



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais  
PPGE3M

## **Fabricação de Próteses Cranianas Personalizadas em Chapas de Titânio Através da Estampagem Incremental**

Anderson Daleffe

Tese de doutorado

Porto Alegre  
2014



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais  
PPGE3M

## **Fabricação de Próteses Cranianas Personalizadas em Chapas de Titânio Através da Estampagem Incremental**

Anderson Daleffe

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  
2014

Esta 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. Lírío Schaeffer  
PPGE3M/UFRGS

**Comissão Examinadora:**

Prof. Dr. Jovani Castelan (SATC)

Prof. Dr. Fábio André Lora (SENAI-Cimatec)

Prof. Dr. Eng. Luis Fernando Folle (UniRITTER)

**Suplente:**

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

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGE3M

Dedico a minha esposa Andreza e a meu filho Gilmar  
pela paciência, apoio e motivação.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Lirio 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 e amigo Daniel Fritzen, pelo suporte técnico e disponibilidade para desenhar todos os componentes mecânicos utilizados neste trabalho e também pela discussão de alternativas para melhorias do projeto e dos experimentos práticos.

Ao coordenador da Tecnologia em Manutenção Industrial, Joeci Casgrande pelo incentivo e colaboração na realização deste trabalho.

Aos colegas do LdTM, especialmente ao Eng<sup>o</sup> Uilian Boff que colaborou na revisão do meu trabalho, contribuindo com sugestões valiosíssimas, o meu muito obrigado.

A coordenadora do LAPEC/UFRGS Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Célia Malfatti, pela pronta autorização para a utilização dos equipamentos de análise de MEV e EDS.

Ao laboratorista Leonardo Marasca Antonini, pelas análises realizadas no LAPEC/UFRGS e pelas valiosas sugestões e contribuições.

Aos colegas Alexandre Milanez, Mateus Milanez e Luiz Carlos Cavaler, que me auxiliaram na pesquisa científica e na preparação dos materiais para análise.

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

À Deus por eu concluir este trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	IX
LISTA DE TABELAS .....	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XV
SÍMBOLOS GREGOS.....	XVI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XVII
RESUMO .....	XVIII
ABSTRACT .....	XIX
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	5
2.1 Estampagem Incremental.....	5
2.2 Modalidades da Estampagem Incremental .....	7
2.3 Trajetória da Ferramenta na Estampagem .....	9
2.3.1 Ferramentas para estampagem incremental.....	10
2.4 Aplicações da Estampagem Incremental .....	12
2.5 Máquinas Para a Estampagem Incremental .....	13
2.5.1 Centro de Usinagem e Fresadoras CNC.....	13
2.5.2 Estampagem Incremental Com Robôs .....	14
2.5.3 Máquinas Dedicadas Para Estampagem Incremental .....	16
2.6 Órteses e Próteses .....	18
2.6.1 Traumatismos Cranianos .....	19
2.6.2 Prótese Fabricadas em Chapas de Titânio .....	20
2.7 Chapas de Titânio Puro – Ti cp grau 2 .....	21
2.7.1 Micrografia .....	22
2.7.2 Curva Tensão - Deformação de Engenharia da Chapa de Titânio .....	23
2.7.3 Curva de Escoamento do Titânio .....	24
2.7.4 Índice de Anisotropia .....	25
2.7.5 Propriedades Físico-químicas .....	26
2.7.6 Características Biomecânicas .....	28
2.7.7 Propriedade Mecânica – Estrutura Cristalina .....	28
2.8 Propriedades Mecânicas Associadas a Biocompatibilidade Superficial .....	29
2.8.1 Molhabilidade .....	29

2.8.2	Rugosidade .....	31
2.9	Deformações na Peça Estampada.....	34
2.10	Curvas Limite de Conformação - CLC.....	36
2.11	Discrepância Geométrica .....	38
2.12	Tratamento Térmico Para Alívio de Tensões do Titânio Puro.....	39
3	CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE TITÂNIO USADA NOS TESTES.....	41
3.1	Ensaio de Tração do Material a Ser Estampado.....	41
3.1.1	Ensaio de Tração na Chapa de Titânio Sem Tratamento Térmico .....	42
3.1.2	Ensaio de Tração na Chapa de Titânio Com Tratamento Térmico.....	49
3.2	Cálculo do Índice de Anisotropia .....	52
3.3	Ângulo Máximo de Inclinação da chapa de titânio puro na SPIF.....	53
3.3.1	Resultado dos Testes que Determinam o Ângulo Máximo de Parede.....	54
3.3.2	Deformações .....	56
3.3.3	Variação da Espessura da chapa de titânio.....	57
3.4	Curva limite de Conformação – CLC do Titânio .....	57
3.5	Metalografia .....	60
3.6	Análise do Titânio Estampado .....	61
3.6.1	Retirada das Amostras.....	62
3.6.2	Desengraxe das Amostras.....	63
3.6.3	Microscopia Óptica do Titânio Puro Grau 2.....	63
3.6.4	Perfilometria de Contato da Superfície do Titânio Puro Grau 2.....	63
3.6.5	Teste de Molhabilidade .....	64
3.6.6	(MEV/EDS) (Microscopia Eletrônica de Varredura).....	64
3.6.7	Resultados dos Ensaios da Chapa de Titânio Estampado .....	64
3.6.7.1	Micrografia .....	64
3.6.7.2	Molhabilidade da Chapa de Titânio Puro Grau 2 .....	66
3.6.7.3	Análise Química.....	67
3.7	Microdureza .....	70
4	FABRICAÇÃO DA PROTESE EM CHAPA DE TI.....	72
4.1	Modelagem.....	72
4.2	Manufatura .....	73
4.2.1	Manufatura do Crânio Com as Medidas Reais do Paciente .....	79
4.3	Planilha de Custo da Prótese – Processo de Fabricação .....	80

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	81
5.1	Contaminação Química.....	81
5.2	Rugosidade.....	81
5.3	Molhabilidade.....	82
5.4	Comparação Entre CLC e Deformações por Estampagem Incremental.....	82
5.5	Comparação Física da Prótese Estampadas .....	83
5.6	Montagem da Prótese no Modelo do Crânio Usinado em Madeira .....	84
5.7	Retorno Elástico na Prótese .....	85
5.8	Análise Dimensional na Ferramenta de Ponta Esférica de Titânio .....	88
5.9	Comparação de Custo da Prótese .....	88
6	CONCLUSÃO.....	90
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	92
8	BIBLIOGRAFIA .....	94

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Representação esquemática do processo de estampagem incremental [30].	6
Figura 2-2: Modalidades de estampagem incremental [32].	7
Figura 2-3: Modalidades da ISF [34].	8
Figura 2-4: AISF, com suporte inferior negativo [35].	9
Figura 2-5: TPIF com suporte assimétrico de configuração positiva [17].	9
Figura 2-6: (a) Trajetória com incrementos graduais em Z; (b) Trajetória helicoidal [37].	10
Figura 2-7: Diferentes tipos de ferramentas. (a) ferramenta rígida, (b) ferramenta VRB, e (c) ferramenta ORB [40].	11
Figura 2-8: Ferramenta VRB e sua deficiência. (a) Geometria de ferramenta VRB e (b) arranhões superficiais provocados pela ferramenta VRB [40].	11
Figura 2-9: O princípio de funcionamento da ferramenta. (a) ângulo máximo de parede obtido pela ferramenta ORB, (b) estampagem incremental SPIF com ferramenta ORB [40].	12
Figura 2-10: Aplicações da estampagem incremental: a) Implante craniano, b) Forno solar e c) Protótipo de coletor de admissão [17].	13
Figura 2-11: Centro de usinagem discovery modelo 4022, ROMI com comando MACH9 [16].	14
Figura 2-12: Robô usado na estampagem incremental [22].	15
Figura 2-13: Ferramentas de estampagem utilizadas na robótica [22].	15
Figura 2-14: (a) Estampagem incremental robotizada, (b) Estampagem incremental com ponto de apoio fixo (DPIF-P), (c) Estampagem incremental com ponto de apoio móvel (DPIF-L), (d) Peça automotiva complexa e (e) Cilindro com sub-contração [15].	16
Figura 2-15: Máquina dedicada para ISF fabricada na universidade de Cambridge - Reino Unido [46].	17
Figura 2-16: a) Máquina dedicada para ISF desenvolvida pela Amino Corporation; b) Capa externa de um capô de carro; c) Capa interna de um capô de carro; d) Montagem do capô de carro [19].	17

