

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  
PPGE3M

**Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para  
aplicação em implante craniano**

Jovani Castelan

Tese de doutorado

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  
PPGE3M

**Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para  
aplicação em implante craniano**

Jovani Castelan  
Mestre em Engenharia

Trabalho realizado junto ao Laboratório de Transformação Mecânica do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia

Área de concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre  
2010

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

Orientador: Prof. Dr. Eng. Lírio Schaeffer  
PPGE3M/UFRGS

**Comissão Examinadora:**

Prof. Dr. Eng. Wilson Kindlein Júnior (UFRGS/LdSM)

Prof. Dr. Newton Fuentefria (Complexo Hospitalar Parque Belém-POA/RS e FASURGS)

Prof. Dr. Eng. Janes Landré Jr. (PUC/MG)

**Suplente:**

Prof. Dr. Eng. Márcio Roberto da Rocha (UNESC)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador do PPGE3M

*Dedico este trabalho ao altruísmo, cooperação e comprometimento de todos os envolvidos.*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Lírio Schaeffer pela atenção dispensada, pelas valiosas informações técnicas e metodológicas repassadas, pelo otimismo demonstrado pelo tema e por ser diretamente o maior responsável pela minha qualificação profissional.

Ao colega Anderson Daleffe, pelo suporte técnico e disponibilidade para fabricação dos dispositivos e ferramentas utilizadas nesse trabalho e pela discussão de alternativas para melhorias nos experimentos práticos.

Ao colega Alexandre Milanez, pela sua inestimável colaboração, persistência, paciência e apoio técnico à realização dos ensaios de microdureza e metalografia do material.

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

Aos colegas Daniel Fritzen, Fábio Peruch e Luiz Carlos Cavaler, que me auxiliaram na pesquisa científica e na preparação dos materiais para análise.

Aos colegas Cletson e Valter do LAMETRO, pela prestação de serviços e disponibilidade dos aparelhos de medição de precisão.

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

À minha família, Daniela e Gabriel, pela paciência e compreensão das seguidas ausências de nosso convívio, necessárias à conclusão deste trabalho.

A Deus.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	5
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS .....	13
LISTA DE SÍMBOLOS.....	14
LISTA DE ABREVIATURAS .....	16
INTRODUÇÃO .....	19
1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
1.1 Descrição do Processo .....	21
1.2 Vantagens e Desvantagens da Estampagem Incremental.....	22
1.3 Aplicações médicas da estampagem incremental.....	25
1.3.1 Órteses e Próteses .....	26
1.3.2 Traumatismos cranianos.....	26
1.4 Tipos de Estampagem Incremental.....	28
1.4.1 Estampagem incremental de ponto simples .....	28
1.4.2 Estampagem Incremental com dois pontos de apoio .....	29
1.4.3 Estampagem Incremental em múltiplos passes.....	32
1.5 Estratégias de estampagem.....	35
1.5.1 Estratégias paralelas / radiais.....	35
1.5.2 Paralela / espiral .....	38
1.6 Ângulo de inclinação .....	40
1.6.1 Estampagem de pirâmide e cone truncados.....	41
1.6.2 Estampagem de geometria profunda.....	42
1.6.3 Estampagem do titânio comercialmente puro com variação angular contínua .....	45
1.7 Influência do passo vertical e avanço na rugosidade .....	49
1.8 Parâmetros de estampagem .....	50
1.8.1 Velocidade de Avanço .....	51
1.8.2 Profundidade do passe vertical.....	51
1.8.3 Rotação da Ferramenta .....	53
1.8.4 Tipo de Ferramenta .....	53

1.8.5	Tipo de estratégia .....	53
2	REVISÃO DE LITERATURA SOBRE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS DE TITÂNIO .....	54
2.1	Micrografia.....	54
2.2	Curva tensão – deformação de engenharia .....	55
2.3	Curva de escoamento .....	56
2.4	Curva limite conformação.....	57
2.5	Propriedades físico-químicas .....	59
2.6	Características biomecânicas.....	60
3	CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA UTILIZADA NOS TESTES .....	62
3.1	Ensaio de tração da matéria prima.....	62
3.2	Índice de anisotropia .....	70
3.3	Microdureza.....	71
3.4	Metalografia.....	72
3.5	Rugosidade .....	73
3.6	Deformações .....	74
4	ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	76
4.1	Objetivo geral dos testes de estampagem incremental .....	76
4.2	Descrição dos testes .....	76
4.3	Metodologia.....	76
4.4	Recursos e equipamentos utilizados.....	78
4.4.1	Ferramentas .....	78
4.4.2	Máquina CNC .....	78
4.4.3	Software CAM.....	79
4.4.4	Dispositivo para estampagem negativa .....	79
4.4.5	Equipamentos de medição .....	80
4.5	Testes preliminares em escala reduzida .....	80
4.5.1	Estampagem incremental de chapa Al 1050 .....	81
4.5.2	Geração do arquivo CAD 3D .....	82
4.5.3	Programação da trajetória de ferramenta no software CAM.....	83
4.5.4	Usinagem do molde e conformação da chapa.....	87
4.5.5	Estampagem incremental do titânio comercialmente puro (Titânio CP) .....	88
4.5.6	Lubrificação .....	89

4.5.7	Resultados dos testes preliminares .....	90
4.5.8	Conclusões relacionadas aos testes preliminares .....	92
4.6	Testes variando o passe vertical, velocidade de avanço e suporte inferior..	93
4.6.1	Objetivos dos testes .....	94
4.6.2	Parâmetros fixos.....	94
4.6.3	Parâmetros variados.....	94
4.6.4	Usinagem dos suportes inferiores .....	96
4.6.5	Geometria.....	99
4.6.6	Exame de visioplasticidade.....	100
4.6.7	Cálculo da força de conformação .....	102
5	RESULTADOS.....	104
5.1	Deformações verdadeiras .....	104
5.2	Distribuição de espessura .....	105
5.3	Conformidade geométrica .....	107
5.4	Cálculo da força de conformação.....	107
6	CONCLUSÕES .....	108
7	PESQUISAS FUTURAS.....	110
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	111
	ANEXOS .....	117

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Aplicações da estampagem incremental: .....	20
Figura 1.2. Representação esquemática da estampagem incremental (Martins, et al. 2008) .....	21
Figura 1.3. Comparativo de custos de fabricação de implantes (Lajarin, 2008) .....	23
Figura 1.4. Tempo gasto na manufatura de implantes .....	24
Figura 1.5. Divisão anatômica das partes constituintes da caixa craniana (Eufinger, et al. 2005) .....	27
Figura 1.6. Traumatismo craniano severo .....	27
Figura 1.7. Modalidades de estampagem incremental. Adaptado de Allwood, Bramley, et al. (2005) .....	28
Figura 1.8. SPIF - Estampagem incremental de ponto simples (sem apoio inferior). 29	
Figura 1.9. Estampagem incremental de ponto duplo (suporte inferior semi-específico) .....	30
Figura 1.10. Estampagem incremental de ponto duplo e suporte inferior específico	30
Figura 1.11. TPIF com suporte assimétrico de configuração positiva .....	31
Figura 1.12. TPIF com suporte assimétrico de configuração negativa .....	31
Figura 1.13. Estampagem em múltiplos passes e o efeito do encruamento. ....	32
Figura 1.14. Variação da espessura da base do cone essampado (Duflou, et al. 2008). .....	33
Figura 1.15. Vaso de pressão essampado em múltiplos passes de .....	34
Figura 1.16. Estratégias diferenciadas de estampagem incremental (Bambach, et al. 2003) .....	36
Figura 1.17. Variações da espessura da peça estampada (Bambach, et al. 2003) ..	37
Figura 1.18. Vista superior das peças estampadas segundo .....	37
Figura 1.19. Estratégias de estampagem (Rauch, Y., et al. 2009) .....	38
Figura 1.20. Pontos para medição de erro dimensional (Rauch, Y., et al. 2009) .....	40
Figura 1.21. Trajetórias de ferramenta utilizadas: paralela de contorno, com incremento constante (Minutolo, et al. 2007) .....	41
Figura 1.22. Zonas de fratura da pirâmide e cone (Minutolo, et al. 2007) .....	42
Figura 1.23. Dados da geometria do tronco de cone (Ambrogio, Filice e Manco, 2008) .....	43

Figura 1.24. Comparação experimental para $\alpha_1 = 60^\circ$ .....	44
Figura 1.25. Comparação experimental para $\alpha_1 = 70^\circ$ .....	44
Figura 1.26. Comparação experimental para $\alpha_1 = 75^\circ$ .....	45
Figura 1.27. Variação do ângulo de parede, determinado pelo raio (R) (Hussain, et al 2008) .....	46
Figura 1.28. Relação entre profundidade de estampagem e diminuição de espessura de parede .....	47
Figura 1.29. Influência do passo vertical, avanço e diâmetro da ferramenta.....	48
Figura 1.30. Aumento da rugosidade em função do avanço .....	49
Figura 1.31. Aumento da rugosidade em função do passe vertical.....	49
Figura 1.32. Controle do incremento do passe; a) passe com $\Delta z$ constante; b) passe variável, mantendo a mesma distância entre os pontos de contato com a chapa.....	52
Figura 1.33. Estratégia “Constant Cusp Finishing” sendo aplicada no acabamento após o desbaste. (Bambach, et al. 2003) .....	52
Figura 2.1. Micrografia óptica da superfície do Titânio comercialmente puro (99%) laminado, com grãos $\alpha$ – aumento de 200x; .....	55
Figura 2.2. Curva tensão-deformação do titânio comercialmente puro (Ti-CP) grau 2 .....	55
Figura 2.3. Curva de escoamento do Titânio CP (Moosruggger 2007) .....	56
Figura 2.4. Curva Curva de escoamento do Titânio CP em escala logarítmica .....	56
Figura 2.5. Curva limite-conformação do Titânio CP (Chen e Chiu 2005).....	57
Figura 2.6. Curvas Limite Conformação na estampagem convencional e incremental .....	58
Figura 2.7. Tipos de deformação de chapa metálica (Schaeffer, L. 2004) .....	58
Figura 2.8. Influência dos elementos residuais do Ti-CP na resistência à tração .....	60
Figura 2.9. Estrutura cristalina do titânio: a) hexagonal compacta na temperatura ambiente; b) cúbica de corpo centrado na temperatura de transformação alfa-beta .	61
Figura 3.1. Dimensões padronizadas do corpo de prova .....	62
Figura 3.2. Curva convencional $\sigma X \epsilon$ do Ti-CP grau 2 - CP retirado a paralelamente em relação ao sentido de laminação.....	63
Figura 3.3. Curva convencional $\tau X \epsilon$ do Ti-CP - CP retirado a $45^\circ$ em relação ao sentido de laminação.....	63
Figura 3.4. Curva convencional $\tau X \epsilon$ do Ti-CP grau 2 - CP retirado ortogonalmente em relação ao sentido de laminação.....	64

Figura 3.5. Fratura dútil da chapa (sentido de laminação paralelo ao corpo de prova), caracterizada pelo ângulo de ruptura (aprox. 45°) e pela estrição visível.....	64
Figura 3.6. Dimensões do corpo de prova antes e depois do ensaio de tração. ....	65
Figura 3.7. Curva de escoamento do Titânio CP, grau 2.....	68
Figura 3.8. Curva de escoamento representada com eixos logarítmicos .....	68
Figura 3.9. Curva tensão-deformação de engenharia e curva real .....	69
Figura 3.10. Microscopia óptica do Ti-CP F67 G2. a) antes da estampagem; b) depois da estampagem. Aumento de 200x .....	73
Figura 3.11. Tronco de cone essampado para medição das deformações .....	74
Figura 3.12. Gráfico das deformações $\varphi_1$ e $\varphi_2$ para geometria de tronco de cone da figura 3.11 .....	75
Figura 4.1. Trajetórias de usinagem e de estampagem. ....	77
Figura 4.2. Ferramenta de estampar utilizada nos testes.....	78
Figura 4.3. a)polímero utilizado como suporte inferior; b)placa prensa-chapas. ....	80
Figura 4.4. Etapas de estampagem de prótese craniana. ....	82
Figura 4.5. Imagens JPG (pictoriais) de tomografia axial, lateral e coronal e o modelo vetorial 3D gerado .....	82
Figura 4.6. Editando a superfície em software CAD.....	83
Figura 4.7. Programando o caminho de ferramenta no software EdgeCAM .....	84
Figura 4.8. Ajuste da altura da ferramenta à usinagem do polímero e estampagem da chapa.....	85
Figura 4.9. Tela de configuração e simulação de programação do EdgeCAM.....	87
Figura 4.10. Estampagem da chapa de alumínio, utilizando o .....	88
Figura 4.11. Lubrificação no processo de estampagem incremental .....	90
Figura 4.12. Resultados dos testes preliminares.....	91
Figura 4.13. Resultados do teste No. 3 .....	92
Figura 4.14. Tipos de suporte: a) suporte inferior positivo; b) suporte inferior negativo .....	95
Figura 4.15. Recursos utilizados para os procedimentos experimentais.....	96
Figura 4.16. Projeto do dispositivo para estampagem com supote positivo .....	97
Figura 4.17. Suporte positivo montado na mesa CNC .....	98
Figura 4.18. Dados geométricos da chapa utilizados nos testes principais.....	99
Figura 4.19. Gravação dos círculos para exame de visioplasticidade .....	100

Figura 4.20. Direção das deformações verdadeiras no exame de visioplasticidade .....	101
Figura 4.21. Uma das peças-teste utilizadas, já com a aplicação dos círculos. ....	102
Figura 4.22. Ângulos de contato entre ferramenta e chapa.....	103
Figura 5.1. Região de medição das maiores e menores deformações ( $\varphi_1$ e $\varphi_2$ ) ...	105
Figura 5.2. Gráficos $\varphi_1 \times \varphi_2$ para geometria de calota.....	105
Figura 5.3. Distribuição da espessura ao longo dos raios de medição .....	106
Figura 5.4. Comparação dimensional entre o modelo CAD e a peça estampada No. 10 .....	107

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1.1. Parametrização e resultados do experimento (Hagan, E., Jeswiet, J. 2004) .....	40
Tabela 1.2. Valores utilizados nos ensaios (Hussain, Gao e Zhang, 2008) .....	47
Tabela 2.1. Propriedades físico-químicas do titânio comercialmente puro – grau 2 (Grandini, Almeida e Pintão 2006) .....	59
Tabela 2.2. Propriedades químicas do Ti-CP F67 G2 (Realum Comércio de Metais s.d.) .....	59
Tabela 3.1. Propriedades mecânicas obtidas a partir do Ti-CP grau 2 ensaiado .....	69
Tabela 3.2. Valores de rugosidade das chapas estampadas .....	74
Tabela 4.1. Características técnicas da máquina CNC utilizada nos testes .....	79
Tabela 4.2. Resumo das etapas de fabricação dos protótipos .....	81
Tabela 4.3. Dados de usinagem do molde e estampagem da chapa nos dois primeiros testes .....	88
Tabela 4.4. Dados de estampagem da chapa de titânio – teste preliminar No. 03 ...	89
Tabela 4.5. Objetivos, resultados e conclusões dos testes preliminares .....	92
Tabela 4.6. Combinações de parâmetros de estampagem utilizadas nos testes .....	98

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado	Unidade
$b$	Largura final do corpo de prova no ensaio de tração	mm
$b_0$	Largura inicial do corpo de prova no ensaio de tração	mm
$E$	Módulo de elasticidade	GPa
$F_v$	Força vertical de estampagem	N
$F_h$	Força horizontal de estampagem	N
$h_e$	Altura da ferramenta de estampagem	mm
$h_p$	Distância vertical de $y_1$ até $y_p$	mm
$h_u$	Altura da ferramenta de usinagem	mm
$kf_{\max}$	Tensão verdadeira correspondente a tensão máxima	N/mm <sup>2</sup>
$l$	Comprimento final do corpo de prova no ensaio de tração	mm
$l_0$	Comprimento inicial do corpo de prova no ensaio de tração	mm
$R$	Raio da geratriz	mm
$r$	Índice de anisotropia	(-)
$r_m$	Índice de anisotropia média	(-)
$R_z$	Parâmetro de rugosidade	$\mu\text{m}$
$R_m$	Rugosidade média	$\mu\text{m}$
$s$	Espessura em um ponto arbitrário da chapa	mm
$s_0$	Espessura inicial da chapa	mm
$s_f$	Espessura final da chapa	mm
$V_c$	Velocidade de corte	mm/min
$x$	Medida da maior deformação no sentido 1	mm
$y$	Medida da menor deformação no sentido 2	mm
$y_p$	Coordenada Y do ponto 'P' arbitrário sobre a geratriz de raio R	mm
$y_1$	Coordenada Y inicial do ponto $P_1$ da geratriz de raio R	mm

## SÍMBOLOS GREGOS

$\sigma$	Tensão	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_B$	Tensão máxima	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_R$	Tensão de ruptura	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_E$	Tensão de Escoamento (convencional)	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon$	Deformação relativa	%
$\varepsilon_B$	Deformação relativa correspondente à tensão máxima	%
$\varepsilon_l$	Deformação relativa no comprimento	%
$\varphi$	Deformação verdadeira	(-)
$\varphi_1$	Deformação verdadeira no sentido 1 na superfície da chapa	(-)
$\varphi_2$	Deformação verdadeira no sentido 2 na superfície da chapa	(-)
$\varphi_3$	Deformação verdadeira na espessura	(-)
$\varphi_{\max}$	Deformação verdadeira correspondente à tensão máxima	(-)
$\varphi_b$	Deformação verdadeira na largura	(-)
$\varphi_l$	Deformação verdadeira no comprimento	(-)
$\varepsilon_f$	Deformação relativa final (ruptura)	%
$\psi$	Ângulo de inclinação de parede da chapa	graus
$\beta$	Ângulo de contacto entre ferramenta e chapa	graus
$\psi_o$	Ângulo inicial de inclinação de parede da chapa	graus
$\psi_f$	Ângulo final de inclinação de parede da chapa	graus
$\theta$	Complemento do ângulo final da parede da chapa	graus
$\sigma_p$	Limite de proporcionalidade	N/mm <sup>2</sup>
$\delta$	Alongamento	%
$\Delta_z$	Profundidade do passe vertical	mm

**LISTA DE ABREVIATURAS**

EI	Estampagem Incremental
ISF	Incremental Sheet Forming
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numeric Command
Ti-CP	Titânio Comercialmente Puro
TPIF	Two Points Incremental Forming
SPIF	Single Points Incremental Forming
AISF	Asymetric Incremental Sheet Forming
KISF	Kinematic Incremental Sheet Forming
CLC	Curva Limite de Conformação
TC	Tomografia Computadorizada
JPG	Extensão de Arquivo Pictorial
PU	Poliuretano Rígido de Alta Densidade
ASTM	American Society for Testing and Materials
CP	Corpo de Prova
Ti-CP	Titânio comercialmente puro
HSS	Aço Rápido ( <i>High Speed Steel</i> )
RPM	Rotações Por Minuto

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o uso do processo de estampagem incremental empregando chapas de titânio comercialmente puro. O modelo do componente empregado como foco do trabalho foi um implante craniano a base de titânio. Este tipo de implante é usado, por exemplo, em casos de acidentes em que a camada óssea do crânio foi perdida. Com auxílio de um sistema computacional CAD (Computer Aided Design), foi desenvolvido um modelo 3D, a partir de imagens de tomografia computadorizada. Foram determinadas as características mecânicas e biomédicas das chapas de titânio F67 - grau 2 e, através de software CAM, foi possível gerar as trajetórias de ferramenta, utilizadas na usinagem do molde e na estampagem da chapa. Os testes práticos demonstraram que a estampagem incremental proporcionou maiores deformações do que a estampagem convencional e qual a estratégia de usinagem que proporcionou a maior homogeneidade na distribuição de espessura e conformidade dimensional das chapas estampadas.

**Palavras-chave:** estampagem incremental, projeto auxiliado por computador, manufatura auxiliada por computador, implante craniano, chapa de titânio, estratégias de ferramenta.

## ABSTRACT

This work present a research about the incremental sheet forming process, using commercially pure titanium sheets. The model of component used like focus on work was a titanium cranial implant. This kind of implant is used, e.g., in cases of accidents where skull bone was lost. With aided of a CAD computacional system (Computer Aided Design), was development a 3D model, with images of computadorized tomography. It was determined the mechanical and biomedical properties of the F67 grade 2 titanium sheet and, through CAM software, it was possible development the tool path, used in the milling mold and sheet forming. The pratical tests showed the incremental forming provided greater than convencional forming and which the tool movement strategy that provided better homogeneity in the thickness distribution and dimensional conformity of the forming sheets.

**Keywords:** incremental sheet forming, Computer Aided Design, Computer Aided Manufacturing cranial implant, titanium sheet, tool strategy.

## INTRODUÇÃO

Dentre todos os processos de fabricação, a conformação mecânica tem um papel de grande importância, já que é uma forma de produzir peças com excelentes propriedades mecânicas com uma perda mínima de material (Schaeffer, L. 1995). Referindo-se especificamente a processos de manufatura de chapa metálica, Hussain *et al* (2009), Dejardin *et al* (2010) e Jeswiet (2004) destacam que a estampagem incremental, além da importância referida, proporciona outras vantagens como: a) a possibilidade de utilizar a mesma ferramenta para a fabricação de perfis de formatos variados; b) a ampliação da característica de conformabilidade das chapas e c) a viabilidade para produção de pequenos lotes de peças, peças unitárias e protótipos.

O objetivo dessa tese é demonstrar a viabilidade técnica da Estampagem Incremental para a fabricação de próteses internas (implantes cranianos) em chapa de titânio utilizando a modalidade com dois pontos de apoio, esclarecida no capítulo 1.

A importância deste estudo é justificada pela sua contribuição social, já que procura melhorar a qualidade de vida de acidentados com traumatismo craniano, considerando: a) a redução dos custos de produção; b) a redução do tempo de cirurgia, com o implante sendo fabricado antes e não durante a cirurgia; c) a redução da morbidade do paciente, por não haver necessidade de outra cirurgia adicional para retirada do enxerto de outra área doadora e d) o aumento da eficácia estético-funcional dos implantes.

A metodologia de desenvolvimento da tese foi dividida em cinco etapas principais: a) apresentação do estado atual do conhecimento na área de estampagem incremental e de materiais biocompatíveis para implantes; b) apresentação dos fundamentos teóricos que descrevem o processo de deformação plástica dos materiais na estampagem; c) caracterização do material; d) experimentos práticos, com variação das estratégias de movimentação e velocidade de avanço da ferramenta e e) avaliação dos resultados, realizando a comparação dimensional entre o modelo digital e físico do implante e a medição da distribuição da espessura da chapa.

## 1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Estampagem Incremental de chapas metálicas (EI), é um processo de conformação mecânica que utiliza ferramentas genéricas de baixo custo e que possibilita a manufatura de peças de chapa de diversas geometrias. Para realizar a estampagem, pode-se utilizar equipamentos CNC específicos ou adaptando máquinas-ferramenta de usinagem. O processo de estampagem incremental foi descrito e patenteado por Leszak (1960) e Roux (1967), quando a tecnologia CNC ainda era incipiente. A partir dos anos 1990, foi amplamente pesquisada e desenvolvida (Martins, et al. 2008), (Hirt, et al. 2004) e (Shim e Park 2001). Algumas aplicações de sucesso incluem (Allwood, et al 2004):

- Peças-protótipos em geral, para verificações de projeto ou produção de pequenos lotes;
- peças automotivas (paralama, capô, suporte de farol e peças de chapa para protótipos, como por exemplo, veículos de competição);
- peças aeroespaciais (caixas e carenagens);
- peças para embarcações (chapas para o casco).

Além dessas, importantes aplicações da estampagem incremental, seu uso foi estendido à área médica, onde são produzidas próteses, órteses e implantes, tais como suportes de tornozelo, suportes de bacia e implantes cranianos. A Figura 1.1a mostra um exemplo dessa aplicação. Outros exemplos do processo de Estampagem Incremental podem ainda ser vistos na Figura 1.1b e Figura 1.1c.



Figura 1.1. Aplicações da estampagem incremental:  
a) implante craniano (Bazan 2004), b) fogão solar e c) protótipo de coletor de admissão (Jeswiet 2004)

Como a estampagem incremental é uma tecnologia recente, em relação aos processos tradicionais de estampagem, as fontes literárias sobre estampagem incremental baseiam-se principalmente em artigos técnico-científicos. São apresentadas a descrição dos processos, suas variações, vantagens e desvantagens e as aplicações específicas para a área médica.

### 1.1 Descrição do Processo

Na estampagem incremental, a ferramenta de perfil genérico (haste cilíndrica ou cilindro-cônica e ponta esférica ou semi-esférica) produz uma deformação plástica, localizada em uma pequena região da chapa. Essa região muda de acordo com a movimentação da ferramenta sobre a chapa (Emmens e Van Den Boogaard 2009). Dessa forma, a deformação ocorre de maneira progressiva, aumentando a conformabilidade da chapa, quando comparada com os processos convencionais de estampagem (Martins, et al. 2008). A Figura 1.2 apresenta a chapa, fixada em sua região externa e sendo deformada por uma ferramenta semi-esférica, na extremidade de contato com a chapa.

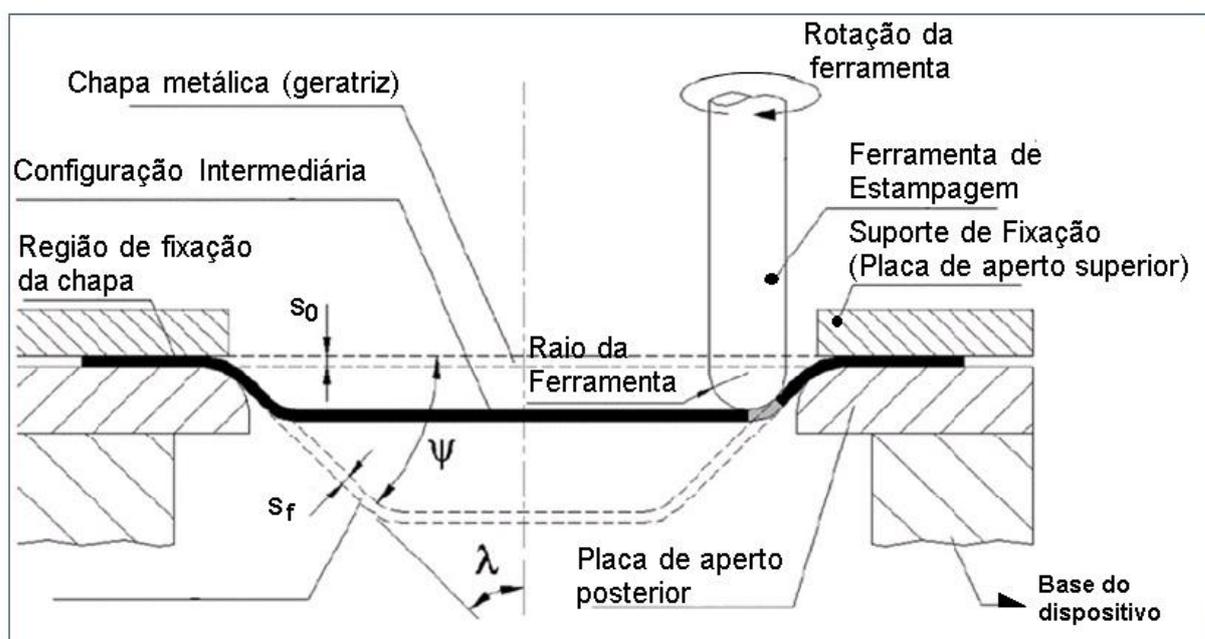


Figura 1.2. Representação esquemática da estampagem incremental (Martins, et al. 2008)

## 1.2 Vantagens e Desvantagens da Estampagem Incremental

A estampagem incremental apresenta como vantagens técnicas e econômicas (Micari, Ambrogio e Filice 2007) e (Jeswiet, Micari, et al. 2005):

- a) redução do tempo de setup<sup>1</sup>;
- b) flexibilidade;
- c) incremento da característica de conformabilidade;
- d) dispensa o uso de ferramentas especializadas;
- e) máquinas CNC convencionais (centros de usinagem 3 eixos);
- f) possibilidade de estampagem de peças de dimensões variadas;
- g) acabamento superficial pode ser melhorado com o uso de lubrificantes;
- h) operação é livre de ruídos intensos;
- i) o processo proporciona a manufatura de uma variedade de formas irregulares e assimétricas, como por exemplo produtos médicos altamente customizados (Hussain, G.; Gao, L.; Zhang, Z. Y. 2008).

A redução do tempo de preparação de máquina ou *setup* é alcançada já que para diferentes peças é possível utilizar as mesmas ferramentas, o mesmo dispositivo prensa-chapas e os mesmos zcamentos dos sistemas de coordenadas. A flexibilidade vem com a parametrização do processo, onde uma alteração na geometria do modelo CAD da peça reflete, imediatamente, na programação CAM e, conseqüentemente, nos códigos “G” que irão comandar o equipamento CNC, responsável pelo deslocamento da ferramenta sobre a chapa.

O tamanho da peça estampada é limitado pelas dimensões e não pela capacidade (potência) da máquina, uma vez que as forças de estampagem não aumentam de acordo com as dimensões da peça, devido a pequena e constante área da zona de contato, provocada pelo passo incremental da ferramenta.

---

<sup>1</sup> Setup: tempo de preparação. São as tarefas necessárias e relativas às atividades de preparação do equipamento, desde o momento em que se tenha completado a última peça boa do lote anterior e até o momento em que se tenha feito a primeira peça boa do lote posterior.

A maior conformabilidade foi observada em peças geradas através da ISF, atingindo profundidades maiores do que as peças obtidas por processos convencionais. As pequenas zonas de deformação plástica e a natureza incremental do processo contribuem para o aumento dessa propriedade, facilitando a deformação (Jeswiet, Micari, et al. 2005).

O implante fabricado por estampagem incremental tem um baixo custo e menor tempo de produção, sobretudo quando comparados com implantes usinados. A Figura 1.3 mostra a relação entre três processos diferentes:

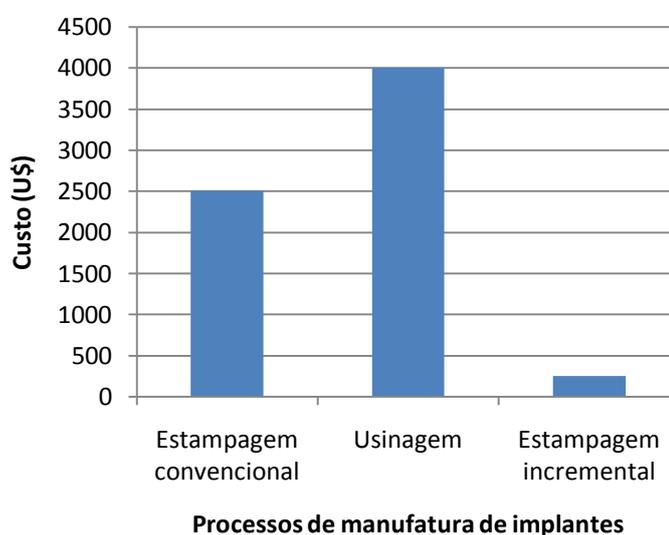


Figura 1.3. Comparativo de custos de fabricação de implantes (Lajarin, 2008)

Os dados de custos de usinagem apresentados na Figura 1.3 foram obtidos a partir de Eufinger e Saylor, (2001) *apud* Lajarin (2008) e incluem: ferramentas de usinagem (fresas de topo e tipo *ball nose*), material do implante (barra de titânio) e o custo hora-máquina do centro de usinagem. O dado de custo de estampagem convencional foi obtido em uma empresa local e inclui o custo de usinagem (ferramental e hora-máquina), o material do molde e o custo utilização da prensa. Os dados de custo da estampagem incremental foram obtidos no próprio desenvolvimento experimental da tese e consideram o custo do apoio inferior (polímero), ferramentas de usinagem e estampagem e dispositivo prensa-chapas.

(Lajarin 2008)

Com relação ao tempo de execução, a estampagem incremental fica em uma posição intermediária entre os outros dois processos de fabricação, conforme a Figura 1.4

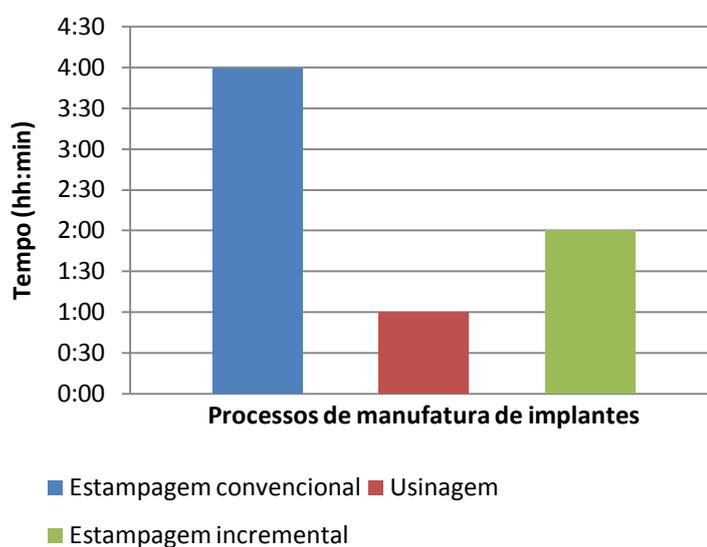


Figura 1.4. Tempo gasto na manufatura de implantes  
 Dados de estampagem convencional e usinagem obtidos em Lajarin ( 2008); dado de estampagem incremental obtido a partir dos testes preliminares

Por outro lado, o processo apresenta as seguintes desvantagens (Micari, Ambrogio e Filice 2007):

- a) tempo muito alto para estampar a peça, limitando sua viabilidade comercial a pequenos lotes (maior desvantagem);
- b) baixa conformidade dimensional e geométrica entre a peça estampada e o modelo CAD, devido ao retorno elástico e ao acúmulo de tensões residuais que acabam deformando a chapa, embora existam algoritmos em desenvolvimento para compensar este problema;
- c) ângulos de parede próximos a 90° necessitam de várias etapas intermediárias de estampagem;
- d) dependendo da geometria produzida, as regiões externas da chapa que não sofrem a ação do punção se deformam após o relaxamento dos fixadores (devido ao acúmulo de tensões residuais), causando discrepâncias dimensionais (Ambrogio, et al. 2005).

