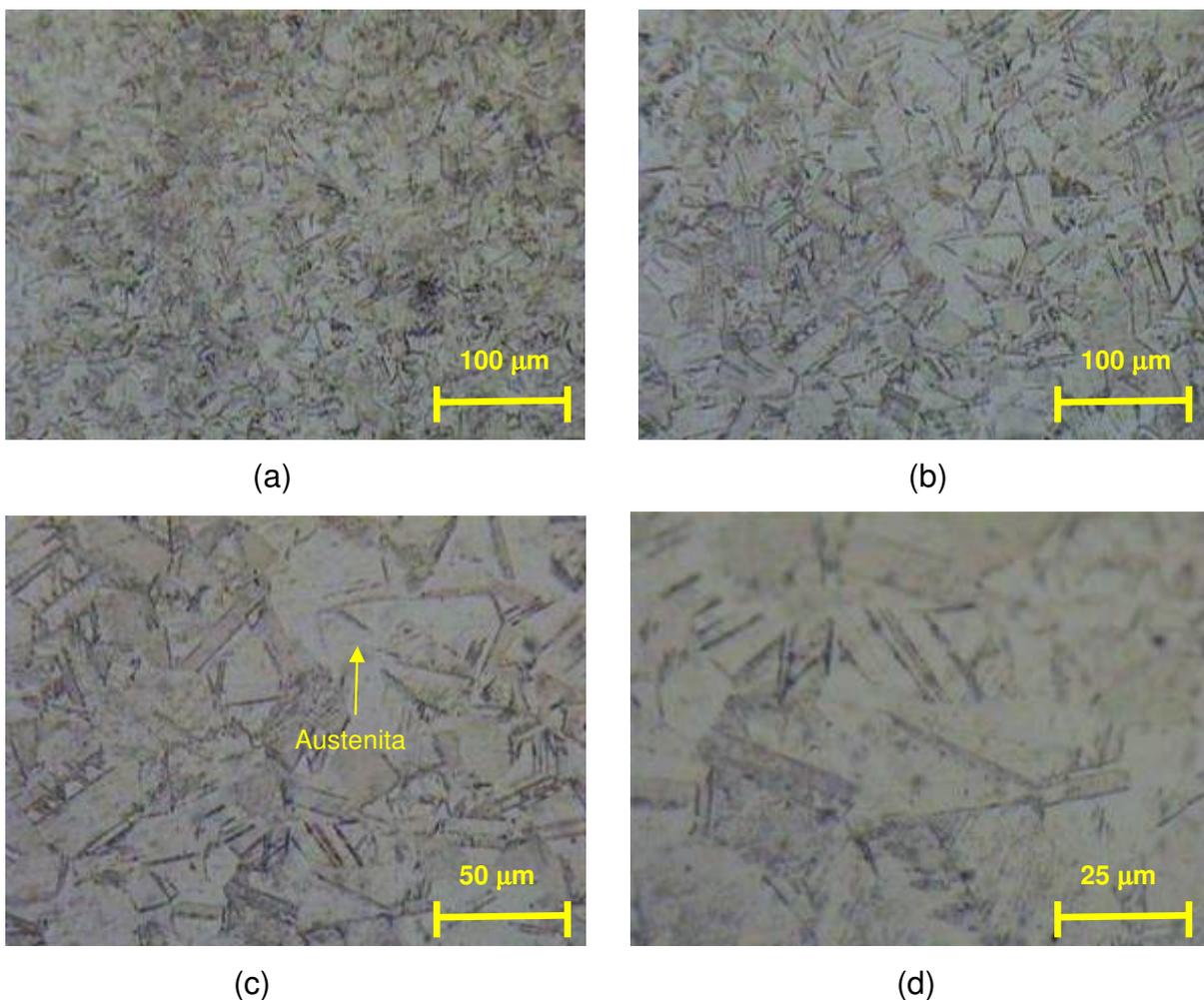


Figura 5.9 - Microestrutura do aço inoxidável austenítico AISI 304L na direção superior: a - aumento de 50x, b - aumento de 100x, c- aumento de 200x, d - aumento de 400x.

A microestrutura da figura 5.9 é formada por uma matriz austenítica.

As micrografias da figura 5.10a e 5.10b mostram a microestrutura na direção longitudinal, enquanto que as micrografias da figura 5.10c e 5.10d mostram a microestrutura na direção transversal.

A conclusão que se pode chegar, é que independente da direção de retirada das amostras, o aço em estudo apresenta similaridade em relação a escala e morfologia dos grãos.

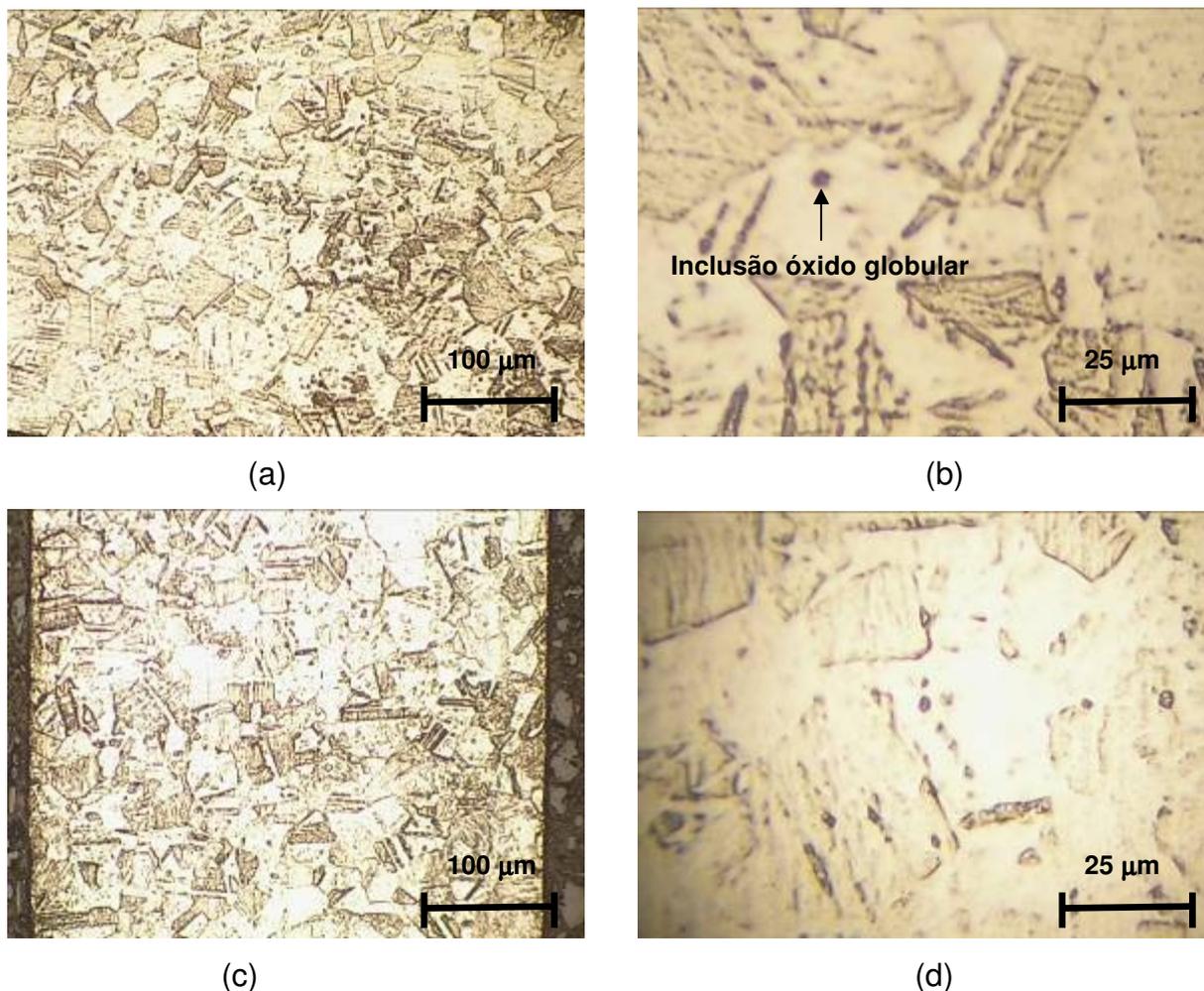


Figura 5.10 - Microestrutura do aço inoxidável austenítico AISI 304L: a - direção longitudinal, aumento de 100x, b - direção longitudinal, aumento de 400x, c- direção transversal, aumento de 100x, d - direção transversal, aumento de 400x.

5.6 Análise da Composição Química

O ensaio da composição química do aço AISI 304L realizado por espectrometria de difração na UFRGS revelou o seguinte resultado médio: C<0,0015%, Si = 0,575%, Mn = 1,16%, P = 0,0325%, S <0,002%, Cr = 15,85%, Mo = 0,0487%, Ni = 9,12%, Al = 0,00867%, Cu = 0,0282%, Ti = 0,00587%, Pb<0,002%, Sn = 0,00493%, Fe<73,17%.

Comparando-se os valores deste ensaio, com a empresa ACESITA para o aço inoxidável AISI 304L, tem-se a tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Comparação da composição química de aços inoxidáveis.

Local do ensaio	C [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	N [%]	Cr [%]	Ni [%]
UFRGS	<0,0015	1,16	0,575	<0,002	-	15,85	9,12
ACESITA	0,03	2,00	0,75	0,03	0,10	18 a 20	8 a 12

Observando-se a tabela 5.5 pode-se constatar que a composição entre ambos apresenta coerência com exceção do carbono C.

Informações detalhadas quanto as propriedades mecânicas do material empregado neste trabalho constam do Anexo A.

6. ENSAIOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Neste capítulo será feita uma análise completa dos resultados dos experimentos de Estampagem Incremental envolvendo basicamente a rugosidade, microestrutura, deformações e redução de espessura.

6.1 Apresentação e Análise dos Resultados

O processo de estampagem se comportou de maneira prevista, ou seja, a ferramenta deslizou sobre a peça de forma adequada e livre de vibrações.

Observou-se que no início dos ensaios a ferramenta escorregava e, a partir de uma determinada profundidade (tabela 6.1), a ferramenta começava a rolar em conjunto com o deslocamento horizontal do corpo de prova nas direções X e Y da máquina-ferramenta. A possível causa é o aumento de atrito devido a uma maior área de contato entre a ferramenta, e o corpo de prova.

Tabela 6.1 – Ensaios em que foram monitoradas a profundidade de início de rolamento da ferramenta.

Ensaio nº	Profundidade que iniciava o rolamento da ferramenta [mm]	Ensaio nº	Profundidade que iniciava o rolamento da ferramenta [mm]
4	7,0	18	7,6
5	7,5	31	6,4
6	7,5	32	6,4
7	7,6	33	7,1
8	7,6	34	6,7
9	8,2	35	6,9
13	6,4	36	7,1
14	6,3	37	7,8
15	7,3	38	7,3
16	6,4	39	7,5
17	6,8	40	8,4

Observou-se a tendência que com o aumento do passo vertical d_z e raio da ferramenta R_T aumentava a profundidade para início de rolamento da ferramenta. Esta profundidade está relacionada basicamente com a rugosidade e as deformações.

6.1.1 Textura e Rugosidade

Na figura 6.1 pode-se ver claramente a região de escorregamento e rolamento da ferramenta. Quanto maior o incremento mais visível é a diferença de textura entre estas duas regiões. Também são mostrados os detalhes da textura produzida nos corpos de prova dos ensaios n^{os} 1, 2 e 3.

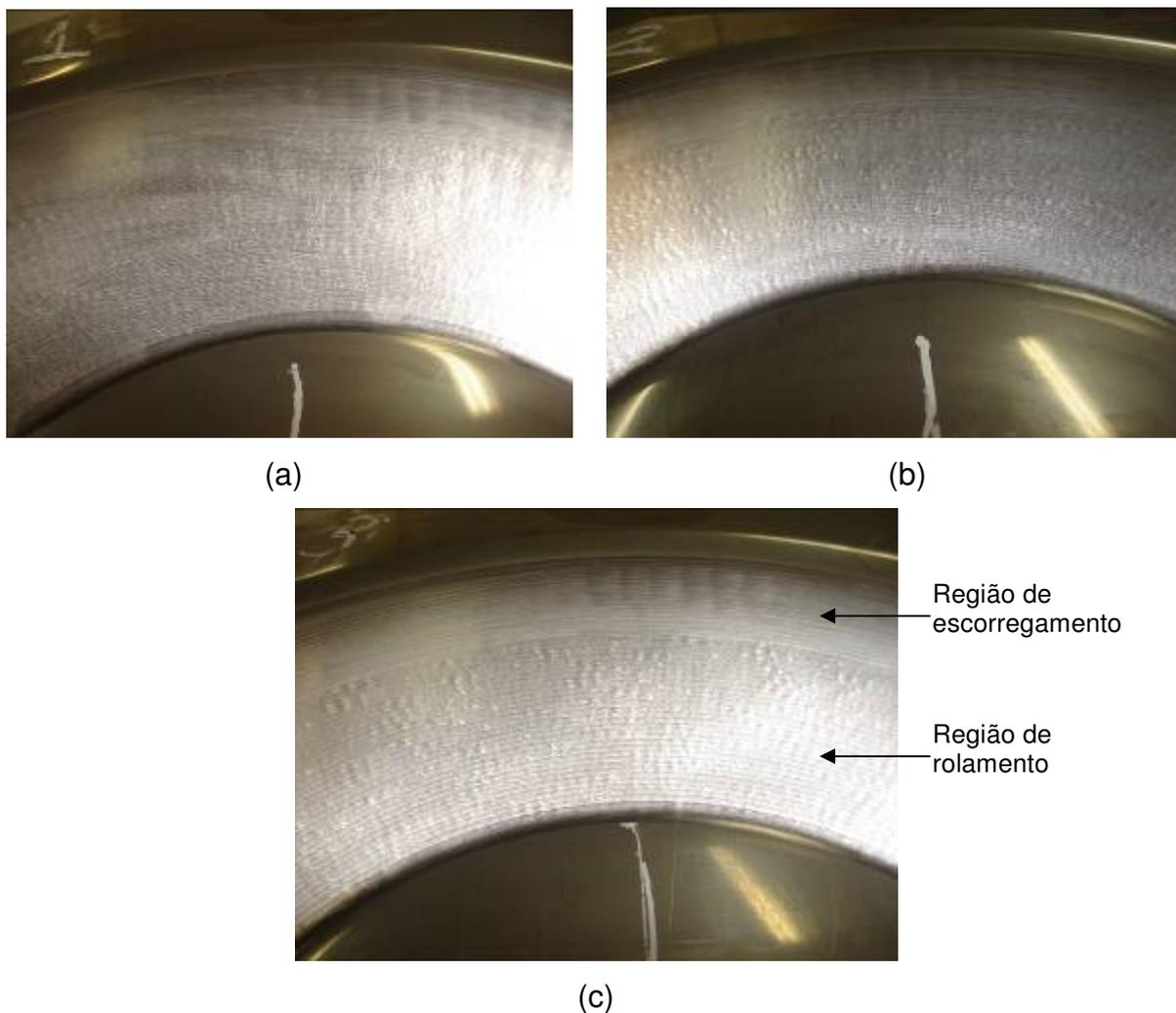


Figura 6.1 - Regiões de textura diferentes: a - ensaio n^o 1 $d_z = 0,4$ mm, b - ensaio n^o 2 $d_z = 0,6$ mm, c - ensaio n^o 3 $d_z = 0,8$ mm.

Com o objetivo de verificar a rugosidade produzida pela ferramenta na região de estampagem foi medido o parâmetro R_z . A figura 6.2 mostra as regiões onde foram feitas as medições de rugosidade.