Figura 2-17: Titânio do implante craniano (imagem cortesia direito de SimiCure) [47]. .....	18
Figura 2-18: Divisão anatômica das partes constituintes da caixa craniana [4], [17].....	19
Figura 2-19: Traumatismo craniano severo. A grande perda de área óssea impede a regeneração e reintegração natural, exigindo o implante [17]. .....	20
Figura 2-20: (a) Modelo stereolitografico do crânio. (b) Modelo digital do crânio. (c) Geometria do apoio inferior utilizado para TPIF. (d) A programação do caminho da ferramenta. (e) Área da chapa coberto pelo implante. (f) Implante craniano produzido [48]..	21
Figura 2-21: Microscopia ótica do Ti-CP F67 G2. Aumento de 200x [17]. .....	22
Figura 2-22: Microestrutura do titânio grau 2 (esquerda) e Ti6Al4V (direita) no estado em que as chapas são entregues [53].....	23
Figura 2-23: Curva tensão-deformação do titânio comercialmente puro (Ti-CP) grau 2 [13].	23
Figura 2-24: Curva convencional $\sigma X \epsilon$ do Ti-CP grau 2 a 0° [17]. .....	24
Figura 2-25: Curva de escoamento do Titânio CP [13]. .....	24
Figura 2-26: Curva de escoamento do Titânio CP em escala logarítmica [17]. .....	25
Figura 2-27: Influência dos elementos residuais do Ti-CP na resistência à tração [17]. .....	27
Figura 2-28: Estrutura cristalina do titânio: a) Hexagonal compacta na temperatura ambiente; b) Cúbica de corpo centrado na temperatura de transformação alfa-beta [17].....	29
Figura 2-29: Definição do ângulo de molhabilidade (Adaptado de [59]).....	30
Figura 2-30: Representação do ângulo formado entre a gota e a superfície: (a) Superfície hidrofóbica (b) Superfície hidrofílica (Adaptado de [61]). .....	30
Figura 2-31: Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de amostras sob diferentes tratamentos superficiais [62]. .....	31
Figura 2-32: Esboço representativo do parâmetro RZ, conforme NBR4287/2002 [65].....	32
Figura 2-33: Variação da adesão e proliferação de células e formação de nódulos ósseos de acordo com a variação de rugosidade [67]. .....	33
Figura 2-34: Exemplo de deformações que ocorrem em um componente estampado [45]. ....	34
Figura 2-35: Medição prática da deformação: a - Círculo inicial, b - Elipse após a deformação [71]. .....	34

Figura 2-36: Deformação em diferentes posições em uma linha de uma peça estampada [71]. .....	35
Figura 2-37: Curva-limite de conformação esquemática [ISO 12004:1997], onde (a) é o embutimento profundo ( $\varphi_1 = -\varphi_2$ ), (b) é a tração uniaxial ( $\varphi_1 = -2 \cdot \varphi_2$ ), (c) é a deformação plana ( $\varphi_2 = 0$ ) e (d) é o estiramento biaxial ( $\varphi_1 = \varphi_2$ ) [73].	36
2-38: Diagrama-limite de conformação das chapas de titânio [75].	37
Figura 2-39: Diagrama limite de conformação e curva limite de fratura do TiCp Gr2 [1].	38
Figura 2-40: Erros geométricos durante o processo de SPIF [31].	39
Figura 2-41: Gráfico esquemático do tratamento térmico [76].	40
Figura 3-1: Corpo de prova com as dimensões padronizadas.	41
Figura 3-2: Curva convencional $\sigma X \varepsilon$ do Ti-CP Grau 2 para ângulo de laminação $0^\circ$ .	42
Figura 3-3: Curva convencional $\sigma X \varepsilon$ do Ti-CP Grau 2 para ângulo de laminação $90^\circ$ .	43
Figura 3-4: Curva convencional $\sigma X \varepsilon$ do Ti-CP Grau 2 para ângulo de laminação $45^\circ$ .	44
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 estricção visível.	44
Figura 3-6: Dimensões do corpo de prova antes e depois do ensaio de tração.	45
Figura 3-7: Curva de escoamento do Titânio CP, Grau 2.	48
Figura 3-8: Curva de escoamento representada com eixos logarítmicos, ensaio 1 a $0^\circ$ .	48
Figura 3-9: corpos de prova tratados termicamente.	49
Figura 3-10: Curva convencional $\sigma X \varepsilon$ do Ti-CP Grau 2 tratado termicamente, para ângulo de laminação $0^\circ$ .	49
Figura 3-11: Curva convencional $\sigma X \varepsilon$ do Ti-CP Grau 2 tratado termicamente, para ângulo de laminação $45^\circ$ .	50
Figura 3-12: Curva convencional $\sigma X \varepsilon$ do Ti-CP Grau 2 tratado termicamente, para ângulo de laminação $90^\circ$ .	51
Figura 3-13: Curva de escoamento Titânio comercialmente puro com tratamento térmico de alívio de tensões.	51

Figura 3-14: Modo de entrada da ferramenta. ....	53
Figura 3-15: Teste de estampagem SPIF com 45° de ângulo de parede. ....	54
Figura 3-16: Teste de estampagem SPIF com 50° de ângulo de parede. ....	54
Figura 3-17: Teste de estampagem SPIF com 47° de ângulo de parede. ....	55
Figura 3-18: Teste de estampagem SPIF com 48° de ângulo de parede. ....	55
Figura 3-19: Sistema de medição das esferas, A - gravação eletroquímica na chapa de Titânio, B - medição das elipses. ....	56
Figura 3-20: Verificação das deformações $\phi 1$ e $\phi 2$ . ....	56
Figura 3-21: A) Sentido de laminação; B) Gráfico da variação das espessuras. ....	57
Figura 3-22: Prensa hidráulica usada nos testes – LD TM-UFRGS. ....	58
Figura 3-23: corpos de prova cortados a laser, conforme ensaio Nakajima. ....	58
Figura 3-24: Medição das esferas. ....	59
Figura 3-25: Forma de medição das elipses. ....	59
Figura 3-26: Curva CLC para o titânio comercialmente puro de grau 2. ....	60
Figura 3-27: Microscopia ótica do Ti-CP F67 grau 2. A microscopia do titânio comercialmente puro. B microscopia do titânio comercialmente puro tratado termicamente. ....	61
Figura 3-28: Obtenção dos corpos-de-prova sem tratamento térmico. ....	62
Figura 3-29: Imagens por microscopia ótica das chapas de Titânio. ....	65
Figura 3-30: Gráfico Molhabilidade x Rugosidade. ....	66
Figura 3-31: Amostra BL-R. (a) Imagem de MEV região 2, (b) Análise Pontual de EDS ponto 1, (c) Análise Pontual de EDS ponto 2, (d) Análise Pontual de EDS ponto 3. ....	68
Figura 3-32: Amostra BLT-R. (a) Imagem de MEV região 1, (b) Análise Pontual de EDS ponto 1, (c) Análise Pontual de EDS ponto 2, (d) Análise Pontual de EDS ponto 3. ....	69
Figura 3-33: Perfil de medição da microdureza. ....	70
Figura 3-34: Gráfico da microdureza. ....	71
Figura 4-1: Tela do Invesalius, com o arquivo vetorial 3D gerado. ....	72