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

### 1.3 Aplicações médicas da estampagem incremental

De acordo com as características técnicas apresentadas, fica evidente que a estampagem incremental se aplica principalmente a pequenos lotes, peças especiais, protótipos e produtos personalizados. Sendo assim, a ISF se torna uma área importante para a medicina ortopédica<sup>1</sup>, já que as diferenças antropométricas<sup>2</sup> entre os indivíduos são naturais e cada um necessita de um produto com características próprias, melhorando seu desempenho e sua usabilidade (Ambrogio, et al. 2005), (Lesic e Bumbasirevic 2004).

Cerca de dois milhões de pessoas são internadas por ano no Brasil, em hospitais da rede pública, vítimas de traumatismos em geral. Dessas, quinhentas mil requerem hospitalização devido a traumatismo craniano-cerebral, sendo que mais da metade destes casos são devidos a acidentes automobilísticos, 21% referente a quedas, 12% em conflitos interpessoais (assaltos, brigas ou agressões) e 10% em esportes e recreações (Bazan 2004).

Segundo a ABIMO (2008), o mercado nacional de produtos e equipamentos médicos implantados ortopédicos está estimado em US\$ US\$ 4,5 bilhões; desse total, os materiais de O.P.M.E – Órteses, Próteses e Materiais Especiais – utilizados em intervenções médicas, representam até 80% da conta hospitalar (Sicoli e Mrad 2010).

---

1 Ortopedia: é a especialidade médica que se ocupa da prevenção e correção de deformidades do corpo humano.

2 Antropometria: processo ou técnica de mensuração do corpo humano ou de suas várias partes.

### 1.3.1 Órteses e Próteses

A utilização de órteses<sup>1</sup>, também designadas por suportes ortopédicos, pode servir tanto para prevenção quanto para recuperação funcional das articulações. Como exemplo de tratamentos preventivos, temos a utilização de botas ortopédicas, cuja função é ressabelecer o alinhamento normal das partes ósseas e ligamentos que compõe os pés, tornozelos e joelhos. Acessórios como talas e suportes podem ser utilizados para imobilização total ou parcial de um membro que necessita recuperar sua função, sem causar dor.

As órteses, portanto, tem utilização temporária, são fixadas externamente e não substituem partes do corpo. Já as próteses<sup>2</sup> são peças permanentes, podem ser externas ou internas e são utilizadas para substituir partes do corpo perdidas por amputações de membros (mãos, braços e pernas) ou destruição de partes ósseas do crânio, complicações que ocorrem com freqüência em acidentes de trânsito.

Tanto em um caso como em outro, a finalidade da estampagem incremental é gerar peças que se adequem perfeitamente a cada paciente, considerando as diferenças antropométricas entre os indivíduos. Além disso, o processo de manufatura da órtese ou prótese deve ser rápido e ter baixos custos, devido à urgência do problema médico e para possibilitar sua aplicação a um maior número de pessoas.

### 1.3.2 Traumatismos cranianos

As perdas cranianas podem ocorrer devido a tumores, infecções e principalmente por fraturas, decorrentes principalmente de acidentes automobilísticos ou atos interpessoais. Quando a área perdida supera 100cm<sup>2</sup> de área, se torna necessária a utilização de implantes, pois a camada óssea perde a capacidade de regeneração e reintegração óssea (Figura 1.6). A maior parte dos implantes (91.2%) estão

---

1 Órtese: refere-se unicamente aos aparelhos ou dispositivos ortopédicos de uso provisório, destinados a alinhar, prevenir ou corrigir deformidades ou melhorar a função das partes móveis do corpo. Exemplo: O aparelho dentário ortodôntico é uma órtese pois corrige a deformidade da arcada dentária (orto = reto, correto)..

2 Prótese: é um componente artificial que tem por finalidade suprir necessidades e funções de indivíduos seqüelados por amputações, traumáticas ou não. Exemplo: A dentadura ou um implante dentário é uma prótese pois substitui o órgão ou sua função (substitui os dentes).

localizados nas regiões neurocranial e temporal, correspondentes às áreas 'G' e 'F' da Figura 1.5 (Eufinger, et al. 2005).

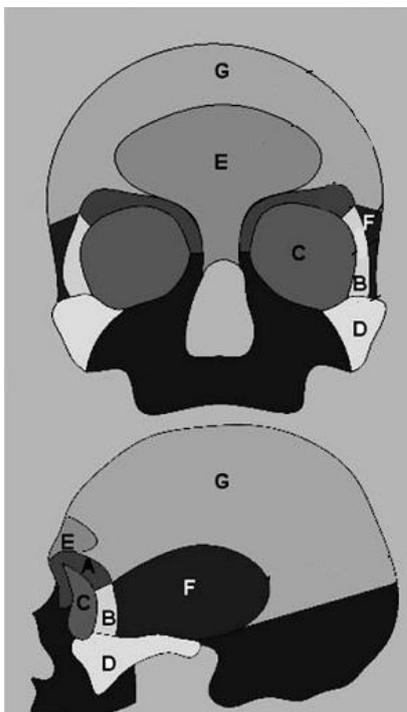


Figura 1.5. Divisão anatômica das partes constituintes da caixa craniana (Eufinger, et al. 2005)

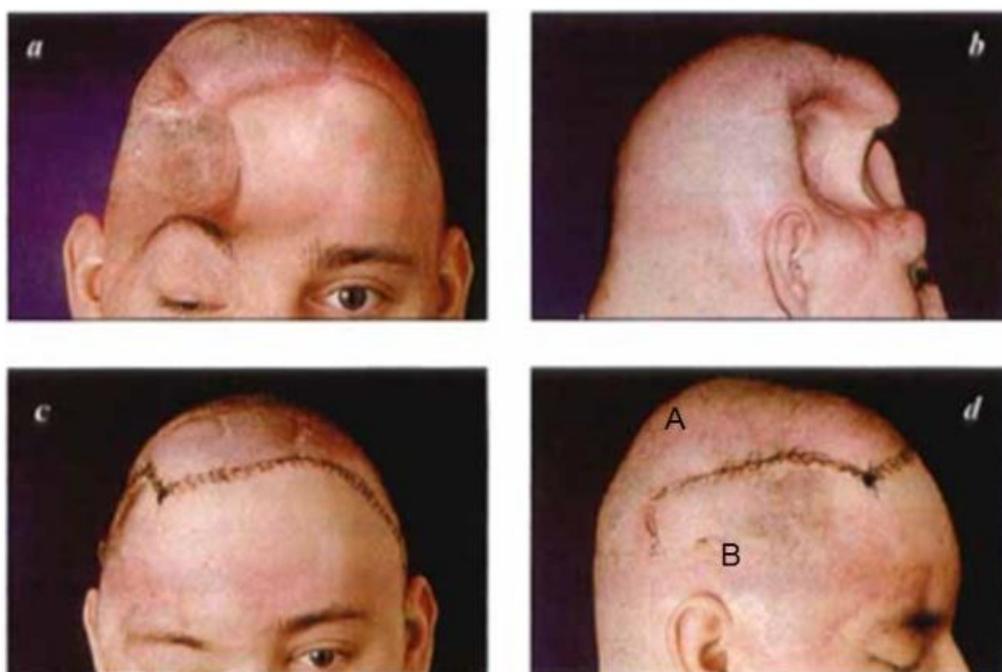


Figura 1.6. Traumatismo craniano severo  
A grande perda de área óssea impede a regeneração e reintegração natural, exigindo o implante.

## 1.4 Tipos de Estampagem Incremental

Existem atualmente 04 modalidades principais de estampagem incremental, cujas características variam em função do número e configuração dos pontos de apoio. A Figura 1.7 mostra desenhos esquemáticos dessas modalidades.

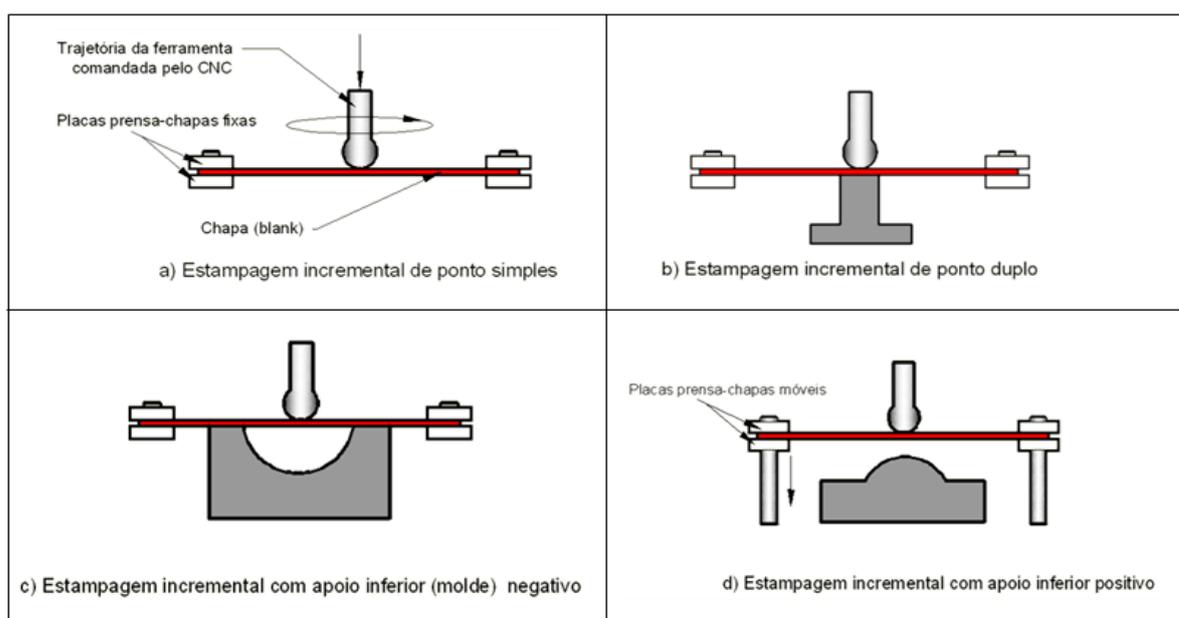


Figura 1.7. Modalidades de estampagem incremental. Adaptado de Allwood, Bramley, et al. (2005)

Além das modalidades apresentadas na Figura 1.7, existem outras que, além do tipo e número de pontos de apoio, se distinguem de acordo com o tipo de máquina que executa a tarefa de estampagem. Bambach (2008) apresentou essas modalidades.

### 1.4.1 Estampagem incremental de ponto simples

A estampagem incremental de ponto simples (ou de ponto único), definida pela sigla em inglês *SPIF - Single-point Incremental Forming*, é realizada com uma ferramenta de ponta esférica, controlada por um equipamento CNC (normalmente centros de usinagem). Como pode ser visto na Figura 1.8, não há ponto de apoio

inferior<sup>1</sup> e o formato da peça final é determinado somente pelo deslocamento da ferramenta. A chapa é fixada em suportes laterais que mantêm altura constante em relação à base. A ferramenta se desloca nos 3 eixos (X, Y e Z) realizando a deformação.

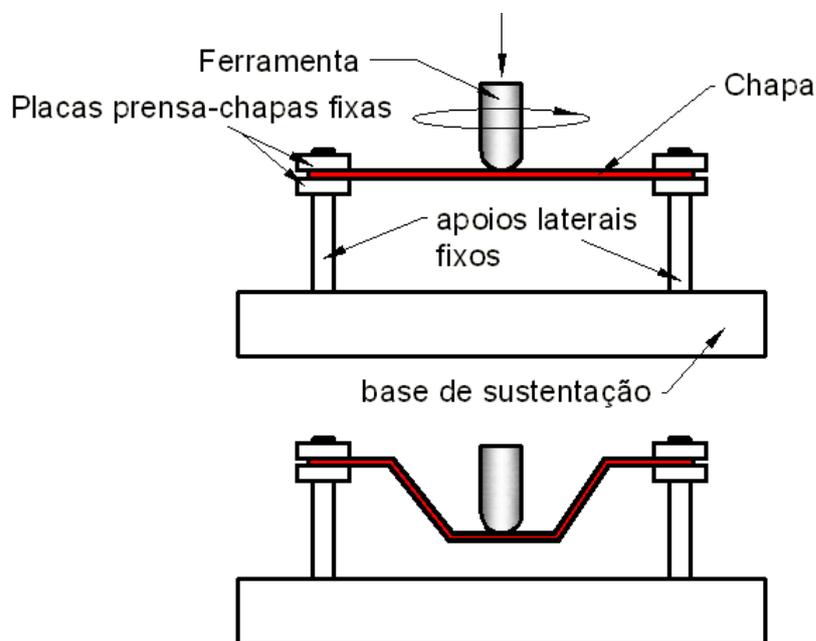


Figura 1.8. SPIF - Estampagem incremental de ponto simples (sem apoio inferior)

#### 1.4.2 Estampagem Incremental com dois pontos de apoio

A estampagem incremental de dois pontos de apoio, também designada pela sigla inglesa *TPIF – Two Points Incremental Forming*, utiliza, além da ferramenta de conformação, um suporte inferior rígido, localizado sob a chapa. Este suporte (que pode ser específico ou semi-específico<sup>2</sup>), é utilizado para expandir as possibilidades geométricas e também melhorar a acuidade das peças, ou seja, a correspondência entre peça virtual e peça real. A utilização do suporte inferior é particularmente importante para geometrias orgânicas e assimétricas. Como os implantes têm

<sup>1</sup>Essa modalidade é comumente chamada de *dieless* - "sem ferramenta", pelo fato de não utilizar suporte inferior.

<sup>2</sup> Suporte específico: tem exatamente o perfil da peça; semi-específico: formato aproximado, se adequando a geometrias diferentes.

justamente este tipo de geometria, a TPIF se torna a modalidade ideal à sua fabricação. A Figura 1.9 mostra a TPIF utilizando suporte inferior semi-específico.

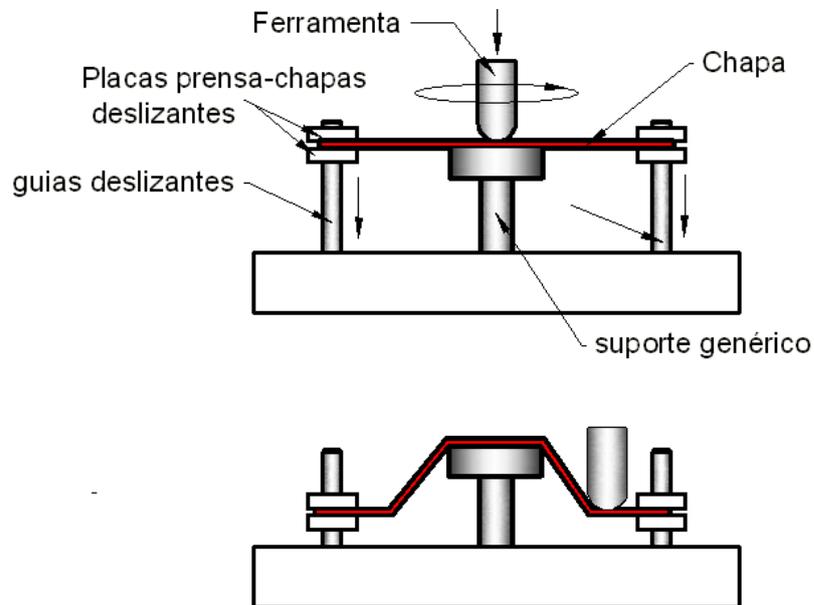


Figura 1.9. Estampagem incremental de ponto duplo (suporte inferior semi-específico)

Nessa modalidade ainda existem outras variantes, dependendo do formato do apoio inferior. Na Figura 1.10 é representada TPIF com suporte inferior específico, com simetria axial. Conseguem-se maior conformidade dimensional, já que toda a superfície de apoio entra em contato com a peça final.

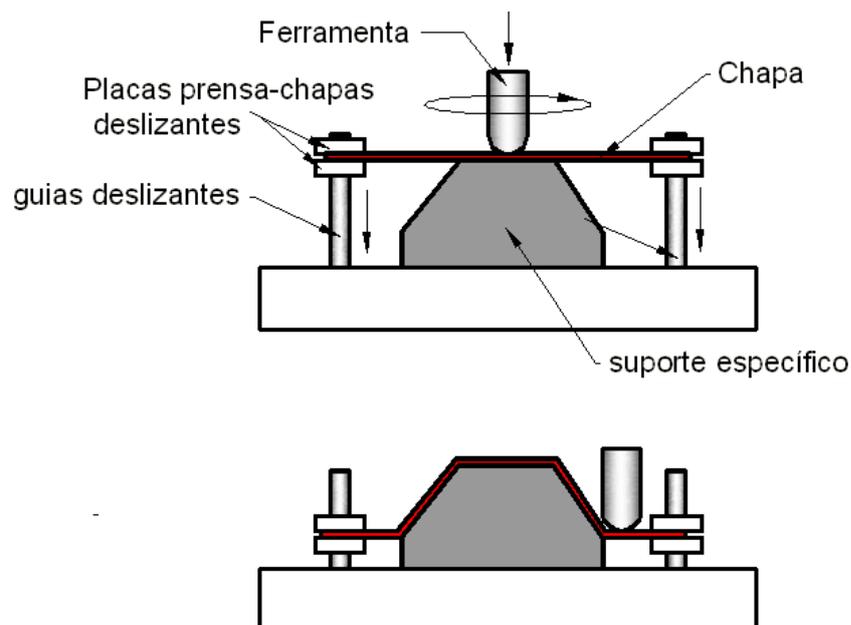


Figura 1.10. Estampagem incremental de ponto duplo e suporte inferior específico

Outra variação da TPIF é a que utiliza suporte inferior específico e de formato assimétrico, indicado para obtenção de superfícies complexas e orgânicas. Este suporte, por sua vez, pode ser positivo (protuberância) - Figura 1.11 - ou negativo (cavidade), conforme a Figura 1.12.

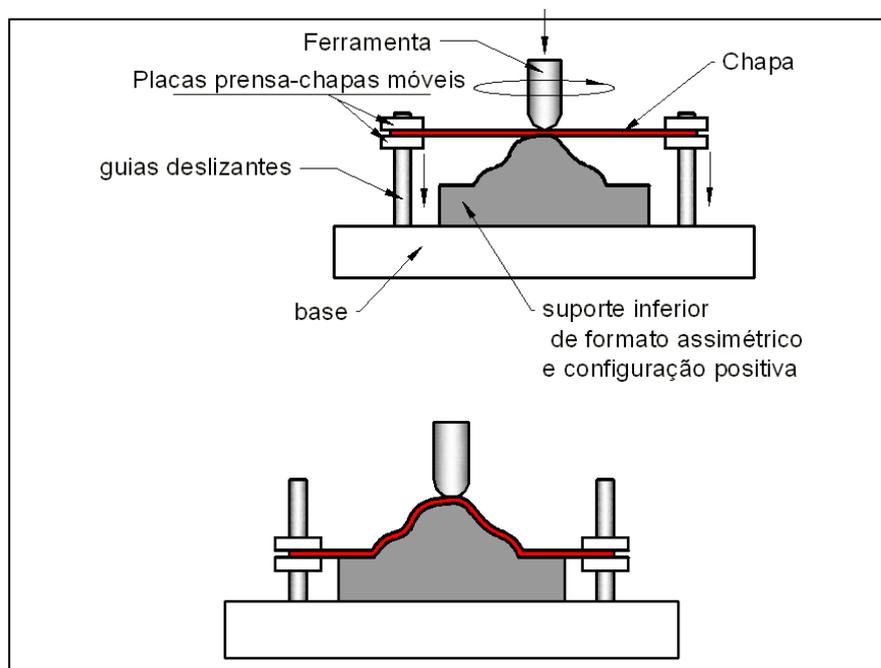


Figura 1.11. TPIF com suporte assimétrico de configuração positiva

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

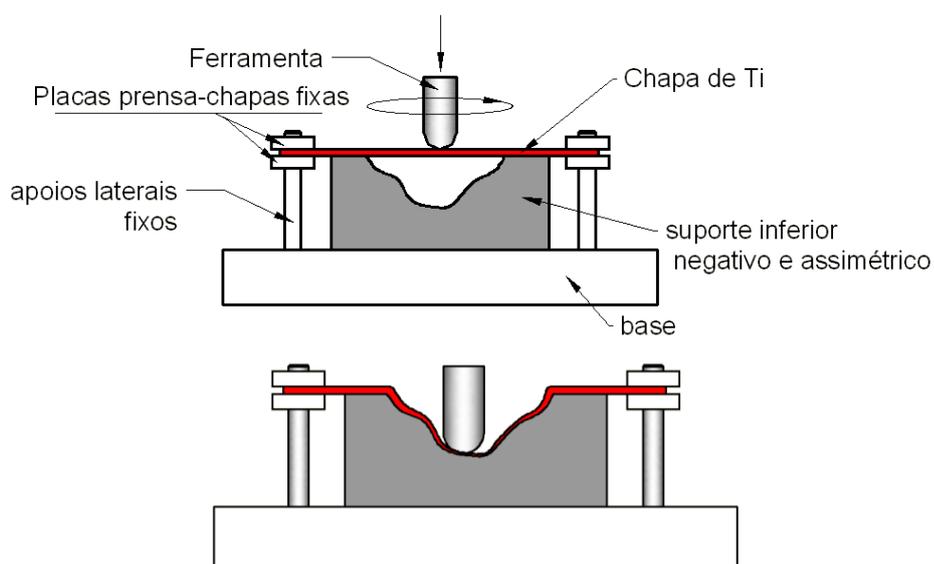


Figura 1.12. TPIF com suporte assimétrico de configuração negativa

(Allwood, J. M.; King, G. P. F.; Duflou, J. 2004) *apud* (Araghi, et al. 2009) afirmam que o processo que utiliza suporte positivo, na qual a chapa (blank) se movimenta de cima para baixo, reduz a quantidade de força necessária para deformar a chapa e, conseqüentemente, as tensões residuais também diminuem, fazendo com que haja menor retorno elástico e deformações geométricas após o desprendimento da chapa do suporte prensa-chapas.

### 1.4.3 Estampagem Incremental em múltiplos passes

A execução em múltiplos passes visa ampliar os limites de estampagem, que são fortemente influenciados pelo ângulo de parede ( $\psi$ ), ilustrado na Figura 1.2. A realização de passes de estampagem intermediários, incrementando o ângulo de parede, pode aumentar o valor final do ângulo  $\psi$ , sem ocasionar o rompimento da chapa (Duflou, et al. 2008). A Figura 1.13 mostra uma estampagem realizada em quatro etapas. À medida que as etapas ocorrem, os ângulos de parede ( $\psi$ ) e o grau de encruamento aumentam, enquanto a espessura ( $s$ ) diminui. O detalhe 'A' mostra a ocorrência do encruamento, que provoca o aumento da rigidez da chapa, ou seja, ela se torna mais resistente à deformação. Este fenômeno pode explicar a ampliação do limite de deformação: ao invés da fratura, a mudança no aspecto microscópico dos grãos faz com que a chapa se torne mais tenaz. O aumento da tenacidade irá exigir maior força para deformar plasticamente a chapa, mas por outro lado, irá prolongar o seu limite de ruptura (Bambach, M. 2008).

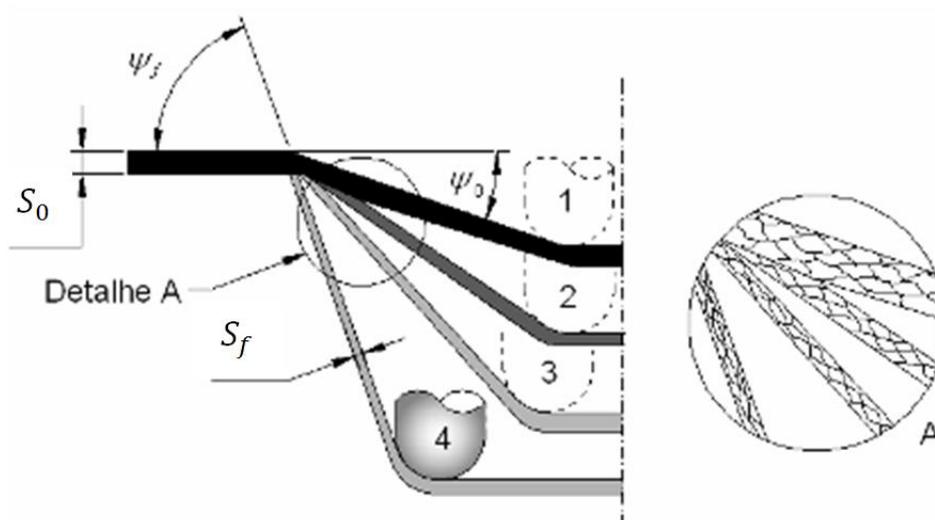


Figura 1.13. Estampagem em múltiplos passes e o efeito do encruamento. No detalhe, o encruamento dos grãos, fenômeno que causa o aumento da resistência ao escoamento.

Estes aspectos microscópicos evidenciam a ocorrência da deformação plástica no início do processo. À medida que a deformação prossegue, os grãos giram, alinham-se no sentido dos espaços deformantes e fraturam, dando lugar a uma nova estrutura de grãos alongados e menores (Schaeffer 1995).

Além do encruamento, a outra possibilidade de aumentar ângulos de parede próximos a  $90^\circ$  é redistribuir o material de outras áreas da peça para as áreas da parede. (Dufloy, et al. 2008) comprovaram que a utilização de múltiplos passes modifica a distribuição (escoamento) de material, aumentando a conformabilidade da chapa. A Figura 1.14 mostra que entre os raios 59 e 79 a redução de espessura da base do cone é menor quando é essampado em múltiplos passes, em comparação à estampagem em passe simples. Considerando a constância de volume, conclui-se que utilizando múltiplos passes, ocorre uma melhor distribuição do material ao longo das diferentes seções das peça, resultando em uma espessura mínima de parede maior (0,45mm) do que a obtida em passe simples (0,3mm). Essa espessura, inclusive, é maior do que a prevista pela lei do seno.

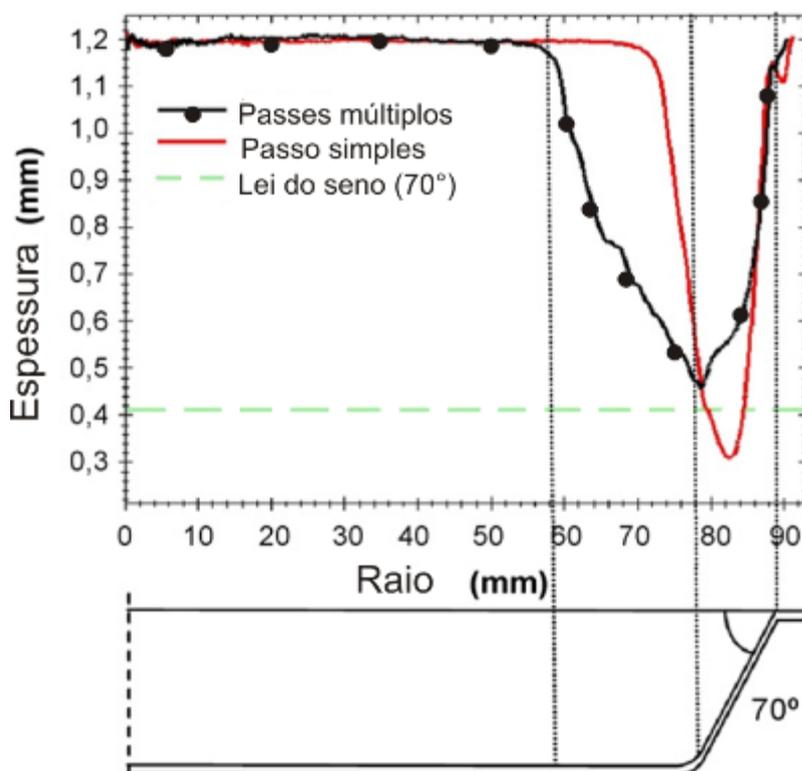


Figura 1.14. Variação da espessura da base do cone essampado (Dufloy, et al. 2008). A utilização de passes múltiplos faz com que a redução de espessura se torne mais gradual, resultando em maior conformabilidade.

A Lei do seno (*Sine Law*) é uma equação matemática que determina a espessura de parede da chapa de acordo com o ângulo de inclinação.

$$s = s_0 * \text{sen}(90 - \psi) \quad (1-1)$$

Onde  $s_0$  é a espessura original da chapa,  $s$  a espessura da chapa medida em determinado estágio do processo de conformação e  $\psi$  o ângulo de inclinação da chapa nesse mesmo ponto. A lei do seno, entretanto, não prevê como ocorre a variação de espessura ao longo do processo de estampagem. A Figura 1.14 mostra claramente a diferença entre a previsão teórica de espessura obtida pela lei do seno e a espessura medida através do procedimento experimental.

Pelos resultados apresentados na Figura 1.14, a estampagem em múltiplos passes pode ser utilizada para ampliar os limites de conformação e possibilitar a geração de paredes com maior ângulo ( $\psi$ ) de inclinação. A Figura 1.15 apresenta um exemplo de geometria crítica que podem ser obtidas sem a ocorrência de trincas ou fissuras. O material usado (Alumínio AA 3103), espessura 1,5mm, apresenta nos 60mm iniciais (sentido base-esfera) ângulos superiores aos delimitados pelos processos convencionais de estampagem.

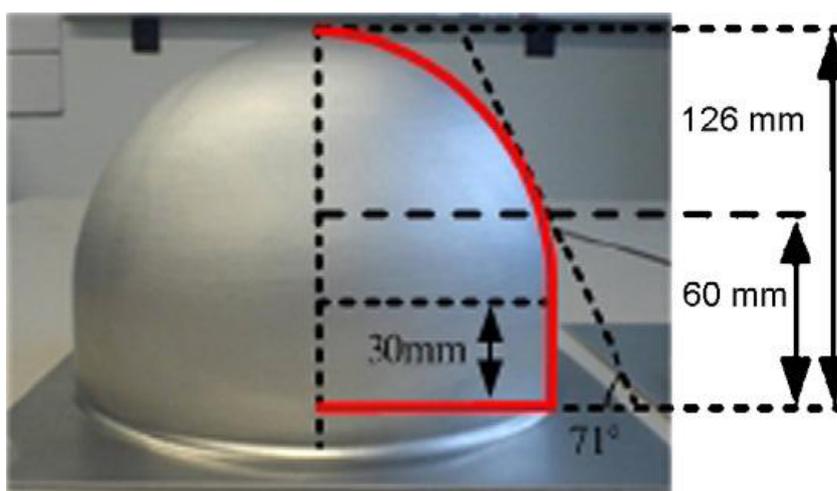


Figura 1.15. Vaso de pressão estampado em múltiplos passes de Estampagem Incremental (Dufloy, et al. 2008)

Para produzir uma peça com ângulo de parede de  $90^\circ$ , como o da Figura 1.15, a lei do seno (equação 1.1) prediz uma espessura igual a zero e as tensões seriam

infinitas. Assim, a utilização de múltiplos passes demonstra que há a modificação da distribuição do material, aumentando a conformabilidade (Skjoedt, et al. 2008).

Além de ampliar os limites de estampagem, a utilização de passes múltiplos pode contribuir à conformidade geométrica. Bambach *et al* (2009) demonstram que o retorno elástico é proporcional à deformação ocorrida. Se uma peça é produzida em um único passe, a deformação localizada será alta e conseqüentemente o retorno elástico e o desvio geométrico em relação à geometria de referência (em CAD) serão consideráveis. Entretanto, na estampagem em passes múltiplos, a geometria final é definida a partir da forma obtida no passe anterior. A deformação resultante, Nesse caso, é medida entre o penúltimo e o último passe, resultando em um retorno elástico menor.

## 1.5 Estratégias de estampagem

Considerando o problema do rompimento da chapa em ângulos de parede iguais ou próximos a 90°, foram investigadas na literatura, diferentes estratégias de usinagem e variação de parâmetros, tais como: incremento angular de estampagem, tipo, velocidade de rotação e avanço da ferramenta e da utilização de passes intermediários de estampagem (*multi-steps toolpaths*). A combinação de diferentes parâmetros pode melhorar a distribuição da espessura da chapa e evitar o rompimento e diminuir o retorno elástico (efeito *spring back*).

Deve ser considerado que ainda não existem trajetórias definidas por sistemas CAM específicas para estampagem incremental. As estratégias utilizadas até o momento são originariamente geradas à usinagem (Rauch, Y., et al. 2009).

### 1.5.1 Estratégias paralelas / radiais

Estudos de Bambach, *et al.* (2003) e Kopac e Campus (2005) comprovaram que o sentido da trajetória de estampagem influencia a conformidade geométrica, o acabamento superficial e a distribuição de material da chapa, sendo possível obter

uma chapa com maior semelhança ao modelo CAD original, com menor rugosidade superficial e com uma distribuição de espessura mais homogênea.

São apresentadas quatro estratégias de usinagem (ilustradas na Figura 1.16):

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

Para a execução dos testes de estampagem, foi definida a geometria de tronco de cone, com raio superior de 120mm, ângulo de parede de  $80^\circ$  e profundidade de 25mm. O material foi o aço baixo carbono DC04 (limite elástico de  $140 \text{ N/mm}^2$  e uma resistência à tensão de ruptura de  $280 \text{ N/mm}^2$ ), de 1.5mm de espessura e o diâmetro da ferramenta de 30mm. Como um dos parâmetros de estampagem, foi utilizado o passo vertical relativamente grande – 5mm por ciclo e nas estratégias radiais, foi utilizado um passo angular de  $4^\circ$ .