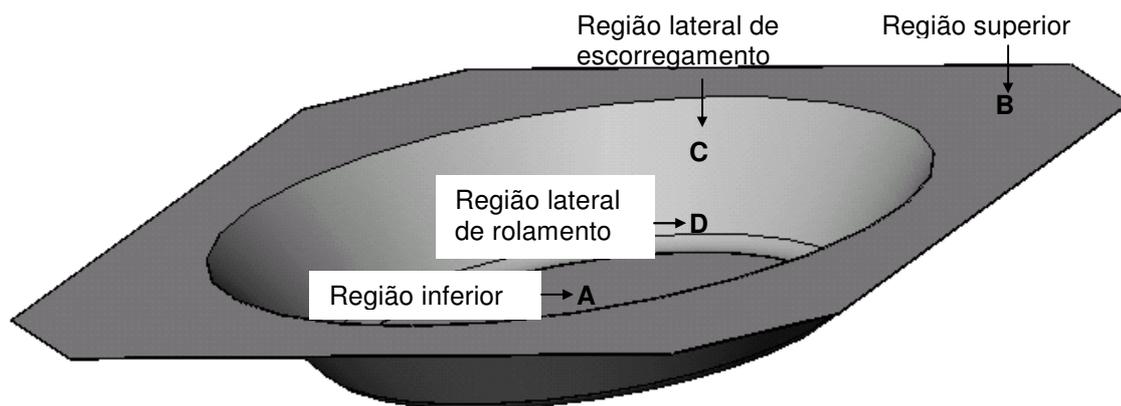


Figura 6.2 - Regiões de medição da rugosidade R_z .

Na tabelas 6.2 e 6.3 são apresentados os valores de rugosidade R_z produzidos pela ação da ferramenta nos diversos ensaios. Cada valor de rugosidade R_z da tabela foi resultado de uma média de três medições (0° em relação a direção da laminação da chapa, 90° em relação a direção da laminação da chapa e a 45° da direção de laminação da chapa).

Tabela 6.2 - Valores de rugosidade R_z com ferramentas não revestidas.

Ensaio nº	Raio da ferramenta R_T [mm]	Ângulo de parede real α [°]	Passo vertical d_z [mm]	Região de medição de R_z [μm]				Média de R_z [μm]
				Inferior A	Superior B	Lateral de escorregamento C	Lateral de rolamento D	
1	5,0	45°	0,4	2,40	1,03	9,13	8,10	8,62
2	5,0	45°	0,6	1,97	0,80	11,43	7,90	9,67
3	5,0	45°	0,8	3,57	1,57	8,17	8,53	8,35
4	8,0	45°	0,4	2,80	1,10	7,77	7,63	7,70
5	8,0	45°	0,6	2,70	1,43	9,10	6,90	8,00
6	8,0	45°	0,8	2,80	0,83	9,17	8,77	8,97
7	10,0	45°	0,4	2,47	0,77	8,17	5,57	6,87
8	10,0	45°	0,6	2,37	1,10	7,73	6,77	7,25
9	10,0	45°	0,8	2,90	1,13	8,23	6,47	7,35
10	5,0	60°	0,4	1,57	0,77	7,90	6,47	7,18
11	5,0	60°	0,6	1,40	0,57	9,40	6,03	7,72
12	5,0	60°	0,8	2,10	0,97	8,40	7,40	7,90
13	8,0	60°	0,4	1,77	1,00	9,03	8,60	8,82
14	8,0	50°	0,6	1,70	1,23	8,67	7,97	8,32
15	8,0	50°	0,8	1,27	0,73	10,53	5,60	8,07
16	10,0	60°	0,4	2,77	1,33	10,90	9,77	10,34
17	10,0	52°	0,6	2,47	0,57	9,20	7,33	8,27
18	10,0	50°	0,8	2,50	0,63	8,63	4,50	6,57

Tabela 6.3 - Valores de rugosidade R_z com ferramentas revestidas de TiAlN.

Ensaio nº	Raio da ferramenta R_T [mm]	Ângulo de parede real α [°]	Passo vertical d_z [mm]	Região de medição de R_z [μm]				Média de R_z [μm]
				Inferior A	Superior B	Lateral de escorregamento C	Lateral de rolamento D	
31	8,0	60°	0,4	1,87	1,30	11,00	5,70	8,35
32	8,0	60°	0,6	2,17	1,87	7,67	5,77	6,72
33	8,0	60°	0,8	1,57	0,87	7,23	7,23	7,23
34	10,0	60°	0,4	3,10	1,37	8,37	5,67	7,02
35	10,0	60°	0,6	1,17	1,07	7,53	5,00	6,27
36	10,0	60°	0,8	0,73	0,93	5,77	5,77	5,77

Nas últimas colunas das tabelas 6.2 e 6.3, foram calculadas médias aritméticas de rugosidade entre as regiões lateral de escorregamento e rolamento. Estas médias foram feitas, porque a área estampada está compreendida entre estas duas regiões. Para efeito de comparação com as regiões inferior e superior o valor de R_z na chapa sem sofrer deformação foi de 0,78 μm . A chapa antes da estampagem apresentou o parâmetro de rugosidade R_z variando entre 0,72 e 1,08 μm . Estes valores estão em concordância com os valores obtidos por (Carbó, 2001).

Os ensaios nºs 14, 15 foram realizados com ângulo de parede α de 50°, pois o ensaio nº 13 já tinha rompido com α de 60°. Os ensaios nºs 17 e 18 também foram respectivamente com ângulo de parede de 52° e 50° pela ruptura no ensaio nº 16.

Observando-se a tabela 6.6 pode constatar que a tendência para os ensaios nºs 1 a 12 é que a rugosidade R_z aumenta com o aumento do passo vertical d_z . Entretanto para o ensaios nºs 13 a 18 esta tendência inverte ou seja a rugosidade R_z reduz com o aumento do passo vertical d_z , o que permite afirmar que o ângulo de parede influencia na rugosidade.

Como pode ser visto através da tabela 6.2 os menores valores da média da rugosidade R_z foram obtidos nos ensaios nº 18 e 7, ambos com ferramentas com raio R_T de 10 mm.

Plotados os valores da média de R_z (última coluna da tabela 6.2) em função do passo vertical d_z , do ângulo de parede α e do raio da ferramenta R_T tem-se a figura 6.3.

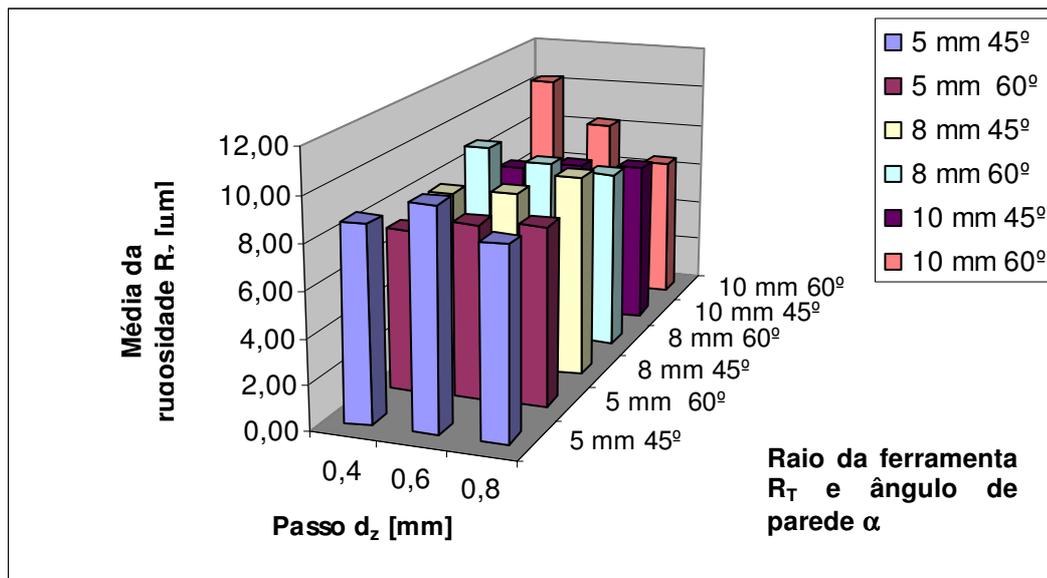


Figura 6.3 - Média da rugosidade R_z em função dos parâmetros de estampagem.

Plotados os valores da média de R_z (última coluna da tabela 6.2) em função do passo vertical d_z , do ângulo de parede α e do raio da ferramenta R_T para ângulo de parede nominal $\alpha = 60^\circ$ e comparando-se para a mesma situação na tabela 6.3 tem-se o gráfico da figura 6.4.

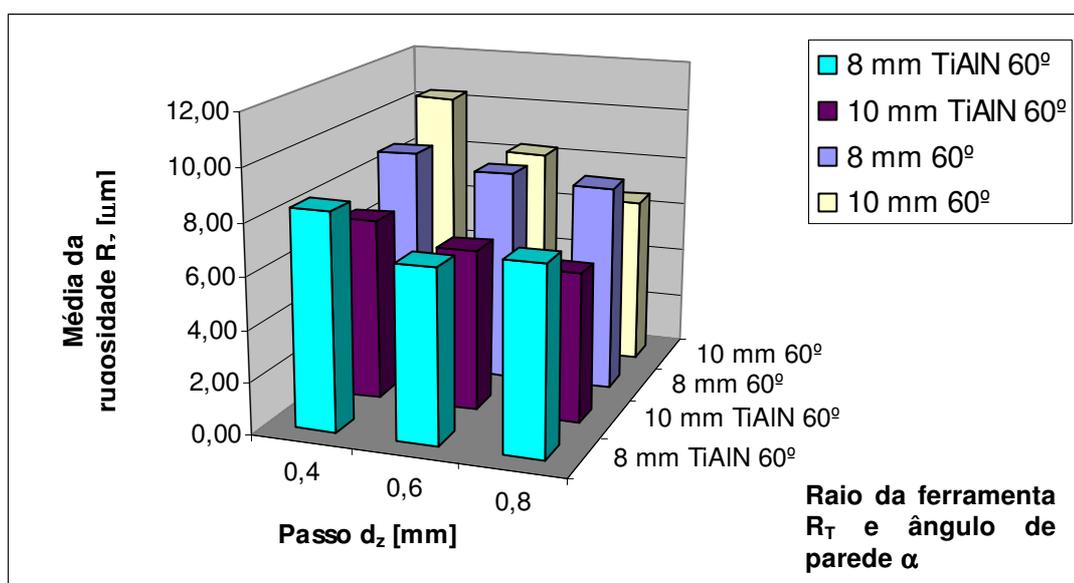


Figura 6.4 - Comparação da média da rugosidade R_z entre as tabelas 6.2 e 6.3.

No gráfico da figura 6.4 pode-se constatar primeiramente que o revestimento TiAlN da ferramenta colaborou expressivamente para a redução do atrito e conseqüentemente da rugosidade. Os fatores que contribuíram para este efeito são: aumento da dureza, estabilidade química e térmica e principalmente a redução do coeficiente de atrito que o revestimento proporciona. Também o gráfico da figura 6.4 mostra uma tendência de redução de rugosidade com o aumento do passo vertical d_z .

Para visualizar melhor a influência do passo vertical d_z sobre a rugosidade tem-se a figura 6.5.

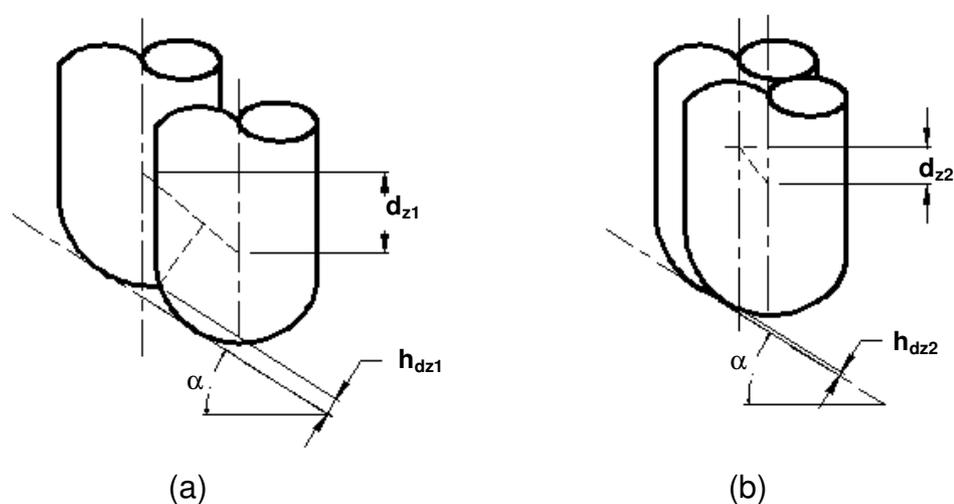


Figura 6.5 - Influência do passo vertical d_z sobre a rugosidade: a - passo grande d_{z1} , b - passo pequeno d_{z2} .

Na figura 6.5 pode-se verificar que no passo grande d_{z1} gera-se uma altura do perfil de rugosidade h_{dz1} enquanto que no passo pequeno d_{z2} gera-se uma altura do perfil de rugosidade h_{dz2} , menor que h_{dz1} . Isto resulta que com o aumento do passo vertical d_z aumenta-se o parâmetro de rugosidade R_z . Esta figura reporta-se a rugosidade cinemática (teórica) influenciada pelo perfil da ferramenta e o deslocamento desta. Entretanto a rugosidade atuante durante os ensaios depende da rugosidade de processo também, que envolve o mecanismo de conformação. Além destes 2 tipos de rugosidade presentes outros fatores contribuem, tais como: vibrações, estabilidade dinâmica do sistema ferramenta-material da peça etc. Por isto que o comportamento da rugosidade R_z não é diretamente proporcional ao passo vertical d_z .

Em ambas as tabelas 6.2 e 6.3, a tendência é a maiores rugosidades estarem na região de escorregamento que na região de rolamento. Presume-se que este comportamento seja devido as condições geométricas da interface corpo de prova/ferramenta.

Nos ensaios de nºs 37 a 40 não foi medido o parâmetro R_z de rugosidade pois, estes romperam em pequenas profundidades o que impossibilita de executar as medições e também porque o objetivo destes ensaios eram outros, quais sejam, medir deformações para mapear curvas CLC nestas condições.

Para efeito de comparação dos valores de rugosidade R_z , foram necessários valores de referência. Na tabela 6.4 são mostrados os valores médios de rugosidade R_z para diferentes processos de conformação mecânica. Estes valores foram convertidos de parâmetro R_a para R_z a partir da norma ASME B46.1-1995.

Tabela 6.4 - Processo de conformação mecânica versus parâmetro R_z (Adaptado da: ASME B46.1, 1995).

Processo de conformação mecânica	Intervalo dos valores médios de R_z [μm]
Laminação a quente	180 até 90
Forjamento	90 até 23,04
Extrusão	23,04 até 5,76
Laminação a frio, embutimento	23,04 até 5,76
Laminação a frio	2,88 até 1,44

Comparando as tabelas 6.2 e 6.3 com a tabela 6.4, foi verificado que o valor da rugosidade obtido nas regiões conformadas situa-se na faixa que equipara o processo de Estampagem Incremental a laminação a frio e embutimento ($R_z = 23,04$ a $5,76 \mu\text{m}$).

Comparando-se as tabelas 6.2 e 6.3 com (Junk et al., 2003) há uma concordância: aumentando-se o raio da ferramenta R_T a rugosidade R_z é reduzida.