Figura 4-2: Modelo CAD 3D do implante finalizado. Para a modelagem, foram utilizados recursos avançados de modelagem de superfícies. No detalhe, a montagem implante-modelo. ....	73
Figura 4-3: Simulações da usinagem do molde inferior de polímero (a) e da estampagem e recorte do implante (b). ....	74
Figura 4-4: Ferramenta de estampagem incremental, especialmente desenvolvida. ....	75
Figura 4-5: Usinagem modelo em PU. ....	76
Figura 4-6: Estampagem Incremental, A) Fixação da chapa e lubrificação usada, B) Processo de estampagem. ....	76
Figura 4-7: Corte da prótese. ....	77
Figura 4-8: Retirada da prótese. ....	77
Figura 4-9: Chapa de titânio estampada e tratada termicamente. ....	78
Figura 4-10: Corte da prótese chapa tratada. ....	78
Figura 4-11: Modelo bipartido para usinagem. ....	79
Figura 4-12: Manufatura do crânio em madeira. ....	79
Figura 5-1: CLC e ISF (incremental Sheet forming) plotada no gráfico – chapa de Titânio. ....	83
Figura 5-2: Próteses finalizadas. ....	83
Figura 5-3: Montagem implante-modelo. O modelo em madeira foi pintado. A chapa de titânio foi presa ao modelo por meio de parafusos. ....	84
Figura 5-4: Uma prótese de titânio pronta, acoplada em um modelo de crânio [80]. ....	85
Figura 5-5: Medição da prótese por escâner. ....	86
Figura 5-6: Comparação entre o modelo CAD e a prótese. ....	87
Figura 5-7: Medição com Solidworks. ....	87
Figura 5-8: Desgaste da ponta da ferramenta. ....	88

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2-1: Especificação da máquina desenvolvida por Alwood [46].....	17
Tabela 2-2: Propriedades físico-químicas do titânio comercialmente puro – grau 2 [51].....	26
Tabela 2-3: Propriedades químicas do Ti-CP F67 G2 [56].....	27
Tabela 2-4: Composição química conforme certificado de qualidade REALUM. ....	27
Tabela 3-1: Resultado dos ensaios de tração.....	52
Tabela 3-2: Índice de anisotropia.....	52
Tabela 3-3: Dados da estampagem SPIF.....	53
Tabela 3-4: Descrição das amostras para os sistemas estudados.....	62
Tabela 3-5: Parâmetros de perfilometria de contato. ....	63
Tabela 3-6: Medidas de rugosidade micrométrica ( $\mu\text{m}$ ). ....	65
Tabela 3-7 Medidas de ângulos de contato. ....	66
Tabela 3-8: Descritivo das amostras. ....	70
Tabela 4-1: Parâmetros tecnológicos da etapa de manufatura ....	74
Tabela 4-2: Planilha de custos para fabricação da prótese por estampagem incremental. ....	80

## 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
$k_f$	Tensão de escoamento	MPa
$l$	Comprimento final do corpo de prova no ensaio de tração	mm
$l_0$	Comprimento inicial do corpo de prova no ensaio de tração	mm
$R_t$	Raio da ferramenta de estampagem	mm
$r$	Índice de anisotropia	(-)
$r_m$	Índice de anisotropia média	(-)
$R_z$	Parâmetro de rugosidade	$\mu\text{m}$
$s$	Espessura em um ponto arbitrário da chapa	mm
$s_0$	Espessura inicial da chapa	mm
$s_f$	Espessura final da chapa	mm
$t_0$	Espessura inicial da chapa	mm
$t_f$	Espessura final da chapa	mm
$V_c$	Velocidade de corte	mm/min
$x$	Medida da maior deformação na direção 1	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
$y$	Medida da menor deformação na direção 2	mm
$Y$	Movimento transversal da máquina ferramenta	mm
$Z$	Movimento vertical da máquina ferramenta	mm
$Z_p$	Soma da altura máxima dos picos do perfil	mm
$Z_v$	A maior das profundidades dos vales do perfil	mm

## SÍMBOLOS GREGOS

Símbolo	Significado	Unidade
$\beta$	Ângulo de contato entre ferramenta e chapa	graus
$\psi$	Ângulo de inclinação de parede da chapa	graus
$\psi_f$	Ângulo final de inclinação de parede da chapa	graus
$\psi_o$	Ângulo inicial de inclinação de parede da chapa	graus
$\lambda$	Ângulo do semi cone	graus
$\delta$	Alongamento	mm
$\theta$	Complemento do ângulo final da parede da chapa	graus
$\varepsilon$	Deformação relativa	%
$\varepsilon_{\max}$	Deformação relativa correspondente à tensão máxima	%
$\varepsilon_l$	Deformação relativa no comprimento	%
$\varphi$	Deformação verdadeira	(-)
$\varphi_1$	Deformação verdadeira na direção 1 na superfície da chapa	(-)
$\varphi_2$	Deformação verdadeira na direção 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)	%
$\gamma_S$	Energia de superfície do sólido	N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{SL}$	Energia da interface sólida líquida	N/mm <sup>2</sup>
$\Delta_z$	Profundidade do passe vertical	mm
$\sigma_R$	Tensão de ruptura	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_E$	Tensão de Escoamento (convencional)	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{MAX}$	Tensão máxima	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma$	Tensão	N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{LV}$	Tensão superficial do líquido em equilíbrio com o vapor	N/mm <sup>2</sup>

**LISTA DE ABREVIATURAS**

AISI	American Iron and Steel Institute
AISF	Asymetric Incremental Sheet Forming
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CLC	Curva limite de conformação
CNC	Computer Numeric Command
CP	Corpo de prova
EI	Estampagem Incremental
HV	Hardness Vickers
KISF	Kinematic Incremental Sheet Forming
ISF	Incremental Sheet Forming
JPG	Extensão de arquivo pictorial
NC	Numerical Control
SATC	Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
SPIF	Single Points Incremental Forming
SBF	Fluido corporal simulado
TC	Tomografia Computadorizada
Ti-CP	Titânio comercialmente puro
TPIF	Two Points Incremental Forming
PU	Poliuretano rígido de alta densidade
VRB	Ferramenta vertical rolante
ORB	Ferramenta oblíqua com esfera rolante
3D	Três dimensões

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é fabricar próteses cranianas personalizados de baixo custo, em chapa de titânio puro. A fabricação antecipada do implante de acordo com as características do paciente permite ao cirurgião estudar e planejar a cirurgia com maiores possibilidades de atingir o resultado esperado, a personalização contribui para o resultado estético e funcional do implante, já que considera a anatomia de cada paciente, o custo baixo permite que um maior número de pessoas possam ser beneficiadas. Os experimentos práticos iniciam-se com aquisição de imagens tomográficas computadorizadas de um crânio defeituoso, reconstruiu-se digitalmente em CAD o crânio com defeito e também a reparadora (implante). A fabricação do implante em chapa de titânio puro grau 2 foi realizada por estampagem incremental, processo de baixo custo e que permite a fabricação customizada de peças. Foram comparadas as dimensões entre o modelo CAD e o modelo físico do implante. A partir da imagem tomográfica também foi gerado o modelo CAD do crânio fraturado e foi feita a usinagem do mesmo em madeira para a realização do teste funcional do implante onde foi comprovada a funcionalidade do mesmo, indicando a eficiência dos recursos e parâmetros utilizados. A ferramenta utilizada para a estampagem incremental foi fabricada em aço SAE 4340 com ponta intercambiável de titânio puro e o lubrificante utilizado no processo foi a base de gordura animal para evitar a contaminação da prótese. Foi feito o tratamento térmico de alívio de tensões na prótese estampada para manter as dimensões geométricas após o corte da prótese, melhoria na rugosidade superficial e biocompatibilidade do titânio. Após o tratamento térmico foram feitas análises na rugosidade e teste de molhabilidade no implante, onde os resultados mostraram que a prótese tratada termicamente muda as características biomecânicas. Para análise da geometria do implante foi feito uma varredura por escâner e comparação com o modelo CAD da prótese.