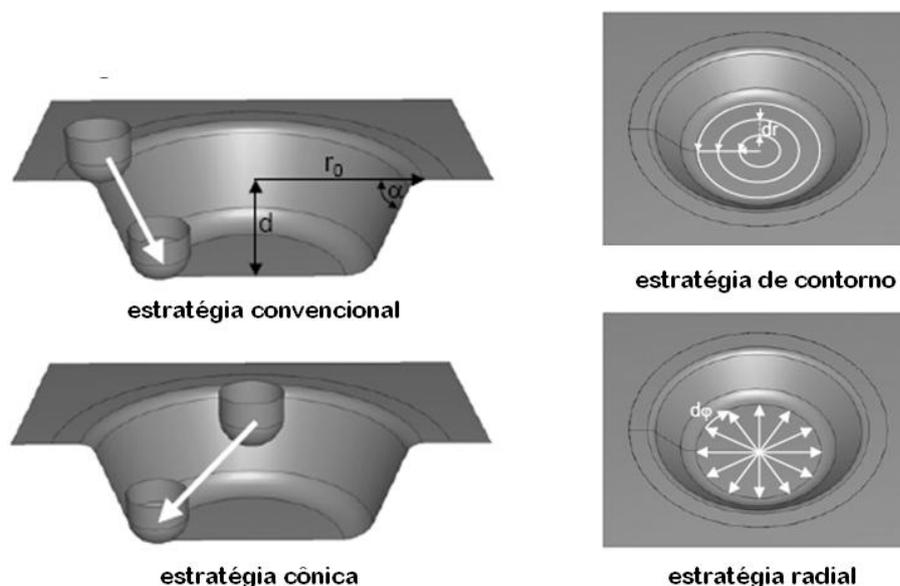


Figura 1.16. Estratégias diferenciadas de estampagem incremental (Bambach, et al. 2003)

Para a mensuração da espessura, a peça estampada foi cortada ao longo de sua seção radial, sendo a medição feita a cada 2mm, utilizando um micrômetro. As variações de espessura são mostradas na Figura 1.17:

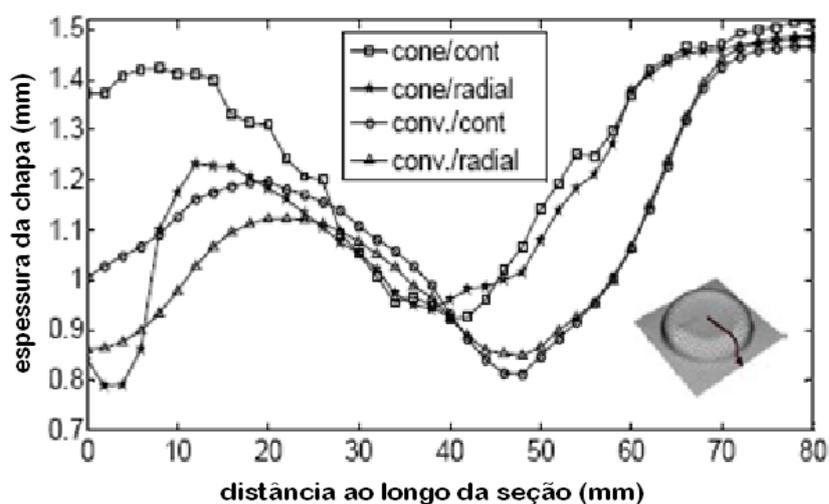


Figura 1.17. Variações da espessura da peça estampada (Bambach, et al. 2003)

O aspecto visual (acabamento superficial) é mostrado em vista superior das peças, na Figura 1.18.

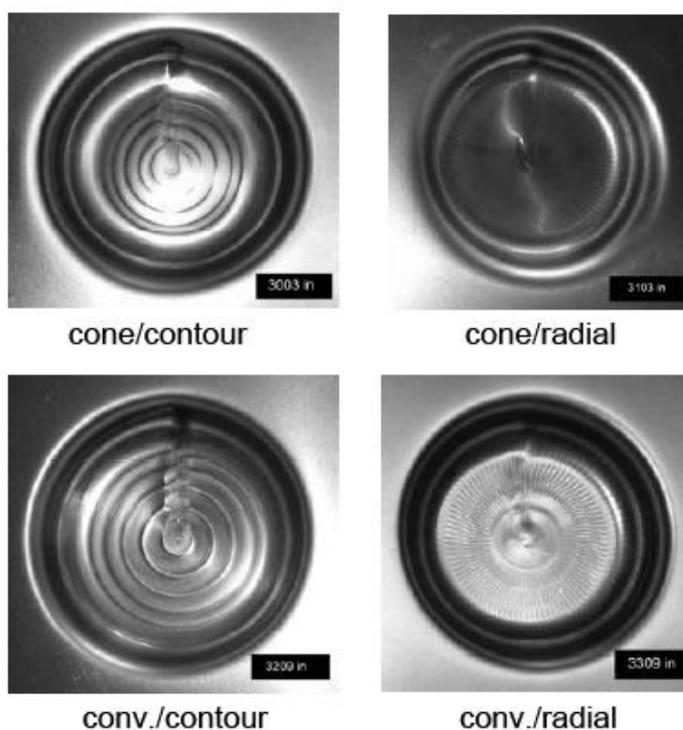


Figura 1.18. Vista superior das peças estampadas segundo diferentes estratégias (Bambach, et al. 2003)

Analisando os resultados obtidos, chegou-se às seguintes conclusões:

- As estratégias radiais provocaram considerável redução de espessura no centro da peça e levam um tempo longo para serem executadas (40 minutos para estratégia radial e 2 minutos para estratégia convencional);
- Utilizando a estratégia convencional de contorno, foi obtida uma distribuição de espessura mais homogênea, quando comparada com as obtidas com os movimentos radiais;
- Apesar da estratégia cônica de contorno ser realizada rapidamente (menos de 1 minuto), a espessura da chapa não foi reduzida no centro da peça, devido à ausência de repetição de carga dentro da peça. O efeito de retorno elástico (*spring back*) é alto, causando discrepância geométrica entre modelo digital e peça acabada;
- Enquanto as estratégias utilizadas contribuem para a maior homogeneidade de espessura, para obter uma superfície lisa exigiria uma operação posterior.
- 

### 1.5.2 Paralela / espiral

No experimento de Rauch, et al. (2009), os parâmetros estudados foram: taxa de avanço, incremento axial e estratégia de estampagem. Os demais parâmetros foram os mesmos para todos os experimentos: chapa de liga de alumínio 5086 com 0.6mm de espessura e ferramenta com diâmetro de 10mm. Os objetivos destes experimentos foram: obter maior produtividade, conformidade e diminuição de custos. São testadas e avaliadas três estratégias de estampagem, mostradas na Figura 1.19.

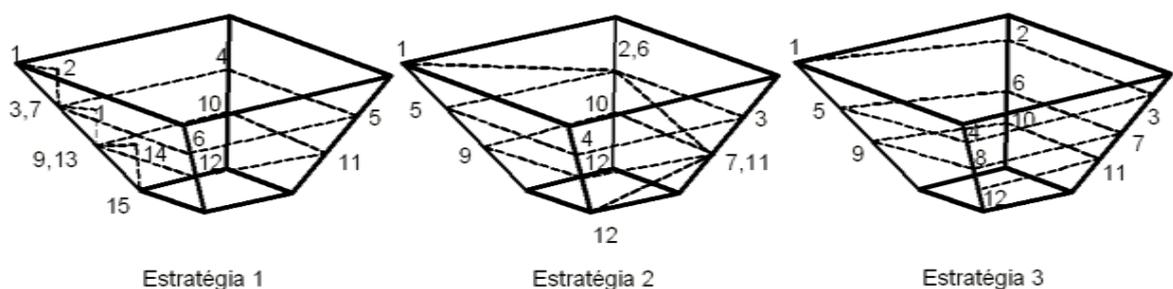


Figura 1.19. Estratégias de estampagem (Rauch, Y., et al. 2009)

Na estratégia 1, o incremento vertical é feito paralelamente ao eixo da ferramenta (Z); na estratégia 2, este incremento é realizado de forma gradual, ao longo de um lado de cada vez da pirâmide truncada; a estratégia 3 acontece de forma espiral, mantendo a ferramenta em contacto constante com a peça.

A Tabela 1.1 fornece os resultados dos testes. Dessaca-se a confirmação de que a velocidade de avanço, utilizada na faixa entre 0.5m/min e 1.5m/min não influencia significativamente a conformidade geométrica (02 últimas colunas) entre peça real e modelo CAD. Entretanto, em outro trabalho (Ham e Jeswiet 2006) foi demonstrado que a conformabilidade das chapas tendem a diminuir, quando são utilizadas velocidades superiores a 2m/min.

Independente do tipo de estratégia, a profundidade atingida foi sempre menor do que o valor programado de 24mm. A coluna “Erro de Profundidade” mostra a diferença entre o valor de referência (24mm) e o atingido. Nesse caso, a estratégia 3, utilizando incremento vertical de 1mm e velocidade de avanço de 0.5m/min foi a que apresentou maior discrepância (0.79mm), ou seja, a profundidade atingida foi de 23.21mm.

A coluna “Erro de Deslocamento” compara 2 pontos determinados na chapa, ainda plana (não conformada) com os pontos correspondentes pós-estampagem, para medir deslocamentos no eixos X e Y (Figura 1.20) . Nesse caso, a estratégia 2, utilizando incremento vertical de 1mm e velocidade de avanço de 1.500mm/min foi a que apresentou maior discrepância (0.53mm). Essa medição se refere à soma das discrepâncias ocorridas nos dois pontos.

Conclui-se, portanto, que a estratégia 1 se apresenta como a melhor solução, no que diz respeito à conformidade geométrica global. Entretanto, na execução do passo incremental, de forma paralela ao eixo da ferramenta (Z), feita sempre no mesmo ponto pode aumentar a rugosidade superficial e afetar a integridade da peça (Hagan, E., Jeswiet, J. 2004).

Tabela 1.1. Parametrização e resultados do experimento (Hagan, E., Jeswiet, J. 2004)

<i>Estratégia</i>	<i>Incremento axial (Z)</i>	<i>Avanço (m/min)</i>	<i>Erro na profundidade (mm)</i>	<i>Erro de deslocamento (mm)</i>
1	0.5	0.5	0.18	0.32
		1.5	0.24	0.34
	1.0	0.5	0.05	0.50
		1.5	0.05	0.50
2	0.5	0.5	0.21	0.33
		1.5	0.24	0.34
	1.0	0.5	0.07	0.50
		1.5	0.18	0.53
3	0.5	0.5	0.55	0.25
		1.5	0.52	0.25
	1.0	0.5	0.79	0.39
		1.5	0.70	0.36

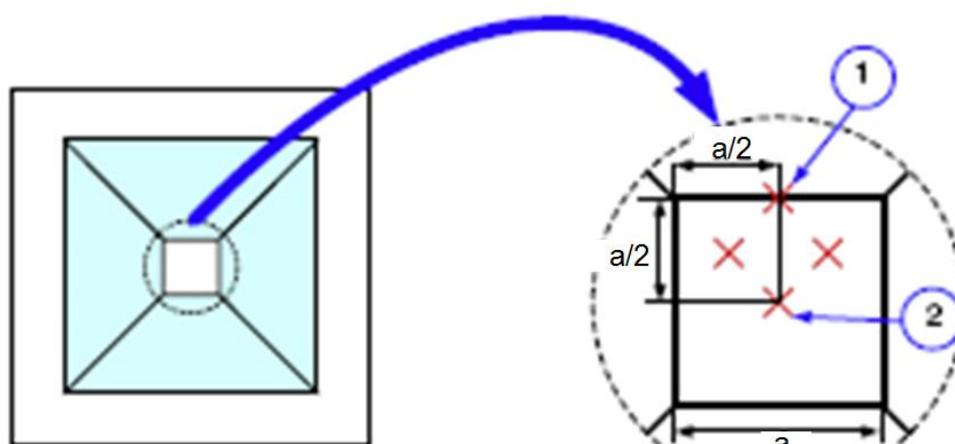


Figura 1.20. Pontos para medição de erro dimensional (Rauch, Y., et al. 2009)

## 1.6 Ângulo de inclinação

O ângulo de inclinação de parede da chapa (ângulo  $\psi$ , Figura 1.2) é o fator limitador mais importante na estampagem incremental, já que a diminuição de espessura da chapa ocorre à medida em que este ângulo aumenta. São apresentados a seguir duas pesquisas que discorrem sobre este assunto específico.

### 1.6.1 Estampagem de pirâmide e cone truncados

(Minutolo, et al. 2007) realizaram experimentos cujo objetivo era determinar o maior ângulo de inclinação de parede da chapa, sem a ocorrência de fratura. O ângulo de inclinação ( $\theta$ ), indicado na Figura 1.21, é medido entre uma referência horizontal e o lado externo da peça. Dois tipos de geometrias foram utilizados: tronco de cone e tronco de pirâmide, onde foi possível obter peças sem fratura com ângulos de inclinação variando de  $50^\circ$  a  $65^\circ$  e  $45^\circ$  a  $60^\circ$ . O tronco de pirâmide tinha a dimensão do lado igual a 70mm e a estratégia de estampagem foi do tipo paralela de contorno, com valor do incremento vertical ( $\Delta_z$ ) igual a 0.5mm; no tronco de cone, o diâmetro ( $\emptyset$ ) foi de 70mm, utilizando estratégia de estampagem com as mesmas características anteriores. Nas duas geometrias, a profundidade máxima ( $h$ ) foi de 39mm.

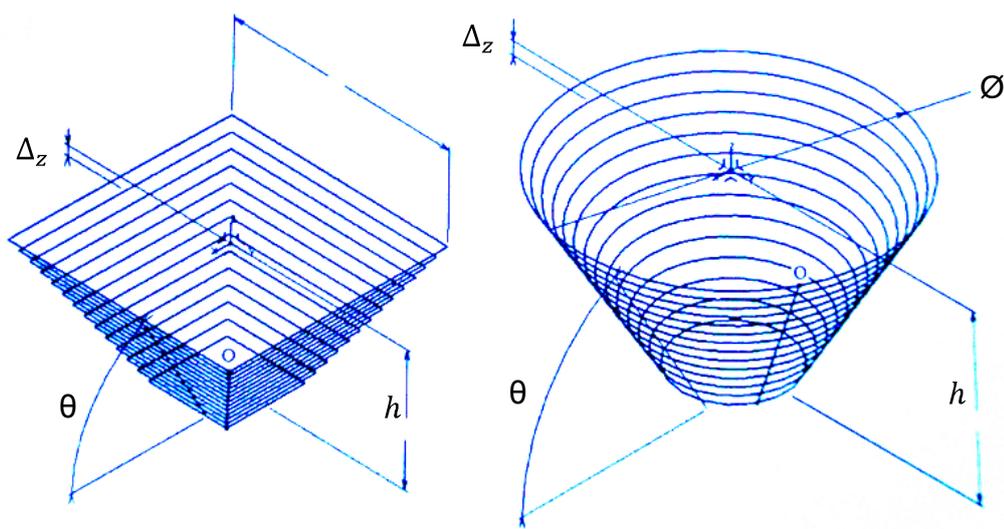


Figura 1.21. Trajetórias de ferramenta utilizadas: paralela de contorno, com incremento constante (Minutolo, et al. 2007)

Os testes foram realizados em um centro de usinagem CNC, mantendo constantes os parâmetros: tipo de ferramenta (diâmetro de 10mm, aço 1020), chapa (liga de alumínio 7075-T0, espessura 1mm), rotação e avanço de ferramenta (1000 RPM e 1000mm/min, respectivamente) e lubrificação por *spray*. O parâmetro variável foi o ângulo de inclinação, incrementado  $5^\circ$  a cada teste, iniciando a  $50^\circ$  para o tronco de cone e a  $45^\circ$  no tronco de pirâmide.

Os resultados demonstraram que a fratura ocorreu em ângulos iguais ou superiores a  $65^\circ$  para o formato tronco-piramidal e  $70^\circ$  para o cone truncado. Para avaliar o ângulo máximo obtido sem fratura, testes complementares foram realizados, utilizando incremento angular de  $1^\circ$ . Obteve-se sucesso (peças sem fratura) com  $63^\circ$  na pirâmide e  $66^\circ$  no cone. Além de determinar o ângulo-limite de estampagem, pode-se observar que, no formato tronco-piramidal, a fratura ocorreu de forma localizada, próximo às arestas, sem se propagar para os lados; no caso do cone, entretanto, a fratura se propagou ao longo de todo o diâmetro da peça, como pode ser visto na Figura 1.22.

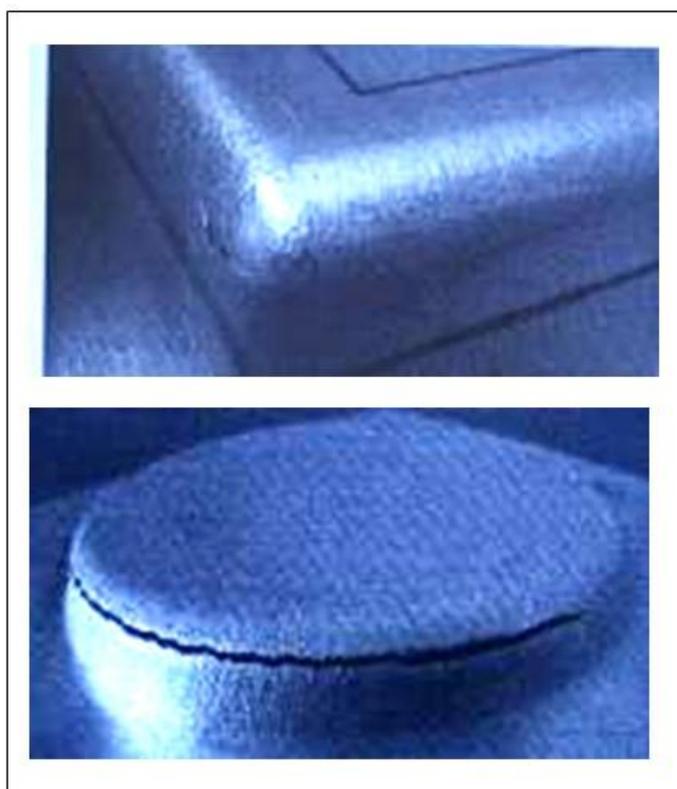


Figura 1.22. Zonas de fratura da pirâmide e cone (Minutolo, et al. 2007)

### 1.6.2 Estampagem de geometria profunda

Em 2008, Ambrogio, Filice e Manco, (2008) realizaram um experimento onde a combinação de duas inclinações diferentes foram utilizadas na estampagem de um tronco de cone. A Figura 1.23 mostra as dimensões:  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  foram atribuídos os valores de  $65^\circ$ ,  $70^\circ$  e  $75^\circ$ . Obviamente que, nos casos em que os valores coincidem, a

geometria resulta em um tronco de cone simples. Os demais valores utilizados foram:  $D_0$  e  $H_f = 70\text{mm}$ ,  $H_1 = 20\text{mm}$  e  $H_2 = 70\text{mm}$ .

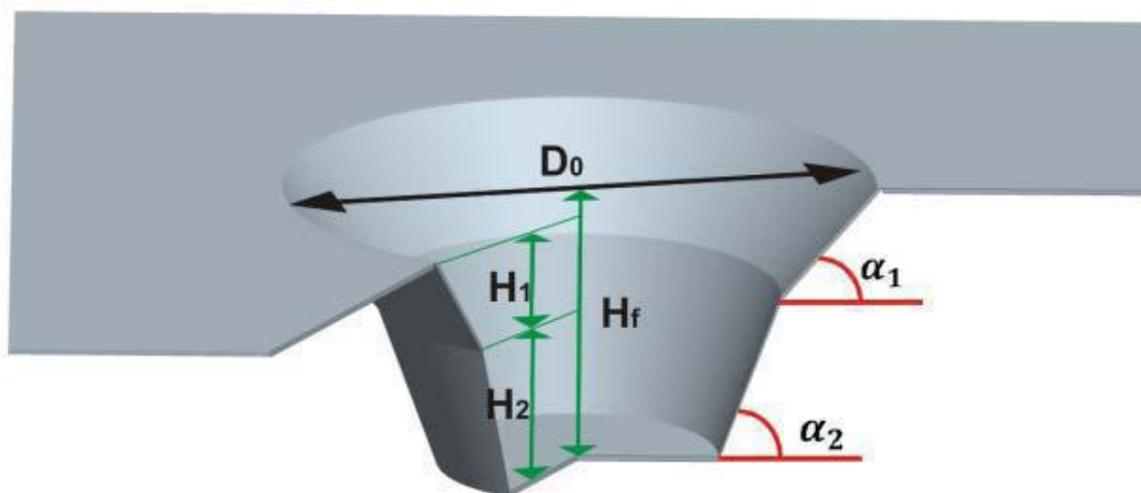


Figura 1.23. Dados da geometria do tronco de cone (Ambrogio, Filice e Manco, 2008)

Apesar da estampagem incremental ser caracterizada como um processo de deformação localizada, onde uma pequena porção de material entra em contato com a ferramenta em um instante de tempo, o resultado experimental sugere que isto não é completamente verdadeiro, quando aplicado a geometrias com variação em sua forma. A conformabilidade, nesse caso, seria influenciada também pelo histórico de deformação e pela espessura do material, na primeira parte da estampagem ( $\alpha_1$ ). Para a condição  $\alpha_1 = 75^\circ$  e  $\alpha_2 = 70^\circ$  por exemplo, a fratura ocorre a uma profundidade de 27mm (Figura 1.26). Utilizando outras combinações, a fratura ocorre em profundidades diferentes: para condição de  $\alpha_1 = 60^\circ$   $\alpha_2 = 75^\circ$ , a fratura ocorreu na profundidade de 43mm (Figura 1.24).

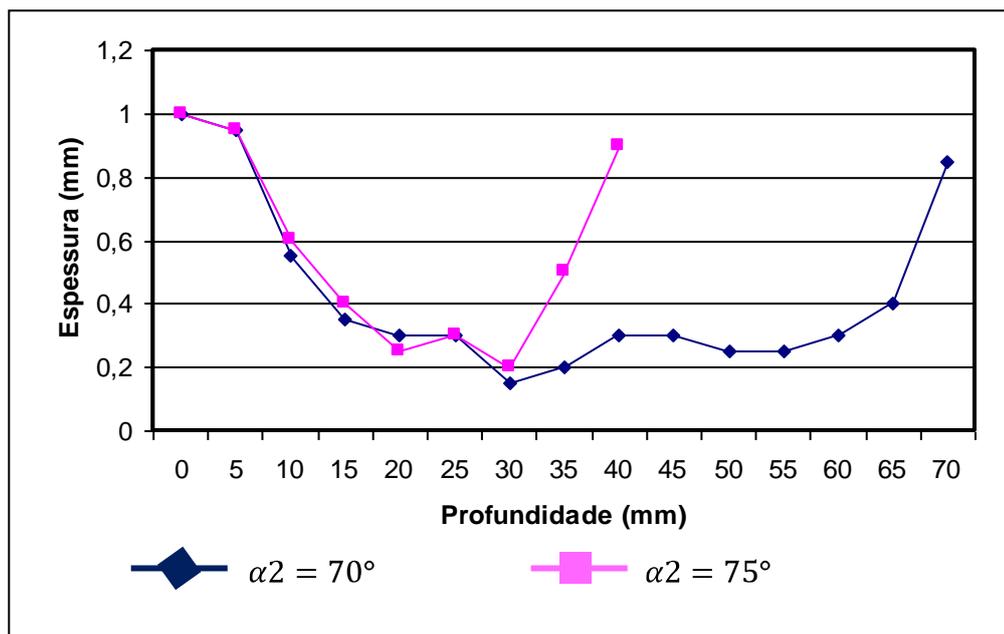


Figura 1.24. Comparação experimental para  $\alpha_1 = 60^\circ$  (adaptado de Ambrogio, Filice e Manco, 2008)

Na condição  $\alpha_1 = 70^\circ$   $\alpha_2 = 75^\circ$  a ocorrência da fratura deu-se aos 22mm de profundidade (Figura 1.25), comprovando a influencia da geometria na determinação do limite de estampagem.

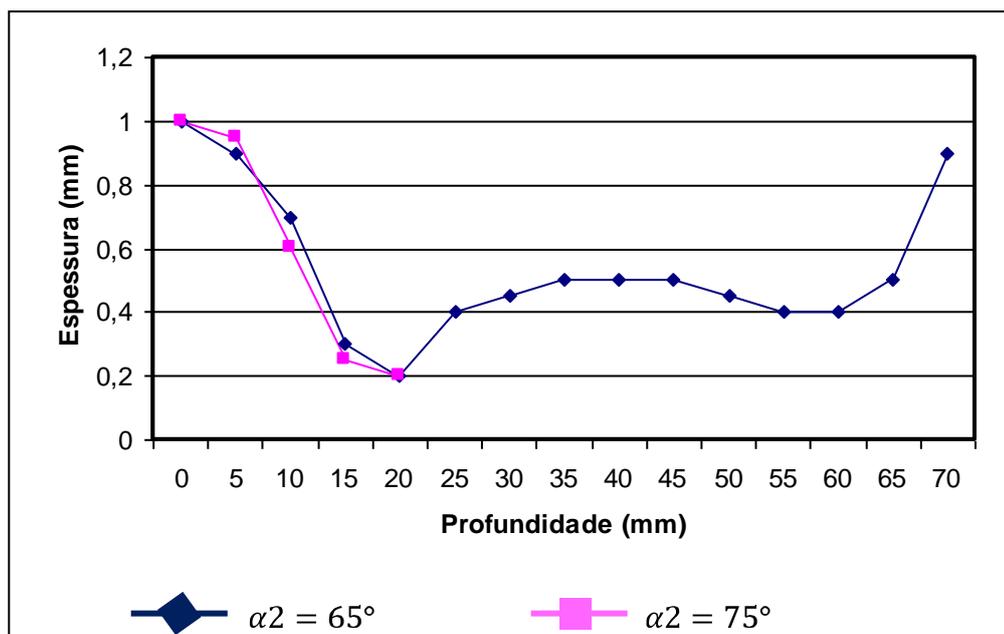


Figura 1.25. Comparação experimental para  $\alpha_1 = 70^\circ$  (adaptado de Ambrogio, Filice e Manco, 2008)

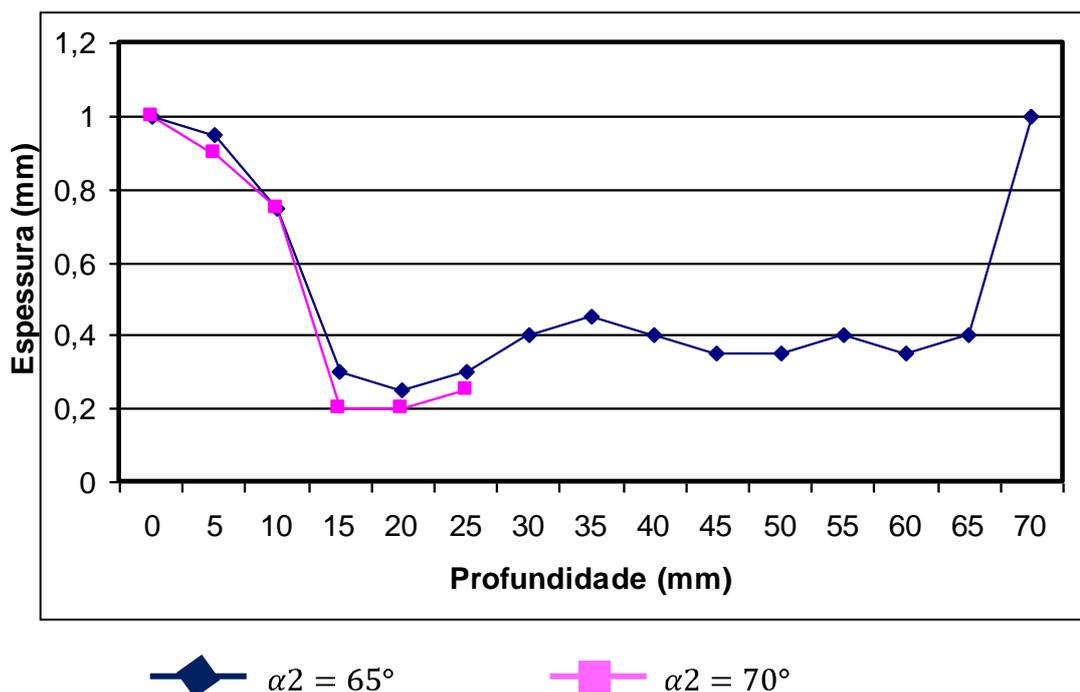


Figura 1.26. Comparação experimental para  $\alpha_1 = 75^\circ$   
(adaptado de Ambrogio, Filice e Manco, 2008)

### 1.6.3 Estampagem do titânio comercialmente puro com variação angular contínua

Existe diversas pesquisas que avaliam o comportamento dos materiais na estampagem incremental, sobretudo o alumínio (Masuku, et al. 2004), (Shim e Park 2001), (Rauch, Hascoet, et al. 2008), (Ambrogio G.; Filice L.; Manco G. L. 2008) e (Lievers, Pilkey e Lloyd 2004). No caso do titânio, entretanto, as pesquisas são mais raras, provavelmente devido ao custo da matéria-prima. De qualquer forma, é imprescindível o estudo da estampagem incremental aplicada a este material, por ser o mais utilizado na fabricação das próteses e órteses.

Na pesquisa de Hussain, Gao e Zhang (2008), foram utilizadas chapas de titânio comercialmente puro com 1mm de espessura. Diferentemente dos experimentos relatados nos tópicos 1.5 e 1.6, onde para cada teste o ângulo de parede

permanecia constante para cada ensaio, Nesse experimento o ângulo de parede<sup>1</sup> varia continuamente, a cada ponto de incremento vertical, conforme o desenho apresentado na Figura 1.27. Dessa forma, o número de experimentos necessários para determinar o limite de estampagem da chapa pode ser reduzido drasticamente (Hussain, et al. 2009).

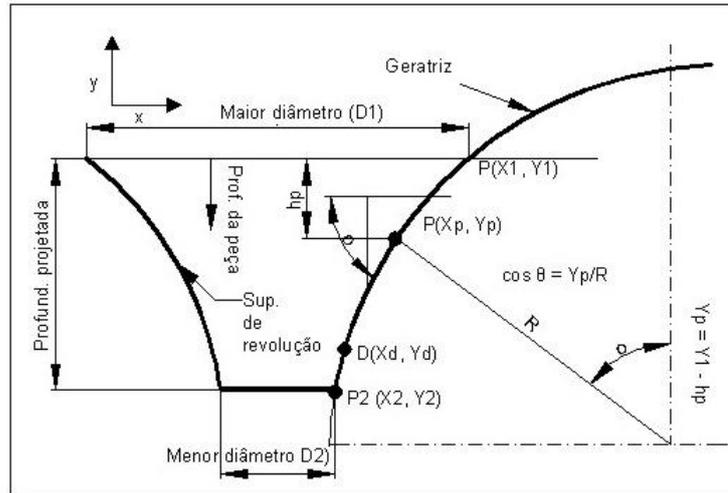


Figura 1.27. Variação do ângulo de parede, determinado pelo raio (R) (Hussain, et al 2008)

O ângulo de parede  $\theta_p$  e a espessura  $s$  no ponto arbitrário  $P(x_p, y_p)$  por ser calculadas usando as seguintes relações:

$$\theta_p = \cos^{-1}\left(\frac{y_p}{R}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{y_1 - h_p}{R}\right) \quad (1-2)$$

$$s = t_0 \frac{y_p}{R} = \frac{t_0}{R}(y_1 - h_p) \quad (1-3)$$

A profundidade  $h_p$  do ponto  $P(x, y)$  é medida na chapa fraturada, enquanto  $R, t_0, y_1$  são valores conhecidos.

Assim como os demais experimentos, a estampagem foi realizada em um centro de usinagem CNC. O tamanho da chapa bruta (*blank*) foi de 140x140mm e a ferramenta utilizada de aço rápido (HSS) com dureza entre 60 e 65 HRC.

<sup>1</sup> Nesse experimento o ângulo de parede, designado por ( $\theta$ ) corresponde ao ângulo ( $\psi$ ) descrito na lista de símbolos gregos.

Para a geratriz (ilustrada na Figura 1.27), foi utilizado um arco de 57,5mm de raio, gerando uma série de ângulos de parede  $\theta$  compreendidos entre 38 e 78°. Para a programação de trajetória de ferramenta foi utilizado o programa de CAD/CAM UG NX-3. A Tabela 1.2 mostra os valores dos demais parâmetros utilizados:

Tabela 1.2. Valores utilizados nos ensaios (Hussain, Gao e Zhang, 2008)

Experimento No.	Veloc. Avanço (mm/seg)	Diâmetro da ferramenta (mm)	Passo vertical (mm)
1	2600	12	0.20
2	2600	12	0.75
3	2600	12	1.30
4	1200	12	0.75
5	4000	12	0.75
6	2600	8	0.75
7	2600	16	0.75

A Figura 1.28 mostra a variação de espessura obtida nos ensaios. Fica claro que a espessura diminui na medida em que a profundidade de estampagem aumenta.

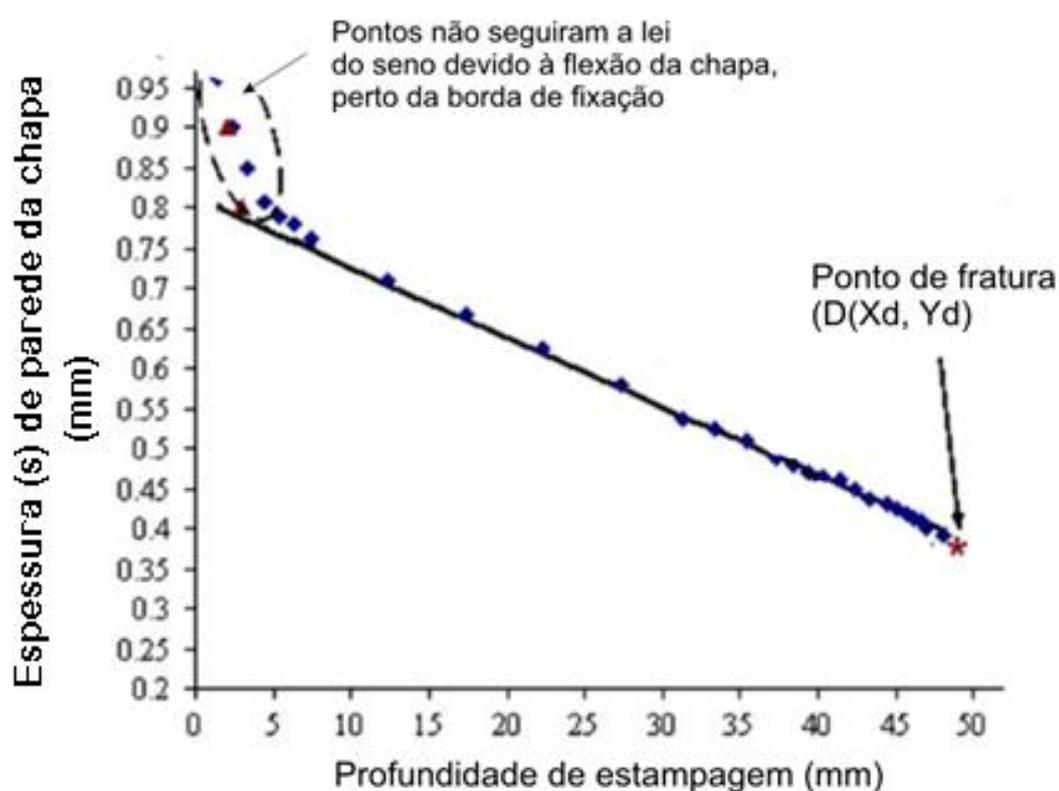


Figura 1.28. Relação entre profundidade de estampagem e diminuição de espessura de parede (Hussain, Gao e Zhang, 2008)

Ficou demonstrado que, quanto maior for o passo vertical (*pith*) a deformação não é mais caracterizada como “localizada” e o metal apresenta menor conformabilidade<sup>1</sup> (Figura 1.29a). Além disso, a rugosidade superficial aumenta. A diminuição da conformabilidade acontecerá à medida em que a taxa de avanço (*feedrate*) aumenta, obedecendo uma função quadrática (Figura 1.29b): entre 2600 e 4000mm/min a diminuição é maior do que entre 1200 e 2600 mm/min. A influência do diâmetro da ferramenta na conformabilidade também pode ser analisada na Figura 1.29c: quanto maior o diâmetro da ferramenta, menor será o ângulo obtido na estampagem, sem que haja rompimento da chapa. Isto ocorreu porque, assim como no incremento vertical, a deformação deixa de ser localizada. Por outro lado, da mesma forma que a taxa de avanço, a influência do diâmetro da ferramenta se comportou como uma função quadrática (Hussain, Gao e Zhang, 2008).