Entretanto não há concordância com relação ao passo vertical d_z , enquanto com (Junk et al., 2003) o aumento do passo vertical d_z conduz a um aumento da rugosidade R_z . a tendência mostrada na tabela 6.3 é exatamente o contrário, ou

seja, quando d_z aumenta R_z diminui. Também deve-se considerar que os eram diferentes materiais, espessuras e parâmetros entre a literatura técnica apresentada por (Junk et al., 2003) e este trabalho.

6.1.2 Defeitos nos Corpos de Prova

Nos ensaios nº 13, 16 e 17 os corpos de prova sofreram ruptura respectivamente nas profundidades de 20,8, 20,0 e 24,8 mm. A razão do rompimento é o grande ângulo de parede α e, o grande diâmetro da ferramenta que exerce uma maior força. A figura 6.6 apresenta um exemplo de peça rompida.



Figura 6.6 - Superfície estampada rompida no ensaio nº 17.

Nos ensaios nº 10, 11 e 12, a peça apresentou um enrugamento que determinava um ponto crítico, a partir do qual o corpo de prova romperia. Neste caso verificou-se uma forte redução de espessura devido ao grande ângulo de parede.



Figura 6.7 - Enrugamento da superfície estampada ensaio nº 12.

Nos ensaios n^{os} 33 e 36 os corpos de prova romperam nas profundidades de 21,0 e 21,4 mm respectivamente. Na terceira série de ensaios correspondente os ensaios aos n^{os} 37 a 40, os corpos de prova romperam nas profundidades de 16,9, 17,8, 18,3 e 18,9 mm respectivamente. A tabela 6.5 apresenta em resumo dos ensaios com relação a ruptura.

Tabela 6.5 - Resumo dos ensaios quanto a ruptura.

Ensaio n ^o	Raio da ferramenta R _T [mm]	Ângulo de parede real α [°]	Passo vertical d _z [mm]	v _{th} [mm/min]	Condição final
1	5	45	0,4	1.500	não rompeu
2	5	45	0,6	1.500	não rompeu
3	5	45	0,8	1.500	não rompeu
4	8	45	0,4	1.500	não rompeu
5	8	45	0,6	1.500	não rompeu
6	8	45	0,8	1.500	não rompeu
7	10	45	0,4	1.500	não rompeu
8	10	45	0,6	1.500	não rompeu
9	10	45	0,8	1.500	não rompeu
10	5	60	0,4	1.500	não rompeu
11	5	60	0,6	1.500	não rompeu
12	5	60	0,8	1.500	não rompeu
13	8	60	0,4	1.500	rompeu
14	8	50	0,6	1.500	não rompeu
15	8	50	0,8	1.500	não rompeu
16	10	60	0,4	1.500	rompeu
17	10	52	0,6	1.500	rompeu
18	10	50	0,8	1.500	não rompeu
31	8	60	0,4	1.500	não rompeu
32	8	60	0,6	1.500	não rompeu
33	8	60	0,8	1.500	rompeu
34	10	60	0,4	1.500	não rompeu
35	10	60	0,6	1.500	não rompeu
36	10	60	0,8	1.500	rompeu
37	8	70	0,4	1.500	rompeu
38	8	70	0,6	1.500	rompeu
39	10	70	0,4	1.500	rompeu
40	10	70	0,6	1.500	rompeu

6.1.3 Mudanças Microestruturais

Para constatar a deformação dos grãos da microestrutura após os ensaios de Estampagem Incremental, foram escolhidos seis corpos de prova (ensaios n^{os} 7, 8, 34, 35, 39 e 40). Estes corpos de prova foram cortados por laser.

Destes corpos de prova foram extraídas amostras da região estampada. A figura 6.8 mostra a posição de corte nos corpos de prova para a extração das amostras.

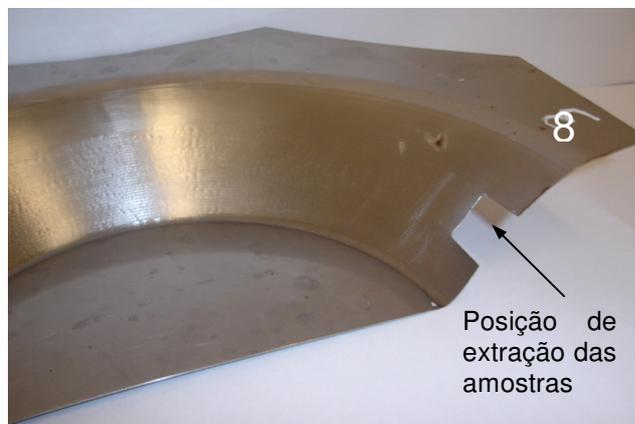


Figura 6.8 - Posição de extração das amostras para a micrografia.

Nestas micrografias foram empregados a mesma forma de embutimento, lixamento e polimento que nas amostras que foram feitas antes da Estampagem Incremental, entretanto, o ataque foi feito de modo diferente que o primeiro, pois como houve uma mudança da microestrutura novas dificuldades surgiram. Estas amostras foram atacadas durante 2,0 minutos e 30 segundos com uma solução de HCl (ácido clorídrico), FeCl_3 (cloreto de ferro) e água destilada na razão de 25 ml, 2,5 ml e 50 ml respectivamente.

A figura 6.9 mostra as micrografias na região estampada extraída dos corpos de prova.

As microestruturas apresentam-se bastante deformadas. Os grãos que inicialmente eram poligonais, agora estão alongados devido a forte deformação que sofreram, inclusive nos ensaios n^{os}. 39 e 40 onde os corpos de prova romperam devido ao grande ângulo de parede ($\alpha = 70^\circ$)

A fase clara identificada nas micrografias é a austenita do aço inoxidável, enquanto que a região escura se constitui de martensita transformada por deformação.

No aço investigado depois da deformação plástica a frio a morfologia dos grãos austeníticos se tornam alongados e com distribuição aleatória (figura 6.9a, 6.9b).

Para constatar a mudança de microestrutura foram executados ensaios de microdureza Vickers. Em todos os ensaios foram feitas três medições e, o valor da microdureza mostrada na tabela 6.6 é a média aritmética destes valores.

Tabela 6.6 - Microdureza Vickers na região conformada.

Ensaio n ^o	Raio da ferramenta R _T [mm]	Ângulo de parede α [°]	Passo vertical d _z [mm]	Microestrutura	Microdureza [HV]
7	10	45	0,4	Martensítica	379
				Austenítica	225
8	10	45	0,6	Martensítica	394
				Austenítica	193
34	10	60	0,4	Martensítica	410
				Austenítica	234
35	10	60	0,6	Martensítica	398
				Austenítica	236
39	10	70	0,4	Martensítica	416
				Austenítica	231
40	10	70	0,6	Martensítica	414
				Austenítica	218

Com relação a dureza alcançada na chapa não deformada na posição longitudinal, esta possuía um microdureza na matriz austenítica de 237 HV.

Nas figuras 6.9c, 6.9d, 6.9e, 6.9f a microestrutura do aço investigado; tende a intensificar a transformação martensítica ocasionando a fragilização do material.

Destaca-se aqui, que a austenita inicialmente presente tem comportamento paramagnético e, quando deformada altera seu comportamento para ferromagnético devido a formação da martensita α' . Explicando-se coloquialmente, na forma austenítica; sem deformação; o material repele um ímã, após a deformação na região encruada acontece o contrário, ou seja, o material atrai o ímã.

Empregando-se um *software* de análise de imagens (Image Tool), binarizando as micrografias dos ensaios n^{os} 7, 8, 34, 35, 39 e 40 e extraindo-se o percentual de martensita tem-se a tabela 6.7.

Tabela 6.7 - Fração de martensita α' .

Ensaio n ^o	Fração de martensita α' [%]	Microdureza [HV]
7	25,45	379
8	38,34	394
34	39,79	410
35	36,40	398
39	48,55	416
40	53,30	414

Combinando-se os valores da tabela 6.7 com (Andrade et al., 2003) que mostra a variação da microdureza Vickers com a fração da martensita α' para o aço AISI 304L tem-se a figura 6.10. No trabalho de (Andrade et al., 2003) determinou-se os valores do gráfico da figura 6.10 a partir do ensaio de tração isotérmico.

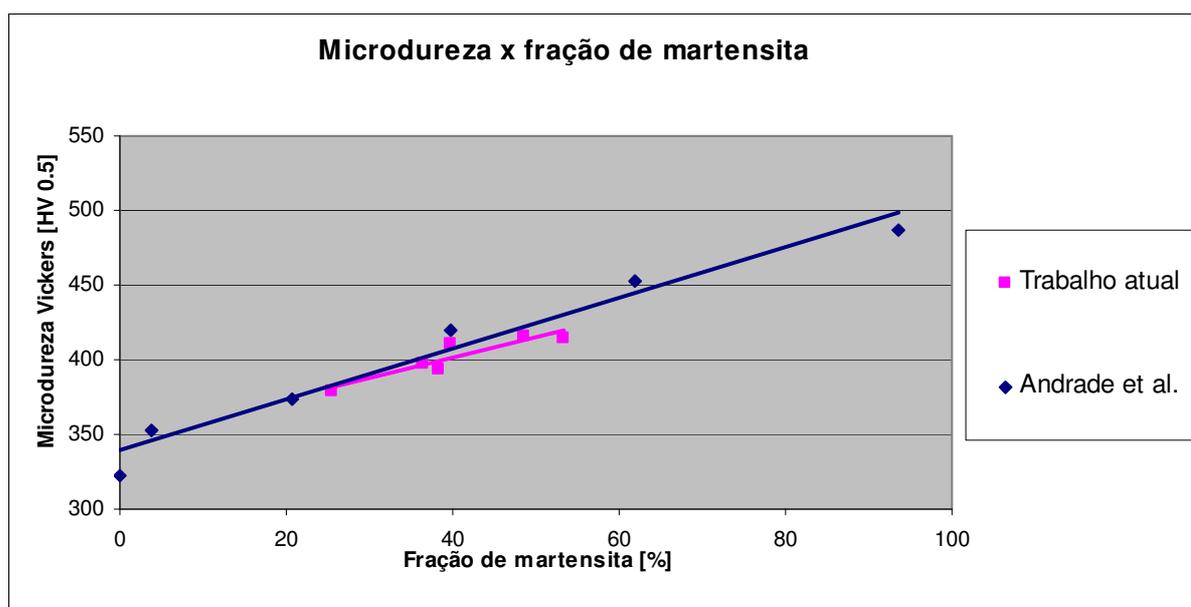


Figura 6.10 - Variação da microdureza Vickers com a fração da martensita α' para o aço AISI 304L.

Interpretando o gráfico da figura 6.10, pode ser dito para as amostras, que o intervalo obtido para a transformação de martensita α' no aço inoxidável AISI 304L, varia entre 25% no ensaio n^o 7 até 53% no ensaio n^o 40.

6.1.4 Deformações

O método empregado para medir as deformações foi a gravação eletroquímica de uma malha de círculos na face inferior do corpo de prova. Inicialmente a malha era composta por círculos com diâmetro inicial (d_0) de 2,5 mm. Após o ensaio, a malha que se deformou com o corpo de prova assume uma geometria de elipse, onde o eixo com maior deformação (a) corresponde a variação do comprimento e o eixo com menor deformação (b) corresponde a variação da largura. No cálculo das deformações do comprimento (φ_1) e da largura (φ_2) são empregadas as equações 2.11 e 2.12 respectivamente. A deformação da espessura (φ_3) é calculada através da lei da constância do volume expressa pela equação 2.15.

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.

Escolheu-se os ensaios da tabela 6.3 ângulo de parede $\alpha = 60^\circ$ por serem os mais críticos ou seja, com maior probabilidade de ruptura.

O valor de deformação verdadeira 0° , 90° e 45° da tabela 6.8 corresponde respectivamente a: direção longitudinal de laminação da chapa, direção transversal de laminação da chapa e a 45° da direção de laminação da chapa. Os corpos de prova escolhidos foram dos ensaios nºs 34 e 36. Nos anexos B e C constam respectivamente os gráficos das deformações para os ensaios nºs 31 e 33.

Na tabela 6.8 são mostradas as deformações que ocorreram no ensaio nº 34. A marcação nos pontos adjacentes (figura 6.11) serve para orientar a medição e, o ponto de partida de medição do centro das deformações parte da base do corpo de prova, para o topo, conforme indicação da seta da figura 6.11. A marcação feita a 45° na figura 6.11, mostra que o comprimento da posição do centro das deformações acompanha a geometria do corpo de prova conformado.

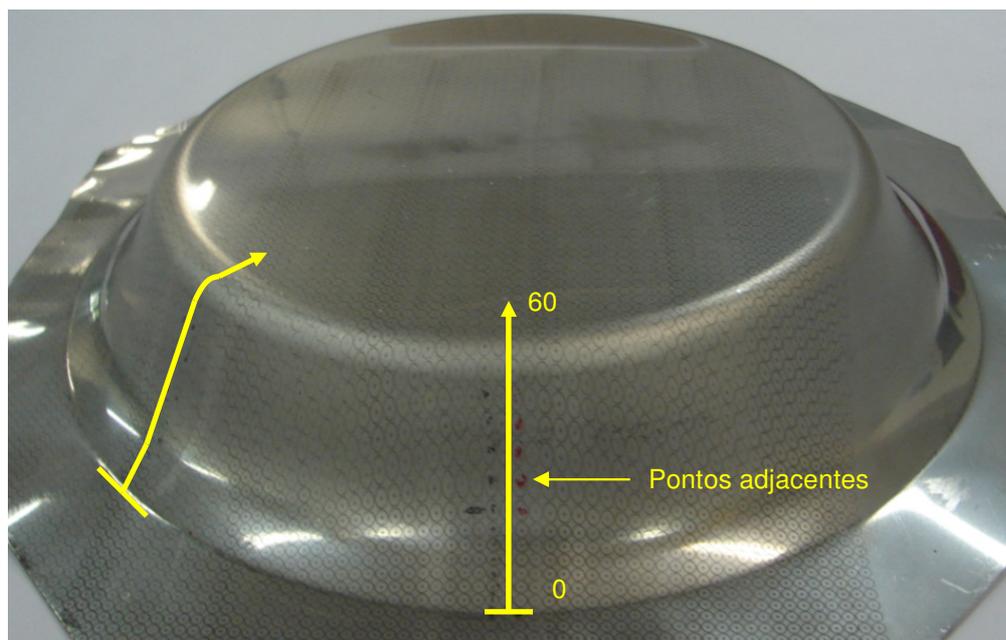


Figura 6.11 - Região de medição das deformações (0° da direção de laminação) no ensaio nº 34.

As deformações verdadeiras que ocorreram no ensaio nº 34 constam da tabela 6.8. O parâmetro d' das tabelas 6.8 e 6.9 é a distância do ponto de partida até o centro da deformação para cada ponto medido sobre a geometria conformada do corpo de prova. O método empregado para medir d' foi o uso de um recorte de transparência colado com fita adesiva ao longo da região de deformação do corpo de prova. Na seqüência convencionou-se chamar o ponto 1 com $d' = 0$ mm e então a partir deste ponto foram marcados os centros das deformações com a ponta seca de um compasso. Ato contínuo retirou-se este recorte de transparência e colou-se em um vidro com luz focando de baixo para cima e, mediu-se a distância dos pontos com um paquímetro de 0 a 150 mm e com resolução de 0,02 mm.

Tabela 6.8 - Deformações verdadeiras para regiões de medição (0° , 90° e 45° em relação à direção de laminação) no ensaio nº 34.