Palavras-chave: implante, estampagem incremental, titânio, personalização.

## ABSTRACT

The work main objective is manufacture custom cranial implants with low cost, in titanium pure sheet. The prior implant fabrication according with the characteristics of the patient allow surgeon to study and planning surgeries with greater possibilities to achieve expected results. The customization helps for esthetic and functional results of implant, because regards the anatomy of each patient, the low cost allow the most people receive benefits. Practical experiments began with acquisition of computed tomographic images of a defective cranium, rebuilt the implant and this cranium in CAD images. Implant manufacture in titanium sheet pure grade 2, was performed with incremental forming, this process have low cost and enables to produce custom pieces. The implant dimensions been compared between the CAD Model and Physic Model. Starting with the tomographic image was generate the CAD Model of fractured cranium, and was make a machining the same in wood for realization of functional implant test, which was confirmed the same functionality, indicating resource efficiency and the parameters used. The tool used for sheet forming been manufactured in SAE 4340 steel with interchangeable point of pure titanium, and the lubricant used in the process has been the basis animal grease to avoid the implant contamination. Heat treatment was done to reduce the relief of stresses at the implant formed to maintain the geometric dimensions after the implant cut, superficial roughness better and titanium biocompatibility. After heat treatment, the average roughness analyzes performed and wettability test in the implant, witch results shows the treated prosthesis changes the biomechanical characteristics. For analysis of the implant geometry, was used a scanner and compared with the CAD model of the prosthesis.

Keywords: implant, sheet forming, titanium, customization.

## 1 INTRODUÇÃO

A estampagem incremental é atualmente um processo inovador no que diz respeito à conformação plástica de chapa, estando associada a novos campos de aplicação, como o caso da biomecânica e da prototipagem rápida, onde a produção em série de um produto não é a prioridade, mas sim o estudo individual da peça a ser fabricada.

As palavras-chaves na indústria hoje em dia são diferenciação, personalização, redução de custos, diminuição do “*lead-time*” e produção sustentável. É necessário, portanto, providenciar respostas urgentes para estes requerimentos, desenvolvendo novas tecnologias em diferentes áreas da produção, entre elas, a área de conformação plástica de chapas metálicas [1]. Na área médica em particular, a customização é o grande paradigma para este novo século, buscando adaptar-se aos requisitos específicos de cada paciente [2].

A fabricação customizada de órteses, próteses e implantes é um setor importante da área médica. Segundo [3], o projeto e fabricação de órteses, próteses e materiais especiais utilizados em intervenções médicas (cirurgias reparadoras), representam até 80% da conta hospitalar.

Os traumatismos cranianos podem ocorrer devido a tumores, infecções e principalmente por fraturas (impactos), decorrentes de acidentes automobilísticos ou atos interpessoais. Quando a área atingida 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. A maior parte dos implantes (91.2%) está localizada nas regiões neurocranial e temporal<sup>1</sup>. [4].

Recursos tecnológicos de computação gráfica, sistemas CAD/CAM, prototipagem rápida e processos de fabricação voltados a peças médicas individuais vem sendo desenvolvidos e aprimorados desde o início dos anos 1990. [5], [6], [7], [8], [9], [10], descrevem metodologias, fluxogramas e procedimentos para a reconstrução de tecidos ósseos utilizando estes recursos tecnológicos. Estes trabalhos apresentam a fabricação de implantes utilizando como matéria-prima polímeros biocompatíveis, manufaturados por diferentes processos de prototipagem rápida (esterolitografia, impressão 3D, sinterização seletiva a laser). Entretanto, o titânio puro grau 2 ainda é um material que apresenta melhores resultados após longos períodos de tempo, mantendo características importantes relacionadas à biocompatibilidade [5,6,7,10]. Além disso, de acordo com [9], suas propriedades mecânicas

---

<sup>1</sup> Regiões da lateral superior e lateral inferior do crânio.

são superiores às dos polímeros: módulo de elasticidade do Ti, é de 4 a 5 vezes superior ao do osso humano, em média e alta resistência à corrosão.

De acordo com o [11], o titânio é largamente utilizado para a substituição de tecidos ósseos, articulações, implantes dentários, restaurações maxilo-cranio-faciais, dispositivos cardiovasculares (stents), órteses externas (próteses temporárias) e instrumentação cirúrgica. Mais de 1.000 toneladas em dispositivos de titânio são implantadas em pacientes no mundo a cada ano. Requisitos para a substituição da articulação continuam a crescer, com o aumento da longevidade. Também há o desgaste não regenerável de ossos devido a atividades esportivas intensas ou perdas ósseas devido a acidentes de trânsito e conflitos interpessoais. Leve, forte e totalmente biocompatível, o titânio é um dos poucos materiais que correspondem naturalmente aos requisitos para implantação no corpo humano.

Implantes ósseos com áreas contínuas e de espessura uniforme, tais como a região crânio-facial e omoplata, podem ser fabricados em chapas de titânio puro grau 2. As ligas de titânio, segundo [12], tais como Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb e Ti-13Nb-13Zr, tem um maior custo de produção e são indicadas para regiões de impacto e movimentação, como juntas de quadril, articulações do joelho e ossos longos, como tíbia e fêmur. Estas ligas, após tratamento térmico, podem atingir tensões-limite de resistência de até 900 MPa, enquanto o titânio puro grau 2, de acordo com [13], pode atingir 520 MPa.

A estampagem incremental de chapas (ISF – Incremental Sheet Forming) é um processo que utiliza ferramentas genéricas de baixo custo e que pode ser realizada em máquinas não projetadas originalmente para esta finalidade, como centros de usinagem CNC. Possibilita a manufatura de peças de chapa de diversas geometrias utilizando a mesma ferramenta. Sistemas CAD/CAM designados para usinagem podem ser utilizados para conceber as geometrias e trajetórias da ferramenta. São utilizadas ferramentas maciças de perfil genérico (haste cilíndrica ou cilindro-cônico e ponta esférica ou semi-esférica) sem arestas de corte, utilizada para deformar incrementalmente a chapa, em movimentos coordenados XYZ. Estes movimentos produzem uma deformação plástica, localizada em uma pequena região da chapa. Esta região muda de acordo com a movimentação da ferramenta, fazendo com que a deformação ocorra de maneira progressiva, aumentando a conformabilidade da chapa, quando comparada com os processos convencionais de estampagem [14].

Segundo Marques, a estampagem incremental desenvolve-se à temperatura ambiente e requer um centro de usinagem CNC, uma ferramenta de ponta esférica e uma estrutura simples para suporte e fixação da chapa [28].

Recentemente diferentes cinemáticas baseadas em processos de conformação de chapas metálicas vem sendo utilizadas, destacando-se a estampagem incremental de chapas [15]. Neste contexto a estampagem incremental está sendo desenvolvida, utilizando máquinas inicialmente projetadas para outras operações: a) Robôs com a tecnologia *Roboforming*, estampagem incremental robótica [15], b) Centro de usinagem, projetados para usinagem e adaptados para estampagem [16], [17] e [18]. Já existem máquinas dedicadas para estampagem incremental, para produção industrial em pequena escala, prototipagem rápida [19].