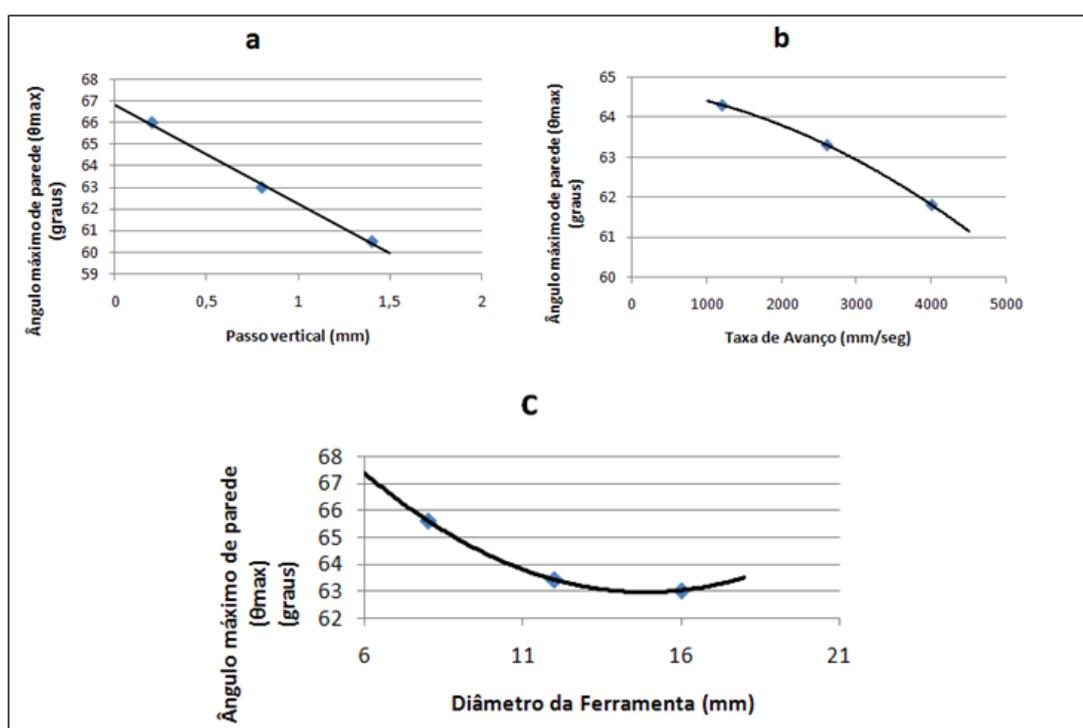


Figura 1.29. Influência do passo vertical, avanço e diâmetro da ferramenta no ângulo máximo de estampagem sem ocorrência de fratura (adaptado de Hussain, Gao e Zhang, 2008).

<sup>1</sup> Por 'conformabilidade' Nesse caso entende-se como o maior ângulo  $\theta$  de parede obtido, sem que haja rompimento da chapa.

## 1.7 Influência do passo vertical e avanço na rugosidade

Em um experimento anterior (Castelan 2007), demonstrou que quanto maior for o avanço (Figura 1.30) e o passo vertical (Figura 1.31), maior será a rugosidade. Nesse experimento, foi utilizada uma chapa de alumínio 1050, espessura 0,5mm; a ferramenta de estampagem tinha  $\varnothing 10\text{mm}$  (aço rápido); a geometria da peça era em formato de tronco de cone, com diâmetro inicial de 250mm, profundidade de 40mm e ângulo de parede de  $45^\circ$ .

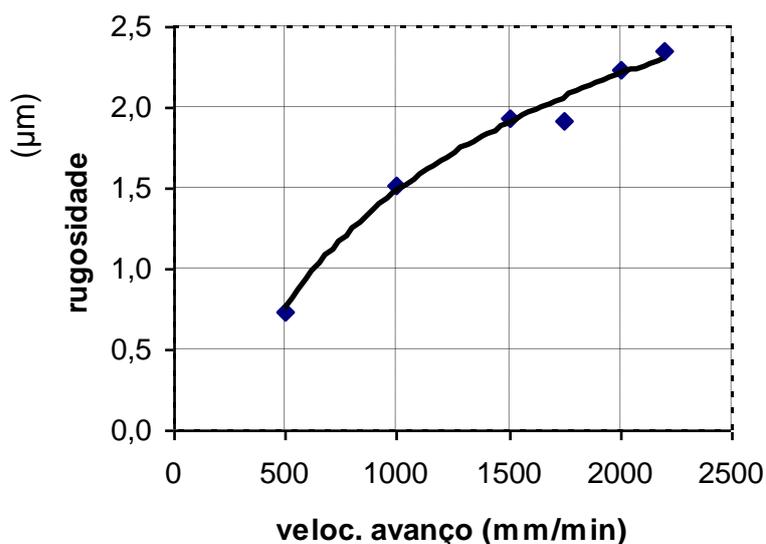


Figura 1.30. Aumento da rugosidade em função do avanço

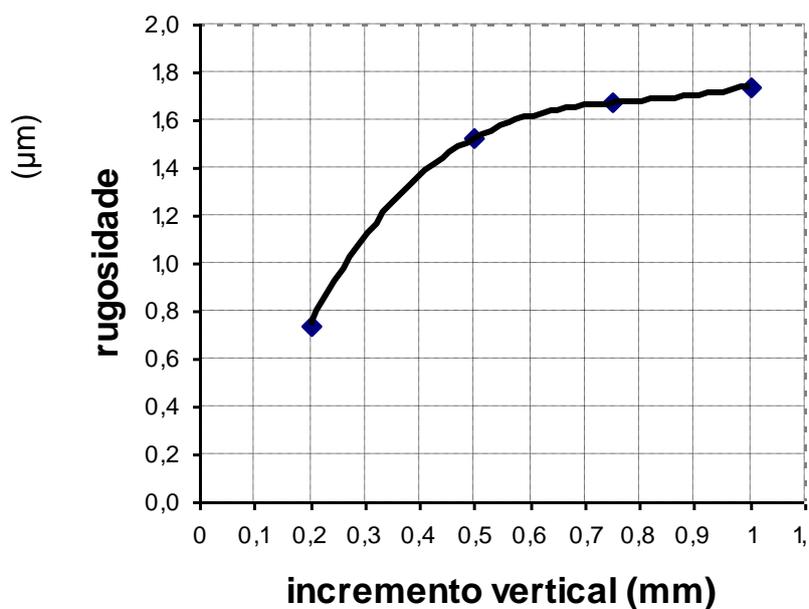


Figura 1.31. Aumento da rugosidade em função do passe vertical

A rugosidade é um parâmetro importante a ser medido nos implantes internos de chapa de titânio, pois se for elevada, há maior tendência ao surgimento de infecções endógenas localizadas (Fuentefria 1997).

## 1.8 Parâmetros de estampagem

A maior parte das pesquisas referenciadas nessa tese utilizaram máquinas-ferramenta CNC (centro de usinagem horizontal 3 eixos). De acordo com Emmens, Sebastiani e Van Den Booggard (2010), um dos primeiros pesquisadores a utilizar máquinas-ferramenta de usinagem para estampar chapas incrementalmente foi o japonês H. Iseki, em 1989 sendo que o controle da máquina era feito manualmente (sem a utilização de software CAM). Em 1996, foram desenvolvidos por Iseki e outros membros de sua equipe, equipamentos específicos para estampagem incremental (Iseki e Naganawa 2002), onde foram estampadas chapas de aço, aço inoxidável e titânio, todas com 0.7mm de espesura. Entretanto, no Brasil, não há conhecimento da existência deste tipo de equipamento. De qualquer forma, vários outros trabalhos demonstraram que a utilização de equipamentos CNC de usinagem foi eficiente para a realização do processo de estampagem incremental (Hussain, Dar, et al. 2007), (Kim e Park 2002), (Dufloy, et al. 2007), (Kopac e Campus 2005), (Cerro, et al. 2006), (Rauch, Hascoet, et al. 2008).

No presente trabalho, os parâmetros de máquina, originalmente destinados à usinagem dos metais, foram definidos para a estampagem de chapas. São doze parâmetros principais a serem definidos: velocidade de avanço; profundidade do passo vertical; rotação da ferramenta; material, tipo e tamanho de ferramenta; material e espessura da chapa; lubrificação, tipo de estratégia de conformação, tipo de suporte inferior e ângulo de parede da chapa. Dentre estes parâmetros, (Jeswiet, Micari, et al. 2005) *apud* (Landre Jr, et al. 2010) destacaram quatro parâmetros principais: espessura da chapa, raio da ferramenta, tamanho do incremento vertical e velocidade da ferramenta, sendo que estes dois últimos são os parâmetros abordados Nesse trabalho. A velocidade da ferramenta é uma medida direta do atrito entre a ferramenta e a chapa (quantificação do estado de tensões aplicado localmente em uma região da chapa) e tem importante influência sobre a

conformabilidade. O passo vertical e o raio da ferramenta determinam a área localizada de deformação e é experimentalmente observado que a conformabilidade diminui à medida que essa área aumenta.

### 1.8.1 Velocidade de Avanço

Os valores encontrados na literatura variaram de 500 a 1500 mm/min (Attanasio, et al. 2008), (Hussain, et al. 2009), (Hussain, G.; Gao, L.; Zhang, Z. Y. 2008) e (Dejardin, et al. 2010). Rauch, et al (2009) comprovaram que quanto maior o avanço, maior será o erro de profundidade (retorno elástico) da chapa conformada, em relação ao modelo CAD correspondente. Como o objetivo da tese está focado na estética e funcionalidade do implante e não no seu tempo de execução, utilizou-se uma velocidade menor.

### 1.8.2 Profundidade do passe vertical

A profundidade do passe vertical ( $\Delta_z$ ) se refere a distância entre cada passe realizado pela ferramenta na direção do eixo Z da máquina CNC. É um parâmetro que influencia significativamente a conformabilidade da chapa (Hagan, E., Jeswiet, J. 2004). Micari (2004) determinou, através de seus experimentos, que a conformabilidade diminui à medida que o passe vertical aumenta. Hussain, et al (2008) estudaram a relação entre diâmetro de ferramenta e a profundidade do passo vertical, variando o diâmetro da ferramenta ( $\phi$ ) entre 80 e 8mm e o passe ( $\Delta_z$ ) de 0.1 a 1mm. Foram realizados testes na proporção  $\phi/\Delta_z$  e valores acima de 40 ( $\phi/\Delta_z > 40$ ) provocam a aderência do material do *blank* à ferramenta.

Ainda com relação ao passe vertical, um importante parâmetro a ser controlado foi a forma com que o incremento do passe vertical é executado. (Attanasio, Ceretti e Giardini, 2006) demonstraram que a utilização de um passe vertical constante, quando o perfil a ser conformado é em arco (perfil de calota esférica) causa pior acabamento e diminui a conformidade geométrica (Figura 1.32a) . A utilização de passe variável, de acordo com a curvatura da chapa, melhora o processo nesses dois aspectos (Figura 1.32b).

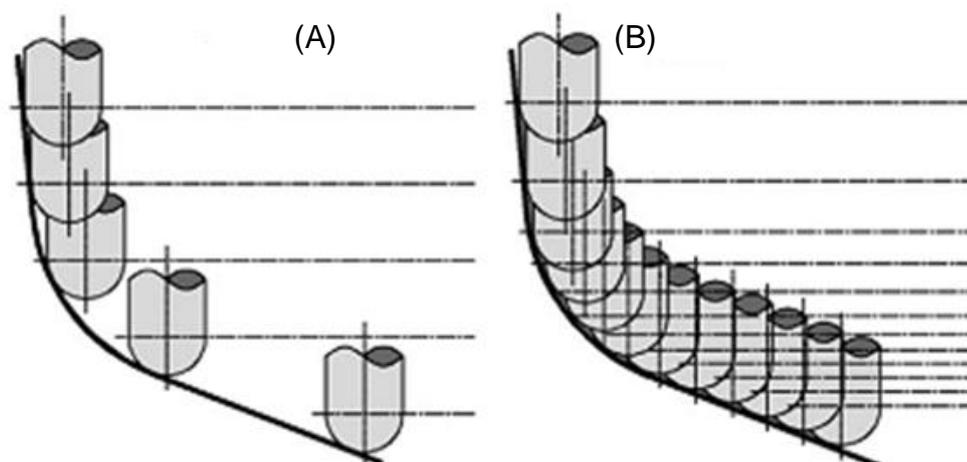


Figura 1.32. Controle do incremento do passe; a) passe com  $\Delta z$  constante; b) passe variável, mantendo a mesma distância entre os pontos de contato com a chapa (Attanasio, Ceretti e Giardini, 2006)

Este controle do passe vertical é chamado *Constant Cusp Finishing* (Figura 1.33), que é continuamente calculado para compensar a inclinação da geometria e manter a rugosidade (altura da crista) constante. Isto produz um acabamento uniforme em toda a superfície usinada ou estampada;

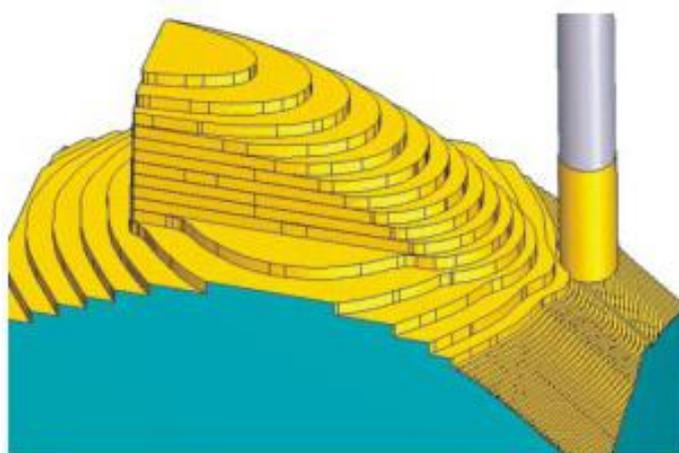


Figura 1.33. Estratégia “Constant Cusp Finishing” sendo aplicada no acabamento após o desbaste. (Bambach, et al. 2003)

### **1.8.3 Rotação da Ferramenta**

No desenvolvimento de um aquecedor solar fabricado por estampagem incremental (Jeswiet, Duflou, et al. 2005), a rotação do eixo árvore (*spindle*) ficou livre, ou seja, a ferramenta rotacionava de acordo com que essa tocava a superfície da chapa, proporcionando menor fricção entre as partes. Esse método foi utilizado em máquinas especialmente desenvolvidas para estampagem incremental e foi escolhido para a realização de todos os testes relatados nessa tese.

### **1.8.4 Tipo de Ferramenta**

Os valores de diâmetro mais comumente encontrados variam de 10 a 12mm (Ambrogio G.; Filice L.; Manco G. L. 2008), (Ceretti, Giardini e Attanasio 2004), (Dejardin, et al. 2010), (Hussain, G.; Gao, L.; Zhang, Z. Y. 2008) e (Duflou, et al. 2008). Micari (2004) demonstrou que a utilização de diâmetros pequenos provoca concentrações de tensão na zona de deformação da chapa, localizadas abaixo da ferramenta. Já diâmetros maiores tendem a distribuir a tensão para uma área maior. Consequentemente, diminuir o diâmetro da ferramenta aumentará a conformabilidade da chapa. Entretanto, a diminuição do diâmetro a tornará mais frágil aos esforços triaxiais que ocorrem na conformação. A utilização de ferramenta com diâmetro de 10mm proporcionou homogeneidade na espessura e suportou os esforços, sem a ocorrência de fraturas.

### **1.8.5 Tipo de estratégia**

A determinação do tipo de estratégia depende da geometria da peça (produto final), do material e espessura da chapa, do acabamento superficial desejado, das opções disponíveis no software CAM e do tipo de máquina CNC utilizada (Ceretti, Giardini e Attanasio 2004). As variações utilizadas e os resultados obtidos são apresentados no item 1.5.1.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA SOBRE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS DE TITÂNIO

O titânio e suas ligas têm sido largamente utilizados na fabricação de próteses crânio-maxilo-faciais, implantes odontológicos, dispositivos cardiovasculares (caixas e desfibriladores de marca-passo), instrumentos cirúrgicos e dispositivos especiais devido às excelentes propriedades mecânicas, como por exemplo, baixo valor do módulo de Elasticidade (em relação aos aços, mas ainda de 4 a 5 vezes superior ao do osso humano, em média), resistência à corrosão (sendo superior aos aços inox e ligas de cobalto) e características de biocompatibilidade (Wang 1996). Além das aplicações biomédicas, o titânio é utilizado como revestimento em componentes estruturais aeroespaciais e marítimos (Yuan e Shim 2002).

### 2.1 Micrografia

Segundo Chen e Chiu (2005), o titânio puro (Ti-CP), na forma de chapa e em temperatura ambiente, na fase  $\alpha$ , apresenta baixa ductilidade, devido à sua estrutura cristalina ser hexagonal-compacta. A estampagem incremental, nesse caso, além de permitir a produção de peças únicas, é utilizada para aumentar a sua conformabilidade (citado no item 2.1), se adequando a geometrias complexas de conformação, nas aplicações ortopédicas e implantes cranianos (Grandini, Almeida e Pintão 2006), (Jacobs, Gilbert e Urban 1998).

De acordo com Lins (2008), as ligas de Ti-CP do tipo  $\alpha$  ocorrem somente à temperatura ambiente. Como tais ligas não exibem fases metaestáveis obtidas através do resfriamento rápido, o emprego de tratamentos térmicos não produz variações significativas em termos microestruturais e de propriedades mecânicas. Além disso, como a fase  $\alpha$  (HC) não é sensível a transições dúctil-frágil, esse grupo de ligas de titânio é indicado para utilização em baixas temperaturas. Em termos de comportamento mecânico, as ligas tipo  $\alpha$  caracterizam-se por exibir bom nível de resistência mecânica, alto módulo de elasticidade, boa tenacidade à fratura e baixa forjabilidade, o que se deve à estrutura HC. As ligas monofásicas alfa não podem ter suas propriedades alteradas por tratamentos

térmicos, mas sim somente por encruamento e recozimento subsequente. A Figura 2.1 apresenta a micrografia do Ti-CP laminado a frio, na fase  $\alpha$ .



Figura 2.1. Micrografia óptica da superfície do Titânio comercialmente puro (99%) laminado, com grãos  $\alpha$  – aumento de 200x;

## 2.2 Curva tensão – deformação de engenharia

De acordo com Moosbrugger (2007) - Figura 2.2, a tensão máxima ( $\sigma_{\max}$ ) do Titânio CP é de 520 MPa (sentido longitudinal de laminação) e 540 MPa (sentido transversal de laminação).

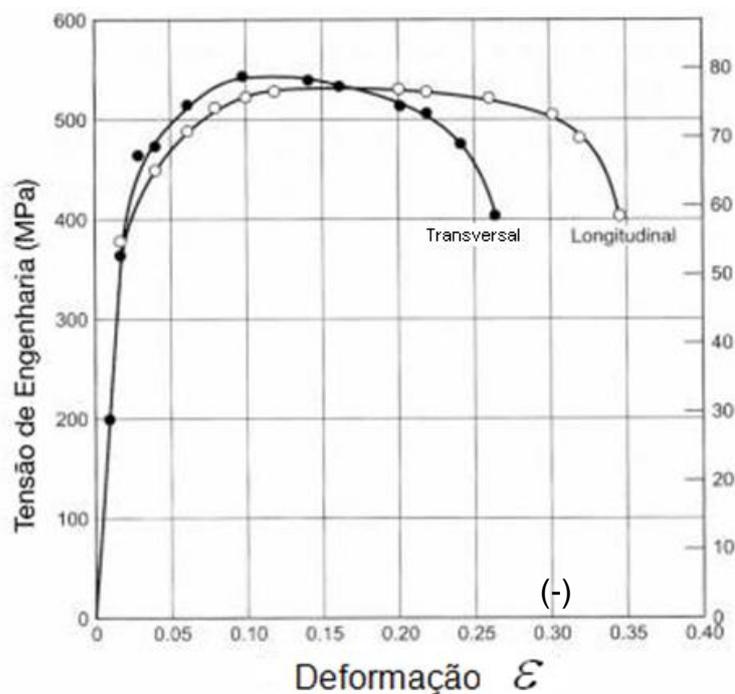


Figura 2.2. Curva tensão-deformação do titânio comercialmente puro (Ti-CP) grau 2 (Moosbrugger 2007)

### 2.3 Curva de escoamento

Moosbrugger (2007) também apresenta a curva de escoamento do Titânio CP (Figura 2.3). Para obter a curva, o ensaio de tração foi realizado com velocidade de 6mm/min sobre uma chapa de 0.81mm de espessura.

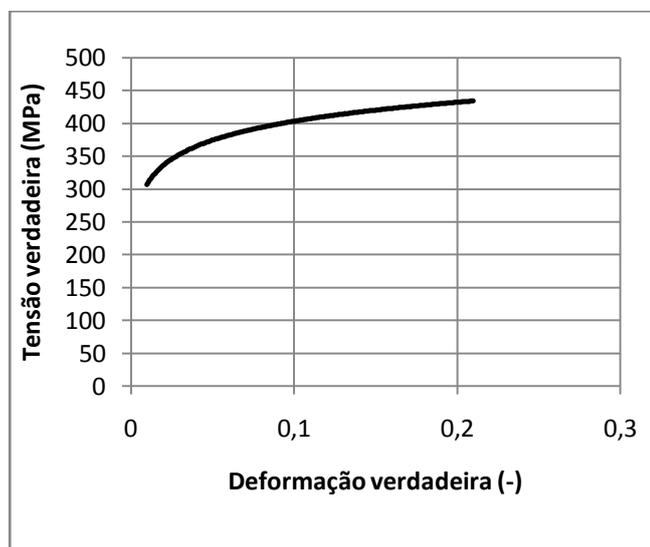


Figura 2.3. Curva de escoamento do Titânio CP (Moosrugger 2007)

Convertendo a curva em escala logarítmica (Figura 2.4) pode-se obter o ângulo de inclinação da reta ( $\alpha$ ), que define o índice de encruamento  $n$  através da equação:

$$n = \operatorname{tg} \alpha \quad 2-1$$

$$n = \operatorname{tg} 12$$

$$n = 0,21$$

O índice de encruamento representa o endurecimento do material devido a alterações em sua rede cristalina originadas a partir da zona plástica de deformação.

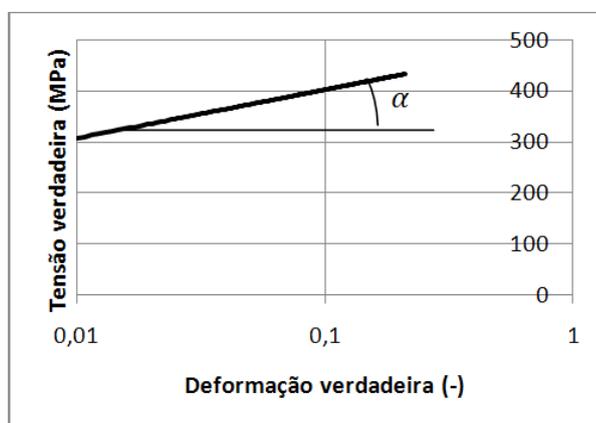


Figura 2.4. Curva Curva de escoamento do Titânio CP em escala logarítmica

## 2.4 Curva limite conformação

Outra importante característica do titânio é a sua curva limite de conformação (CLC). (Chen e Chiu 2005) realizaram um estudo sobre a conformabilidade do titânio CP, obtendo diversas propriedades mecânicas, entre elas a CLC. Foram utilizadas chapas retangulares com o mesmo comprimento 100mm, mas com larguras diferentes, que vão de 10 a 100 mm em incrementos de 10 mm. Similar aos testes de tração, a chapa de titânio CP foi cortada em três orientações ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ), em relação ao sentido da laminação. Durante os testes, as chapas foram estampadas por um punção semi-esférico de 78mm de diâmetro, até a fratura. Foram medidas as elipses no pólo do punção e do lado oposto à trinca, que deram origem à CLC do titânio CP, conforme a Figura 2.5.

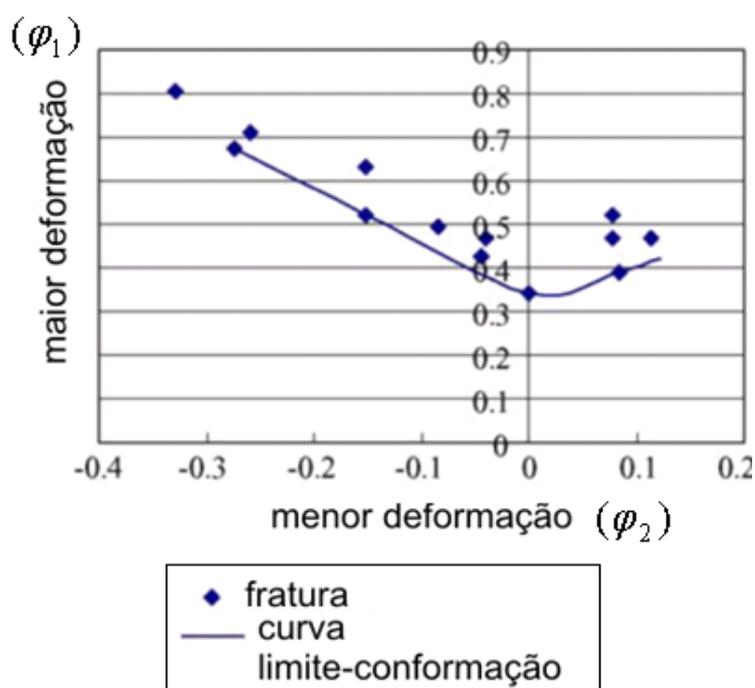


Figura 2.5. Curva limite-conformação do Titânio CP (Chen e Chiu 2005)

A CLC é um importante parâmetro indicador dos limites de essampabilidade das chapas, em um processo convencional de estampagem. Entretanto, quando o processo empregado é a estampagem incremental, são obtidos valores que ficam

bem acima daqueles preconizados pela CLC. Isso pode ser observado na Figura 2.6: a CLC incremental fica bem acima da CLC convencional e, à medida em que predomina a deformação plana (uniaxial, tendendo ao eixo vertical), o limite de conformabilidade aumenta.

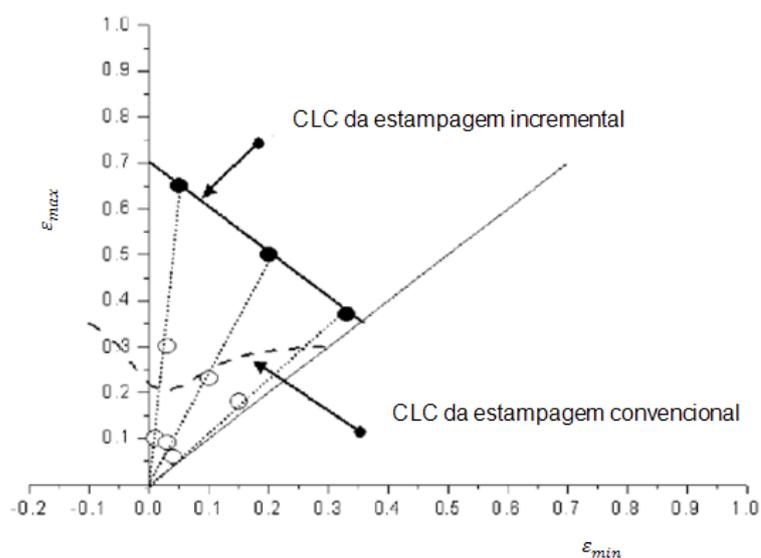


Figura 2.6. Curvas Limite Conformação na estampagem convencional e incremental (Kim e Park 2002)

As deformações são identificadas pela forma como os círculos de visioelasticidade têm sua área modificada em função do processo de conformação. A Figura 2.7 ilustra os tipos de deformação.

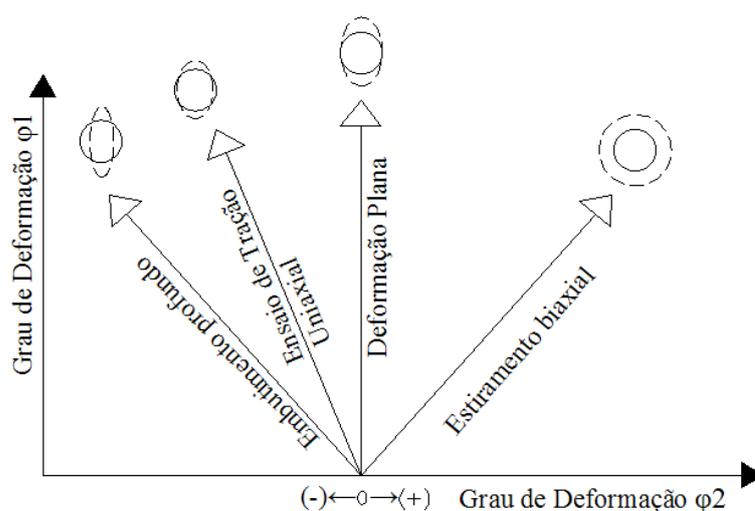


Figura 2.7. Tipos de deformação de chapa metálica (Schaeffer, L. 2004)

## 2.5 Propriedades físico-químicas

Algumas propriedades físico-químicas do titânio comercialmente puro (sem elementos de liga e com 99,55% de Ti) estão listadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Propriedades físico-químicas do titânio comercialmente puro – grau 2 (Grandini, Almeida e Pintão 2006)

<i>Propriedade</i>	<i>Valor</i>
Densidade	4,51 g/cm <sup>3</sup>
Número atômico	22
Massa atômica	47,90u
Ponto de Fusão	1724°C
Resistência à corrosão	excelente
Módulo de Elasticidade	116 GPa
Alongamento (%)	40
Coefficiente de Poisson	0,34
Dureza	90 – 160 HV
Condutibilidade elétrica	1,5 a 2,5 m/Ω mm <sup>2</sup>
<i>Tensão de escoamento</i>	290 a 690 N/mm <sup>2</sup>

As classes de titânio ASTM-F67 e o ASTM-F136 têm aplicações específicas à área biomédica. São fabricados com rigoroso controle de qualidade, por se tratar de componentes temporários ou permanentes a serem incluídos no corpo humano (Grandini, Almeida e Pintão 2006).

A Tabela 2.2 mostra a composição química do Titânio comercialmente puro. O material utilizado nos testes práticos foi o Ti-CP F67 grau 2. Os graus especificam as quantidades de C, O, N, H e Fe presentes em sua composição.

Tabela 2.2. Propriedades químicas do Ti-CP F67 G2 (Realum Comércio de Metais s.d.)

	<i>Ti</i>	<i>C(max)</i>	<i>O(max)</i>	<i>N(max)</i>	<i>H(max)</i>	<i>Fe(max)</i>	<i>Al</i>	<i>V</i>	<i>Pd</i>
Grau 1	Bal.	0.08	0.18	0.03	0.015	0.20	-	-	-
Grau 2	Bal.	0.08	0.25	0.03	0.015	0.30	-	-	-
Grau 4	Bal.	0.08	0.40	0.05	0.015	0.50	-	-	-
Grau 5	Bal.	0.08	0.20	0.05	0.015	0.40	5.5-6.75	3.5-4.5	-
Grau 7	Bal.	0.08	0.25	0.03	0.015	0.30	-	-	0.12-0.25

A quantidade dos elementos residuais (carbono, oxigênio, nitrogênio e ferro) encontrados no Ti-CP aumentam a resistência mecânica e diminuem a ductilidade

do material. Na Figura 2.8 mostra-se o efeito da concentração de alguns elementos residuais ou impurezas sobre a resistência à tração. Nota-se que o nitrogênio e o oxigênio aumentam a resistência à tração e, conseqüentemente, diminuem a conformabilidade.