Direção de laminação	0°			90°			45°		
Ponto	d' [mm]	φ_1	φ_2	d' [mm]	φ_1	φ_2	d' [mm]	φ_1	φ_2
1	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,02	-0,02
2	3,1	0,02	0,00	2,6	0,00	0,00	2,6	0,06	0,00
3	6,0	0,02	0,02	5,4	0,00	0,02	7,6	0,00	0,04
4	8,0	0,02	0,04	7,7	0,02	0,02	11,5	0,02	0,06
5	10,9	0,04	0,04	10,8	0,02	0,02	14,6	0,02	0,06
6	13,9	0,04	0,06	13,6	0,04	0,08	20,3	0,41	0,10
7	16,4	0,11	0,06	15,5	0,04	0,08	28,4	0,88	0,10
8	20,3	0,53	0,08	20,6	0,26	0,08	36,9	0,68	0,10
9	26,5	0,83	0,08	23,5	0,66	0,11	44,9	0,59	0,11
10	32,4	0,73	0,08	30,6	0,88	0,10	52,1	0,41	0,11
11	37,9	0,64	0,10	36,8	0,80	0,10	57,8	0,17	0,02
12	42,9	0,64	0,10	42,8	0,69	0,08			
13	48,7	0,63	0,10	48,4	0,64	0,08			
14	52,8	0,34	0,08	53,0	0,59	0,08			
15	56,9	0,06	0,02	57,4	0,38	0,04			
16	60,3	0,00	0,00	60,6	0,04	0,02			

Nas figuras 6.12, 6.13 e 6.14 estão plotados os resultados da tabela 6.8 para direção longitudinal de laminação da chapa (0°), direção transversal de laminação da chapa (90°) e a 45° em relação à direção de laminação da chapa respectivamente. Os gráficos mostram uma tendência, que o modo como ocorrem as deformações aproximam-se muito da deformação plana ($\varphi_2 = 0$). As maiores deformações e a distância do ponto de partida, considerando as regiões de medição (0° , 90° e 45° em relação à direção de laminação) tem um valor médio respectivamente de 0,86 e 28,5 mm.

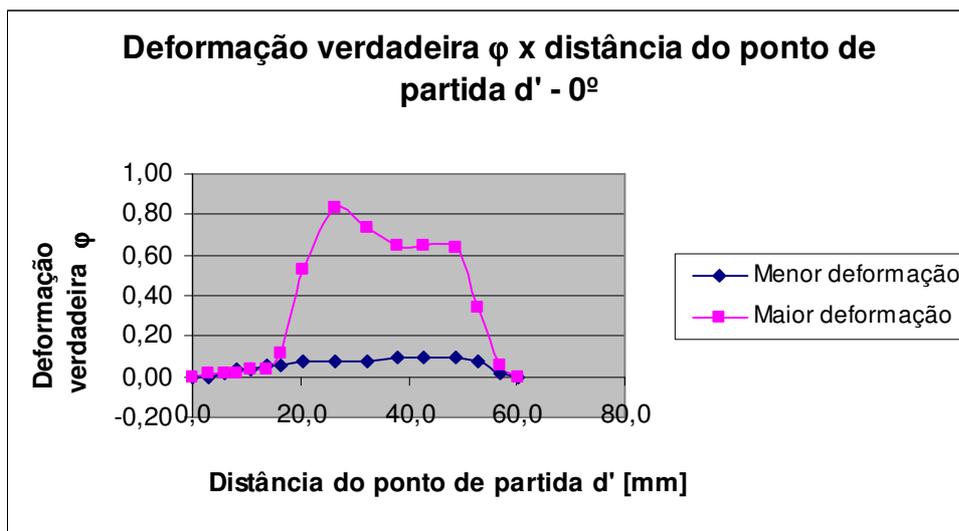


Figura 6.12 - Deformação verdadeira ϕ versus distância do ponto de partida d' a 0° em relação a direção de laminação, no ensaio nº 34.

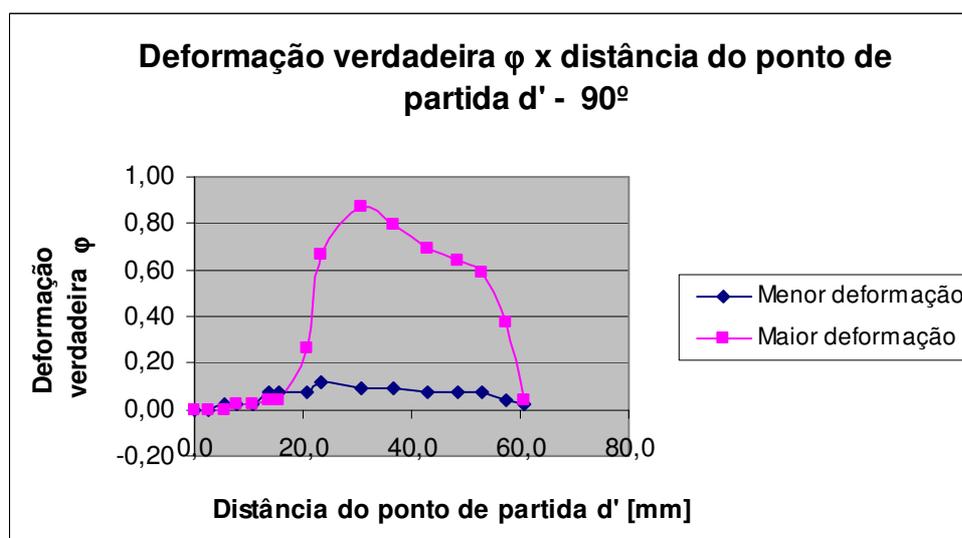


Figura 6.13 - Deformação verdadeira ϕ versus distância do ponto de partida d' a 90° em relação a direção de laminação, no ensaio nº 34.

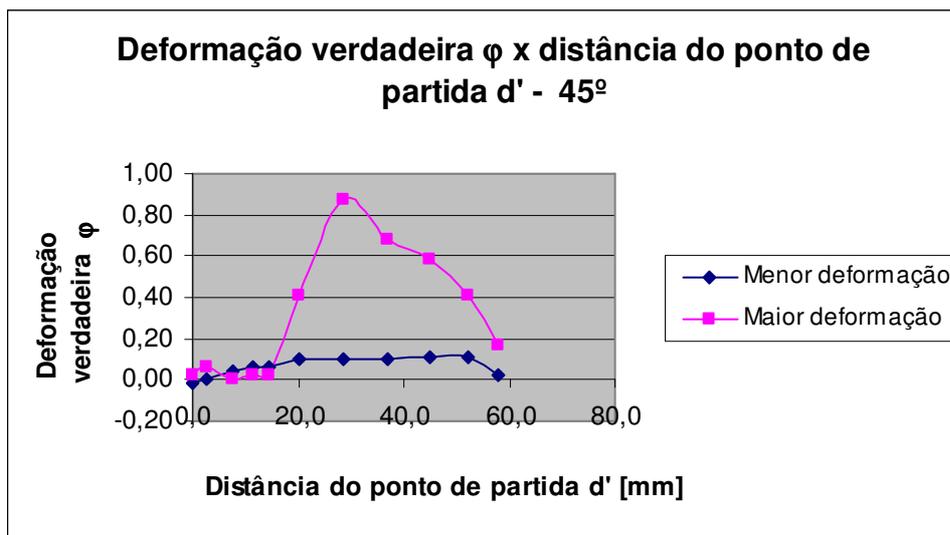


Figura 6.14 - Deformação verdadeira ϕ versus distância do ponto de partida d' a 45° em relação a direção de laminação, no ensaio nº 34.

No ensaio nº 36 o corpo de prova rompeu. A figura 6.15 mostra o corpo de prova rompido.



Figura 6.15 - Corpo de prova rompido no ensaio nº 36.

As deformações verdadeiras que ocorreram no ensaio nº 36 constam da tabela 6.9. A região de ruptura nas direções 0° e a 90° da direção de laminação ocorreu entre os pontos 10 e 11 e, a 45° da direção de laminação foi entre os pontos

7 e 8, justamente estas regiões apresentaram as maiores deformações. Novamente observa-se a tendência, que o modo como ocorrem as deformações aproximam-se muito da deformação plana ($\varphi_2 \cong 0$).

Tabela 6.9 - Deformações verdadeiras para regiões de medição (0° , 90° e 45° em relação à direção de laminação) no ensaio nº 36.

Direção de laminação	0°			90°			45°		
Ponto	d' [mm]	φ_1	φ_2	d' [mm]	φ_1	φ_2	d' [mm]	φ_1	φ_2
1	0,0	-0,02	0,00	0,0	-0,02	-0,02	0,0	0,00	-0,02
2	3,2	-0,02	0,00	3,2	0,02	0,00	4,1	-0,04	-0,04
3	6,3	-0,02	-0,02	5,8	-0,02	0,02	7,9	-0,02	0,00
4	8,6	0,00	0,00	8,6	0,02	0,02	11,7	-0,02	0,02
5	11,6	0,02	0,00	11,6	0,00	0,02	15,5	0,00	0,02
6	14,0	0,04	0,04	13,7	0,02	0,02	20,0	0,08	0,02
7	17,0	0,04	0,02	16,9	0,13	0,02	24,4	0,32	0,04
8	19,6	0,22	0,04	19,8	0,28	0,02	31,1	0,69	0,04
9	22,8	0,41	0,04	24,2	0,54	0,04	37,6	0,28	0,02
10	29,0	0,61	0,04	29,0	0,64	0,02	42,5	0,00	-0,02
11	33,8	0,39	0,04	34,4	0,34	0,02			
12	37,6	0,15	0,02	37,8	0,11	0,02			
13	40,7	0,00	0,00	40,4	0,00	0,02			

Nas figuras 6.16, 6.17 e 6.18 estão plotados os resultados da tabela 6.9 para direção longitudinal de laminação da chapa (0°), direção transversal de laminação da chapa (90°) e a 45° em relação à direção de laminação da chapa respectivamente.

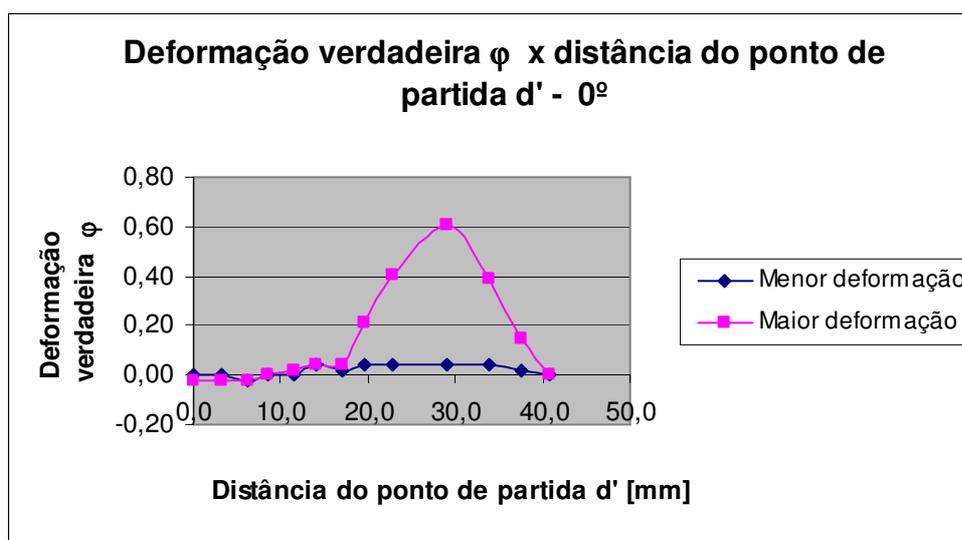


Figura 6.16 - Deformação verdadeira φ versus distância do ponto de partida d' a 0° em relação a direção de laminação, no ensaio nº 36.

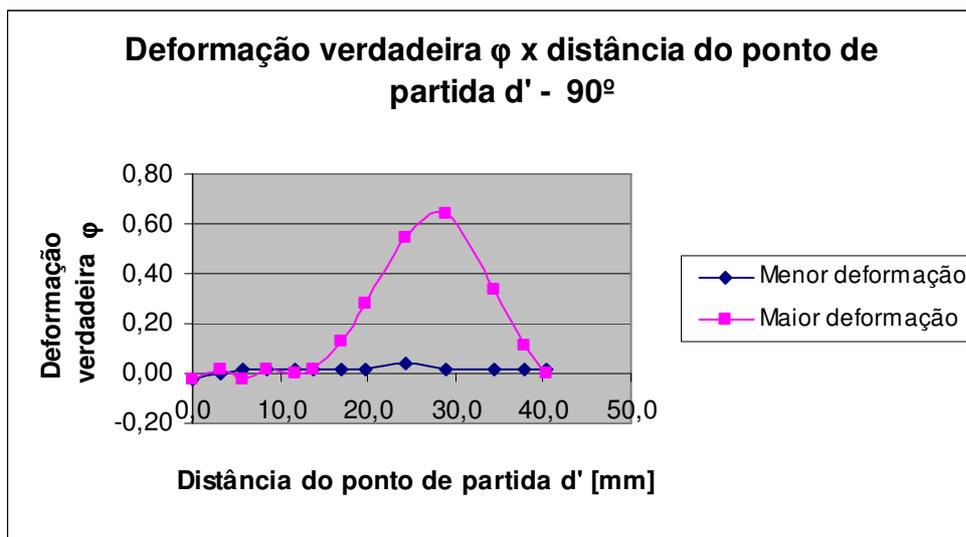


Figura 6.17 - Deformação verdadeira ϕ versus distância do ponto de partida d' a 90° em relação a direção de laminação, no ensaio nº 36.

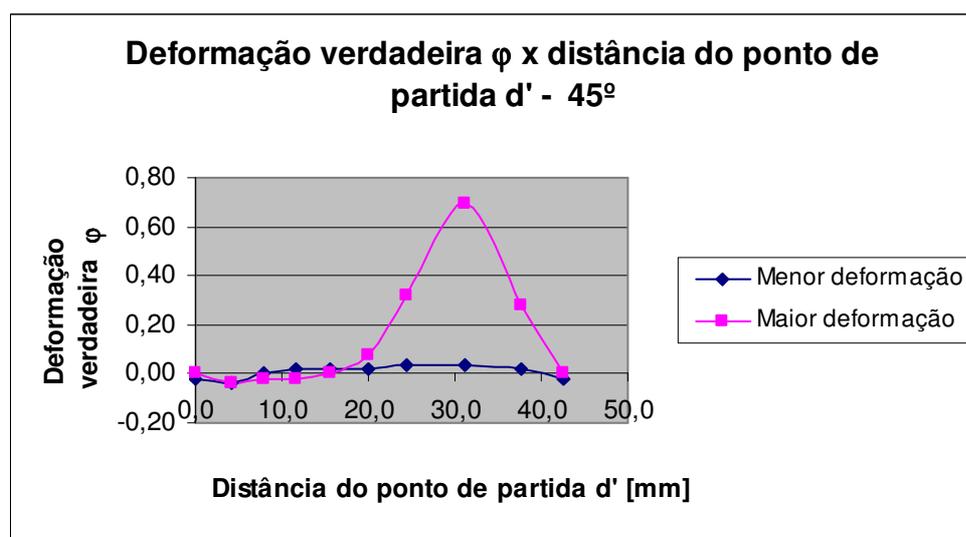


Figura 6.18 - Deformação verdadeira ϕ versus distância do ponto de partida d' a 45° em relação a direção de laminação, no ensaio nº 36.

Os perfis da maior deformação ϕ_1 e da menor deformação ϕ_2 apresentam diferenças. Enquanto os perfis da menor deformação tendem a linha paralela ao eixo horizontal, os perfis da maior deformação apresentam dois picos, com exceção dos ensaios onde houveram ruptura da chapa. Nestes ensaios, a curva aproximou-se de

um sino com uma queda abrupta. Isto era esperado, pois com o aumento do passo vertical d_z aumenta o encruamento do corpo de prova, conduzindo a ruptura frágil.