Bertol, em seu estudo, trabalha com a fabricação customizada de implantes. A análise é focado nos diferentes biomateriais aloplásticos, (polimetilmetacrilato, titânio e cimentos de fosfatos de cálcio) e apresenta resultados de uma forma semelhante aos desta pesquisa. A principal diferença é que a fabricação dos implantes é feita de forma manual [10].

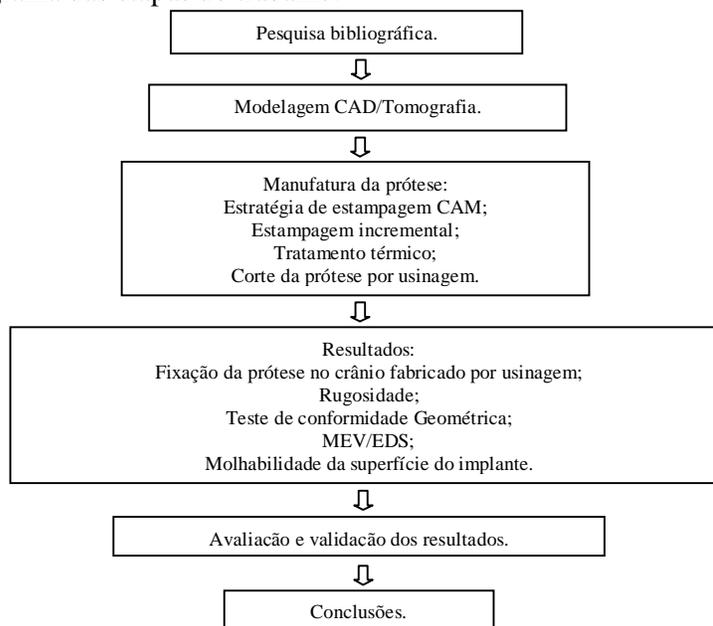
No trabalho de [7], a metodologia do trabalho, parte das imagens tomografias computadorizadas para a fabricação de biomodelos e implantes, é similar a metodologia adotada neste trabalho, se diferenciando em dois pontos: a) pelos recursos utilizados (softwares - de aquisição de imagens DICOM e CAD/CAM e hardware – máquinas e ferramentas) e b) pelo processo de fabricação do implante. Lieger utiliza o processo de esterolitografia para gerar o modelo do implante e seus respectivos moldes. A utilização de equipamentos de impressão tridimensional por esterolitografia tem alto custo [7].

O objetivo desta tese é desenvolver implantes cranianos em chapa de titânio puro grau 2 priorizando a funcionalidade biomecânica e estética do implante. Comparar a prótese fabricada com o modelo CAD e avaliar a montagem final no crânio, (modelo fabricado em madeira), com as características reais do paciente. Outro objetivo importante é viabilizar através de redução do custo final da prótese que um maior número de pessoas tenha acesso a este recurso. A importância do estudo é justificada pela sua contribuição social, melhorando a qualidade de vida de acidentados com traumatismo craniano, considerando a redução dos custos e a viabilidade técnica da Estampagem Incremental (EI) para a fabricação de próteses internas (implantes cranianos) em chapa de titânio. Redução do tempo de cirurgia e a eficácia estético-funcional dos implantes.

A inovação desta pesquisa está relacionada com o desenvolvimento de subsídios para viabilizar através da estampagem incremental a fabricação de próteses cranianas nacionais, visando melhorar a tecnicidade da indústria nacional. A contribuição social deste estudo é outro fator que prioriza o bem estar da população através da correção de um problema estético e funcional no crânio do indivíduo causado por traumas ou lesões interpessoais.

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 também sobre materiais biocompatíveis para implantes, descrição do processo de deformação plástica dos materiais para estampagem e caracterização do material; b) Modelagem, onde imagens DICOM referentes às seções longitudinais do crânio defeituoso do paciente são obtidas via tomografia computadorizada e modeladas em softwares específicos, transformando esta imagem em modelo CAD; c) Manufatura da prótese, onde são desenvolvidas todas as técnicas referente a fabricação da prótese por estampagem incremental; d) Usinagem do modelo do crânio defeituoso, para realizar o teste de conformidade geométrica da prótese; e) avaliação dos resultados, foi feita a análise estética e funcional, morfologia superficial, análise química, resistência mecânica e avaliação na espessura da chapa de titânio após a estampagem. Também foi realizado estudos na prótese relacionados com a contaminação do implante pelo processo de fabricação, análise da rugosidade, conformidade geométrica entre modelo CAD e produto final, Lubrificação eficiente e livre de contaminação e análise da estampabilidade do titânio.

Cronograma das etapas do trabalho:



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A estampagem incremental é um processo de fabricação recente e está em permanente desenvolvimento, neste capítulo foram abordados estudos e suas pesquisas. Inclui também uma relação dos conteúdos que estão sendo estudados em relação ao tema.

### 2.1 Estampagem Incremental

A ideia de deformar plasticamente chapa por sucessivos incrementos com uma única ferramenta, com movimento nos três eixos cartesianos, foi patenteada por [20]. Com o avanço da tecnologia de fabricação, a implementação deste processo foi possível, tornando a sua aplicação atrativa, pelo fato de poder ser adaptado a uma máquina de comando numérico. Este novo método de deformação plástica dá a possibilidade de criar um produto com uma determinada configuração sem a utilização de punção e matriz, com geometrias complexas [21].

A estampagem incremental é um inovador e acessível processo de estampagem de chapa de metal no qual um *blank* é deformado por um punção de tamanho pequeno comandado por CNC. Devido ao fato que a estampagem pode ser realizada com matriz bastante simplificada ou mesmo sem matriz, o processo parece ser muito interessante para pequenos volumes de produção e prototipagem rápida de componentes de chapa [18].

Estampagem Incremental de Chapas (ISF) é um termo que descreve uma série de métodos de estampagem de chapas de metal. Em comum estes métodos tem uma capacidade de formar geometrias assimétricas com simples ou até ausência de matriz e a baixo custo. ISF não requer ferramentas caras para produzir peças complexas de chapas metálicas e o equipamento de estampagem é adequado para uma grande quantidade de produtos sem grandes trocas ou grandes investimentos [22].

Diversos grupos de pesquisadores têm feito pesquisa na área de Estampagem Incremental. A maior parte destas pesquisas é relatada para máquinas comerciais de ISF ou estampagem ISF utilizando fresadoras NC ou similar [22].

As variações de ISF podem ser divididas dentro de duas categorias principais: estampagem de superfícies convexas ou superfícies côncavas. [23] Estudaram a estampagem incremental com um torno. [24], [25], e [26], tem estudado a aplicação da tecnologia de estampagem incremental CNC para formas não simétricas formada sobre superfícies

côncavas. Neste processo o *blank* permanece estacionário e a estampagem ocorre usando controle CNC da ferramenta [17].

A estampagem de superfície convexa foi a primeira variação da ISF. Conhecida como Estampagem NC sem Matriz (*Dieless NC Process Forming*), foi introduzida no Japão por [27] em 1993, como um método para prototipagem e fabricação de produtos a partir de chapas de metal para pequenas séries. O método foi originalmente desenvolvido para as necessidades da indústria automobilística, mas agora é usada para outras indústrias também [22]. A tecnologia de estampagem incremental tem sido comercializada pela empresa japonesa Amino Corporation [18]. A estampagem incremental realiza-se num centro de usinagem CNC, robôs ou numa máquina ferramenta especificamente desenvolvida para estampagem incremental e que permita gerar as trajetórias das ferramentas que são indispensáveis à deformação plástica da chapa [28].

O princípio de funcionamento do processo de estampagem incremental é o movimento incremental de uma ferramenta de ponta semi-esférica ou esférica sobre uma chapa, seguindo uma trajetória pré-definida. Na figura 2-1 estão representados os elementos básicos do processo: a chapa a deformar plasticamente; suporte de fixação (placa de aperto inferior e aperto superior), e a ferramenta de ponta semi-esférica [30] *apud* [29].