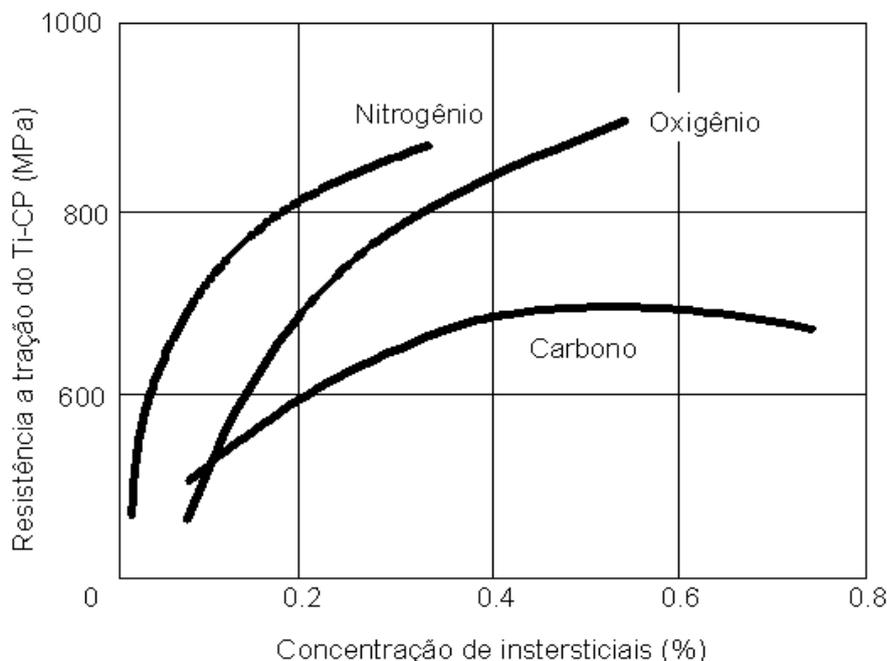


Figura 2.8. Influência dos elementos residuais do Ti-CP na resistência à tração

## 2.6 Características biomecânicas

Quanto as propriedades físicas, químicas e mecânicas diferenciadas do titânio, este metal apresenta características relacionadas especificamente com a biomecânica (Bazan 2004):

- É resistente a corrosão e reativo, devido a rápida formação de uma camada de óxido na superfície, quando em contato com tecidos orgânicos;
- densidade aceitável para utilização como prótese ( $4,45 \text{ g/cm}^3$ ) – enquanto a do osso humano é  $1,35 \text{ g/cm}^3$ ;
- Possui módulo de elasticidade superior ao osso humano ( $E_{Ti} = 116 \text{ GPa}$ ;  $E_{osso} = 13,5 \sim 22,5 \text{ GPa}^1$ );

<sup>1</sup>  $13,5 \text{ GPa}$ : osso trabecular da vértebra;  $22,5 \text{ GPa}$ : tíbia; ossos retirados de um cadáver do sexo masculino (Sanada 2007)

- d) É biocompatível: sua presença no organismo não causa rejeições (edemas reações imunológicas) no local do implante ou no sistema biológico (alergias);
- e) É biofuncional: cumpre tanto as funções biomecânicas como as estéticas devido à estabilidade dimensional;
- f) É bioinerte: praticamente não há formação do encapsulamento fibroso ao redor da prótese (imunologicamente não racional);;
- g) É esterelizável;

O titânio é um elemento altamente reativo quimicamente, ao entrar em contato com os tecidos e fluidos corporais, forma na superfície um filme estável de óxido de 4 – 6 nm de espessura, com composição predominante de  $TiO_2$  com menores quantidades de  $Ti_2O_3$  e  $TiO$ . Esse filme confere ao material resistência a determinados ácidos aos quais outros metais e ligas não possuem. Isto ocorre devido ao titânio possuir uma elevada afinidade pelo oxigênio, reagindo com o mesmo, e formando um óxido protetor na superfície com excelente estabilidade e aderência (Sittig et al 1997) *apud* (Melo 2007).

O titânio puro a temperatura ambiente possui uma estrutura hexagonal compacta denominada fase alfa ( $\alpha$ ). Nessa fase, o fator de empacotamento atômico é de 0,74 (74% do volume da célula é ocupado por átomos. Na temperatura de 885°C a estrutura transforma-se em cúbica de corpo centrado (CCC) denominada beta ( $\beta$ ), com fator de empacotamento atômico de 0,68. A alteração da microestrutura afeta as características de conformabilidade dos metais, influenciando as suas propriedades mecânicas (Melo 2007).

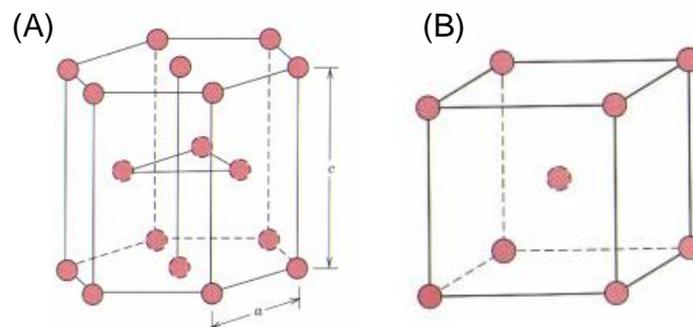


Figura 2.9. Estrutura cristalina do titânio: a) hexagonal compacta na temperatura ambiente; b) cúbica de corpo centrado na temperatura de transformação alfa-beta

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA UTILIZADA NOS TESTES

Para a caracterização do material, realizada antes dos testes de estampagem, foram utilizados os seguintes equipamentos e insumos:

- Ensaio de tração: máquina de tração EMIC modelo DL10000 capacidade 100 kN;
- Ensaio de microdureza Vickers: microdurômetro Future Tech FM 700;
- Análise metalográfica: máquina de embutir, politriz, reagente a base de ácido nítrico e fluorídrico, microscópio óptico Leica, máquina fotográfica digital Olympus;
- Rugosidade: rugosímetro portátil TR 100 Roughness Tester;
- Visioplaticidade: máquina para gravação eletroquímica de círculos, eletrólito, tela serigráfica.

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

#### 3.1 Ensaio de tração da matéria prima

As chapas de Ti-CP F67 G2 foram adquiridas da empresa Realum Comércio de Metais de São Paulo/SP. A chapa para o ensaio de tração tem espessura de 0,5mm e foram retirados três corpos de prova: o primeiro paralelo ao sentido de laminação ( $0^\circ$ ), o segundo oblíquo ao sentido de laminação ( $45^\circ$ ) e o terceiro transversal ao sentido de laminação ( $90^\circ$ ). O formato segue a norma ABNT 6152 / DIN EM 10002, para corpos de prova de ensaio de tração para chapas, conforme Figura 3.1.

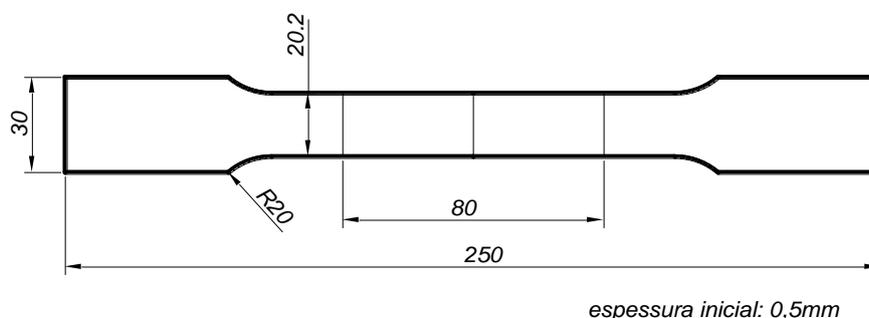


Figura 3.1. Dimensões padronizadas do corpo de prova

Após realizados os ensaios, foram geradas as curvas tensão-deformação convencionais para cada CP (Corpo de Prova - Figura 3.2, Figura 3.3 e Figura 3.4).

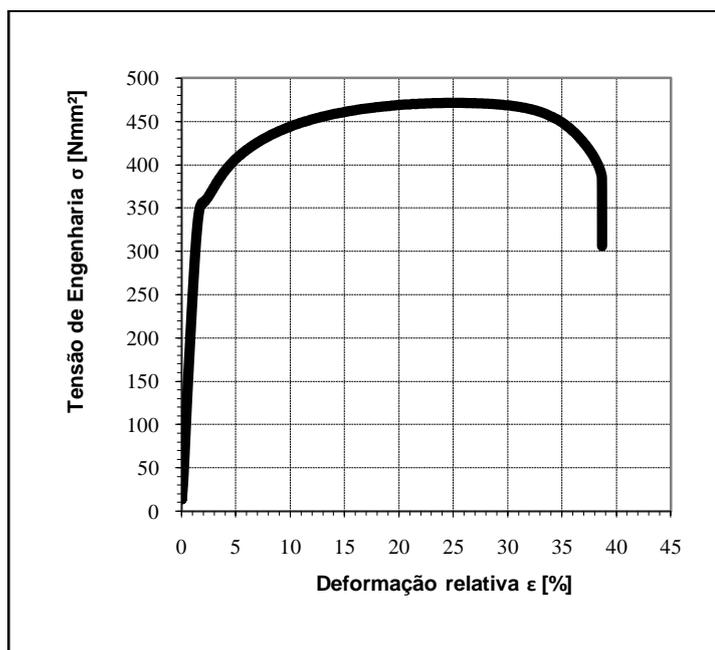


Figura 3.2. Curva convencional  $\sigma X \epsilon$  do Ti-CP grau 2 - CP retirado a paralelamente em relação ao sentido de laminação.

A curva obtida no ensaio de tração (Figura 3.2) ficou semelhante a da literatura (Figura 2.2). A tensão máxima dessa última foi de aproximadamente 520MPa, enquanto a curva obtida apresentou a tensão máxima de 470MPa, indicando ser menos resistente à tração do que a curva da literatura. Essa comparação foi feita entre as curvas obtidas a partir do corpo de prova retirado no sentido paralelo a direção de laminação da chapa (0°).

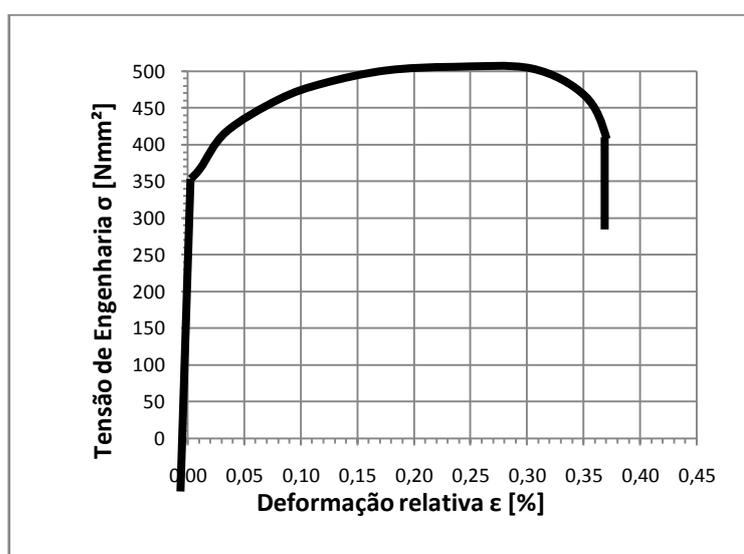


Figura 3.3. Curva convencional  $\tau X \epsilon$  do Ti-CP - CP retirado a 45° em relação ao sentido de laminação.

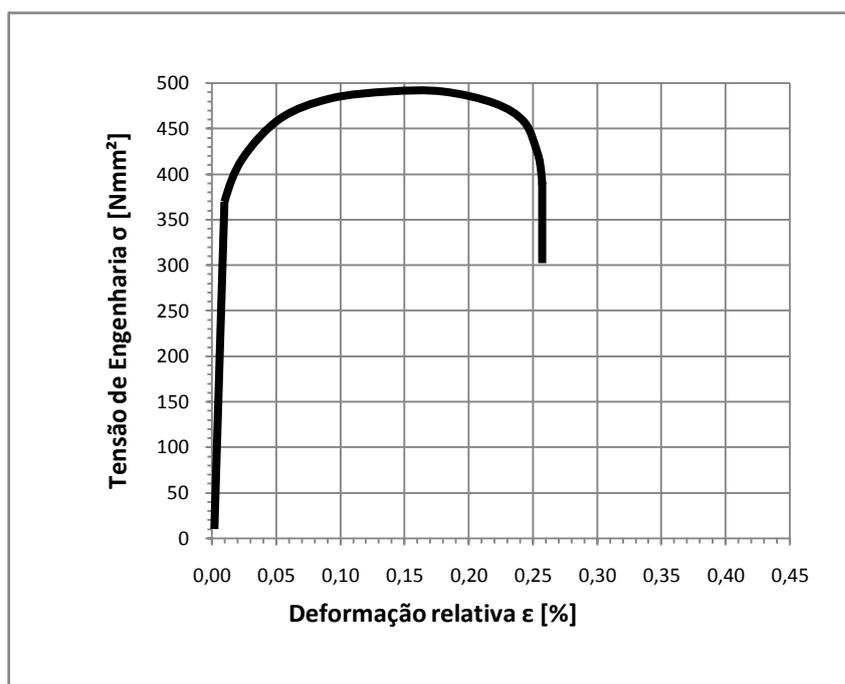


Figura 3.4. Curva convencional  $\tau X \varepsilon$  do Ti-CP grau 2 - CP retirado ortogonalmente em relação ao sentido de laminação.

Observando-se o tipo de fratura na Figura 3.5, constatou-se que a chapa de Ti-CP grau 2 apresentou uma fratura do tipo dútil, com estrição visível (Garcia, SPIM e Santos 2000), embora Chen e Chiu (2005) tenham afirmado o contrário no item 2.1, devido a característica de sua estrutura cristalina.



Figura 3.5. Fratura dútil da chapa (sentido de laminação paralelo ao corpo de prova), caracterizada pelo ângulo de ruptura (aprox.  $45^\circ$ ) e pela estrição visível.

Através do ensaio de tração puderam ser obtidos os valores de deformação relativa, alongamento (Figura 3.6), tensão máxima ( $\sigma_b$ ) e a curva de escoamento do material (Figura 3.7). Os valores de alongamento ( $\delta$ ) e área inicial ( $S_0$ ) foram obtidos por medição na chapa, antes e depois de rompida. Os valores obtidos a seguir e as

tabelas e gráficos resultantes referem-se ao corpo de prova retirado no sentido paralelo a direção de laminação da chapa (0°).

a) *deformação relativa* ( $\varepsilon$ ):

$$\varepsilon = \left( \frac{l - l_0}{l_0} \right) \quad (3-1)$$

$$\varepsilon = \left( \frac{110,9 - 80}{80} \right)$$

$$\varepsilon = 0,38$$

b) *alongamento* ( $\delta$ ):

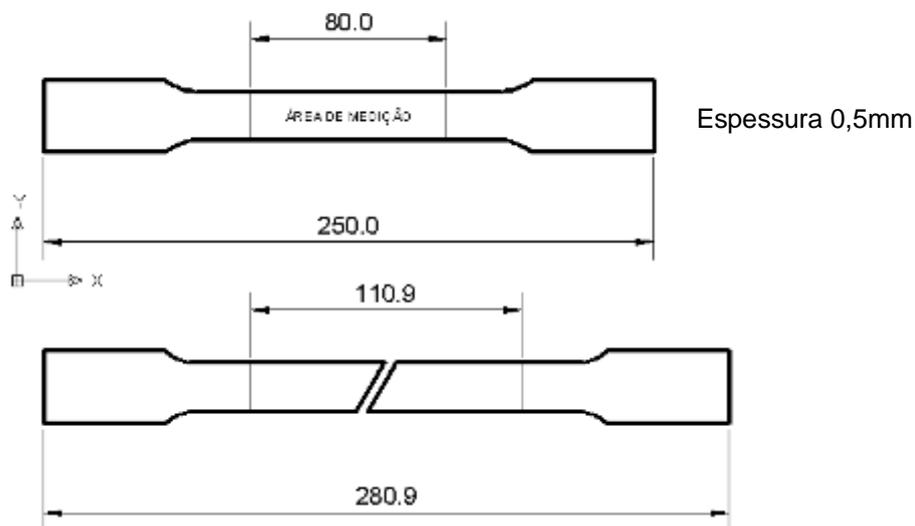


Figura 3.6. Dimensões do corpo de prova antes e depois do ensaio de tração.

$$\delta = l - l_0 \quad (3-2)$$

$$\delta = 30,9mm$$

c) *tensão máxima* ( $\sigma_B$ ):

$$\sigma_B = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad (3-3)$$

$$\sigma_B = \frac{4947,7}{10,5}$$

$$\sigma_B = 471 \text{ MPa}$$

d) *curva de escoamento do material* ( $k_f \times \varphi$ )

O encruamento é um fenômeno que provoca o endurecimento do metal quando deformado plasticamente. Na deformação plástica, há o movimento das discordâncias, que interagem entre si ou com outras imperfeições, dificultando sua mobilidade, necessitando de uma tensão maior para provocar a deformação.

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, L. 2004):

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (3-4)$$

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

Os demais dados necessários para a determinação algébrica da curva de escoamento são (Schaeffer e Rocha 2007):

- a deformação relativa no instante de tensão máxima  $\varepsilon = 0,25$  (de acordo com Figura 3.2)

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

$$\varphi = n \quad (3-5)$$

A deformação verdadeira correspondente à tensão máxima, que é calculada com o valor da deformação relativa no instante de tensão máxima ( $\varepsilon = 0,25$ ) retirado do ensaio de tração (Figura 3.2):

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3-6)$$

$$\varphi = \ln(1 + 0,25)$$

$$\varphi = 0,096$$

Igualando 4.5 a 4.6, tem-se que:

$$n = 0,096$$

Tensão verdadeira ( $Kf$ ) correspondente a tensão máxima do material (Schaeffer e Rocha 2007):

$$kf = \sigma_B(1 + \varepsilon) \quad (3-7)$$

$$kf = 471(1 + 0,25) = 589MPa$$

Dessa maneira já é possível obter a constante  $C$ :

$$kf = C.\varphi^n$$

$$589 = C.0,096^{0,096}$$

$$C = 737.6MPa$$

Portanto, a curva de escoamento ( $kf \times \varphi$ ) do titânio CP grau 2 pode ser definida matematicamente por:

$$kf = 737.6 * \varphi^{0,096}$$

e está representada na Figura 3.7:

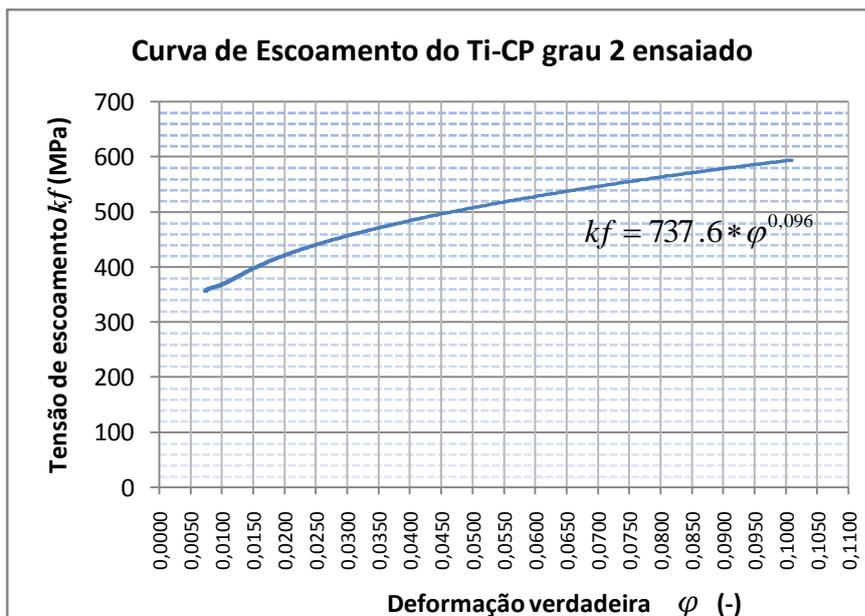


Figura 3.7. Curva de escoamento do Titânio CP, grau 2.

Plotando a curva de escoamento em escala logarítmica, pode-se obter o índice de encruamento ( $n$ ) do material.. Normalmente se obtém uma reta e o valor de  $n$  é dado pela inclinação dessa reta (Equação 2.1). A Figura 3.8 apresenta a plotagem logarítmica e o valor de  $n$ :

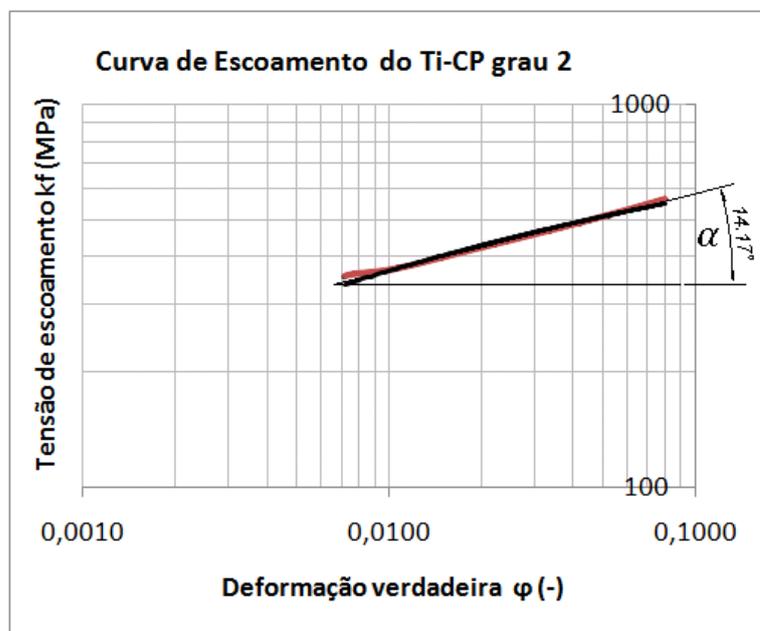


Figura 3.8. Curva de escoamento representada com eixos logarítmicos

$$n = \operatorname{tg} \alpha$$

$$n = 0,25$$

A curva de escoamento da literatura (Figura 2.4) apresentou  $n=0,21$ . Isto significa que, no caso da chapa utilizada no ensaio de tração, há um maior endurecimento do material durante a deformação plástica.

A Tabela 3.1 apresenta os valores obtidos no ensaio de tração; a Figura 3.9 apresenta as curvas Tensão de Engenharia x Deformação Relativa ( $\sigma x \epsilon$ ) e Tensão Verdadeira x Deformação Verdadeira ( $kf x \varphi$ ):

Tabela 3.1. Propriedades mecânicas obtidas a partir do Ti-CP grau 2 ensaiado

Propriedade	Símbolo	Valor obtido / calculado
Tensão de Escoamento (convencional)	$\sigma_E$	350 MPa
Alongamento	$\delta$	30,9
Deformação relativa	$\epsilon$	38%
Tensão máxima	$\sigma_B$	471 MPa
Deformação relativa no instante da tensão máxima	$\epsilon_B$	0,25
Deformação verdadeira no instante da tensão máxima	$\varphi$	0,096
Coeficiente de encruamento	$n$	0,25
Equação da curva de escoamento do Titânio CP – grau 2 para CP retirado paralelo ao sentido de laminação		$kf = 737,6 \cdot \varphi^{0,096}$

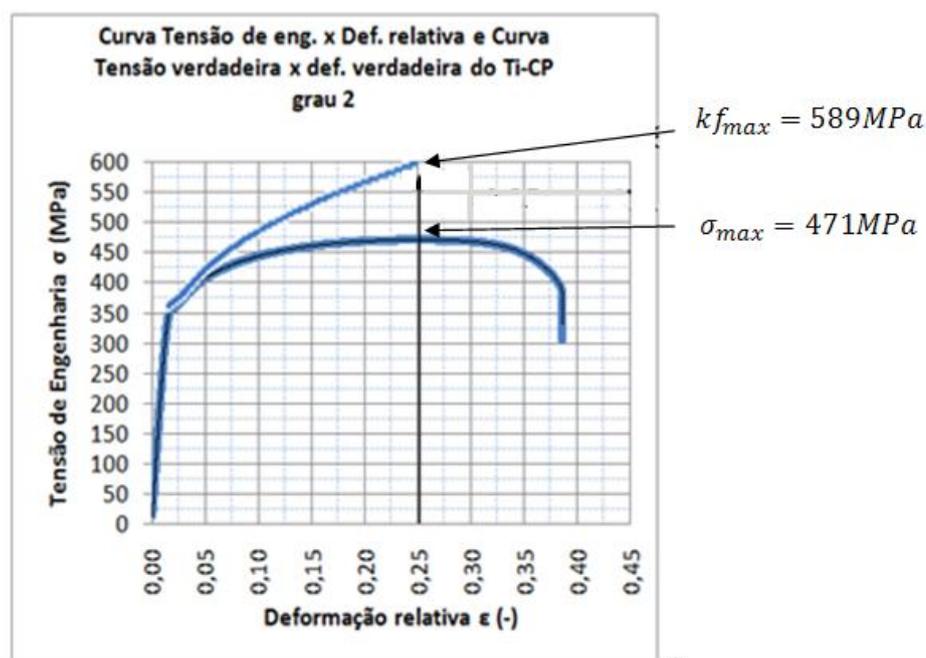


Figura 3.9. Curva tensão-deformação de engenharia e curva real

### 3.2 Índice de anisotropia

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

O índice de anisotropia  $r$  é definido por :

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_l} \quad (3-8)$$

$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{-\ln \frac{l}{l_0}} \quad (3-9)$$

Sendo:

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

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

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

$l$  [mm]: comprimento final do corpo de prova no ensaio de tração

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

$$r_0 = \frac{\ln \frac{13,5}{20}}{-\ln \frac{110,9}{80}}$$

$$r_0 = 1,2$$

$$r_{45} = \frac{\ln \frac{14,1}{20}}{-\ln \frac{108,2}{80}}$$

$$r_{45} = 1,15$$

$$r_{90} = \frac{\ln \frac{15,6}{20}}{-\ln \frac{101,6}{80}}$$

$$r_{90} = 1,03$$

A anisotropia média ( $r_m$ ) indica a habilidade de uma chapa metálica resistir à diminuição de espessura, quando submetida às forças de tração e pode ser calculada por:

$$r_m = \frac{1}{4}(r_0 + 2r_{45} + r_{90}) \quad (3-10)$$

$$r_m = 1,13$$

Um material que não apresenta alterações em suas propriedades mecânicas segundo o sentido de laminação é chamado de material “isotrópico” e apresenta  $r_m = 1$  e quanto maior for este valor, maior será a resistência da chapa à diminuição de espessura. Como o  $r_m$  do Ti-CP F67 G2 ficou próximo de 1, isto significa que o material não apresenta boas características de conformabilidade, sobretudo para estampagem profunda.

### 3.3 Microdureza

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado com um microdurômetro Future Tech FM 700. Foram analisadas duas amostras. A primeira foi retirada de uma região não estampada da chapa e apresentou uma dureza (média de três medições) de 184 HV. O valor de microdureza encontrado na literatura, para chapas de Ti-CP F67 G2 laminadas, foi de 160 HV. O valor de 184 HV pode ser explicado pelo fato de que metais com estrutura cristalina na forma hexagonal compacta tendem a diminuir as dimensões da cavidade produzida pela ferramenta de dureza, alterando para mais o valor real.

A segunda amostra foi retirada de uma região estampada da chapa, na dimensão da superfície (e não da espessura). Foram realizadas três medições de dureza: 194.9, 217.5 e 193.9 HV; a dureza média foi de 202,1 HV, indicando que a estampagem incremental da chapa aumentou a dureza do material, devido à ocorrência do encruamento na deformação plástica.

### 3.4 Metalografia

A análise metalográfica das peças utilizadas nos testes foi feita em um microscópio ótico da marca Leica. As amostras foram embutidas em polímero (baquelite), lixadas e polidas em uma politriz giratória. O ataque foi feito com um reagente composto de 10% de ácido fluorídrico e 20% de ácido nítrico e o tempo de ataque foi de 10 segundos. As condições e formulação dos reagentes utilizadas nessa análise divergem das efetuadas por Salem, Kalidindi e Doherty (2003). Porém, o titânio pesquisado na literatura tinha 99.9998% de pureza e não tem a mesma composição química do Ti-CP F67 G2 empregado nos testes (veja composição química na Tabela 2.2). Esses fatos podem ser responsáveis pelas diferenças nas imagens metalográficas obtidas entre a análise executada e a da literatura.

Foram analisadas duas amostras: a primeira (Figura 3.10a) foi retirada de uma região da chapa plana (não estampada); a segunda (Figura 3.10b) foi retirada da região de menor espessura da chapa depois de estampada. Ambas as amostras foram retiradas da dimensão da espessura da chapa (e não da superfície). Notou-se um contorno de grãos mais proeminente na peça estampada (b); ambas as amostras 'a' e 'b' apresentam uma estrutura isotrópica (sem alinhamento dos grãos). Na peça não estampada, o contorno de grãos não é claramente percebido e não há alinhamento destes. O tamanho pequeno de grão diminui as descontinuidades e aumenta a resistência da chapa a deformação. Essa característica pode explicar a menor capacidade de se deformar (sem fraturar) do titânio em relação ao alumínio, por exemplo, que apresentou grãos maiores e descontinuados.

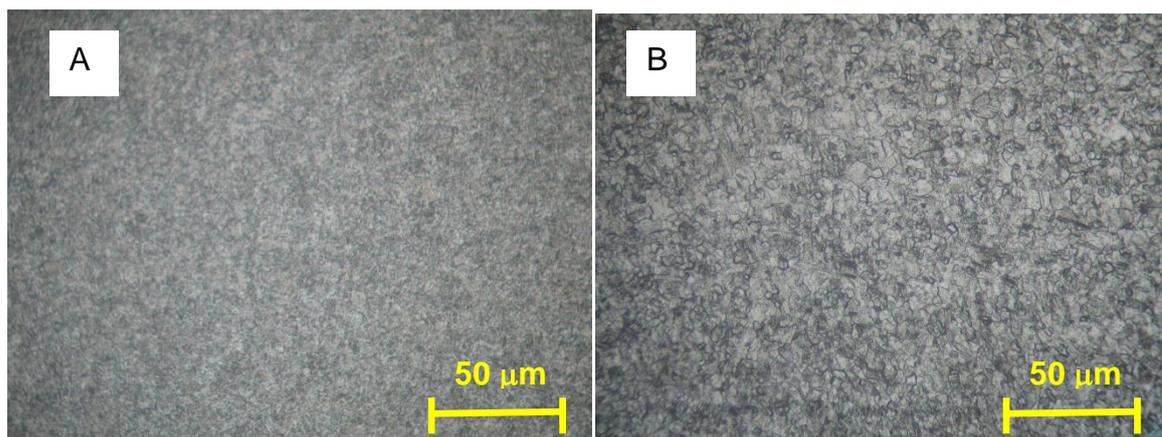


Figura 3.10. Microscopia óptica do Ti-CP F67 G2. a) antes da estampagem; b) depois da estampagem. Aumento de 200x

### 3.5 Rugosidade

Conforme consulta ao trabalho do Prof. Dr. Newton Fuentesfria (Fuentesfria 1997), a rugosidade na face externa de titânio não é desejada porque, após o implante, haverá maior aderência bacteriana em sua superfície, aumentando o risco de infecções endógenas e exógenas.

O valor da rugosidade (parâmetro Rz) depende do material da chapa e da ferramenta, do tipo de lubrificação e dos valores de passo vertical e avanço. As medições de rugosidade foram feitas em três peças estampadas em formato de tronco de cone (diâmetro inicial de 90mm, profundidade de 40mm e ângulo de parede de 45°), utilizando chapa de Ti-CP F67 G2 espessura 0,5mm. As três estampagens foram realizadas com ferramenta de ponta esférica Ø10mm (SAE 4340) e velocidade de avanço de 500 mm/min. O parâmetro alterado foi o passo vertical (0.5, 0.25 e 0.1mm). Levando-se em consideração o objeto de estudo deste trabalho (implantes cranianos) foram medidas as rugosidades internas (onde houve contato com a ferramenta) e externas, considerando que o implante é posicionado entre os tecidos do corpo e a rugosidade superficial influencia ambos os lados da chapa. As medidas foram realizadas com rugosímetro digital portátil TR 100 Roughness Tester. A Tabela 3.2 mostra os valores de rugosidade, sendo que os menores valores foram obtidos utilizando passe de 0.1mm.

Tabela 3.3. Valores de rugosidade das chapas estampadas

Rugosidade ( $\mu\text{m}$ ) (média de três medições)	Peça 01 Passe 0.1mm	Peça 02 Passe 0.25mm	Peça 03 Passe 0.5mm
Rugosidade externa	12.06	30.04	75.02
Rugosidade interna (contato c/ ferramenta)	3.02	8.05	18.06

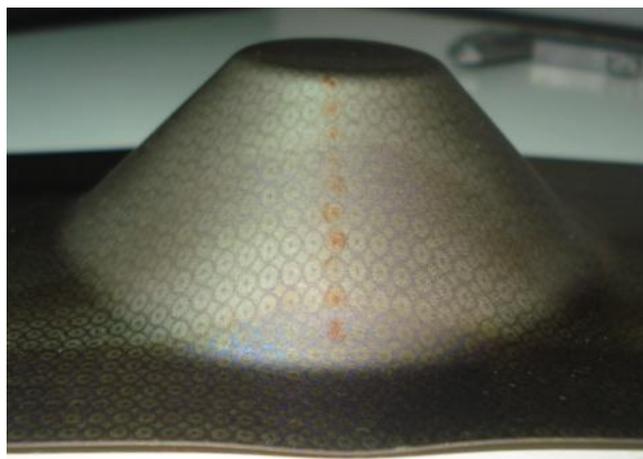


Figura 3.11. Tronco de cone essampado para medição das deformações

### 3.6 Deformações

Para medir as deformações  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  foi utilizada a mesma peça onde foi medida a rugosidade (Figura 3.11). Antes da conformação, foram gravados eletroquimicamente círculos de  $\varnothing 2,5\text{mm}$  sobre a superfície da chapa. Comparando a Figura 3.12 com os tipos de deformação da Figura 2.7, pode-se perceber que a deformação é do tipo uniaxial. A tabela com os valores absolutos e os valores das deformações estão em anexo, no final do trabalho.

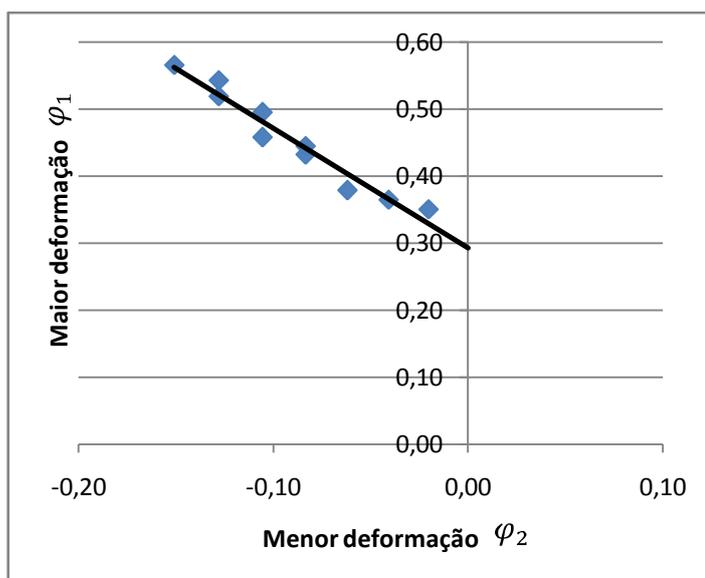


Figura 3.12. Gráfico das deformações  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  para geometria de tronco de cone da figura 3.11

Os valores de  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  foram obtidos através de uma régua graduada flexível, impressa em papel poliéster (translúcido), com as deformações relativas e verdadeiras em uma grade circular de 2,5 mm de diâmetro. A régua, por ser flexível, acompanha o formato do corpo de prova e a transparência do papel possibilita a visualização das linhas da malha.