Na tabela 6.10 é mostrado um resumo da maior deformação φ_1 (valores médios das direções 0° , 45° e 90°), para os ensaios mais relevantes do trabalho.

Tabela 6.10 - Valores máximos da maior deformação φ_1 .

Ensaio n ^o	Raio da ferramenta R_T [mm]	Ângulo de parede α [°]	Passo vertical d_z [mm]	φ_1	Condição
7	10	45	0,4	0,42	não rompeu
8	10	45	0,6	0,41	não rompeu
9	10	45	0,8	0,40	não rompeu
31	8	60	0,4	0,81	não rompeu
32	8	60	0,6	0,77	não rompeu
33	8	60	0,8	0,68	rompeu
34	10	60	0,4	0,86	não rompeu
35	10	60	0,6	0,76	não rompeu
36	10	60	0,8	0,65	rompeu
37	8	70	0,4	0,48	rompeu
38	8	70	0,6	0,53	rompeu
39	10	70	0,4	0,73	rompeu
40	10	70	0,6	0,65	rompeu

Da tabela 6.10 pode-se afirmar para todos os ensaios que com o aumento do passo vertical d_z a maior deformação φ_1 reduz. Nos ensaios n^{os}. 33 e 36 (ruptura) os valores da maior deformação verdadeira φ_1 foram menores que nos testes em que não houve ruptura respectivamente (ensaios n^{os}. 31, 32, 34 e 35). Sob grandes deformações, o aço inoxidável AISI 304L sofre mudança de fase de austenita para martensita, conhecido como efeito TRIP (*Transformation Induced Plasticity*). Então, o aço torna-se um material com diferentes características (microestrutura, dureza) (Cavaler, 2009), e possui uma tendência por ruptura frágil em vez de ruptura dúctil, ou seja, uma fratura com um reduzida estrição.

6.1.5 Redução da Espessura

Para verificar a redução da espessura da chapa na região conformada aproveitaram-se os mesmos corpos de prova dos ensaios n^{os} 34 e 36. Fizeram-se cortes a 0° , 90° e a 45° em relação a direção de laminação conforme figura 6.19. Na

seqüência mediram-se as espessuras. A partir das medições elaboraram-se as tabelas 6.11 e 6.12.

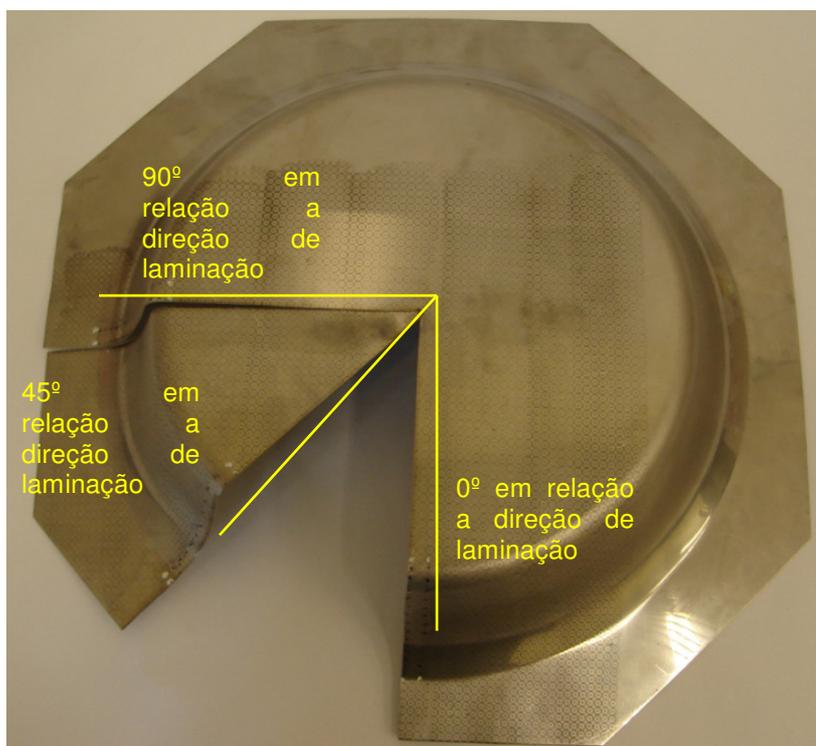


Figura 6.19 - Corpo de prova do ensaio nº 34 seccionado nas três direções de laminação (0°, 90° e 45°).

Tabela 6.11 - Espessura medida s' em relação a distância ao ponto de partida d' no ensaio nº 34.

Direção de laminação	0°		90°		45°	
Ponto	d' [mm]	s' [mm]	d' [mm]	s' [mm]	d' [mm]	s' [mm]
1	0,0	0,51	0,0	0,51	0,0	0,51
2	3,1	0,47	2,6	0,50	2,6	0,51
3	6,0	0,53	5,4	0,49	7,6	0,51
4	8,0	0,53	7,7	0,49	11,5	0,50
5	10,9	0,52	10,8	0,49	14,6	0,48
6	13,9	0,51	13,6	0,49	20,3	0,32
7	16,4	0,47	15,5	0,47	28,4	0,20
8	20,3	0,33	20,6	0,39	36,9	0,26
9	26,5	0,21	23,5	0,24	44,9	0,25
10	32,4	0,25	30,6	0,21	52,1	0,31
11	37,9	0,28	36,8	0,24	57,8	0,46
12	42,9	0,27	42,8	0,26		
13	48,7	0,27	48,4	0,26		
14	52,8	0,36	53,0	0,35		
15	56,9	0,45	57,4	0,42		
16	60,3	0,49	60,6	0,49		

Tabela 6.12 - Espessura medida s' em relação a distância ao ponto de partida d' no ensaio nº 36.

Direção de laminação	0°		90°		45°	
Ponto	d' [mm]	s' [mm]	d' [mm]	s' [mm]	d' [mm]	s' [mm]
1	0,0	0,51	0,0	0,51	0,0	0,53
2	3,2	0,51	3,2	0,51	4,1	0,50
3	6,3	0,51	5,8	0,51	7,9	0,50
4	8,6	0,51	8,6	0,51	11,7	0,50
5	11,6	0,51	11,6	0,50	15,5	0,49
6	14,0	0,50	13,7	0,49	20,0	0,46
7	17,0	0,49	16,9	0,45	24,4	0,34
8	19,6	0,40	19,8	0,38	31,1	0,27
9	22,8	0,32	24,2	0,30	37,6	0,40
10	29,0	0,25	29,0	0,28	42,5	0,50
11	33,8	0,34	34,4	0,37		
12	37,6	0,44	37,8	0,46		
13	40,7	0,49	40,4	0,50		

De posse das tabelas plotaram-se os gráficos, conforme figura 6.20 e 6.21.

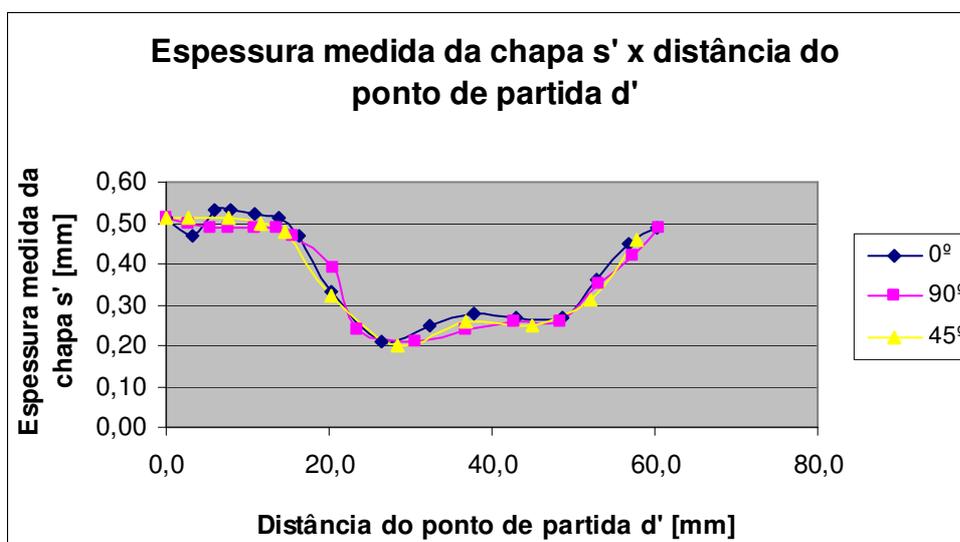


Figura 6.20 - Espessura medida da chapa s' versus distância do ponto de partida d' no ensaio nº 34.

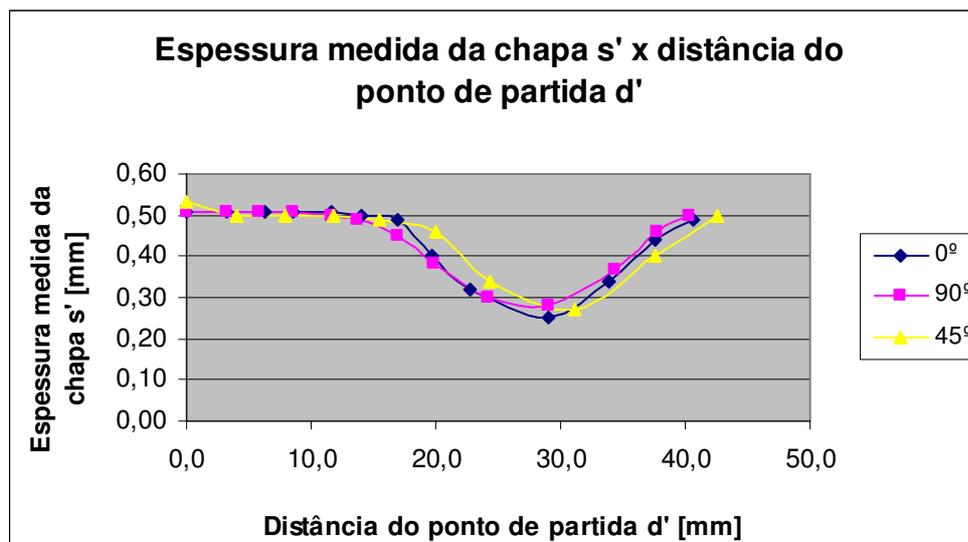


Figura 6.21 - Espessura medida da chapa s' versus distância do ponto de partida d' no ensaio nº 36.

Para o ensaio nº 34 as menores espessuras medidas da chapa e a distância do ponto de partida, considerando as regiões de medição (0°, 90° e 45° em relação à direção de laminação) tem um valor médio respectivamente de 0,22 mm e 28,5 mm.

Para o ensaio nº 36 as menores espessuras medidas da chapa e a distância do ponto de partida, considerando as regiões de medição (0°, 90° e 45° em relação à direção de laminação) tem um valor médio respectivamente de 0,27 mm e 29,7 mm.

No anexo D constam respectivamente os gráficos da redução de espessura para os ensaios nºs 31 e 33.

Verificou-se que nos ensaios em que não houveram ruptura (nºs 31, e 34) a espessura da chapa tem pequenas variações em relação as direções de laminação 0°, 90 e 45°, devido ao método experimental. Com relação aos ensaios em que houveram a ruptura (nºs 33, e 36) a 45° nota-se um divergência dos resultados da variação da espessura em relação as direções 0° e 90°.

6.1.6 Guia Prático para Determinação da Curva CLC para a Estampagem Incremental

Os ensaios mostrados neste item para a plotagem das curvas CLC (nºs 39 e 40) foram executados com ferramentas de raio R_T igual a 10 mm, ângulo de parede de 70° e incrementos verticais distintos. Estas condições consideradas críticas, são

ideais para mostrar as possíveis diferenças das curvas CLC para a Estampagem Incremental.

Para obter os valores de φ_1 e φ_2 das tabelas 6.13 e 6.14 usou-se o recurso da régua flexível transparente e graduada, para três pontos abaixo da ruptura (AB) e três pontos acima da ruptura (AC) nos corpos de prova.

Tabela 6.13 - Deformações verdadeiras para regiões de medição (0° , 90° e 45° em relação à direção de laminação) na região da fratura do ensaio nº 39.

Direção de laminação	0°			90°			45°		
Ponto	φ_1	φ_2	φ_3	φ_1	φ_2	φ_3	φ_1	φ_2	φ_3
1 _{AB}	0,74	0,00	-0,74	0,41	0,02	-0,43	0,68	0,00	-0,68
2 _{AB}	0,74	0,00	-0,74	0,41	0,02	-0,43	0,69	0,00	-0,69
3 _{AB}	0,74	0,00	-0,74	0,41	0,02	-0,43	0,69	0,00	-0,69
1 _{AC}	0,39	0,02	-0,41	0,75	0,00	-0,75	0,34	0,02	-0,36
2 _{AC}	0,39	0,02	-0,41	0,75	0,00	-0,75	0,32	0,02	-0,34
3 _{AC}	0,39	0,02	-0,41	0,75	0,00	-0,75	0,32	0,02	-0,34

Tabela 6.14 - Deformações verdadeiras para regiões de medição (0° , 90° e 45° em relação à direção de laminação) na região da fratura do ensaio nº 40.

Direção de laminação	0°			90°			45°		
Ponto	φ_1	φ_2	φ_3	φ_1	φ_2	φ_3	φ_1	φ_2	φ_3
1 _{AB}	0,73	0,00	-0,73	0,69	0,00	-0,69	0,39	0,02	-0,41
2 _{AB}	0,73	0,00	-0,73	0,69	0,00	-0,69	0,41	0,02	-0,43
3 _{AB}	0,74	0,00	-0,74	0,69	0,00	-0,69	0,41	0,02	-0,43
1 _{AC}	0,48	0,02	-0,50	0,58	0,02	-0,60	0,53	0,00	-0,53
2 _{AC}	0,48	0,02	-0,50	0,58	0,02	-0,60	0,53	0,00	-0,53
3 _{AC}	0,48	0,02	-0,50	0,58	0,02	-0,60	0,53	0,00	-0,53

A partir das tabelas 6.13 e 6.14 gerou-se a Curva Limite de Conformação adaptada para o processo de Estampagem Incremental (CLC - Estampagem Incremental), mostrado nas figuras 6.22 e 6.23.

Confirma-se a tendência que o modo como ocorrem as deformações aproximam-se muito da deformação plana ($\varphi_2 \cong 0$).

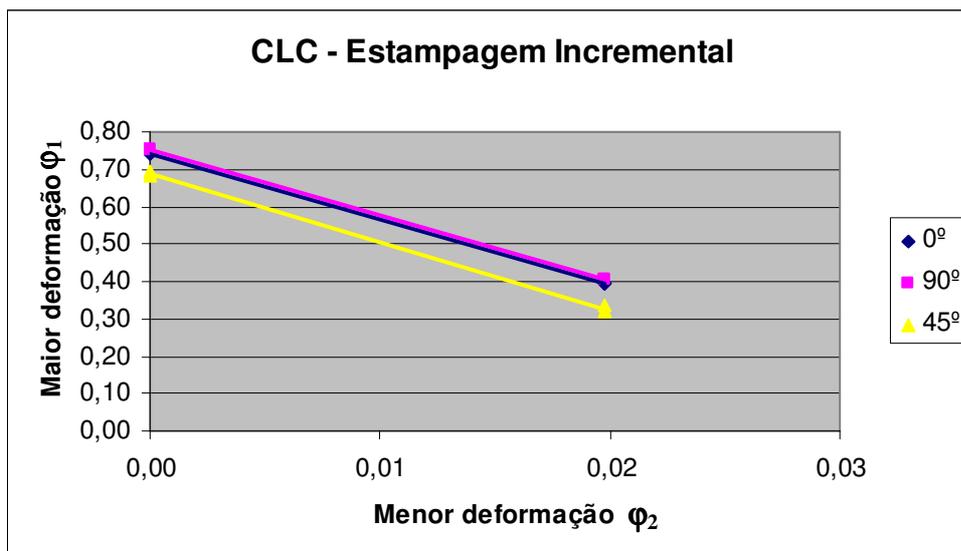


Figura 6.22 - Curva CLC para a Estampagem Incremental obtida no ensaio nº 39.