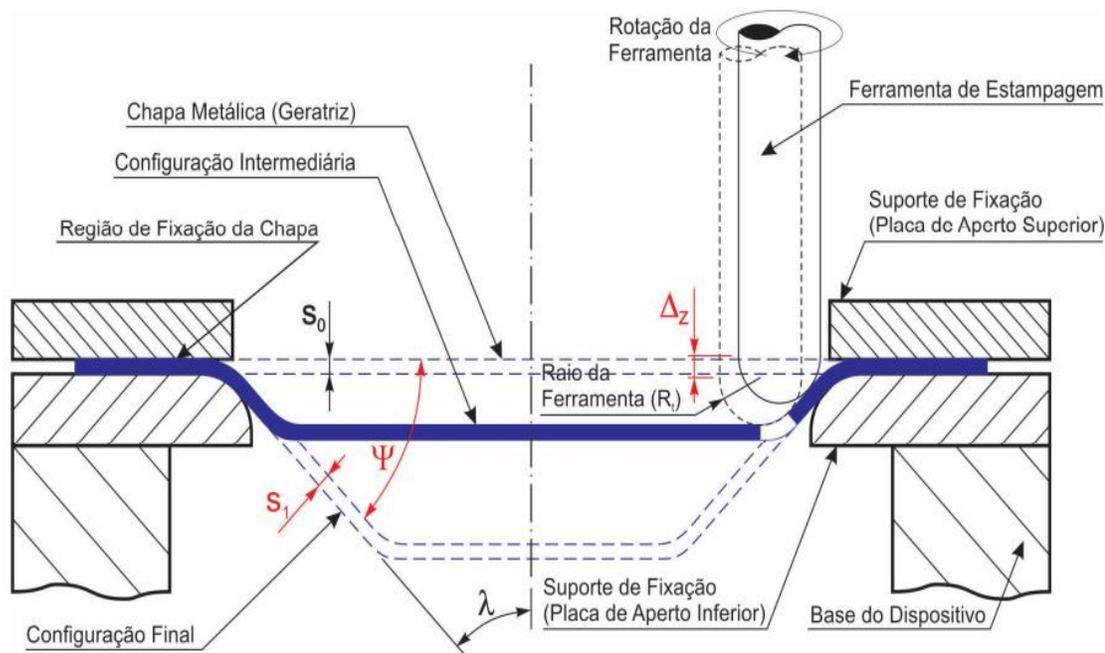


Figura 2-1: Representação esquemática do processo de estampagem incremental [30].

## 2.2 Modalidades da Estampagem Incremental

A estampagem incremental como toda tecnologia recente, sofre ao longo dos anos muitas mudanças, causadas por um avanço tecnológico desenfreado. Este avanço tecnológico é fruto das inúmeras pesquisas realizadas em volta do mundo.

Palavras e expressões como diferenciação, redução de custos, minimização do ciclo concepção e produção, encurtamento do ciclo de vida (mas também manufatura sustentável) permeiam as estratégias corporativas atuais [31].

Existem atualmente 04 modalidades principais de estampagem incremental, cujas características variam em função do número e configuração dos pontos de apoio. A figura 2-2 mostra desenhos esquemáticos destas modalidades [17].

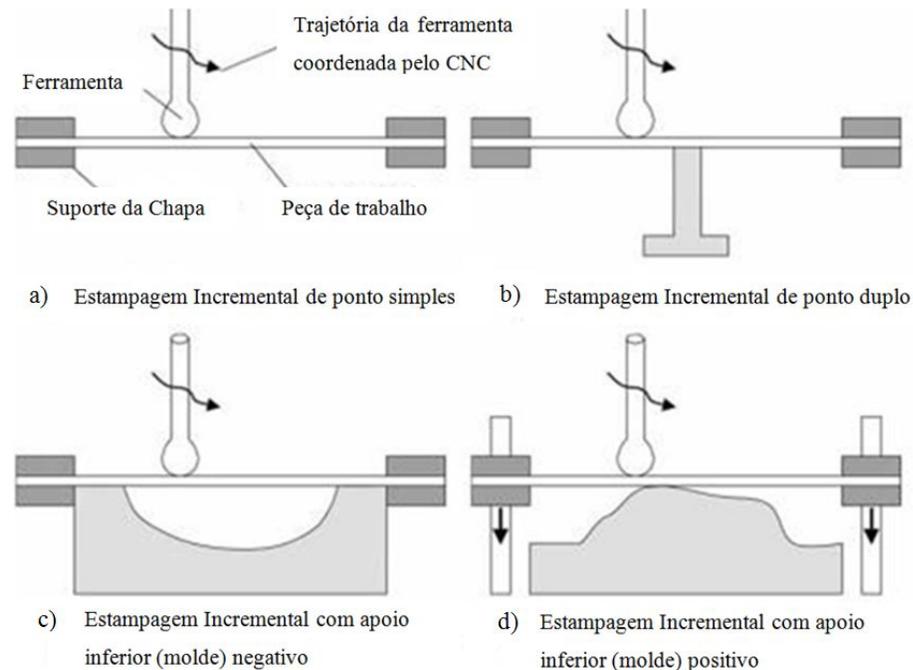


Figura 2-2: Modalidades de estampagem incremental [32].

As estampagens dividiram-se em duas famílias, dependendo do número de pontos de contatos entre a chapa, ferramenta e matriz inferior. A SPIF – sigla inglesa para ‘Estampagem incremental de ponto simples’ e TPIF – ‘Estampagem incremental de ponto duplo’. Na SPIF há uma característica não desejada de discrepâncias geométricas entre o modelo digital em CAD e a peça real. Embora existam recursos para minimizar tais discrepâncias, como multi-estágios de estampagem e utilização de algoritmos para correção das trajetórias da ferramenta, tem-se um acréscimo do tempo de manufatura da peça. Por outro lado, a TPIF oferece um

decréscimo da conformabilidade da chapa e um incremento da acuidade geométrica entre o modelo teórico e o real, em apenas um estágio [33].

Na figura 2-3a é mostrado a SPIF - *Single Point Incremental Forming*; a 2-3b mostra a TPIF - *Two Points Incremental Forming*, com suporte (matriz) genérico; a 2-3c apresenta a modalidade TPIF com matriz específica [34], [63].