## **4 ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL**

### **4.1 Objetivo geral dos testes de estampagem incremental**

O objetivo geral dos testes é demonstrar que, utilizando a estampagem incremental, consegue-se maiores deformações para a mesma ductilidade, quando comparada com a estampagem convencional.

### **4.2 Descrição dos testes**

Foram programados dez testes de estampagem, divididos em dois grupos: os testes 1 a 3 foram os testes preliminares e tinham dois objetivos específicos: primeiro, aplicar a metodologia proposta por Ambrogio, et al. (2005), descrita no próximo parágrafo e, segundo, verificar possíveis erros de *setup* de ferramentas ou falhas de programação CAM. Os testes 4 a 10 utilizaram a mesma metodologia dos testes anteriores, mas apresentaram resultados objetivos, relacionados à distribuição de espessura e conformidade geométrica da chapa.

### **4.3 Metodologia**

O ciclo inicia com a aquisição de um conjunto de arquivos de tomografia computadorizada (TC), que contém imagens pictoriais (JPG) das seções transversais, laterais e coronais do crânio. Através dessas imagens, é possível construir um modelo vetorial tridimensional do crânio do paciente, em extensão STL, através do software livre 'Invesalius'. Faz-se a edição deste modelo em um software CAD 3D a fim de gerar uma superfície uniforme, referenciada com os planos X, Y, Z e preparada para ser enviada ao software CAM.

Na etapa de fabricação, foi realizada a programação de usinagem do molde de PU (ponto de apoio inferior específico). A programação de usinagem foi composta por duas sequências: a) desbaste, realizado com fresa de topo diâmetro 10mm e b) acabamento, feito com fresa tipo *Ball nose* (ponta semi-esférica), diâmetro de 5mm.

A seguir foi realizada a programação de estampagem, que corresponde a operação de acabamento, porém utilizando uma superfície de referência com o equivalente a 98% do tamanho original do crânio (Figura 4.1). Este percentual varia de acordo com a espessura da chapa. Nos três primeiros experimentos, foi utilizada chapas de Ti-CP com espessura de 0,5mm. A diminuição de 2% na superfície de referência (modelo CAD) gerou um espaçamento de 0,56mm entre a trajetória inicial (usinagem de acabamento do molde) e final (estampagem da chapa), conforme ilustrado Figura 4.1 (o valor extrapolado de 0,06mm foi ignorado Nesses primeiros testes). Mesmo considerando que a espessura da chapa diminui com o escoamento, a correção de trajetória foi necessária, sobretudo no início do processo de estampagem, onde a espessura da chapa é maior. A superfície de acabamento, com redução de 2%, produz uma folga de 0,56 mm entre a trajetória da ferramenta e a superfície de contato do molde. Se a compensação não for realizada, haverá um aumento da pressão da ferramenta sobre o molde de PU, podendo deformá-lo plasticamente e o inutilizando para outras estampagens ou, por outro lado, ocasionar a quebra da ferramenta por cisalhamento.

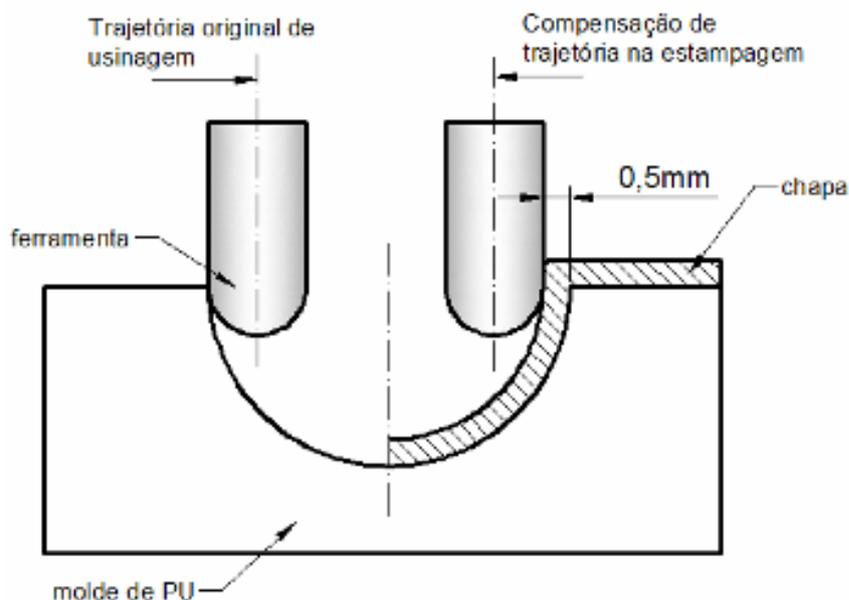


Figura 4.1. Trajetórias de usinagem e de estampagem. À esquerda a trajetória de usinagem do molde; à direita a trajetória de estampagem, considerando a espessura da chapa

#### 4.4 Recursos e equipamentos utilizados

Todos os recursos e equipamentos descritos a seguir, necessários à execução dos testes de estampagem foram disponibilizados pela Faculdade SATC. Os testes foram realizados no setor de usinagem da instituição.

##### 4.4.1 Ferramentas

Nos testes relatados (1 ao 10) foi utilizada uma ferramenta de ponta semi-esférica, aço 4340, Ø10mm (ver Figura 4.2). Esta ferramenta foi desenvolvida exclusivamente para este trabalho. A usinagem da ferramenta foi programada no módulo de torneamento do software EdgeCAM e a fabricação foi realizada em um torno CNC ROMI Centur 30D. Diferente das ferramentas de usinagem convencionais, as ferramentas de estampagem incremental não possuem aressas de corte.

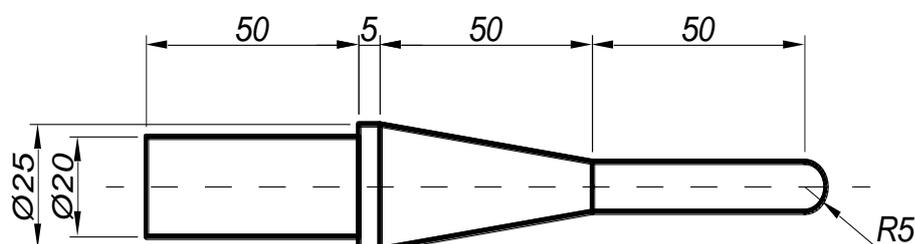


Figura 4.2. Ferramenta de estampar utilizada nos testes

##### 4.4.2 Máquina CNC

A máquina utilizada para os testes práticos foi um Centro de Usinagem Romi Discovery 4022 com as seguintes características físicas: dimensões da mesa - 840 x 360mm, curso eixo x - 590mm, curso eixo y - 406mm, curso eixo z - 508mm. Demais dados técnicos estão descritos na tabela 2, a seguir:

Tabela 4.1. Características técnicas da máquina CNC utilizada nos testes

<b>Características Técnicas</b>	<b>ROMI Discovery 4022</b>
Movimento rápido	X, Y: 20m/min
Avanço máximo (mm/min)	4000
Tipo/Classe de cone porta ferramenta	BT-40
Número de ferramentas no magazine	22
Resolução de posicionamento	0.001
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
<b>CNC</b>	Mach 9, 3 eixos de posicionamento, interpolação linear e circular

#### 4.4.3 Software CAM

Originalmente desenvolvido para usinagem, o software utilizado para gerar as simulações foi o EdgeCAM, versão 12, cuja licença de uso foi obtida junto à empresa SKA de São Leopoldo/RS. As simulações computacionais, além da aparência geométrica, forneceram os dados dimensionais, o tempo gasto no processo de conformação, o caminho utilizado pela ferramenta e a existência ou não de colisões entre as partes móveis (ferramenta, peça, dispositivo ISF e mesa XY) da máquina. A principal função do software CAM foi gerar os códigos 'G' responsáveis pela movimentação dos eixos X, Y e Z da máquina CNC.

#### 4.4.4 Dispositivo para estampagem negativa

Por estampagem negativa entende-se que o ponto de apoio inferior é uma cavidade (Figura 1.7c, Figura 4.14a). Na fabricação do ponto de apoio inferior (Figura 4.3) foi utilizado o polímero PN 651 com as seguintes características: densidade de 700Kg/m<sup>3</sup>; dureza Shore D 68; resistência à compressão de 25 N/mm<sup>2</sup> (dados do fabricante). Além da cavidade de conformação, foram realizados furos para fixação da placa prensa-chapas. Outro dispositivo para estampagem positiva (Figura 1.7d, Figura 4.14b) foi projetado e fabricado e está descrito no item 4.6.4.



Figura 4.3. a)polímero utilizado como suporte inferior; b)placa prensa-chapas.

#### 4.4.5 Equipamentos de medição

Nos testes 4, 6 e 10, foram feitas as medições de espessura e perfil da chapa. Para medir a distribuição de espessura foi utilizado um micrômetro externo Mitutoyo, com resolução de 0,01 mm, com extremidades em forma de ponto, para medição de forma precisa. Para medir a conformidade geométrica entre a chapa estampada e o modelo CAD correspondente, empregou-se uma máquina de medição tridimensional Mitutoyo modelo BRM.

#### 4.5 Testes preliminares em escala reduzida

Os objetivos específicos dos 03 testes preliminares foram: a) tessar a comunicação computador-máquina CNC, b) obter uma análise visual do comportamento de chapas de alumínio (Al 1050) e titânio CP, relacionada à sua ductilidade, acabamento superficial e conformidade geométrica com seu modelo CAD correspondente e c)utilizar ângulo de parede superior ao designado por experimentos anteriores para comprovar seus resultados. Em relação a este último

objetivo, foi feita uma revisão de literatura: em um experimento realizado por Dufloy, et al. (2008), o ângulo de falha, ou seja, o ângulo de parede( $\psi$ ) que determina a fratura da chapa, obtido em passe único, para chapa de titânio grau 2, espessura 0,5mm, utilizando ferramenta de Ø10mm é de 47°. Portanto, o ângulo inicial de parede do modelo utilizado nos testes (75°) extrapola este limite. No primeiro teste, utilizou-se uma chapa de alumínio laminado, comercialmente puro (AA 1050) e espessura 0,5mm. Nos demais foi utilizada uma chapa de Ti-CP grau 2 – ASTM B265, espessura 0,5mm.

#### 4.5.1 Estampagem incremental de chapa Al 1050

Como a chapa de titânio tem um alto custo, realizou-se o primeiro teste com material mais barato (Al 1050), para checar possíveis erros no *set-up* de ferramentas (erros de posicionamento de referências X, Y e Z) e programação da máquina CNC (realizada através de *software* CAM e baseado em modelo CAD). E pelo motivo de custos, o modelo CAD original, obtido através da tomografia de um crânio de estrutura óssea saudável, teve sua escala (tamanho) reduzido em 60%.

Para gerar o arquivo CAD do molde (ponto de apoio inferior), foi utilizado o software Solidworks 2009. Para a geração das trajetórias da ferramenta para a usinagem do molde e estampagem da chapa, foi utilizado o software EdgeCAM 12. Concluídas as programações, os arquivos CAM são convertidos em códigos “G” e transferidos à máquina CNC através de um cabo serial RS-232. Na máquina CNC, foram realizados os zeramentos das ferramentas (*set-up*) e finalmente a usinagem do molde e a estampagem da chapa. A Tabela 4.2 e a Figura 4.4 mostram o resumo das etapas de fabricação dos protótipos.

Tabela 4.2. Resumo das etapas de fabricação dos protótipos.

No.	Etapa	Recurso utilizado
1	Obtenção das imagens JPG (112 seções cranianas)	Tomografia computadorizada
2	Geração de arquivo 3D vetorial, extensão STL	Software livre Invesalious
3	Edição e melhoria da superfície 3D correspondente à parte superior do crânio	Software Solidworks 2009
4	Simulação e programação de usinagem do molde e de conformação da chapa	Software EdgeCAM
5	Usinagem do molde	Centro de usinagem ROMI Discovery 4022
6	Estampagem da chapa	Centro de usinagem ROMI Discovery 4022

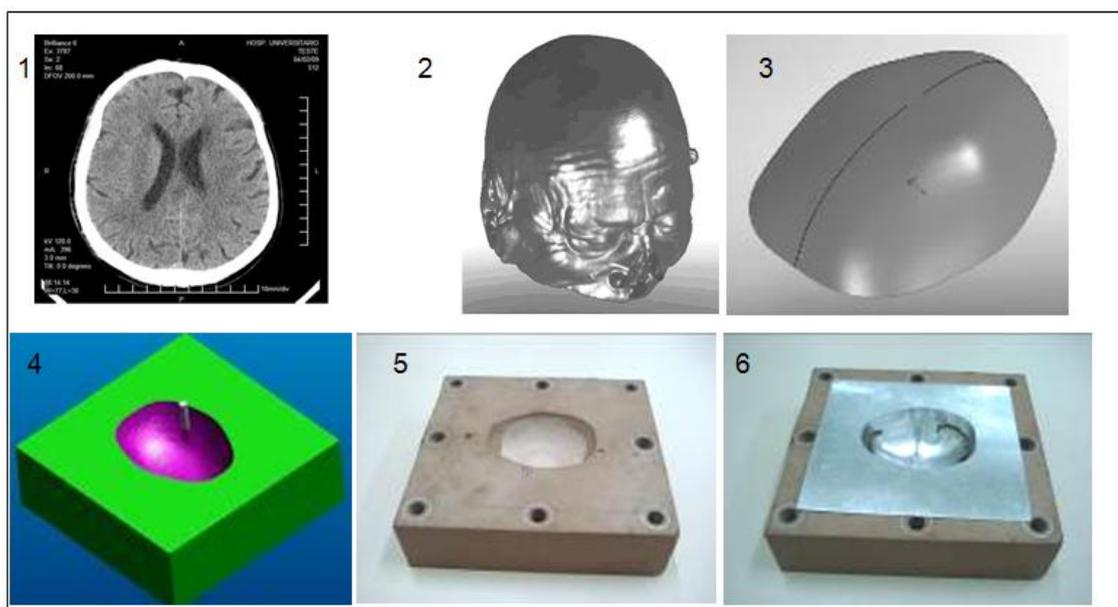


Figura 4.4. Etapas de estampagem de prótese craniana.  
 1) imagens cranianas; 2) modelo STL; 3) modelo STL melhorado, específico da região do implante; 4) simulação de usinagem do molde inferior; 5) molde inferior usinado; 6) estampagem incremental da chapa

#### 4.5.2 Geração do arquivo CAD 3D

Foram obtidas 112 imagens JPG, provenientes de um arquivo de tomografia computadorizada (TC) de um crânio real. Com as imagens (correspondentes às seções cranianas com espaçamento de 3mm entre cada uma), um arquivo vetorial 3D, extensão STL foi gerado, no software livre InVesalius (Figura 4.5).

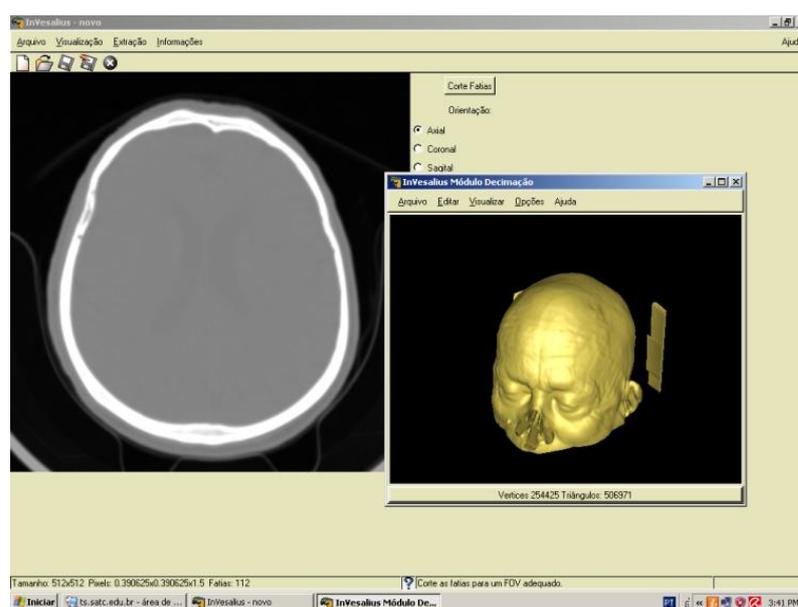


Figura 4.5. Imagens JPG (pictoriais) de tomografia axial, lateral e coronal e o modelo vetorial 3D gerado

Ocorreu um problema com o arquivo STL gerado no Invesalius. Devido à alta resolução de malha 3D, o software CAD não conseguiu ler adequadamente o arquivo, devido ao tamanho elevado, impedindo qualquer operação de edição (translação, rotação e recorte). É necessário utilizar software de CAD para ajustar a posição espacial X, Y, Z do arquivo STL em relação a origem do sistema de coordenadas, para que a programação CAM possa ser feita. Assim, ao invés de utilizar o arquivo STL, foi necessário gerar a superfície craniana manualmente no software CAD Solidworks 2009 (licença educacional da Faculdade SATC), desenhando o contorno de cada uma das 112 imagens. Cada contorno foi posicionado em diferentes planos, espaçados a cada 3mm, conforme os dados da tomografia. Foi utilizado um recurso de modelagem denominado *Loft*, que transforma os contornos em uma superfície 3D, como ilustrado na Figura 4.6.

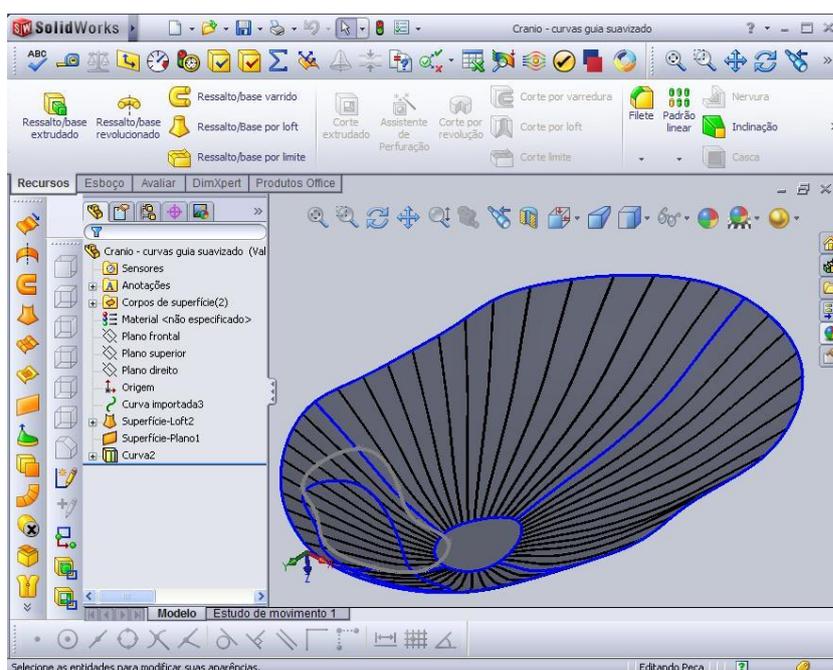


Figura 4.6. Editando a superfície em software CAD.  
A superfície corresponde à região interna da calota superior de um crânio

#### 4.5.3 Programação da trajetória de ferramenta no software CAM

Para a programação de usinagem, foi utilizado o software EdgeCAM, versão 12. A partir da superfície CAD 3D (Figura 4.7), foram geradas duas operações. A primeira foi o desbaste (*Roughing*) do molde de polímero. Este molde (ponto de apoio inferior), serve para aumentar a correspondência geométrica entre a chapa

conformada e o modelo CAD. Para realizar a conformação de perfis orgânicos e complexos (típicos de implantes), sem esse apoio, o resultado seria um produto com discrepância geométrica (em relação ao modelo CAD), devido a deformações indesejáveis causadas por tensões residuais e pelo retorno elástico. A segunda operação (*Profiling*) foi para dar acabamento ao molde, alisando a superfície, deixando-a pronta para apoiar a chapa formada. Este mesmo procedimento foi utilizado para a conformação da chapa, alterando as propriedades da ferramenta. Nesse caso, foi utilizada uma ferramenta semi-esférica, sem aressas cortantes, adequada à conformação. Além disso, o corretor da ferramenta<sup>1</sup>, foi ajustado para compensar a espessura da chapa (s), de acordo com a Figura 4.8.

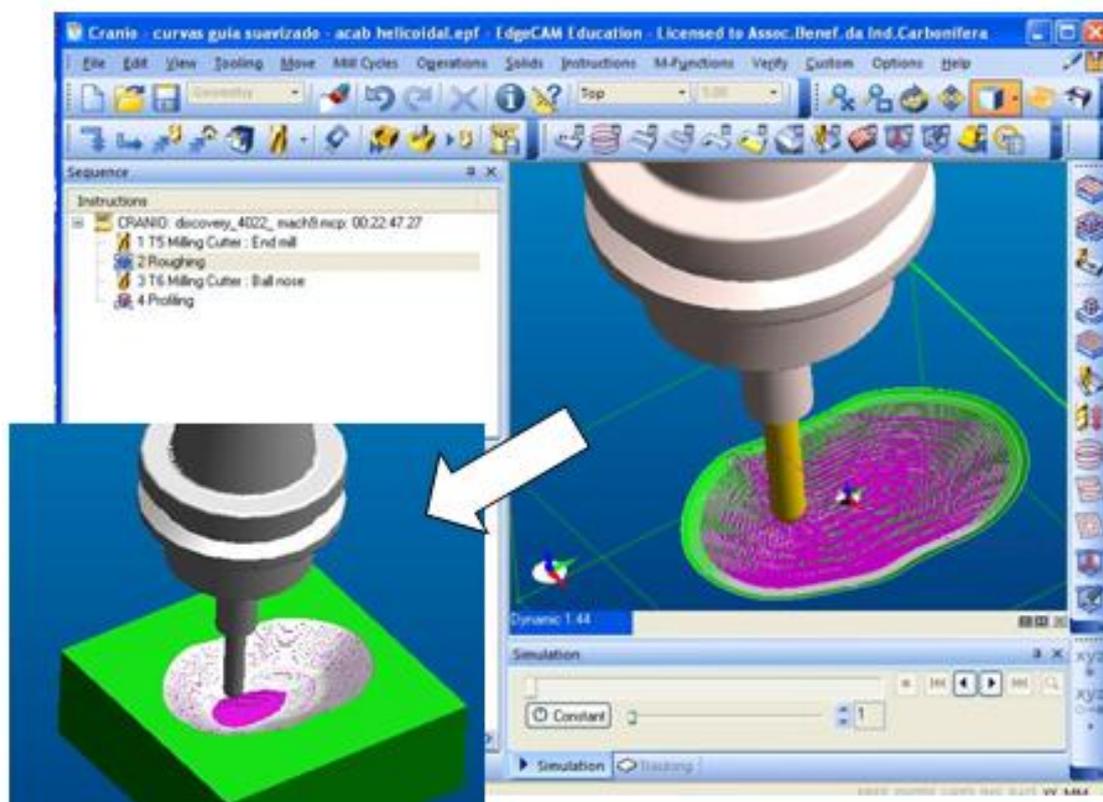


Figura 4.7. Programando o caminho de ferramenta no software EdgeCAM

---

<sup>1</sup> Procedimento realizado no centro de usinagem CNC que define a altura da ferramenta que, Nesse caso, foi reduzida de acordo com a espessura da chapa.

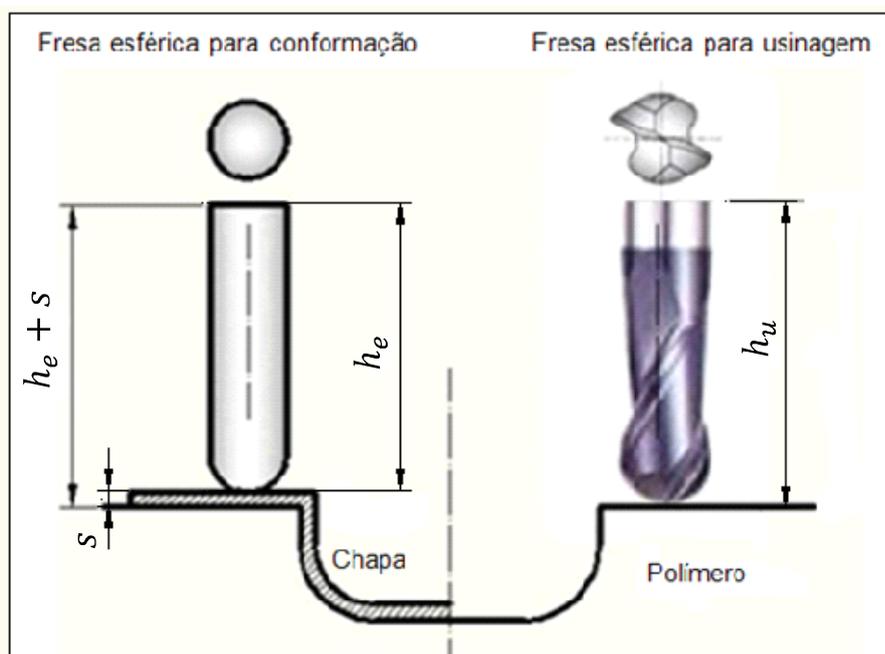


Figura 4.8. Ajuste da altura da ferramenta para a usinagem do polímero e estampagem da chapa

Para realizar a simulação e posterior usinagem e estampagem, foram ajustados dez parâmetros do software EdgeCAM, descritos a seguir:

- Profundidade do passo vertical ( $\Delta z$ ), em mm;
- Velocidade de avanço dos eixos XY ( $V_c$ ), em mm/min;
- Velocidade de mergulho (eixo Z);
- Sobremetal (usinagem do molde);
- Rotação da ferramenta, em RPM;
- Valor de *Cusp Height*, em mm;
- Forma de movimentação da ferramenta;
- Especificação de ferramenta (tipo, diâmetro e número);
- Especificação de distâncias de segurança (*Clearences*).

Em todos os testes realizados, a rotação da ferramenta foi configurada no programa CNC com o valor 0 (zero). Isto possibilita a ferramenta ficar com movimento de rotação livre no eixo-árvore (*spindle*). Dependendo dos dados de passo e avanço, ocorria o deslizamento (ferramenta não rotacionava enquanto transladava) ou o rolamento da ferramenta sobre a chapa. Obviamente que, quanto maior o passe vertical, maior a área de contato entre ferramenta e chapa. A maior área determina maior atrito e provoca o rolamento.

*Cusp Height* é um parâmetro do software que controla a “altura de crista”, ou seja, a maior altura permitida para a forma final, além da determinada pelo perfil de referência (este parâmetro está ilustrado na Figura 1.32). É um parâmetro que influencia a rugosidade superficial da chapa.

Existem duas possibilidades de realizar a movimentação da ferramenta: a) cada incremento vertical ( $\Delta z$ ) é realizado ao final de cada passe (interpolação X,Y); b) o incremento vertical acontece pela interpolação de X,Y e Z, fazendo com que a ferramenta descreva uma trajetória helicoidal. Essa trajetória é a ideal, pois mantém a ferramenta em contato constante com a chapa. A execução de  $\Delta z$  ao final de cada passe pressiona a chapa sempre no mesmo ponto de entrada, podendo provocar a fratura da chapa nesse ponto, além de prejudicar o acabamento (Figura 4.13).

As distâncias de segurança ou *Clearences*, determinam a altura entre ferramenta e chapa para a mudança de G0 (código da máquina CNC para movimento rápido) para G1 (velocidade de avanço controlada), ou seja, controlam a velocidade de aproximação da ferramenta sobre a chapa. A Figura 4.9 mostra a tela principal de configuração da operação de acabamento (*profiling*) e a sequência do programa de usinagem CAM.

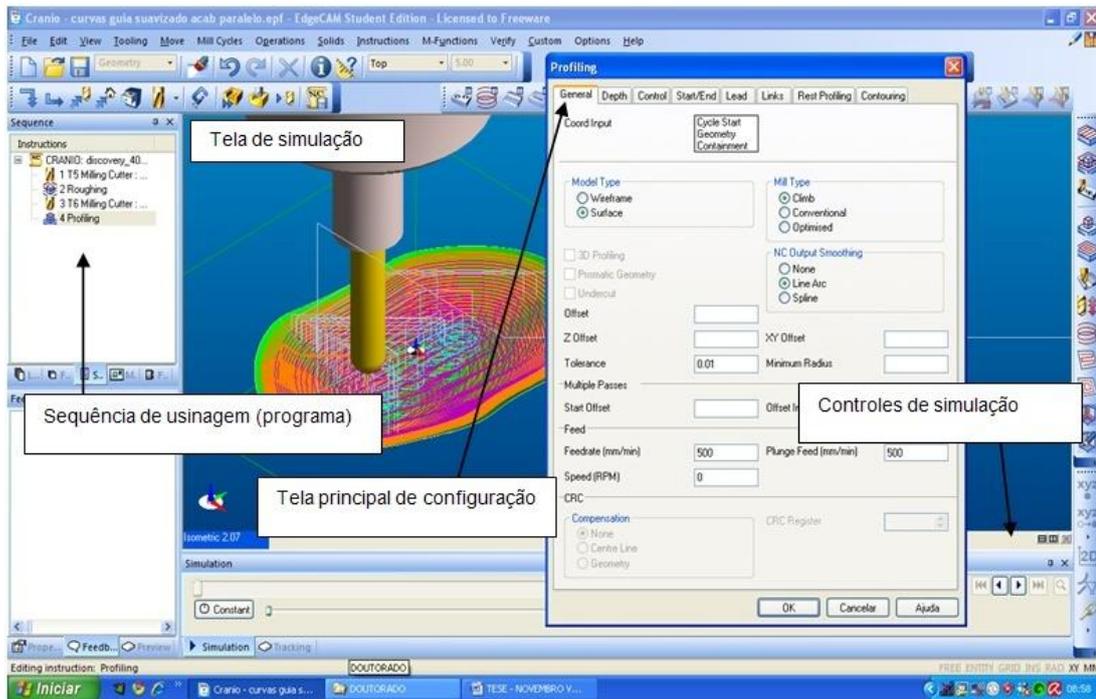


Figura 4.9. Tela de configuração e simulação de programação do EdgeCAM

#### 4.5.4 Usinagem do molde e conformação da chapa

As trajetórias CAM geradas, foram convertidas em "códigos G" e transmitidos para o centro de usinagem CNC através de cabo serial RS 232. Em seguida, foi realizada a usinagem do molde e a conformação da chapa de alumínio (Figura 4.10).



Figura 4.10. Estampagem da chapa de alumínio, utilizando o polímero usinado anteriormente como ponto de apoio inferior

#### 4.5.5 Estampagem incremental do titânio comercialmente puro (Titânio CP)

Além da chapa de alumínio, foram realizados mais 02 testes preliminares em chapa de titânio CP grau 2, espessura 0,5mm. A metodologia e os parâmetros foram os mesmos descritos no item 4.5.1. A Tabela 4.3 apresenta um resumo dos dados de usinagem e estampagem dos testes nº 1 (Alumínio) e nº 2 (Titânio).

Tabela 4.3. Dados de usinagem do molde e estampagem da chapa<sup>1</sup> nos dois primeiros testes

<b>Dados</b>	<b>Usinagem do molde</b>			<b>Estampagem da chapa</b>
	Desbaste	Acabamento	Flat land <sup>2</sup>	Acabamento
Ferramenta	Fresa Topo Ø10	Fresa Topo Ponta esférica Ø5	Fresa Topo Ponta esférica Ø5	Fresa Ponta esférica sem aressas Ø10
Velocidade de avanço (mm/min)	400	400	400	400
Rotação (RPM)	1000	1000	1000	0
Profundidade de passe (eixo Z) (mm)	5	0.4	-	0.4

<sup>1</sup> os dados referem-se à chapa de alumínio, porque o ensaio com chapa de titânio foi interrompido antes do término do processo.

<sup>2</sup> Ciclo de usinagem específico para superfícies planas. No modelo utilizado, há uma pequena região plana, localizada na parte mais profunda.

Sobre-metal (mm)	0.5	-	-	-
Tempo gasto (min:seg)	07:05	26:38	01:00	27:13
Tempo total				61:56

No teste nº 3 (Tabela 4.4), foram mantidos os mesmos dados dos testes 1 e 2. Entretanto, a estampagem foi realizada em quatro etapas, com incrementos  $\psi$  de 30, 45, 60 e 75°, com o objetivo de aumentar a conformabilidade e evitar a fratura.

Tabela 4.4. Dados de estampagem da chapa de titânio – teste preliminar No. 03

<b>Etapas</b>				
<i>Usinagem do molde (já realizada nos testes anteriores)</i>		<i>Estampagem da chapa</i>		
Desbaste, acabamento e flat land	30°	45 °	60 °	75 ° (forma final)
	07:58	11:15	16:26	20:53
	Para todos os ângulos: Fresa Ponta esférica sem arestas Ø10; Veloc. Avanço: 400 mm/min Rotação eixo árvore: 0 RPM Profundidade do passe: 0.4 mm			
Tempo da etapa (min:seg)	34:43	Tempo total da etapa (min:seg)		56:32
<b>Tempo total (hh:min:seg)</b>				<b>01:31:15</b>

#### 4.5.6 Lubrificação

Com a finalidade de diminuir a fricção entre a ferramenta e a chapa e absorver o calor causado pela deformação, foi utilizada graxa sintética à base de lítio (Figura 4.11). A aplicação foi feita manualmente com pincel. De acordo com as características geométricas da ferramenta e da chapa, o contato entre essas envolve apenas um ponto tangencial, se configurando como uma lubrificação

elastohidrodinâmica. Nesse tipo de lubrificação, a tensão na zona de contato foi bem maior do que aquela encontrada em condições de lubrificação hidrodinâmica, onde as áreas de contato são maiores.

Mesmo com a aplicação de lubrificante, notou-se o desgaste por deslizamento da chapa. O material que se desprende da chapa mistura-se ao lubrificante, alterando sua coloração. Uma das formas mais importantes de desgaste por deslizamento é aquele que envolve a adesão, denominado desgaste adesivo. O deslizamento entre duas superfícies, sob um determinado carregamento, leva a uma contínua formação e destruição de junções de asperezas, tendo como consequência a remoção de material da superfície do material mais fraco (Tribologia s.d.).