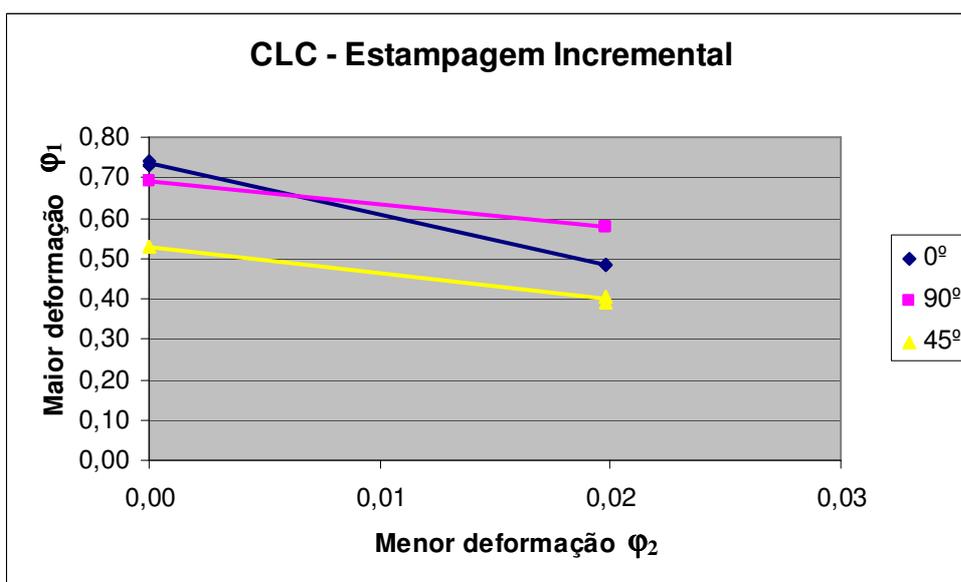


Figura 6.23 - Curva CLC para a Estampagem Incremental obtida no ensaio nº 40.

Pode-se notar que a inclinação das curvas apresenta um comportamento linear e descendente.

Experimentos conduzidos por (Lamminen, 2005) mostram semelhança com a curva CLC (Estampagem Incremental) deste trabalho. O método de estampagem está descrito no item 3.4.3 e, na tabela 3.4 encontram-se os termos e parâmetros empregados no trabalho desenvolvido por (Lamminen, 2005).

Ampliando-se o gráfico da figura 3.20 e, convertendo os dados para maior deformação φ_1 e para menor deformação φ_2 e, plotando-se em um gráfico, através do *software* Excel tem-se a figura 6.24.

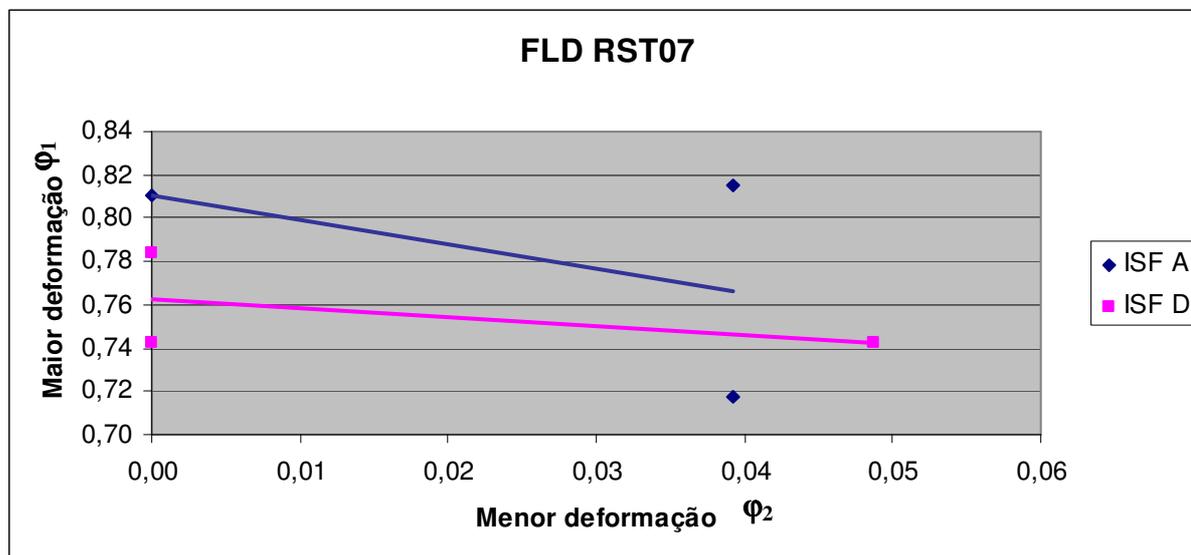


Figura 6.24 - Curva CLC para o aço inoxidável austenítico padrão EN 1.4301 2B (Lamminen, 2005).

Comparando-se a curva da figura 6.24 com a curva do ensaio n° 40 (figura 6.23) tem-se a figura 6.25.

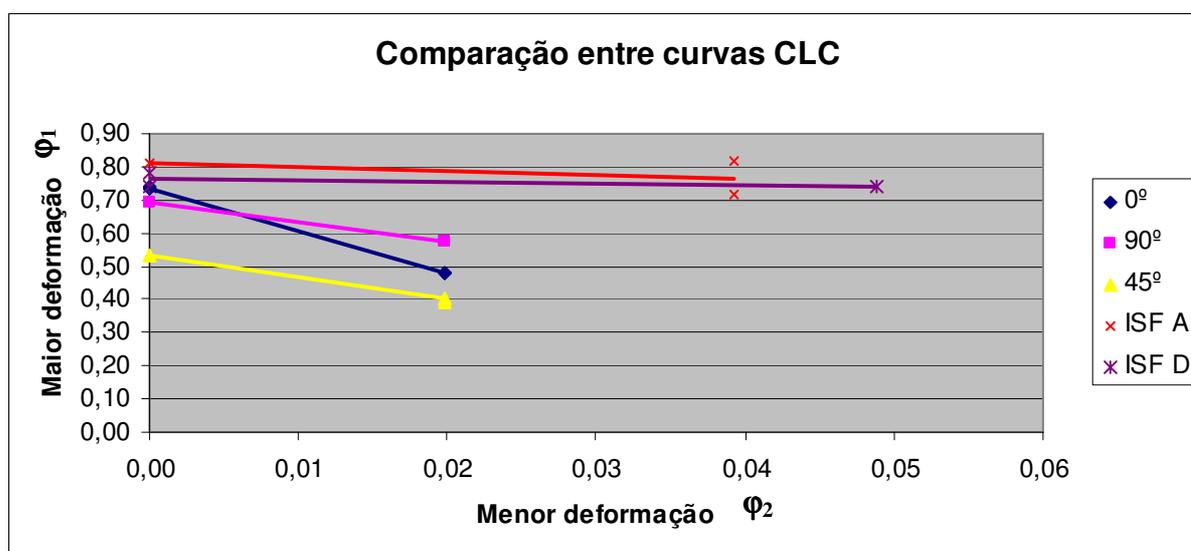


Figura 6.25 - Comparação entre curvas CLC.

Os parâmetros que originaram as diferenças entre as curvas CLC (figura 6.24) podem-se ser melhor visualizados na tabela 6.15.

Tabela 6.15 - Comparação entre os parâmetros para obtenção da curva CLC.

	Trabalho atual	Lamminen, 2005
Material	Aço inoxidável austenítico AISI 304L	Aço inoxidável austenítico padrão EN 1.4301 2B
s_0 [mm]	0,5	0,7
α [°]	70	63
d_z [mm]	0,6	0,2
R_T [mm]	10	10

É de conhecimento que a espessura de chapa altera o comportamento das curvas CLC ditas convencionais e por conseqüência as curvas CLC obtidas por Estampagem Incremental. Os parâmetros: ângulo de parede α e o passo vertical d_z também conduzem a graus de deformações diferentes razão pela qual as curvas obtidas neste trabalho com (Lamminen, 2005) apresentam diferenças.

6.1.7 Informações Complementares

Durante o processo de Estampagem Incremental notou-se que mesmo usando a lubrificação para reduzir a fricção durante os ensaios, uma pequena quantidade de material da superfície da chapa foi removido. Prova disto é a troca de cor da graxa que inicialmente era amarela e tornou-se cinza escura após os testes.

a) Cálculo da espessura

A espessura da chapa na região conformada s_1 pode ser calculada pela equação 3.1, lei do seno e comparada com valores reais, através da tabela 6.16. Também mediu-se o ângulo de parede real α_1 , através de uma máquina de medição tridimensional.

$$s_1 = s_0 \cdot \text{sen}(90^\circ - \alpha) \quad [\text{mm}] \quad (3.1)$$

Tabela 6.16 - Lei do seno e valores medidos do ângulo de parede e da espessura da chapa na região conformada.

Ensaio nº	Lei do seno			Valores medidos	
	s ₀ [mm]	α [°]	s ₁ [mm]	α ₁ [°]	s' [mm]
7	0,54	45	0,38	42,4	0,36
8	0,54	45	0,38	43,6	0,35
34	0,54	60	0,25	55,3	0,21
35	0,54	60	0,25	57,0	0,24
39	0,50	70	0,17	65,6	0,19
40	0,50	70	0,17	60,6	0,20

Os resultados dos valores medidos de s' (tabela 6.16) foram do menor valor obtido da média das medições: direção longitudinal, direção transversal e na direção oblíqua, ou seja, a 45° com a direção de laminação. Como mostrado na seção 6.1.5, a espessura possui um perfil ao longo da parede conformada. Normalmente a espessura medida é menor do que a calculada pela lei do seno. A exceção ocorreu nos ensaios n^{os}. 39 e 40 onde os corpos de prova romperam antes de atingir a profundidade programada e, portanto ocorreu o contrário. A máxima diferença percentual encontrada para a espessura da chapa conformada entre a equação 3.1 e as medições foi de aproximadamente 19%, que ocorreu no ensaio n° 34. Nota-se uma tendência do aço inoxidável AISI 304L com relação ao efeito mola, ou seja o ângulo de parede real α₁, é menor que o programado.

b) Rotação da ferramenta

A equação 3.2 fornece um modelo de cálculo para rotação com objetivo de reduzir a fricção e o aquecimento.

$$N = \frac{v_{fh}}{\pi R_T \sqrt{\frac{1}{2}(1 - 2\cos 2\alpha)}} \quad [\text{rpm}] \quad (3.2)$$

Neste trabalho optou-se pela *spindle* livre de rotação, ou seja, a ferramenta fica parada (seção 3.2.4). Entretanto, a partir de determinada profundidade, a ferramenta começava a rolar de acordo com o movimento de translação da mesa da máquina-ferramenta. Na tabela 6.17 constam os ensaios em que foram monitoradas as rotações.

Tabela 6.17 - Cálculo da rotação.

Ensaio nº	v_{fz} [mm/min]	R_T [mm]	α [°]	N^1 [rpm]	N^2 [rpm]
31	1.500	8	60°	69	36
32	1.500	8	60°	69	36
33	1.500	8	60°	69	36
34	1.500	10	60°	55	36
35	1.500	10	60°	55	35
36	1.500	10	60°	55	35
37	1.500	8	70°	64	42
38	1.500	8	70°	64	38
39	1.500	10	70°	51	35
40	1.500	10	70°	51	41

1 - Rotação calculada pela equação 3.2

2 - Rotação empregada neste trabalho

As rotações empregadas neste trabalho estavam adequadas, pois feitas algumas medições de temperatura na área de trabalho estas não ultrapassaram 30°C, o que dá um indicativo de que o atrito não era exagerado.

c) Estimativa da força

Para o aço AISI 304L a força vertical F_v e a força horizontal F_h podem ser estimadas pelas equações 3.3 e 3.4 respectivamente.

$$F_v = \pi R_T s_0 \sigma_e \sin \beta \quad [\text{N}] \quad (3.3)$$

$$F_h = R_T s_0 \sigma_e (\sin \beta + 1 - \cos \beta) \quad [\text{N}] \quad (3.4)$$

Na tabela 6.18 tem-se um resumo das forças para as ferramentas de raio R_T de 5, 8 e 10 mm.

Tabela 6.18 - Estimativa da força vertical F_v e força horizontal F_h baseada nas equações 3.3 e 3.4.

R_T [mm]	s_0 [mm]	σ_e [MPa]	β [°]	F_v [N]	F_h [N]
5	0,5	258	30	1.012	408
8	0,5	258	30	1.619	653
10	0,5	258	30	2.024	817

Nestes cálculos deve-se lembrar que R_T é o raio da ferramenta de conformação, s_0 é a espessura inicial da chapa, σ_e é a tensão de escoamento e β é a metade do ângulo interior do cone formado pelo limite de contato entre a ferramenta e a peça de trabalho.

Os valores máximos calculados da força vertical F_v e da força horizontal F_h são 2.024 N e 817N respectivamente, são considerados pequenos em função da estrutura da máquina. Estes valores foram calculados para raio da ferramenta R_T de 10 mm, conforme tabela 6.18.

Dados encontrados em catálogo do Centro de Usinagem Vertical HAAS modelo VF-5 (potência do motor principal 20 HP) apresentam uma força máxima nos eixos X, Y e Z de 15.120 N. Isto possibilita que para o aço inoxidável AISI 304L pode-se estampar incrementalmente até uma chapa com 3,175 mm de espessura e, empregar uma ferramenta com raio de 10 mm e com ângulo do cone máximo de 60°. Nestas condições alcança-se uma força vertical F_v e uma força horizontal F_h respectivamente de 12.854 N e 5.187 N.

6.1.8. Estudo de Caso

No ensaio nº 45 planejou-se fazer uma peça comercial, ou seja um tampo de um reservatório de ar comprimido de pequenas dimensões, conforme figura 6.26. A profundidade total do tampo é 60,3 mm e o maior diâmetro interno é 234 mm.

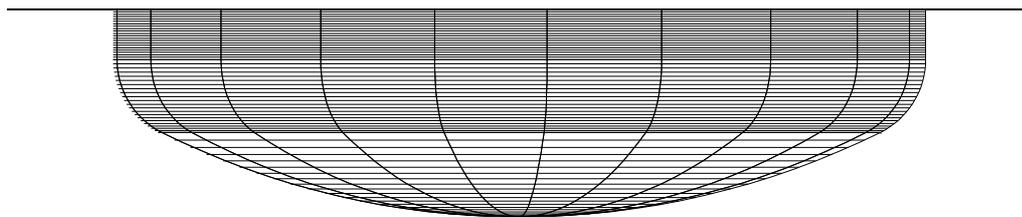


Figura 6.26 - Geometria do tampo de reservatório de ar comprimido.

A tabela 6.19 apresenta os parâmetros deste ensaio.

Tabela 6.19 - Parâmetros de estampagem no ensaio n° 45.

Ensaio n°	Raio da ferramenta R_T [mm]	Ângulo de parede α [°]	Passo vertical d_z [mm]	v_{fh} [mm/min]	Condição
45	5	90°	0,3	300	rompeu

No ensaio n° 45 o tampo rompeu-se na profundidade de 10,4 mm, apesar de tomarem-se todas as medidas de melhoria do processo como: redução do passo vertical d_z e do avanço v_{fh} , emprego de graxa abundante, redução do diâmetro da ferramenta de 10 mm, para diâmetro de 9 mm por 30 mm de comprimento, próximo a ponta semi-esférica. A função desta redução é evitar o atrito com a parede da peça já que a parte reta desta ($\alpha = 90^\circ$) tinha 15 mm. A figura 6.27 mostra o detalhe da ferramenta no processo de Estampagem Incremental.