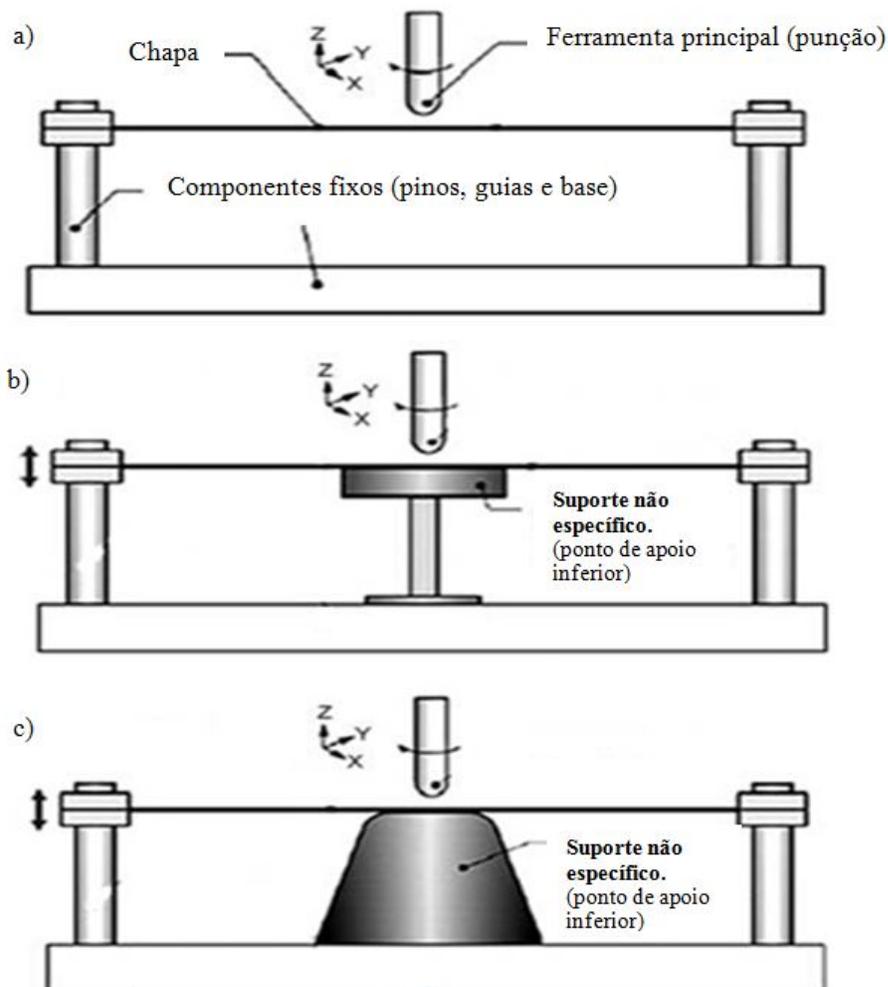


Figura 2-3: Modalidades da ISF [34].

Um processo particular de TPIF denominado AISF - *asymetric incremental sheet forming* – Estampagem incremental assimétrica – é possível obter uma boa conformidade geométrica entre modelo teórico e real, para perfis complexos e assimétricos, caracterizados por superfícies orgânicas côncavas e convexas. Sendo assim, a TPIF se torna a modalidade ideal para a produção de perfis complexos e protótipos [33]. A figura 2-4 ilustra a AISF e este modelo caracteriza a estampagem incremental negativa.

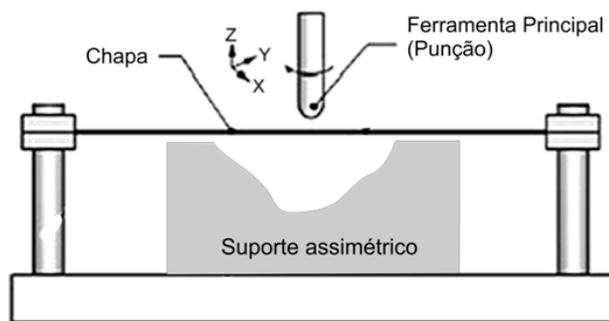


Figura 2-4: AISF, com suporte inferior negativo [35].

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, é positivo, conforme figura 2-5, [17].

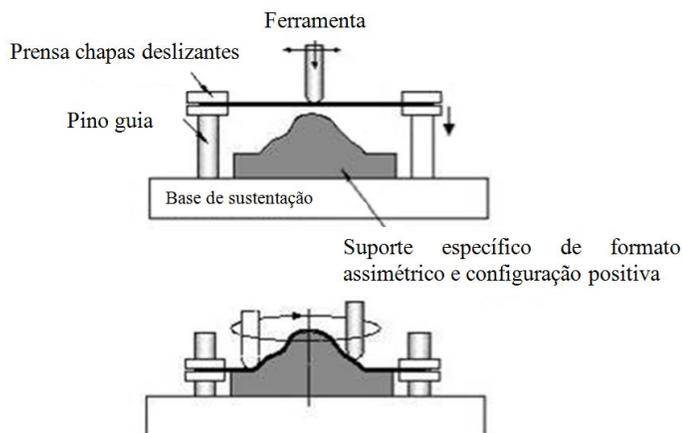


Figura 2-5: TPIF com suporte assimétrico de configuração positiva [17].

A estampagem incremental de um único ponto, (SPIF) é um novo processo de estampagem que alcança maior flexibilidade no processo e reduz as forças em comparação com o processo convencional de estampagem em operações devido à sua característica de deformação localizada. Nos últimos anos, um novo processo SPIF associado ao calor de atrito localizado é desenvolvido para melhorar ainda mais a estampagem do material [36].

### 2.3 Trajetória da Ferramenta na Estampagem

Como ilustrado na figura 2-6 (a), a ferramenta segue uma trajetória a partir do diâmetro externo do cone, perto da prensa - chapas, para o diâmetro interno com incrementos

graduais na direção Z. Alternativamente, uma trajetória helicoidal pode ser utilizada como uma trajetória da ferramenta tridimensional e contínua, figura 2-6 (b).



Figura 2-6: (a) Trajetória com incrementos graduais em Z; (b) Trajetória helicoidal [37].

No processo de estampagem incremental a variação de espessura da parede da chapa pode ser determinada através da relação da lei dos senos (eq 2.1), sendo  $t_0$  a espessura inicial da chapa,  $t_f$  a espessura final da chapa,  $\lambda$  o ângulo do semi-cone e  $\psi$  o ângulo de estampa  $\frac{\pi}{2}$  que é dado por  $\Psi = -\lambda$  que é o ângulo entre a parede inclinada e a configuração inicial da chapa (ver Figura 2.1).

$$t = t_0 \sin \lambda \quad (2.1)$$

O trabalho realizado por [38] e [39] mostra que o processo de estampagem incremental nem sempre segue a lei dos senos devido à rotação da ferramenta levando a uma espessura final inferior à prevista, para a liga de alumínio AA 3003-0 [28].

### 2.3.1 Ferramentas para estampagem incremental

No processo SPIF, uma ferramenta de ponta esférica se move ao longo de um caminho predefinido pelo programa CNC para estampar a peça nas formas desejadas. Devido à sua capacidade única de deformação local da chapa de metal, a condição de atrito entre a ferramenta e a chapa desempenha um papel significativo na deformação do material. Os efeitos da fricção no acabamento da superfície formando cargas significativas, deformação do material e estampagem são estudados usando uma esfera rolante oblíqua, ferramenta recém desenvolvida, [40].

A ferramenta usada para estampagem incremental, estudada por [40] tem o objetivo de melhorar o acabamento superficial, onde foram feitos testes em três tipos de ferramentas diferentes, conforme mostrado na figura 2-7.

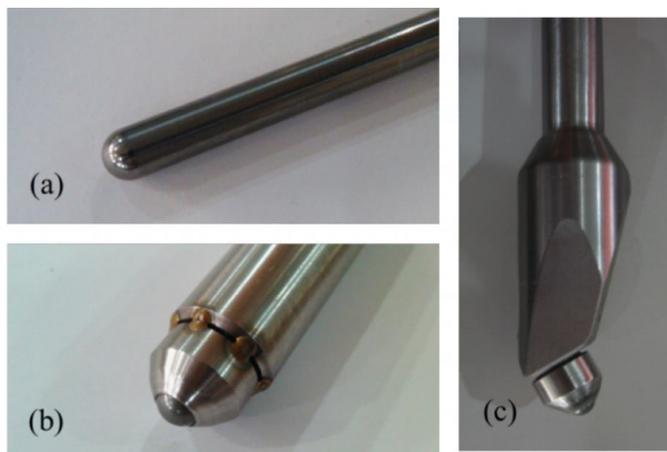


Figura 2-7: Diferentes tipos de ferramentas. (a) ferramenta rígida, (b) ferramenta VRB, e (c) ferramenta ORB [40].

A ferramenta figura 2-7 (a) é uma ferramenta tradicional usada em estampagem incremental, figura 2-7 (b) é uma ferramenta VRB (ferramenta vertical rolante) desenvolvida para teste e figura 2-7 (c) ferramenta ORB (Obliqua com esfera rolante) também desenvolvida para testes [40].