Figura 4.11. Lubrificação no processo de estampagem incremental

#### 4.5.7 Resultados dos testes preliminares

A Figura 4.12 mostra os resultados dos testes nº 1 e nº 2 sendo que, em ambos os casos, houve a fratura das chapas. No caso do alumínio, a fratura ocorreu de forma mais localizada transversalmente ao sentido de laminação da chapa. Isso ocorreu devido à maior fragilidade da chapa quando a tração é exercida

perpendicularmente à orientação dos grãos que formam a estrutura cristalina do material. Já a chapa de titânio apresentou fratura generalizada, sobre toda a extensão da linha de conformação. A Figura 4.12a apresenta a vista interna e externa da chapa de alumínio após a estampagem; a Figura 4.12b é mostrada a vista interna e externa da chapa de titânio após a estampagem; a Figura 4.12c apresenta as dimensões do protótipo.

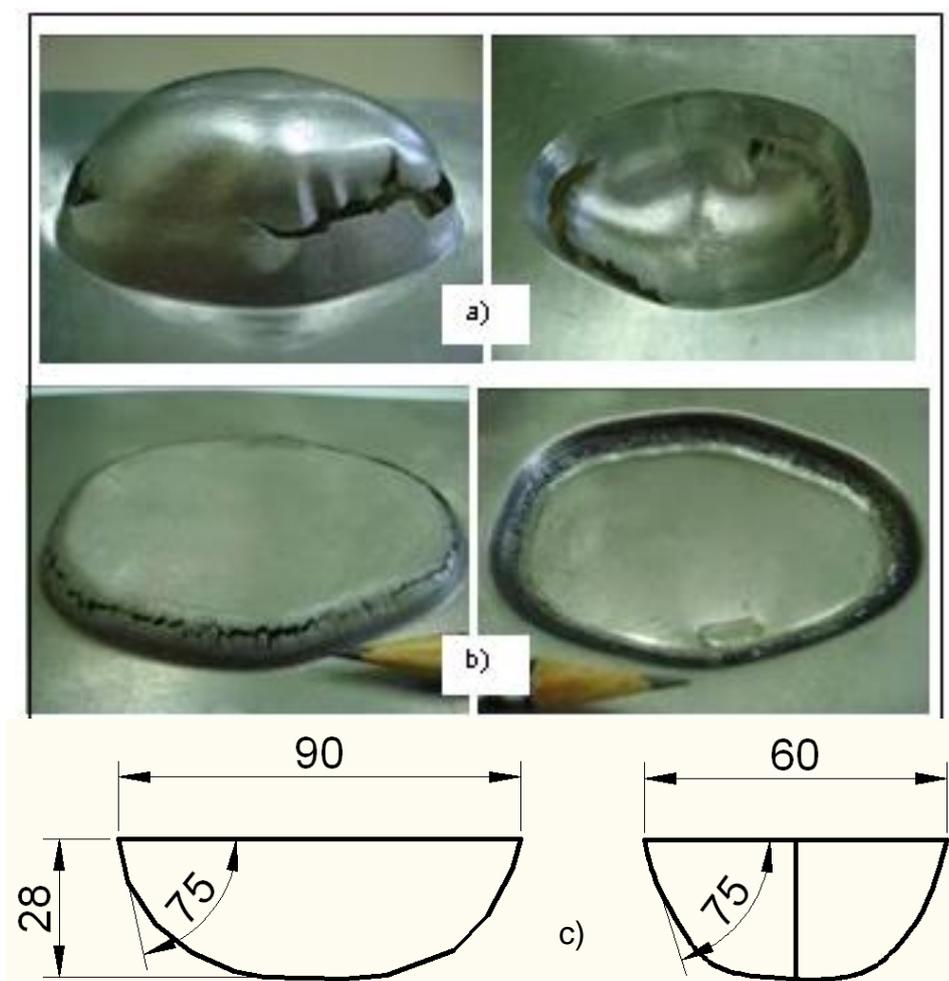


Figura 4.12. Resultados dos testes preliminares.  
a) vista interna e externa da chapa de alumínio após a estampagem;  
b) vista interna e externa da chapa de titânio após a estampagem; c) dimensões do protótipo.

No teste nº 3 ocorreu o rompimento localizado da chapa, no sentido contrário a laminação, conforme ilustra a Figura 4.13. Nos testes seguintes (testes 4 a 10), foram utilizados ângulos menores de parede e menores valores de passo vertical e conseguiu-se obter peças finais íntegras, em conformidade com seu modelo digital e com uma distribuição homogênea de espessura.

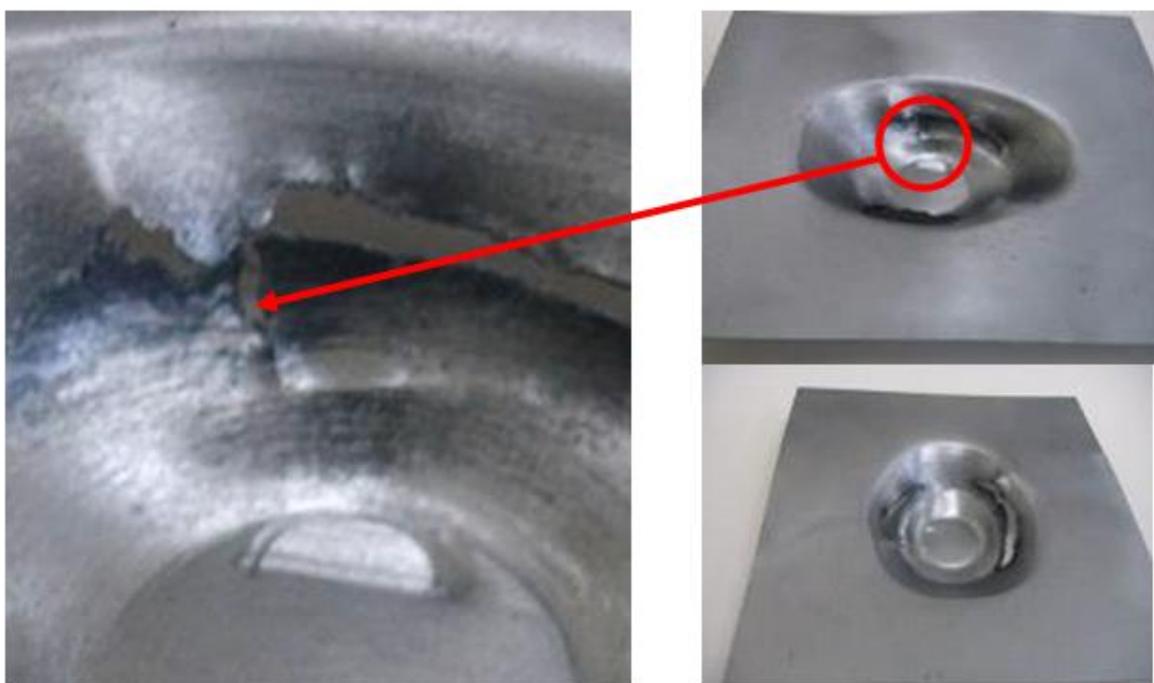


Figura 4.13. Resultados do teste No. 3  
Rompimento precoce e localizado da chapa Ti-CP.  
Observa-se ainda a deformação não desejada do ponto de entrada e saída da ferramenta.

Além da fratura, houve um aumento da rigidez (maior resistência à deformação) da chapa conformada, mesmo com a diminuição da espessura, devido ao encruamento ocasionado pela deformação plástica. Também foi observado que houve elevação da temperatura da chapa, durante a estampagem.

#### 4.5.8 Conclusões relacionadas aos testes preliminares

A Tabela 4.5 apresenta um resumo das relações entre os objetivos pretendidos, os resultados alcançados e as conclusões obtidas:

Tabela 4.5. Objetivos, resultados e conclusões dos testes preliminares

Objetivos	Resultados	Conclusões
Tessar a comunicação computador-máquina CNC	Comunicação <i>off-line</i> <sup>1</sup> ok; comunicação <i>on-line</i> sem sucesso	Somente programas pequenos (até 65KB) podem ser executados; programas maiores devem ser particionados.
Obter uma análise visual do comportamento de chapas de alumínio (série 1000) e titânio CP, relacionada à sua ductilidade.	Chapa de Ti-CP: rompimento precoce e generalizado da chapa, o que impediu qualquer análise dimensional posterior; Chapa de AA 1050: rompimento precoce e localizado no sentido contrário à direção de laminação.	Para aumentar a ductilidade, acabamento superficial e conformidade geométrica utilizar:
Verificar a correspondência geométrica entre a chapa pronta e o modelo digital CAD correspondente	Na chapa de AA1050, notou-se uma elevada deformação das regiões não estampadas, após o relaxamento dos fixadores, devido às tensões residuais trativas. Uma simples análise visual já demonstra elevada discrepância entre modelo digital e peça estampada.	a) passo vertical menor, combinado com a diminuição da velocidade de avanço; b) chapa com maior espessura (1mm); c) ângulos de parede menores.
Utilizar ângulo de parede superior ao designado por experimentos anteriores	Rompimento das chapas	

#### 4.6 Testes variando o passe vertical, velocidade de avanço e suporte inferior

Nos testes preliminares, descritos no item 4.5, os resultados obtidos se basearam na análise visual, chegando-se conclusões subjetivas. Os testes principais foram realizados utilizando as mesmas etapas descritas na Tabela 4.2 e Figura 4.4. Entretanto, os resultados e conclusões obtidos foram objetivos e de maior importância à tese, pois foram realizadas as medições de espessura, deformações e conformidade geométrica das chapas. Os resultados obtidos podem ser considerados válidos não apenas para um caso específico, mas sim para situações globais, fornecendo importantes sugestões para a definição de parâmetros na estampagem incremental de chapas. O problema descrito no item 4.5.2 (software de CAD *Solidworks* incapaz de ler o arquivo STL) foi resolvido utilizando o software *3D Studio Max*.

<sup>1</sup> No modo *off-line* o programa é transmitido do computador à memória da máquina CNC e posteriormente executado; no modo *on-line* a transmissão e execução do programa são feitos concomitantemente.

#### 4.6.1 Objetivos dos testes

- Realizar a medição da espessura ao longo da área estampada, através do exame de visioplaticidade;
- Realizar a análise dimensional da chapa estampada, para verificar a conformidade geométrica com o modelo CAD correspondente;
- Determinar qual a estratégia de estampagem que proporciona a maior homogeneidade na distribuição de espessura e a maior correspondência geométrica entre peça real e modelo CAD.

#### 4.6.2 Parâmetros fixos

Os parâmetros mantidos nos testes foram: tipo, material, dimensão e rotação da ferramenta (haste cilíndrica, aço 4340, ponta semi-esférica Ø10mm, 0 RPM), material e espessura da chapa (Ti-CP F67 G2 / 1,0mm). Tais valores foram estabelecidos através de consultas à literatura (itens 4.5.2, 4.6.1 e 4.6.3).

#### 4.6.3 Parâmetros variados

- Velocidade de avanço ( $V_c$ ): 500 e 1500mm/min
- Profundidade do passe ( $\Delta_z$ ): 0.10, 0.25 e 0.50mm
- Altura da crista (*cusp height*);
- Tipo de suporte inferior (negativo/positivo)

O planejamento dos experimentos foi definido como segue: primeiramente foram realizados os testes variando o passo e o avanço; foram determinados os resultados, verificando qual destes testes apresentou a maior homogeneidade na distribuição de espessura e conformidade geométrica em relação ao modelo digital. Com os dados de passo e avanço do melhor teste, foi realizado um ensaio utilizando suporte positivo. A Figura 4.14 mostra a configuração geométrica dos suportes.

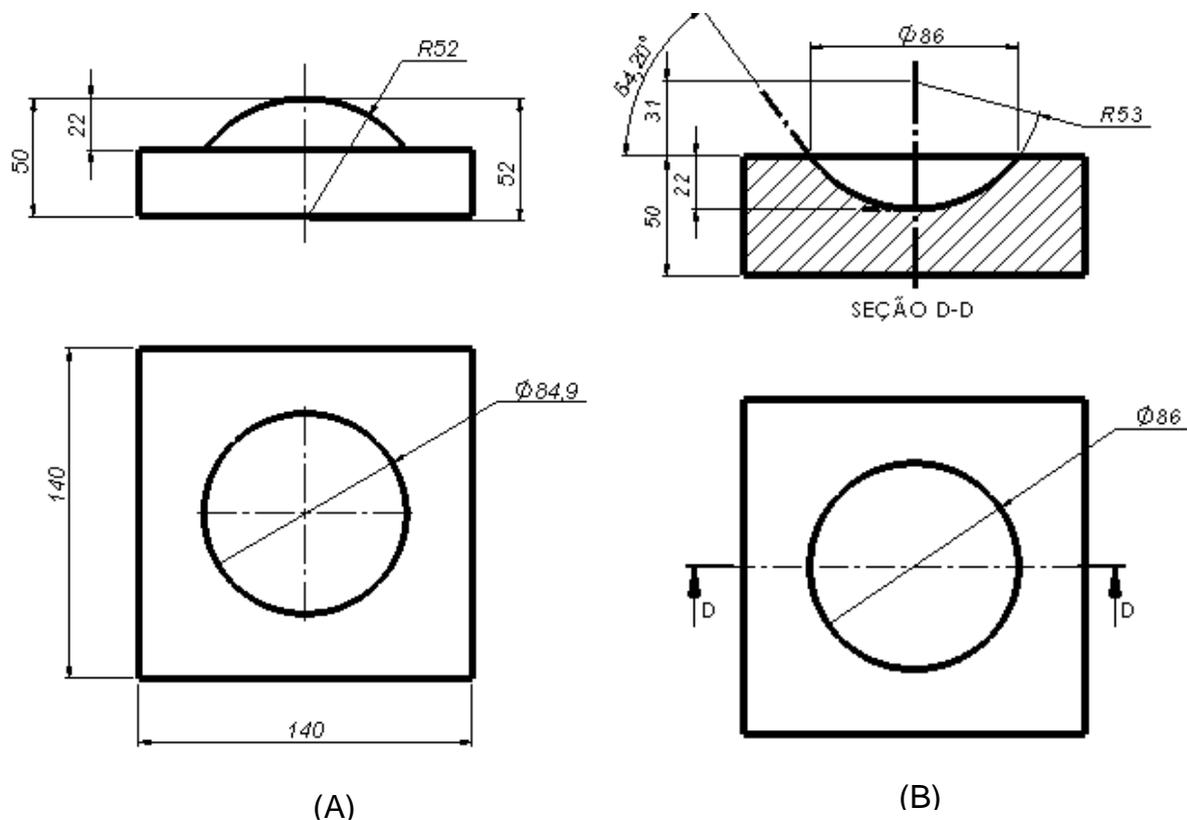


Figura 4.14. Tipos de suporte: a) suporte inferior positivo; b) suporte inferior negativo

Na Figura 4.15 são mostrados todos os recursos (software, máquina CNC, dispositivo prensa-chapas, suporte inferior, ferramenta de estampagem, lubrificante e cabo de transmissão) utilizados nos testes.

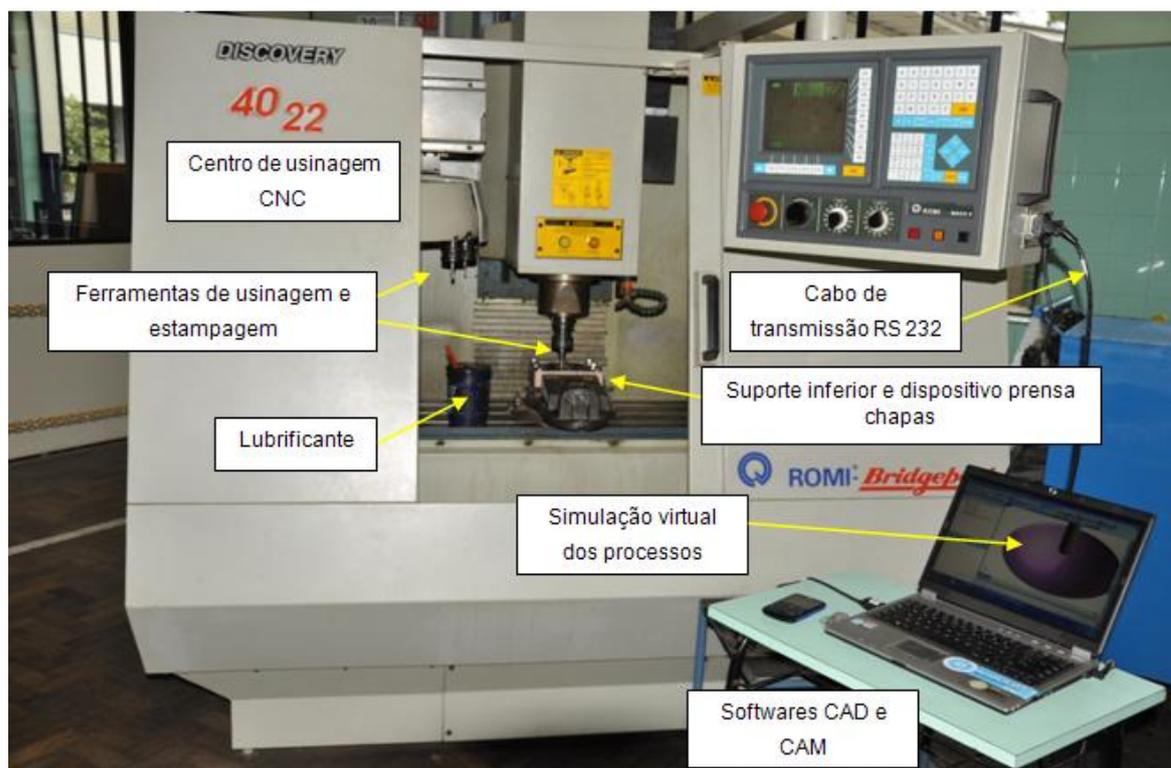


Figura 4.15. Recursos utilizados para os procedimentos experimentais

#### 4.6.4 Usinagem dos suportes inferiores

Tanto o suporte negativo quanto positivo foram usinados a partir de um bloco de poliuretano (especificações no item 4.4.4, página 81). É um material que apresentou excelente usinabilidade e resistência mecânica adequada à conformação das chapas de titânio, mantendo sua geometria e dimensões mesmo sob a ação das forças de compressão atuantes durante o processo de estampagem incremental.

Para a execução da estampagem com suporte positivo, foi projetado e fabricado um dispositivo específico, composto por base, guias, rolamentos e placas prensa-chapas (Figura 4.16).

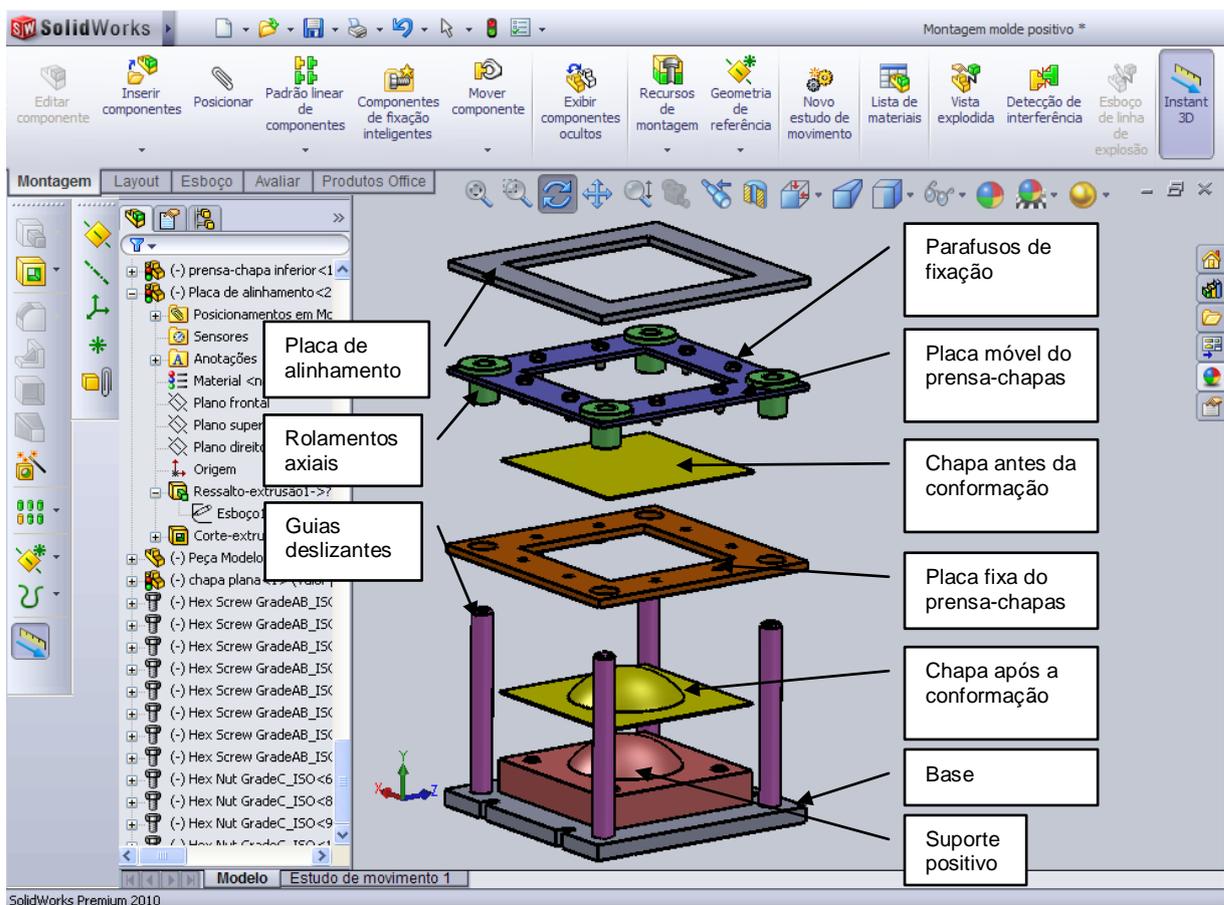


Figura 4.16. Projeto do dispositivo para estampagem com suporte positivo

A base do dispositivo sustenta as guias deslizantes, responsáveis pelo deslocamento das placas prensa-chapas (fixa e móvel), que ocorre à medida em que a estampagem ocorre; para que este deslocamento ocorra sem interferências, rolamentos axiais de esferas são utilizados; os parafusos de fixação irão prender a chapa entre as placas, fazendo com que ocorra o estiramento da chapa durante o processo de estampagem incremental; a função da placa de alinhamento é evitar que ocorra flexão ou desalinhamento das guias deslizantes durante a estampagem, já que o deslocamento da ferramenta sobre a chapa provoca forças de reação sobre essas. As guias revestidas e os rolamentos foram adquiridos junto à empresa Tekno Industrial, de Bauru/SP. Os demais materiais (placas de aço 1020 espessura 6.35mm e base de ferro fundido espessura 25.4mm) foram adquiridos junto à empresa Iron Comércio de Metais de Criciúma/SC. O projeto e fabricação do dispositivo foi realizado no Laboratório de CNC da Faculdade SATC.

O objetivo de utilizar um suporte positivo foi o de verificar a influência do tipo de suporte na estampagem da chapa, efetuando as mesmas medições dos ensaios anteriores (distribuição de espessura e conformidade geométrica). A Figura 4.17 mostra o suporte positivo montado no centro de usinagem CNC.

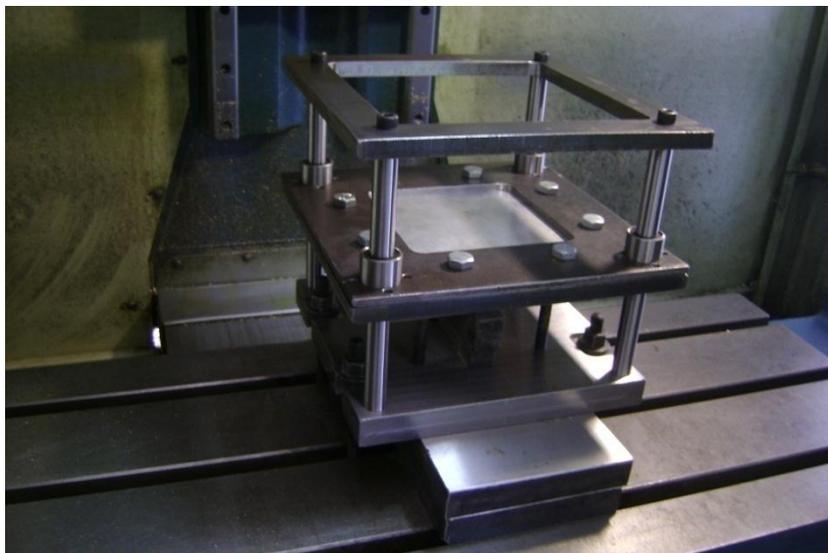


Figura 4.17. Suporte positivo montado na mesa CNC

O número de testes foi determinado prioritariamente pelo custo das chapas. Cada chapa de Ti-CP F67 G2, laminada, espessura 1mm, com as dimensões de 140 x 140mm, custou R\$ 90,00 + despesas com frete. A Tabela 4.6 apresenta os testes planejados:

Tabela 4.6. Combinações de parâmetros de estampagem utilizadas nos testes

	Teste No.	Passo vertical (mm)	Velocidade de avanço (mm/min)	Altura da crista	Suporte inferior	Material	Espessura (mm)
TESTES PRELIMINARES (4.5)	1	0.40	400	-	negativo	Al 1050	0,5
	2	0.40	400	-	negativo	Ti-CP ASTM B265	0,5
	3	0.40	400	-	negativo	Ti-CP ASTM B265	0,5
TESTES PRINCIPAS (4.6)	4	0.10	500	0.05	negativo	Ti-CP F67 G2	1,0
	5	0.10	1500	0.05	negativo	Ti-CP F67 G2	1,0
	6	0.25	500	0.10	negativo	Ti-CP F67 G2	1,0
	7	0.25	1500	0.10	negativo	Ti-CP F67 G2	1,0
	8	0.50	500	0.20	negativo	Ti-CP F67 G2	1,0
	9	0.50	1500	0.20	negativo	Ti-CP F67 G2	1,0
	10	0.10	500	0.20	positivo	Ti-CP F67 G2	1,0

#### 4.6.5 Geometria

A geometria e dimensões adotadas nos testes principais foram estabelecidas de acordo com as características formais dos implantes cranianos (geralmente em forma aproximada de calota) e também considerando o ângulo máximo de inclinação da parede da chapa (Figura 4.18). Os testes preliminares, descritos no item 4.5 demonstraram que os ângulos máximos de parede  $\psi$  do Ti-CP são menores do que os utilizados para outros materiais comerciais. No caso do Alumínio 1050, pode-se chegar a ângulos de até  $75^\circ$  (Figura 1.25), enquanto o Titânio apresenta ruptura da chapa a partir dos  $55^\circ$  de inclinação de parede.

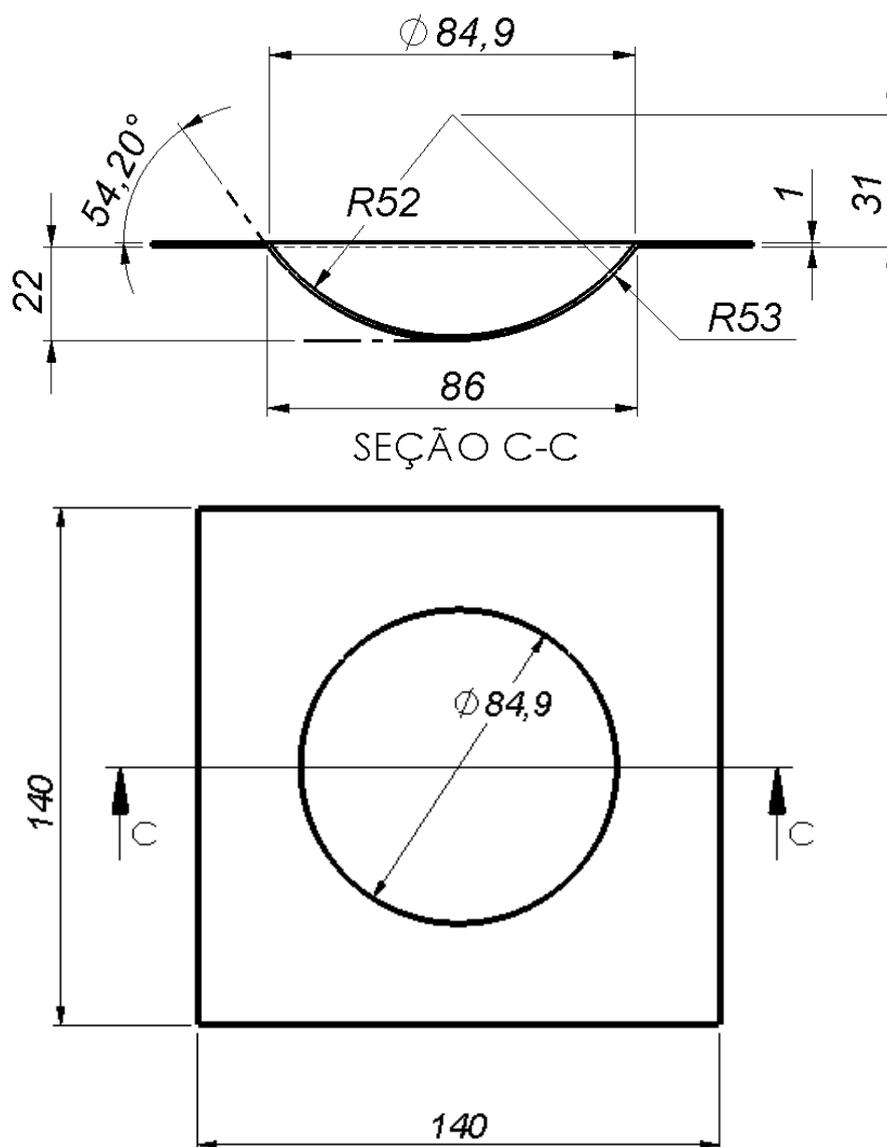


Figura 4.18. Dados geométricos da chapa utilizados nos testes principais

#### 4.6.6 Exame de visioplasticidade

Para medir as deformações  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$ , foi utilizada a técnica de visioplasticidade. Nessa técnica, as medidas são obtidas através de uma grade de pequenos círculos (2,5mm de diâmetro) impressa na chapa antes da conformação, através de um processo eletroquímico (Figura 4.19). Os valores de maior deformação ( $\varphi_1$ ) e menor deformação ( $\varphi_2$ ) foram obtidos e mostraram qual o tipo de deformação predominante que ocorreu no processo de estampagem incremental.



Figura 4.19. Gravação dos círculos para exame de visioplasticidade

As deformações verdadeiras que ocorreram na chapa puderam ser medidas através do exame de visioplasticidade. Este exame consiste na gravação de pequenos círculos alinhados sobre a chapa, antes da estampagem. Após realizado o processo, avaliam-se as deformações dessa rede, sendo possível obter os valores de deformação de cada ponto (círculo). As deformações foram medidas pelas Lei da Constância de Volume:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (4-1)$$

-  $\varphi_1$  é a deformação verdadeira no sentido 1 (x) na superfície da chapa (maior deformação - Figura 4.20):

$$\varphi_1 = \ln \left( \frac{x}{x_0} \right) \quad (4-2)$$

-  $\varphi_2$  é a deformação verdadeira no sentido 2 (y) na superfície da chapa (menor deformação - Figura 4.20):

$$\varphi_2 = \ln \left( \frac{y}{y_0} \right)$$

-  $\varphi_3$  é a deformação verdadeira na espessura, obtida pela diferença entre as outras duas deformações:

$$\varphi_3 = -\varphi_1 - \varphi_2$$

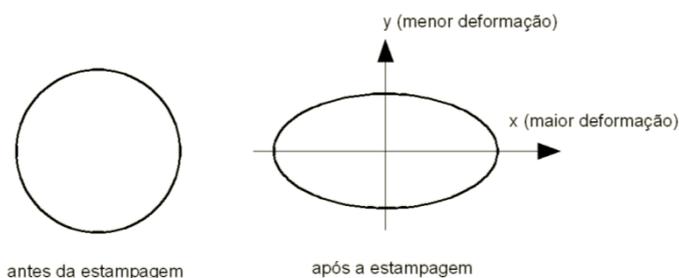


Figura 4.20. Direção das deformações verdadeiras no exame de viscoplasticidade

Os valores obtidos irão mostrar qual o tipo de deformação predominante que ocorre na estampagem incremental (a Figura 2.7 mostra os tipos de deformação).

A Figura 4.21 mostra os círculos de viscoplasticidade deformados pela ação da ferramenta de estampagem e a linha de medição das deformações.

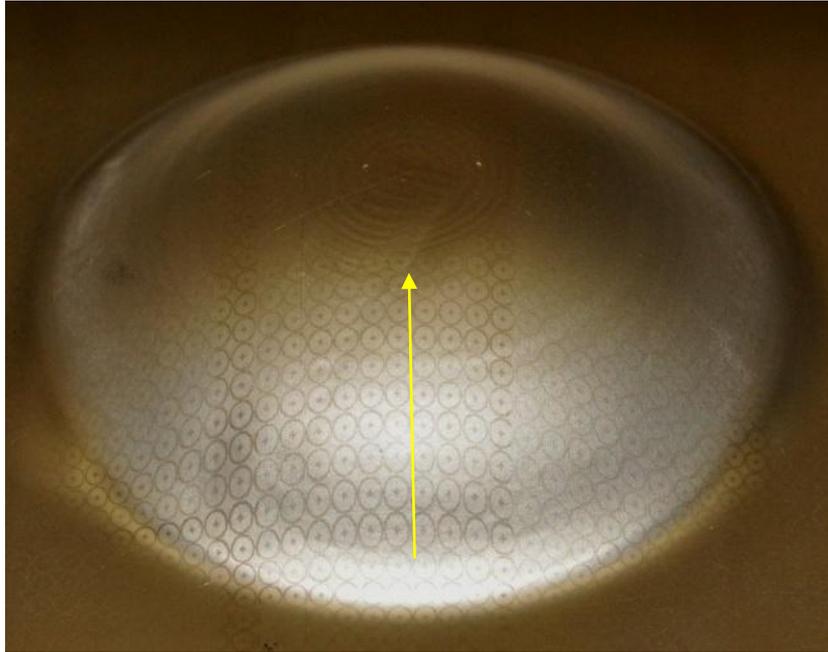


Figura 4.21. Uma das peças-teste utilizadas, já com a aplicação dos círculos.

#### 4.6.7 Cálculo da força de conformação

Conforme descrito no item 4.4.1, em um ensaio não registrado houve a ruptura (quebra) de uma ferramenta de conformação, de metal duro. Este fato indicou a necessidade de medir as forças que atuaram durante o processo de estampagem. Para medir tais forças foram considerados: o raio da ferramenta de conformação ( $r_c$ ) espessura inicial da chapa ( $s_0$ ), tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ) e ( $\beta$ ), que corresponde a metade do ângulo interior do cone que se formou pelo limite de contato entre a ferramenta e a peça de trabalho (Cavaler 2010).