Figura 6.27 - Ferramenta em trabalho no ensaio n° 45.

7. CONCLUSÃO

A Estampagem Incremental de Chapas ISF é um processo viável e tem um grande potencial como uma ferramenta no processo de desenvolvimento de produto, podendo ser realizado em centro de usinagem.

Em todos os ensaios de Estampagem Incremental a profundidade total projetada da peça era de 40 mm. A ferramenta com uma profundidade média de 7,2 mm passava de escorregamento para rolamento. Observou-se a tendência que com o aumento do passo vertical d_z e raio da ferramenta R_T aumentava a profundidade para início de rolamento da ferramenta e esta profundidade, tem influência direta na rugosidade.

Nos ensaios de Estampagem Incremental a ferramenta foi mantida livre e alcançava rotações devido ao contato da ferramenta com a peça. As rotações empregadas neste trabalho (tabela 6.17) estavam adequadas, pois feitas algumas medições de temperatura na área de trabalho estas não ultrapassaram 30°C, o que dá um indicativo de que o atrito não era exagerado.

Os resultados das medições de rugosidade em ferramentas não revestidas para o aço inoxidável AISI 304L, apresentaram uma tendência do parâmetro R_z elevar com o aumento do passo vertical d_z . Os menores valores da média da rugosidade R_z foram obtidos nos ensaios nº 18 e 7, ambos com ferramentas com raio R_T de 10 mm;

Os resultados das medições de rugosidade em ferramentas revestidas para o aço inoxidável AISI 304L, permite afirmar que o revestimento TiAlN da ferramenta, colaborou expressivamente para a redução do atrito e conseqüentemente da rugosidade. Apesar do revestimento de TiAlN pelo processo PVD ter uma camada fina (aproximadamente 3 μm) e que reproduz em parte a textura da ponta da ferramenta, este funciona com um lubrificante sólido reduzindo o coeficiente de atrito e conseqüentemente a rugosidade da superfície da chapa conformada.

Os valores do parâmetro de rugosidade R_z alcançados nos experimentos de Estampagem Incremental foram próximos dos valores obtidos para os processos convencionais de conformação mecânica (laminação a frio e embutimento).

Após o processo de Estampagem Incremental, o aço deformado a frio apresentou um significativo encruamento de seus grãos, o que induziu parte da

microestrutura originalmente austenítica a uma transformação martensítica induzida por deformação. Esta transformação foi verificada entre 25% a 53% em volume, conforme estimativa apresentada na figura 6.10.

Pode-se constatar (tabela 6.6) que existe uma tendência que com o aumento do ângulo de parede α aumenta a microdureza da região encruada.

A anisotropia média encontrada no ensaio de tração $r_m = 1,18$ significa que existe aproximadamente uma igualdade entre a resistência à deformação na largura e na espessura. Entretanto para os ensaios de Estampagem Incremental notou-se justamente que as deformações ocorriam no comprimento e na espessura.

A estampabilidade do aço inoxidável AISI 304L é considerada boa no processo de Estampagem Incremental, pois consegue-se obter um peça livre de defeitos com deformações verdadeiras da ordem de 0,8 e ângulo de parede α de 60° , sabendo empregar adequadamente o passo vertical d_z e o raio da ferramenta R_T (tabela 6.10). Pretende-se mostrar com isto, que os ensaios convencionais (tração, CLC) não podem ser relacionados com o limite de fratura para a Estampagem Incremental, pois, por exemplo, no ensaio de tração para o aço inoxidável AISI 304L este rompeu com deformação verdadeira de 0,4.

Os ensaios de Estampagem Incremental neste trabalho mostram que os gráficos das deformações exibem uma tendência, que o modo como ocorrem as deformações aproximam-se muito da deformação plana ($\varphi_2 \cong 0$). Isto pode ser concluído que o aumento no comprimento é praticamente compensado com a redução da espessura, desde que a largura mantém-se praticamente constante (lei da constância de volume).

Os perfis da maior deformação φ_1 e o da espessura medida s' apresentam certa similaridade. Nos casos onde não houveram ruptura, os perfis da maior deformação φ_1 apresentam dois picos, enquanto a espessura s' apresenta dois vales. Nos casos onde houveram ruptura, os perfis da maior deformação φ_1 apresentam um pico enquanto a espessura medida s' apresenta um vale.

Nos testes onde houveram ruptura, os valores da maior deformação φ_1 foram máximos e a espessura medida s' foram as mínimas. Entretanto observou-se que alguns corpos romperam com valores menores de φ_1 dos que não romperam, de acordo com a combinação de raio da ferramenta R_T , ângulo de parede α e passo vertical d_z (vide tabela 6.10). Presume-se esta ocorrência devido ao aumento do passo vertical que provocou altos níveis de tensão, ocasionando reduzido

escoamento e ruptura abrupta. Este efeito é mais visível a 45° em relação a direção de laminação da chapa.

Verificou-se que nos ensaios em que não houveram ruptura os perfis da espessura da chapa nas direções (0°,90° e 45°) em relação a direção da laminação da chapa praticamente coincidiram. Com relação aos ensaios em que houveram a ruptura, a 45° nota-se um divergência dos resultados da variação da espessura em relação as direções 0° e 90°, presumindo-se que a anisotropia do aço AISI 304L tem influência no perfil da espessura da chapa.

A lei do seno é um modelo aproximado do cálculo da menor espessura da parede, e ela só leva em consideração o ângulo de parede α ; entretanto, desconsidera dois parâmetros muito importantes na Estampagem Incremental: passo vertical d_z e raio da ferramenta R_T .

É de consenso na comunidade acadêmica internacional que os limites de conformação encontrados para Estampagem Incremental é uma linha reta de declividade negativa na região da ruptura e, que os limites de conformação são consideravelmente maiores que aqueles obtidos pelos convencionais testes Nakajima.

O trabalho mostra que o Diagrama Limite de Conformação convencional não pode ser aplicado para Estampagem Incremental, entretanto os resultados não são extensivos suficiente para propor um método de construção do Diagrama Limite de Conformação para ISF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR-6152 – Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração de Materiais Metálicos. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 22p. 1992.

ACESITA. Aço inox: especificações técnicas. Arquivo extraído da Internet em outubro de 2007. http://www.acesita.com.br/port/aco_inox/pdf/catalogoAcesita.pdf

ALLWOOD, J. M.; HOUGHTON; N. E. e JACKSON. K. P. The Design of an incremental sheet forming machine. Institute for Manufacturing, University of Cambridge, Mill Lane, Cambridge CB2 1RX, United Kingdom. 2004.

ALLWOOD, J.; JACKSON, K. An introduction to incremental sheet forming in Cambridge. CMI workshop on sandwich sheets. Cambridge, United Kingdom. 21st June 2005.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS ASME. Surface texture (surface roughness, waviness, and lay). ASME B46.1-2002. (Revision of ASME B46.1-1995).

AMINO, H.; LU, Y.; OZAWA, S.; FUKUDA, K. e MAKI, T. Dieless NC forming of automotive service panels, Advanced Technology of Plasticity (2002), Vol.2.

AMINO NORTH AMERICA CORPORATION. Arquivo extraído da Internet em outubro de 2007. http://www.aminonac.ca/product_e_dieless.asp.

ANDRADE, M. S.; GOMES, O. A.; VILELA, J. M. C.; SERRANO, A. T. L. e MORAES, J. M. D. Avaliação da estampabilidade de dois aços inoxidáveis austeníticos. 2º COBEF. Uberlândia. 2003.

AVITZUR, B.; YANG, C. T. Analysis of power spinning of cones. Trans. ASME, series B, Journal of Engineering for Industry, vol. 82, pp. 231-245, 1960.

BAMBACH M.; HIRT, G. e AMES J. Modeling of optimization strategies in the incremental CNC sheet metal forming process. AIP Conference Proceedings 712: "Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications, NUMIFORM 2004"; Proceedings of the 8th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes, June 13-17, 2004, Columbus/Ohio, USA

BET, L. Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor. 1999. 350f. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BLASS, A. Estampagem. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Apostila. 1985.

BRASIMET. Durotin. Arquivo extraído da internet em janeiro de 2009. <http://www.durotin.com.br/durotin/tipos.asp>.

CARBÓ, H. M. Aço inoxidável - aplicações e especificação. ACESITA. Núcleo Inox. 2001. Arquivo extraído da internet em outubro de 2009. http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos//downloads/Acesita_Aplica_Especificica.pdf

CAVALER, L.; PERUCH, F.; SCHAEFFER, L. Microstructural transformation of the AISI 304 induced by incremental forming. XI.I National Metal Sheet Forming Conference, from 14 to 16th October of 2009, Porto Alegre/RS, Brasil, ed. Schaeffer L., Gráfica e Editora Brasil Ltda.

CASTELAN, J. Utilização das Tecnologias CAD/CAM para Estampagem Incremental do Alumínio Série 1000. 2007. 93f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CERRO, I. MAIDAGAN, E.; ARANA J., RIVERO, A.; RODRÍGUEZ, P. P. Theoretical and experimental analysis of the dieless incremental sheet forming process. Journal of Materials Processing Technology 177 (2006) 404–408.

CHOUVALOVA, I.; JUNK, S.; e HIRT, G. Forming strategies and tools in Incremental Sheet Forming. ”, in: SHEET METAL2003, Proceedings of the 10th International Conference on Sheet Metal – SHEMET 2003, 14-16 April 2003, Jordanstown, U. K., eds. Singh U. P., Geiger M., Kals H.J.J., Shirvani B. (ISBN 1 85923 171 3), pp. 57-64

DAMOULIS, G. L.; BATALHA, G. F. Desenvolvimento de processo de conformação de chapas metálicas usando simulação computacional como ferramenta integrada no desenvolvimento de carrocerias automotivas. Anais do 2º COBEF (Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação). 2003.

DIETER, G. E. Metalurgia mecânica. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 2ª ed., 1981.

FATRONIK. Incremental sheet forming - industrial applications. International Seminar on Novel Sheet Metal Forming Technologies. Finland. 2006. Arquivo extraído da Internet em setembro de 2006. www.fatronik.com/documentos/otraspub/NSF2006.pdf.

FERRARINI, J. L. Caracterização de Materiais para o Processo de Estampagem. 2004. 116f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FILICE, L., FRATINI, L., MICARI, F. Analysis of material formability in Incremental Forming, Annals of the CIRP, vol. 51/1/2002: 199-202.

FOLLE, L. F.; ARRRUDA, R. P.; MARCA, D. e SCHAEFFER, L. Escolha do Lubrificante Correto Torna Mais Precisa a Curva Limite de Conformação. Corte e Conformação de Metais, v. 3, p. 64-76, 2008.

FRATINI, L., AMBROGIO G., Di LORENZO, R.; FILICE, L.; MICARI, F. Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming, *Annals of CIRP*, 53, 207-210. 2004.

GUIDA, R. B. Conformação dos Aços Inoxidáveis. ACESITA. Cadernos da assistência técnica. 2004. Arquivo extraído da Internet em novembro de 2006. <http://www.nucleoinox.org.br/new/downloads/ACESITA%20CADERNO%20%20JULHO.pdf>.

HAGAN, E.; JESWIET, J. A review of conventional and modern single point sheet metal forming methods. *of Engineering Manufacture*. 2003 vol 217 No B2. Pp 213 - 225.

HIRT, G. Tools and Equipment used in Incremental Forming. 1st Incremental Forming Workshop, University of Saarbrucken, 9 June 2004. On Cdrom.

HIRT; G.; AMES, J and ZIEGLER, S. Design of an improved blank holder drive system to enable combined stretch forming and CNC- Incremental Sheet Forming. 9^a Conferência Nacional de Conformação de Chapas, 18 a 19 de Outubro de 2006, Porto Alegre/RS, Brasil, ed. Schaeffer L., Gráfica Metrópole, pp. 175-186.

HIRT, G.; BAMBACH, M. e JUNK, S. Modelling of the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process. Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP), Saarland University, Germany. 2003.

HIRT, G., JUNK, S., CHOUVALOVA, I. Herstellung von prototypen und kleinserien komplexer bauteile mit inkrementeller blechumformung, 9. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Dresden, 2002.

ISMAIL, N.; MAHDAVIAN, S. M., Hydrodynamic lubrication in metal spinning. *Tribology in Manufacturing Processes*, vol. 5, pp. 119-123, 1994.

JACKSON, K. Incremental sheet forming machine. Institute for Manufacturing, University of Cambridge, Mill Lane, Cambridge CB2 1RX, United Kingdom. Arquivo extraído da Internet em outubro de 2006. www.srcf.ucam.org/mtms/seminars/Kathryn_Jackson.pdf

JESWIET, J. Incremental single point forming. *Trans. of North American Manufacturing Research Institute NAMRC*; vol. XXIX, May 22-25, 2001, pp 75 - 79. Gainesville/Florida, USA.

JESWIET, J.; HAGAN, E. e SZEKERES, A. Proceedings of the institution of mechanical engineers part B- *Journal of Engineering Manufacture*, 216 (2002), No. 10, p. 1367-1371.

JESWIET, J.; MICARI, F.; HIRT, G.; BRAMELY, A.; DUFLOU, J. and ALLWOOD, J. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal, *Annals of CIRP*, 54, 623-650. 2005.

JUNIOR, E. H. S. Determinação do grau de conformabilidade de chapa de aço para suporte de coluna de direção e identificação de similar nacional. 2002. 128f.

Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

JUNK, S.; HIRT, G.; BAMBACH, M.; CHOUVALOVA, I. e AMES, J. Flexible CNC Flexible CNC incremental sheet forming: Process evaluation and simulation. VI. Conferência Nacional de Conformação de Chapas, 15. Outubro 2003, Porto Alegre/RS, Brasil, ed. Schaeffer L., Gráfica e Editora Brasul Ltda., pp. 30-38.

JUNK, S.; HIRT, G. e WITUSKI, N. Surface quality, geometric precision and sheet thinning in incremental sheet forming. Proceedings of Materials Week 2001, Munich, 1-3 October 2001, Paper No. 442 G3 (CD Jan. 2002).

KALPAKCIOGLU, S. On the mechanics of shear spinning. Trans. ASME, series B, Journal of Engineering for Industry, vol. 83, pp. 125-130, 1961.

KIM, T.J.; YANG, D.Y. Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process. International Journal of Mechanical Sciences, vol. 42, pp. 1271-1286, 2001.

KIM, Y. H.; PARK, J. J. Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal. Journal of Materials Processing Technology 130–131 (2002) 42–46.

KITAZAWA, K.; HAYASHI, S. e YAMAZAKI, S. Hemispherical stretch-expanding of aluminium sheet by computerized numerically controlled incremental forming process with two path method. Journal of Japan Institute of Light Metals, vol. 46, pp. 219-224, 2001.

KITAZAWA, K.; NAKAJIMA, A. Cylindrical incremental drawing of sheet metals by CNC incremental forming process, 6th ITCP, 1999.

KITAZAWA, K.; NAKANE, M. Hemi-ellipsoidal stretch expanding of aluminium sheet by CNC incremental forming process with two path method. Journal of Japan Institute of Light Metals, vol. 47, pp. 440-445, 1997.

KOBAYASHI, S.; HALL, I. K. e THOMSEN, E. G. A theory of shear spinning of cones. Trans. ASME, series B, Journal of Engineering for Industry, vol. 83, pp. 485-495, 1961.