Com o perfil em raio, o valor do ângulo ( $\beta$ ) varia continuamente. Nesse caso, foi considerado o ponto crítico, ou seja, o maior ângulo de contato, que ocorre no início da estampagem e tende a diminuir à medida em que a ferramenta se aproxima do centro. A Figura 4.22 representa graficamente este ângulo.

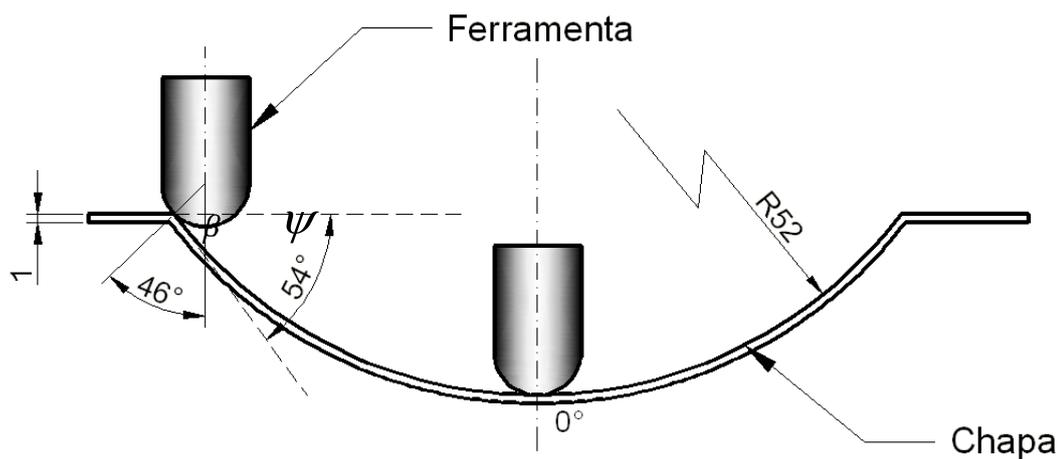


Figura 4.22. Ângulos de contato entre ferramenta e chapa.

Cálculo da força vertical  $F_v$ :

$$F_v = \pi r_c s_0 \sigma_e \text{sen} \beta \quad [\text{N}] \quad (4-3)$$

Cálculo da Força horizontal  $F_h$ :

$$F_h = r_c s_0 \sigma_e (\text{sen} \beta + 1 - \text{cos} \beta) \quad [\text{N}] \quad (4-4)$$

## 5 RESULTADOS

Através da análise dos resultados foi possível determinar qual a combinação de parâmetros (passo vertical / velocidade de avanço / tipo de suporte) que melhor atende aos requisitos de qualidade (homogeneidade da espessura e conformidade geométrica). Conforme as medições realizadas, não houve alteração dos valores das deformações, distribuição de espessura e conformidade geométrica, com a variação da velocidade de avanço de 500 para 1.500 mm/min. Dessa forma, para gerar os gráficos das deformações, variação de espessura e conformidade geométrica, foram considerados somente os testes 4, 6, 8 e 10 (Tabela 4.6). Como o teste 8 apresentou fratura (devido à utilização de passe vertical de 1mm) este foi excluído da plotagem, restando portanto os testes 4, 6 e 10. O teste 9 não chegou a ser realizado.

### 5.1 Deformações verdadeiras

Seguem abaixo os gráficos que indicaram as deformações verdadeiras ocorridas em cada teste. A plotagem representa a região da chapa onde a maior deformação foi crescente. Como o perfil de estampagem é em forma de calota esférica, naturalmente houve uma tendência de as deformações diminuírem à medida que se aproxima do centro inferior da calota (Figura 5.1). Assim, nesse caso, para gerar os gráficos de maior/menor deformação, foi considerada somente a região de maior deformação crescente.

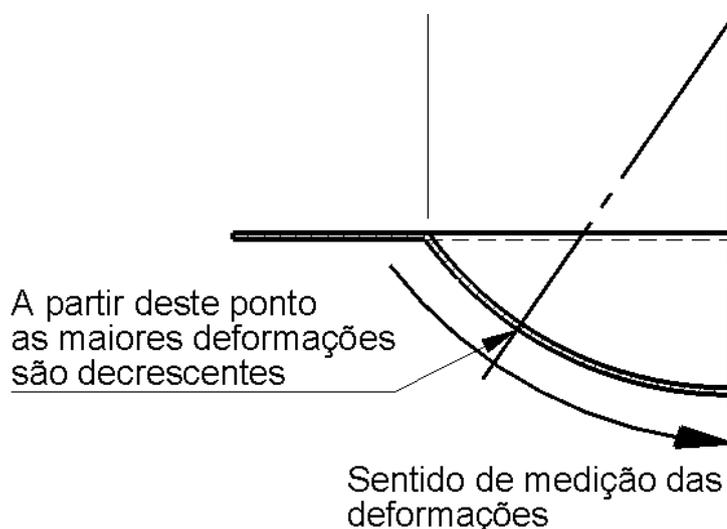


Figura 5.1. Região de medição das maiores e menores deformações ( $\varphi_1$  e  $\varphi_2$ )

As deformações verdadeiras foram medidas somente nas chapas estampadas dos testes 4 e 6. As deformações do teste 8 não foram consideradas devido à fratura da chapa nesse teste. No teste 10 (suporte positivo) a ferramenta realizou a estampagem no lado externo da chapa e removeu as gravações dos círculos. As gravações, nesse caso, foram feitas no lado interno da chapa. Entretanto, as medições de deformação do lado interno não puderam ser comparadas com as deformações do lado externo, devido a espessura da chapa. A Figura 5.2 indica os resultados obtidos nos testes 4 e 6, com relação às deformações verdadeiras  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$ . Pela posição das linhas de tendência, fica caracterizado que a deformação predominante foi do tipo uniaxial. A inclinação da linha de tendência em relação ao eixo horizontal indicou a predominância de valores maiores de  $\varphi_2$ ; quando a inclinação tende para o eixo vertical,  $\varphi_1$  predomina.

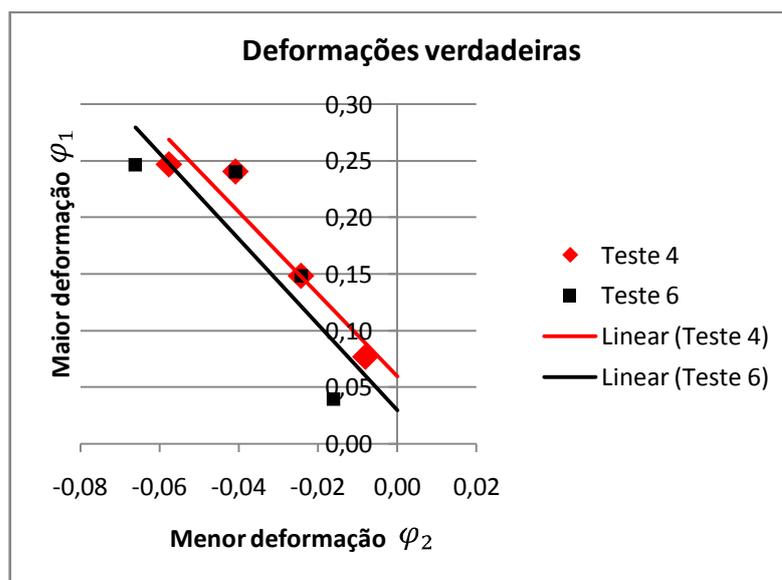


Figura 5.2. Gráficos  $\varphi_1 \times \varphi_2$  para geometria de calota

## 5.2 Distribuição de espessura

Os resultados relacionados à distribuição de espessura indicaram qual o teste em que foi obtido a maior homogeneidade possível nesse indicador de qualidade. A Figura 5.3 indica que existe uma discordância entre os resultados dos testes práticos

e a lei do seno (Equação 1.1). A lei do seno, quando plotada em um gráfico, normalmente é expressa por uma reta (Figura 1.14), para ângulos de inclinação de parede ( $\psi$ ) constantes. Sendo o perfil utilizado nos testes práticos em forma de raio, o ângulo de parede diminui continuamente, à medida em que se aproxima do centro da peça estampada (Figura 5.3).

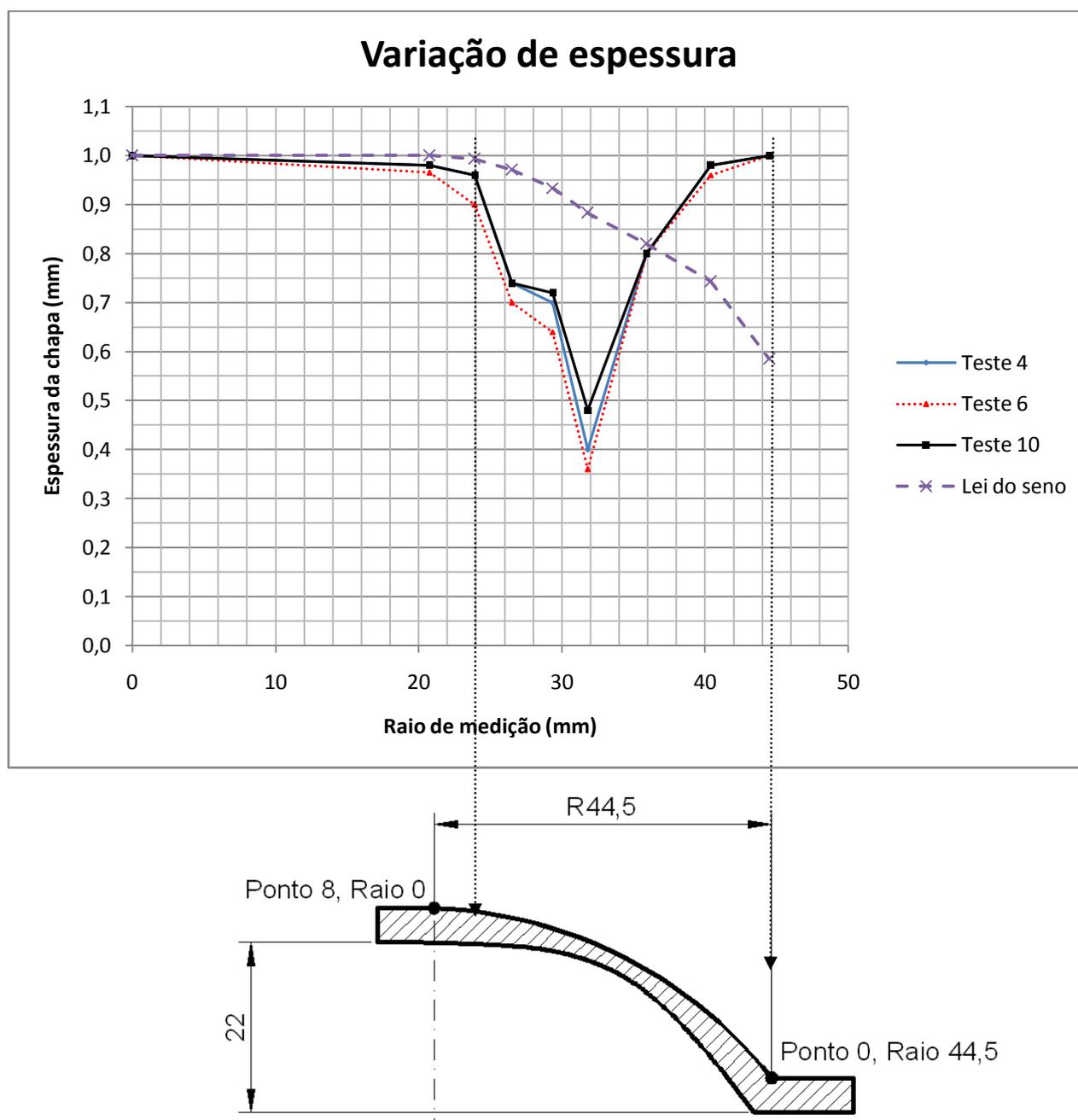


Figura 5.3. Distribuição da espessura ao longo dos raios de medição

### 5.3 Conformidade geométrica

A avaliação da conformidade geométrica entre o modelo de referência (CAD) e as peças acabadas foi realizada da seguinte forma: foram medidos na chapa três pontos colineares cujo alinhamento passou pelo centro da calota; com estes três pontos (coordenadas X, Z), foi gerado o desenho de um arco. Este desenho foi comparado com o obtido pela vista frontal do arquivo CAD de referência.

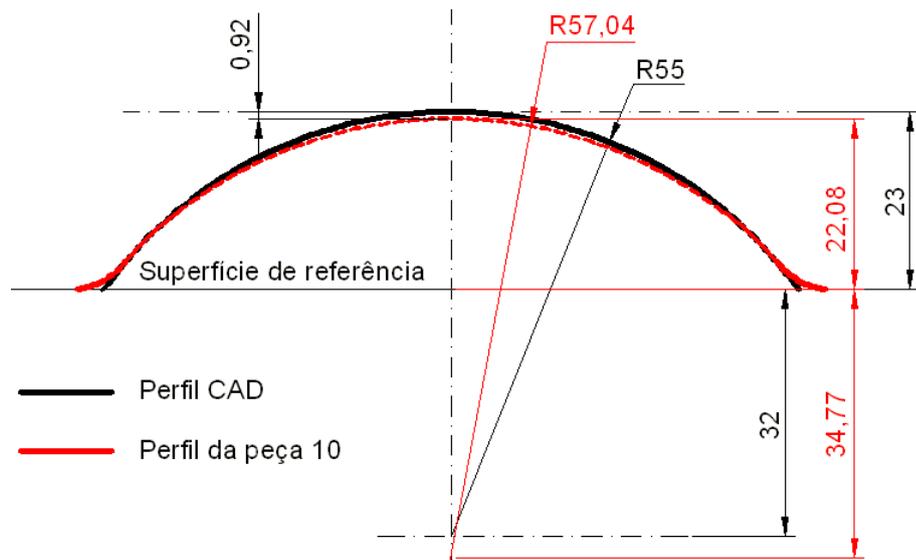


Figura 5.4. Comparação dimensional entre o modelo CAD e a peça estampada No. 10

### 5.4 Cálculo da força de conformação

- Força vertical  $F_v$ :

$$F_v = \pi r_c s_0 \sigma_E \text{sen} \beta \quad (5-1)$$

$$F_v = \pi * 5 * 1 * 350 * 0,71 \text{ (N)}$$

$$F_v = 3903 \text{ N}$$

- Força horizontal  $F_h$ :

$$F_h = r_c s_0 \sigma_e (\text{sen} \beta + 1 - \text{cos} \beta) \quad (5-2)$$

$$F_h = 1793 \text{ N}$$

## 6 CONCLUSÕES

Através dos experimentos práticos, ficou demonstrado que é possível adaptar recursos da área de usinagem (softwares CAD/CAM, equipamentos, ferramentas e centros de usinagem CNC) à fabricação de implantes cranianos, utilizando o processo de estampagem incremental;

A fabricação de implantes por conformação apresentou baixa perda de matéria-prima, porque a chapa já está na espessura desejada e o blank pode ser cortado próximo das dimensões finais;

A fabricação de implantes personalizados, de acordo com a geometria de cada paciente, contribui para a eficiência funcional e estética para o paciente.

A expressão matemática da lei do seno não condiz com as medições de espessura realizada ao longo do perfil da chapa estampada;

A variação da velocidade de avanço entre 500 e 1.500mm/min não interferiu na distribuição de espessura e na conformidade geométrica da chapa de Ti-CP F67 G2 espessura 1mm; a utilização de passo vertical igual ou superior a 0.5mm provocou a fratura da chapa;

Os valores de  $F_v = 3903 N$  e  $F_h = 1793 N$ , obtidos no cálculo da força de estampagem, indicam se a máquina CNC tem condições de executar a tarefa de conformação, de acordo com o material, espessura, raio da ferramenta e ângulo de estampagem. Como exemplo, pode-se citar os dados de força máxima de um Centro de Usinagem Vertical HAAS modelo VF-5 (potência do motor principal 20 HP), obtidos por Cavalier (2010): 15.120 N. Pode-se concluir que essa máquina executaria a estampagem sem maiores problemas.

A rugosidade da chapa é proporcional ao passo vertical da ferramenta utilizado na conformação;

A maior homogeneidade na distribuição da espessura e a maior conformidade geométrica foram obtidas utilizando-se a combinação passo vertical = 0.1mm, velocidade de avanço = 500 mm/min e suporte inferior positivo.

## 7 PESQUISAS FUTURAS

Uma proposta de pesquisa futura é a de desenvolver um equipamento leve e específico para estampagem incremental, que permita a fabricação de peças médicas de chapa de titânio e outras peças de pequeno porte e materiais diversos. Até o momento, a maior parte das pesquisas adaptou equipamentos de usinagem, com estruturas grandes e superdimensionadas para realizar a estampagem incremental. No Brasil, este equipamento seria inédito e poderia pleitear recursos junto aos fundos governamentais para desenvolver o projeto, já que essaria focado em melhorar a qualidade de vida das pessoas com problemas ortopédicos e anatômicos.

Outra linha de pesquisa seria a de aplicar processos de recozimento às chapas de titânio, e verificar os efeitos quando submetidas à estampagem incremental. As transformações de fase da microestrutura do Ti-CP com a elevação da temperatura e o seu efeito sobre a conformabilidade trazem complexidade suficiente para gerar outro tema de tese de doutorado.

A forma como realizar o corte da chapa, considerando um perfil orgânico e irregular necessita de estudos e experimentos complementares. As placas de titânio são utilizadas para substituir regiões ósseas lesadas por fraturas cujo perfil e contorno pode assumir formatos diversos. Assim, pesquisas a respeito de ferramentas de corte/perfuração e adaptação/ desenvolvimento de equipamentos de 4 ou 5 eixos (além dos 3 eixos convencionais X, Y e Z) necessitam ser realizadas, para: realizar o corte limítrofe normal ao plano da superfície, perfurar os furos de vascularização da região afetada e para a fixação de parafusos. A utilização de eletroerosão por penetração pode ser uma interessante linha de estudo, apesar do material Ti-CP F67 G2 apresentar baixa condutibilidade elétrica.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIMO. *ABIMO - Associação Brasileira da Indústria de Artigos e Equipamentos Médicos, Odontológicos, Hospitalares e de Laboratórios*. 2008.

[http://www.abimo.org.br/novo/content.php?page=DADOS\\_ECONOMICOS\\_PT](http://www.abimo.org.br/novo/content.php?page=DADOS_ECONOMICOS_PT) (acesso em 08 de setembro de 2010).

Allwood, J. M., A. N. Bramley, T. W. Ridgman, e A. R. Mileham. "A novel method for the rapid production of inexpensive dies and moulds with surfaces made by incremental sheet forming." *Proc. IMechE Vol. 220 Part B: J. Engineering Manufacture*, 2005.

Allwood, J. M.; King, G. P. F.; Duflou, J. "A structured search for applications of the Incremental Sheet Forming process by product segmentation." *Proc I Mech E, Part B, J Eng Manuf, Vol 219, No. B2, pp 239-244*, 2004: 239-244.

Allwood, Julian M., Daniel Braun, e Omer Music. "The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming." *Journal of Materials Processing Technology 210* 1501–1510.

Ambrogio G.; Filice L.; Manco G. L. "Considerations on the incremental sheet forming of deep geometries." *Int J Mater Form, Suppl. 1:1143-1146*, 2008: 1143-1146.

Ambrogio, G., L. Napoli, L. Filice, F. Gagliari, e M. Muzzupappa. "Application of incremental forming process for high customized medical product manufacturing." *J. Materials Processing Technology 162-163, pp.*, 2005: 156-162.

Araghi, B.T., G.L. Manco, M. Bambach, e G. Hirt. "Investigation into a new hybrid forming process: incremental sheet forming combined with stretch forming." *CIRP Annals-Manufacturing Technology 58*, 2009: 225–228.

Attanasio, A., E. Ceretti, C. Giardini, e L. Mazzone. "Asymmetric two points incremental forming: improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization." *Journal of Materials Processing Technology 197*, 2008: 59-67.

Attanasio, A., E. Ceretti, e C. Giardini. "Optimization of tool path in two points incremental forming." *Journal of Materials Processing Technology 177*, 2006: 409–412.

Bambach, M. "Process Strategies and Modelling Approaches for Asymmetric Incremental Sheet Forming." *Shaker Verlag. Aachen: Int Journal of Materials Processing Technology*, 2008.

Bambach, M., J. Ames, M. Azaouzi, L. Campagne, G. Hirt, e J.L. Batoz. "Initial experimental and numerical investigations into a class of new strategies for single point incremental sheet forming (SPIF)." *Saarland University. Saarbrücken, Germany*, 2003.

Bambach, M.; Araghi, B. T.; Hirt, G. "Strategies to improve the geometric accuracy in asymmetric single point incremental forming." *Int Prod. Eng. Res. Devel* 3, 2009: 145-156.

Bazan, Ovandir. *Usinagem de próteses para cranioplastia a partir de imagens tomográficas*. Curitiba, PR: Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 2004. 9.

Castelan, Jovani. "Estampagem incremental do alumínio série 1000." *Dissertação de Mestrado. Laboratório de Transformação Mecânica, PPGE3M, UFRGS*, 2007.

Cavaler, Luiz Carlos de Cézar. *Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço Inoxidável AISI 304L*. Porto Alegre: n.d., 2010.

Ceretti, Elisabetta, Cláudio Giardini, e Aldo Attanasio. "Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines." *Journal of Materials Processing Technology* 152, 2004: 176–184.

Cerro, I., E. Maidagan, J. Arana, A. Rivero, e P.P. Rodríguez. "Theoretical and experimental analysis of the dieless incremental sheet forming process." *Journal of Materials Processing Technology* 177, 2006: 404–408.

Chen, Fuh-Kuo, e Kuan-Hua Chiu. "Stamping formability of pure titanium sheets." *Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University, Taipei 10764, Taiwan, ROC. Journal of Materials Processing Technology* 170, 2005: 181–186.

Dejardin, S., S. Thibaud, J. C. Gelin, e G. Michel. "Experimental investigations and numerical analysis for improving knowledge of incremental sheet forming process for the sheet metal parts ." *Int Journal of Materials Processing Technology* 210, 2010: 363-369.

Duflou, J. R., J. Verbet, J. Gu. Belkassem, H. Sol, C. Henrard, e A. M. Habrken. "Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths." *CIRP Annals Manufacturing technology* 57, 2008: 253-256.

Duflou, Joost, Yasemin Tunçkol, Alex Szekeres, e Paul Vanherck. "Experimental study on force measurements for single point incremental forming." *Journal of Materials Processing Technology* 189, 2007: 65–72.

Emmens, W.C., e A. H. Van Den Boogaard. "An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming." *Int Journal of Materials Processing Technology* 209, 2009: 3688-3695.

Emmens, W.C., G. Sebastiani, e A. H. Van Den Boogaard. "The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history." *Journal of Materials Processing Technology*, 2010: 981-997.

Eufinger, H., et al. "CAD/CAM titanium implantes for cranioplasty - an evaluation of success and quality of life of 169 consecutive implants with regard to size and location." *International Congree Series* 1281, 2005: 827-831.

Fuentefria, Newton Bragança. "Avaliação histológica da reação tecidual frente a implante poliuretano vegetal na tíbia de rato ." *Tese de doutorado - PUC/RS. Faculdade de Odontologia*, 1997.

Garcia, A., J. A. SPIM, e C. A. Santos. *Ensaio dos Materiais*. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

Grandini, C. R., L. H. Almeida, e C. A. F. Pintão. " Módulo de elasticidade dinâmico de ligas de Ti usadas como biomaterial ." *17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*. Foz do Iguaçu/PR, 2006.

Hagan, E., Jeswiet, J. "Analysis of surface roughness for parts formed by computer numerical controlled incremental forming." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 218, 2004: 1307-1312.

Ham, M., e J. Jeswiet. " Single point incremental forming and the forming criteria for AA 3003." *Annals of CIRP* 2006: 55, 2006: 241-244.

Hirt, G., J. Ames, M. Bambach, e R. Koop. "Forming strategies and Process Modeling for CNC Incremental Sheet Forming." *Materials Technology/Precision Forming, Saarland University, Saarbrücken, Germany. Metal Forming Institute, RWTH Aachen, Aachen, Germany*, 2004.

Hussain, G., L. Gao, N. Hayat, e Xu Ziran. "A new formability indicator in single point incremental forming. ." *Int Journal of Materials Processing Technology* 209, 2009: 4237-4242.

Hussain, G., N. U. Dar, L. Gao, e M. H. Chen. "A comparative study on the forming limits of an aluminum sheet-metal in negative incremental forming." *Journal of Materials Processing Technology*, 2007: 94-98.

Hussain, G.; Gao, L.; Hayat, N.; Cui, Z.; Pang, Y. C.; Dar, N. U. "Tool and lubrication for negative incremental forming of a commercially pure titanium sheet." *Journal of Materials Processing Technology* 203, 2008: 193-201.

Hussain, G.; Gao, L.; Zhang, Z. Y. "Formability evaluation of a pure titanium sheet in the cold incremental forming process." *Int Adv Manufacturing Technology* 37, 2008: 920-926.

Iseki, H., e T. Naganawa. "Vertical wall surface forming of rectangular shell using multistage incremental forming with spherical and cylindrical rollers." *Journal of Materials Processing Technology* 130–131, 2002: 675–679.

Jacobs, J. J., J. L. Gilbert, e R. M. Urban. "Corrosion of metal orthopaedic implants." *J Bone Joint Surg.* 8, 1998: 268.

Jeswiet, J. "Recent results for SPIF." *Seminar on Incremental Forming*. Cambridge University, 2004.

Jeswiet, J., F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, e J. Allood. "Asymmetric single point incremental forming of sheet metal ." *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 54, Issue 2, 2005: 88-114.

Jeswiet, J., J. Duflou, A. Szekeres, e P. Levebre. "Custom manufacture of a solar cooker - a case study." *Journal Advanced Materials Research - Vols. 6-8*, 2005: 487-492.

Kim, Y. H., e J. J. Park. "Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal." *Journal of Materials Processing Technology*, 2002: 42-46.

Kopac, J., e Z. Campus. "Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool ." *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163, 2005: 622-628.

Lajarin, Sérgio Fernando. "Avaliação dimensional de implantes sob medida para cranioplastia." *Tese de Mestrado*. Curitiba: UFPR - Universidade Federal do Paraná - Setor de Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Eng. Mecânica - PG-Mec, 2008.

Landre Jr, Janes, L. F. S. Patrício, C. E. dos Santos, e P. A. F. Martins. "A estampagem incremental como alternativa para a conformação em prequenas séries." *Corte e Conformação de Metais - Outubro*, 2010: 27-38.

Lesic, A., e M. Bumbasirevic. "Ankle Fractures." *Current Orthopaed* 18, 2004: 232-244.

Lievers, W. B., A. K. Pilkey, e D. J. Lloyd. "Using incremental forming to calibrate a void nucleation model for automotive aluminum sheet alloys." *Acta Materialia* 52, 2004: 3001-3007.

Lins, Fabrício. "Titânio e suas ligas." *Escola de Engenharia Industrial de Volta Redonda - Universidade Federal Fluminense UFF/VR*, 2008.

Martins, P. A. F., N. Bay, M. Skjoedt, e M. B. Silva. "Theory of single incremental forming." *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 57, 2008: 247-252.

Masuku, E. S., A. N. Bramley, A. R. Mileham, e W. Geraint. "Incremental sheet metal forming: a die-less rapid prototyping process for sheet metal." *Innovative Manufacturing Research Centre University of o Bath*. Claverton Down, 2004.

Melo, Alexandre Lyrio Viana de. *Análise das propriedades de chapa de Ti ASTM grau 5 (Ti6Al4V) soldadas por laser Nd:YAG*. Rio de Janeiro: Curso de Mestrado em Ciências dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, 2007.

Micari, F. "Single point incremental forming: recent results." *Seminar on Incremental Forming*. Cambridge: Cambridge University, 2004.

Micari, F., G. Ambrogio, e L. Filice. " Shape and dimensional accuracy in single point incremental forming: state of the art and future trends." *J. Materials Processing Technology* 191, 2007: 390-395.

- Minutolo, F. C., M Durante, A. Formisano, e A Langela. "Evaluation of the maximum slope angle of simple geometries carried out by incremental forming process. Department of Materials and Production Engineering." *University of Nales "Federico II", Piazzale Tecchio 80, 80125 Naples, Italy. Journal of Materials Processing Technology 194*, 2007: 145–150.
- Moosrigger, C. *Atlas of Stress - Strain Curves. Second Edition.* . ASM international, 2007.
- Rauch, M., Hascoet J. Y., J. C. Hamann, e Y. Plenel. "Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications." *Int Computer Aided Design 41*, 2009: 877-885.
- Rauch, M., J. Y. Hascoet, J. C. Hamann, e Y. Plenel. "A new approach for toolpath programming in Incremental Sheet Forming." *Int J Mater Form, Suppl 1, Springer/ESAFORM*, 2008: 1191-1194.
- Realum comércio de metais. <http://www.realum.com.br> (acesso em 10 de agosto de 2010).
- Salem, Ayman, A., Surya R. Kalidindi, e Roger Doherty. "Strain hardening of titanium: role of deformation twinning." *Acta Materialia 51*, 2003: 4225–4237.
- Sanada, Jefferson Tomio. *Avaliação da resistência e módulo de elasticidade de osso mineralizado e desmineralizado pelos testes de microtração.* Dissertação de Mestrado. Faculdade de Odontologia de Bauru da Universidade de São Paulo - USP, 2007.
- Schaeffer, L. *Conformação de Chapas Metálicas.* Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
- . *Conformação dos Metais – metalurgia e mecânica.* Porto Alegre: Rigel, 1995.
- Schaeffer, L., e A. Rocha. *Conformação Mecânica – Cálculos Aplicados em Processos de Fabricação.* Porto Alegre: Imprensa Livre, 2007.
- Shim, M. S., e J. J. Park. "The formability of aluminium sheet in incremental forming." *Journal of Materials Processing Technology 113*, 2001: 654-658.
- Sicoli, Marcelo, e Thaise. Mrad. "Oportunidades no Mercado Brasileiro de Produtos e Equipamentos Médicos." *Portal Farmacêutico.* 2010. <http://pfarma.com.br/noticia-setor-farmacaceutico/varejo-farmacaceutico/353-mercado-brasileiro-produtos-equipamentos-medicos.html> (acesso em 30 de agosto de 2010).
- Sittig et al, C. "Surface characterization of implant materials cp Ti, Ti-6Al-7Nb and Ti-6Al-4V with different pretreatments." *Journal Of Materials Science: Materials in Medicine, Zürich*, 1997: 35-46.
- Skjoedt, M., N. Bay, B. Endelt, e G. Ingarao. " Multi Stage Strategies for Single Point Incremental Forming of a Cup." *Int J Mater Form, Suppl 1, Springer/ESAFORM*, 2008: 1199-1202.

“Tribologia.” <http://www.scribd.com/doc/23898478/Tribologia> (acesso em 30 de agosto de 2010).

Wang, K. “The use of titanium for medical applications in the USA .” *Materials Science and Engineering A213*, 1996: 134-137.

Yuan, J.M., e V.P.W. Shim. “Tensile response of ductile alfa-titanium at moderately high strain rates.” *International Journal of Solids and Structures* 39, 2002: 213-224.

## ANEXOS

DEFORMAÇÕES										
Valores de deformação utilizados para gerar o gráfico da Figura .2										
Medições dos círculos			Deformações verdadeiras							
Teste 4						Teste 6				
Ponto	maior deformação (mm)	menor deformação (mm)	$\varphi_1 = \frac{l}{l_0}$	$\varphi_1 = \frac{b}{b_0}$	$\varphi_3 = -\varphi_2 - \varphi_1$	maior deformação (mm)	menor deformação (mm)	$\varphi_1 = \frac{l}{l_0}$	$\varphi_1 = \frac{b}{b_0}$	$\varphi_3 = -\varphi_2 - \varphi_1$
0	2,5	2,5	0,00000	0,00000	0,00000	2,5	2,5	0,0000	0,0000	2,5000
1	2,7	2,48	0,07696	-0,00803	-0,06893	2,6	2,46	0,0392	-0,0161	-0,0231
2	2,9	2,44	0,14842	-0,02429	-0,12413	2,8	2,44	0,1484	-0,0243	-0,1241
3	3,18	2,4	0,24059	-0,04082	-0,19977	3	2,4	0,2406	-0,0408	-0,1998
4	3,2	2,36	0,24686	-0,05763	-0,18923	3,1	2,34	0,2469	-0,0661	-0,1807
5	2,7	2,24	0,07696	-0,10981	0,03285	2,6	2,24	0,0770	-0,1098	0,0329
6	2,68	2,24	0,06953	-0,10981	0,04029	2,56	2,24	0,0695	-0,1098	0,0403
7	2,56	2,4	0,02372	-0,04082	0,01711	2,54	2,38	0,0237	-0,0492	0,0255
8	2,52	2,48	0,00797	-0,00803	0,00006	2,52	2,44	0,0080	-0,0243	0,0163
9	2,5	2,5	0,00000	0,00000	0,00000	2,5	2,5	0,0000	0,0000	0,0000
Passo	0.1				-0,14551	0.25				-0,1319268
Avanço	500					500				
Suporte	negativo					negativo				

VARIAÇÃO DE ESPESSURA							
Medições realizadas para gerar o gráfico da Figura 5.3							
Posição	Raio	4	6	8	10	lei seno	Âng parede
1	44,50	1,000	1,000	1,000	1,000	0,585	54,200
2	40,40	0,980	0,960	0,980	0,980	0,743	42,000
3	35,92	0,800	0,800	0,800	0,800	0,819	35,000
4	31,80	0,400	0,360	0,340	0,480	0,883	28,000
5	29,36	0,700	0,640		0,720	0,934	21,000
6	26,52	0,740	0,700		0,740	0,970	14,000
7	23,92	0,960	0,900		0,960	0,993	7,000
8	20,76	0,980	0,965		0,980	1,000	0,000
9	0,00	1,000	1,000		1,000	1,000	0,000
		Teste	Passo	Avanço	Suporte		
		4	0.10	500	negativo		
		5	0.10	1500	negativo		
		6	0.25	500	negativo		
		7	0.25	1500	negativo		
		8	0.50	500	negativo		
		9	0.50	1500	negativo		
		10	0.10	500	positivo		