KÖNIG, W. Tornear, Fresar e Furar. (Tradução: Prof. Dr.-Ing. WALTER L. WEINGAERTNER. Aachen. 1981. 409 p.

LAMMINEN, L. Incremental sheet forming with an industrial robot - forming limits and their effect on component design. Helsinki University of Technology. Finland. Advanced Materials Research Vols. 6-8 (2005) pp. 457-464. 2005.

LAMMINEN, L.; WADMAN, B. et al. Prototyping and low volume production of sheet metal components. Research Report. Arquivo extraído da Internet em julho de 2005. www.nordicinnovation.net.

LANGE, K. Forming Handbook. New York: McGraw Hill and SME, 1993.

LEACH, D.; GREEN, A. J. e BRAMLEY, A. N. A new incremental sheet forming process for small batch and prototype parts. 9th International Conference on Sheet Metal, Leuven, pp. 211-218, 2001.

LEBEDEV, A. A.; KOSARCHUK, V. V. Influence of phase transformations on the mechanical properties of austenitic stainless steel, Int. J. Plasticity, 16, 2000 p. 749-767.

MATSUBARA, S. Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical tool. Journal of the JSTP, vol. 35, pp. 1311-1316, 1994.

MCLOUGHLIN, K Institute of Technology Tallaght. Arquivo extraído da Internet em julho de 2005. <http://www.irishscientist.ie>

MESQUITA, E. L. A.; RUGANI, L. L. Estampagem de Aços Inoxidáveis. ACESITA. Apostila. 1997. Arquivo extraído da Internet em agosto de 2005. http://www.acesita.com.br/port/aco_inox/pdf/apostila_aco_inox_estampagem.pdf.

MICARI, F.; AMBROGIO, G. A. Common shape for conducting Incremental Forming Tests. 1st Incremental Forming Workshop, University of Saarbrucken, 9 June 2004. On Cdrom.

PARK, J. J.; KIM, Y. H. Fundamentals studies on the incremental sheet metal forming technique. Journal of Materials Processing Technology 140 (2003) 447-453.

REAGAN, J., SMITH, E. Metal spinning, 1991, (Lindsay Publications, Bradley, IL).80p.

ROCHA, M. R.; OLIVEIRA, C. A. S. Avaliação das transformações martensíticas em aços inoxidáveis austeníticos. 10^a Conferência Nacional de Conformação de Chapas, 18 a 19 de Outubro de 2007, Porto Alegre/RS, Brasil, ed. Schaeffer L., Gráfica Metrôpole, pp. 203-214.

SCHAEFFER, L. Conformação de chapas metálicas. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 200p.

SCHAEFFER, L. Conformação mecânica. Porto Alegre: Imprensa Livre, 1999. 267p. Bibliografia: p 122.

SCHAEFFER, L.; CAVALER, L. C. C. e BILESSIMO, L. D. Ensaios com estampagem incremental de chapas. X Conferência Nacional de Conformação de Chapas, 18 e 19 de outubro of 2007, Porto Alegre/RS, Brasil, ed. Schaeffer L., Gráfica Metrôpole.

SILVA, M. B.; SKJOEDT, M.; ALVES, L. M.; ALVES, M. L.; BAY, N. and MARTINS, P. A. F. Single point incremental forming of metal sheets: experimentation and theoretical interpretation. Anais da 11^a. Conferência Nacional de Conformação de Chapas, 8 a 10 de Outubro de 2008, Porto Alegre/RS, Brasil, ed. Schaeffer L., Gráfica Metrôpole., pp. 11-28.

SILVA, M. B.; SKJOEDT, M.; MARTINS, P. A. F. e BAY N. Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2007.

SKA. EdgeCAM. Arquivo extraído da Internet em março de 2007. <http://skarenderworks.com.br/edgecam>.

VENCOVSKY, P. K.; YUHARA, D. Aplicação de revestimentos PVD em ferramentas de conformação de chapas. Arquivo extraído da Internet em dezembro de 2010. <http://www.brasimet.com.br/artigos/conformacao.pdf>.

YAN, W.; O'DOWD, N. P.; BUSSO, E. P. Numerical study of sliding wear caused by a loaded pin on a rotating disc, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 50 (2002) pp. 449-470.

YOUNG, D.; JESWIET, J. "Forming Limit Diagrams for Single Point Incremental Forming of aluminum sheet". *IMECHE part B, J. of Engineering Manufacture*. 2002.

ANEXO A

Para caracterizar as propriedades mecânicas do material empregado neste trabalho, segue abaixo documento certificando a chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304L.

Cold Rolled Drawing Quality 304 Stainless Steel

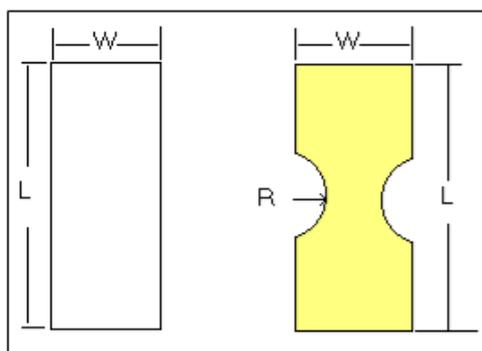
Heat: 641747A 8000B

Longitudinal Mechanical Properties

Thickness		Yield strength		Tensile strength		%El	n value	r value
mm	(in)	MPa	(Ksi)	MPa	(Ksi)	in 50mm		
1.165	0.046	297.6	43.2	801.5	116.2	54.9	0.66	0.92

Element	Cr	Ni	C	Si	Mn	S	N
Percent	18.08	8.01	0.0363	0.42	1.15	0.0021	0.0522

Blank	True	
	Major Strain	Minor Strain
40p	0.52	-0.22
40	0.51	-0.16
60	0.55	-0.22
60p	0.47	-0.09
80	0.44	-0.08
100	0.43	-0.05
120	0.44	-0.04
140p	0.47	-0.06
160p	0.41	-0.02
180p	0.39	0.02
200p	0.40	0.03
200 pvc	0.40	0.30



FLD ₀	41%
------------------	-----

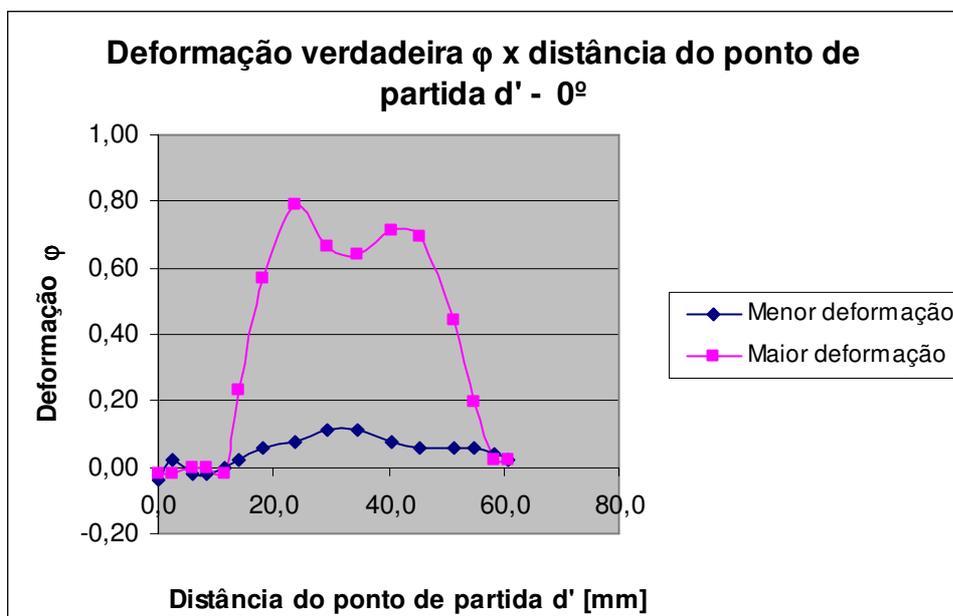
L = 200mm
W = 40 to 200mm

R = 50mm

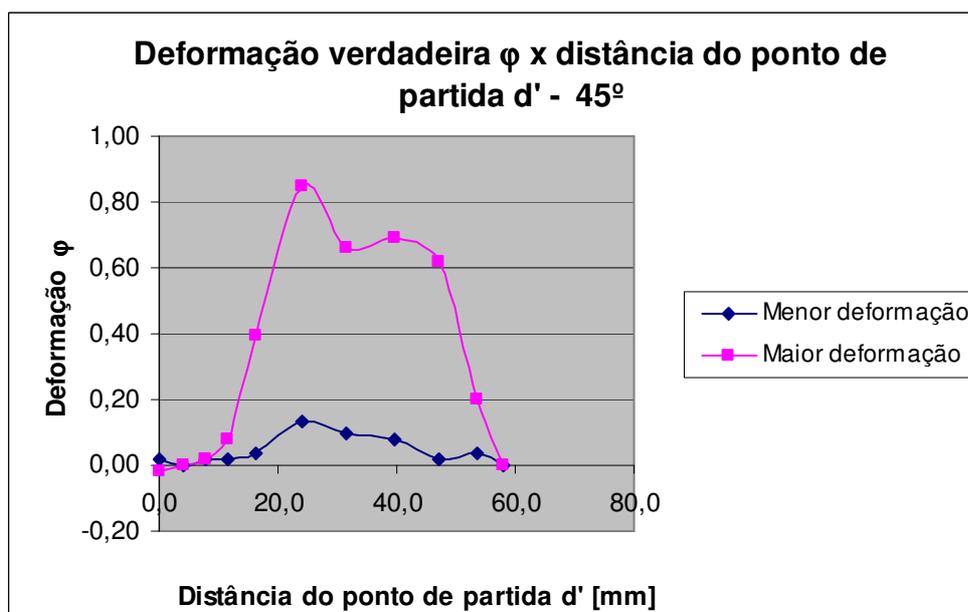
Roberto Bamenga Guida
Engº Metalurgista
Assistente Técnico Aço Inoxidável
Phone (0xx11) 3818-1862 - ACESITA
Celular (0xx11) 8457-2531
rbguida@acesita.com.br

ANEXO B

Deformações verdadeiras no ensaio nº 31, a 0° em relação a direção de laminação.

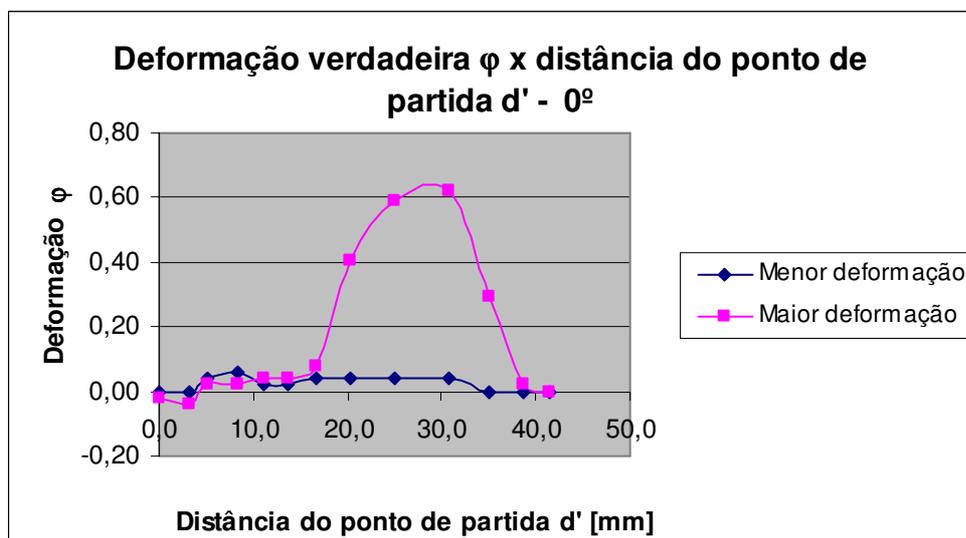


Deformações verdadeiras no ensaio nº 31, a 45° em relação a direção de laminação.

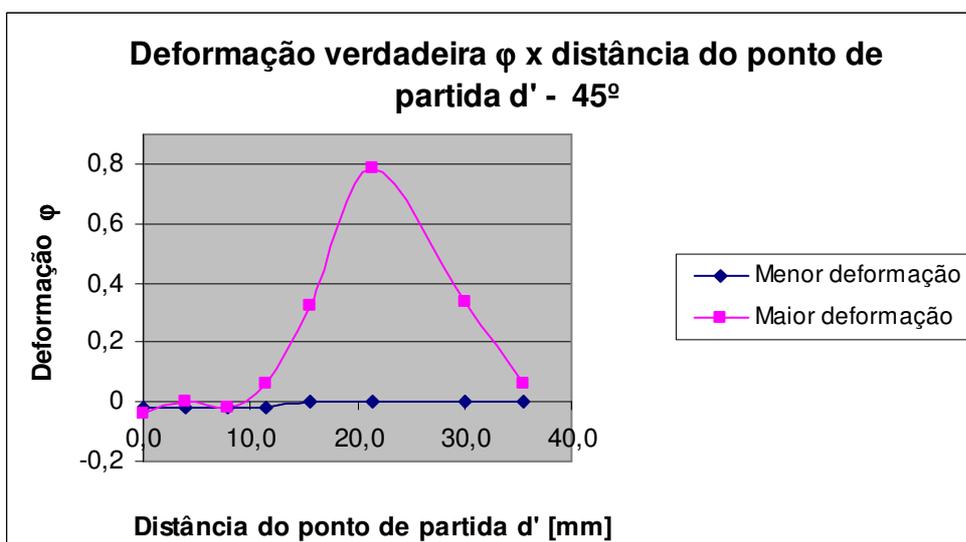


ANEXO C

Deformações verdadeiras no ensaio nº 33, a 0° em relação a direção de laminação.

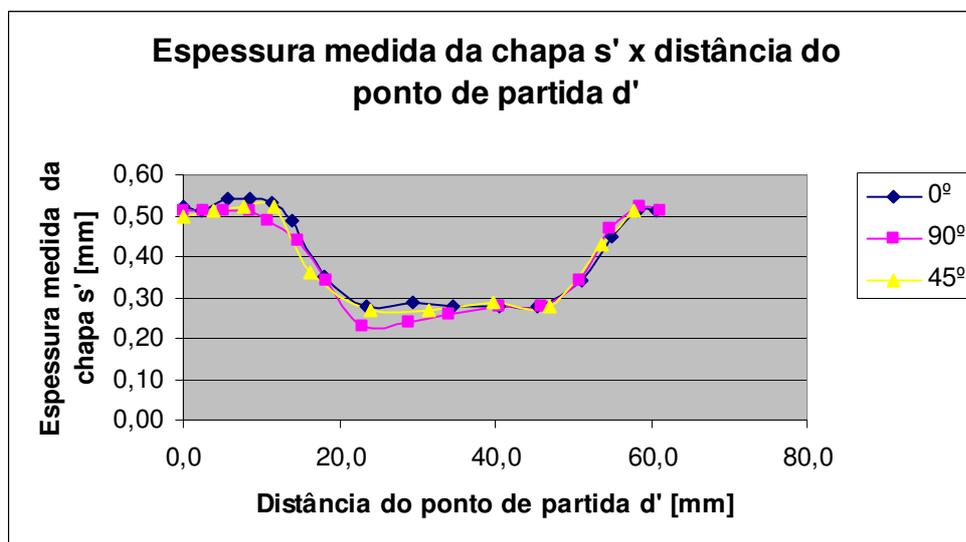


Deformações verdadeiras no ensaio nº 33, a 45° em relação a direção de laminação.



ANEXO D

Redução de espessura no ensaio nº 31.



Redução de espessura no ensaio nº 33.