Durante os testes realizados a ferramenta VRB não obteve bom desempenho em estampagens influenciado pelo ângulo de inclinação de parede, figura 2-8. Em função deste problema o mesmo autor desenvolve a ferramenta ORB, que em função da inclinação oblíqua da esfera obtém bom resultado, melhorando o acabamento superficial [40].

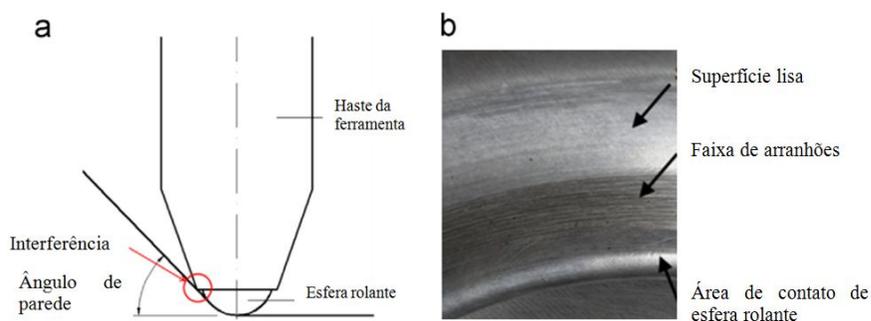


Figura 2-8: Ferramenta VRB e sua deficiência. (a) Geometria de ferramenta VRB e (b) arranhões superficiais provocados pela ferramenta VRB [40].

A figura 2-9 mostra a ferramenta ORB (obliqua com esfera rolante) com os detalhes de projeto, montagem e funcionamento.

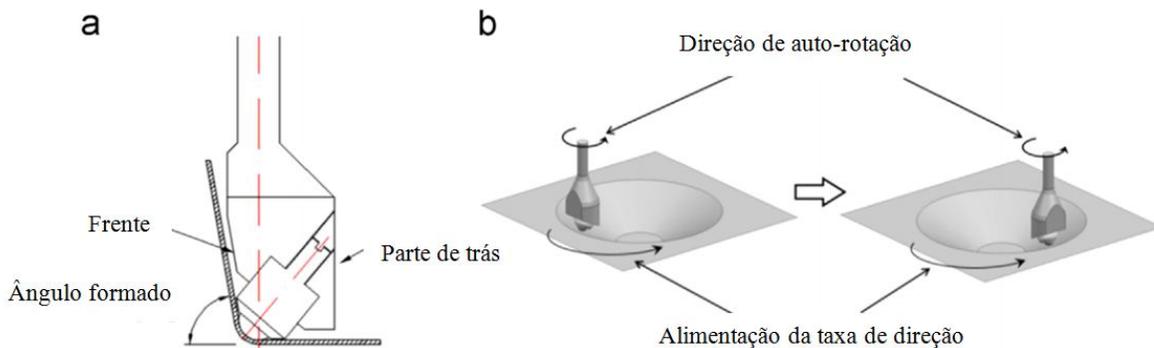


Figura 2-9: O princípio de funcionamento da ferramenta. (a) ângulo máximo de parede obtido pela ferramenta ORB, (b) estampagem incremental SPIF com ferramenta ORB [40].

As ferramentas utilizadas na estampagem incremental são peças fundamentais para o processo e elas são na maioria das vezes as determinantes de um bom acabamento das superfícies estampadas.

A utilização de ferramenta com diâmetro de 10mm proporciona boa homogeneidade na espessura e suporta os esforços, sem a ocorrência de fraturas [17].

## 2.4 Aplicações da Estampagem Incremental

Segundo [17], o processo de estampagem incremental foi descrito e patentado por Leszak e Roux [20], quando a tecnologia CNC ainda era incipiente. A partir dos anos 1990, foi amplamente pesquisada e desenvolvida [14], [41] e [42]. Algumas aplicações de sucesso incluem [43].

- Peças-protótipos em geral, para verificações de projeto ou produção de pequenos lotes;
- Peças automotivas (pára-lama, 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 destas, importantes aplicações a estampagem incremental também é usada na área médica, onde são produzidas próteses, órteses e implantes, tais como suportes de tornozelo, suportes de bacia e implantes cranianos [17]. A figura 2-10 a, [44], mostra um exemplo desta aplicação [17]. Outros exemplos do processo de estampagem incremental podem ainda serem vistos na figura 2-10 b e figura 2-10 c [39].

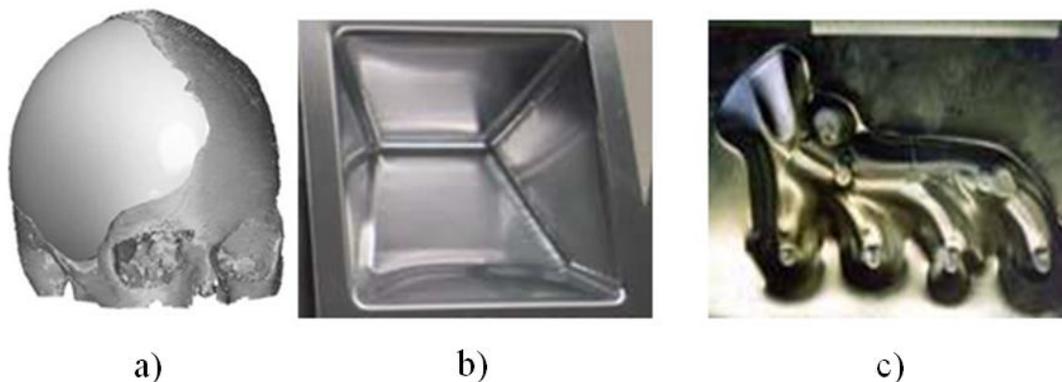


Figura 2-10: Aplicações da estampagem incremental: a) Implante craniano, b) Forno solar e c) Protótipo de coletor de admissão [17].

## 2.5 Máquinas Para a Estampagem Incremental

As máquinas normalmente utilizadas para estampagem incremental são: centros de usinagem e fresadoras CNC, máquinas dedicadas e robôs industriais. A escolha deve-se a: disponibilidade, tamanho da peça, forma construtiva da máquina, capacidade do comando da máquina, aplicação da peça após a estampagem.

### 2.5.1 Centro de Usinagem e Fresadoras CNC

É comum em ISF o uso de máquinas-ferramentas com comando CNC. Estas máquinas dividem-se em fresadoras e centros de usinagem (fresadoras com estoque e troca automática de ferramentas). Em estampagem incremental estas máquinas normalmente possuem conectadas a elas, cabos que transmitem programas elaborados por softwares CAD/CAM. A razão do modelamento da superfície da peça via um software de CAD é devido a complexidade de um desenho em 3 dimensões [45].

Nas pesquisas desenvolvidas por [16], [17] e [45] foi utilizado um centro de usinagem Discovery modelo 4022, conforme figura 2-11. Esta máquina CNC possui uma rotação máxima de 6000 RPM, o comprimento máximo em X de 500mm, Y de 400mm e Z de 550mm. O comando NC da Máquina é Mach 9 de fabricação da indústria Romi® S.A. Os mesmos pesquisadores utilizaram um dispositivo prensa chapas desenvolvido para a fixação da chapa para a estampagem incremental.



Figura 2-11: Centro de usinagem discovery modelo 4022, ROMI com comando MACH9 [16].

### 2.5.2 Estampagem Incremental Com Robôs

Segundo Lamminen, em seu estudo, a estampagem incremental com robôs, consiste de um robô industrial com braço figura 2-12 e a capacidade de manipulação do robô é de 175 kg, o alcance de 2,55 m. A chapa é fixado ao suporte, o qual se move verticalmente ao longo de quatro guias a cada canto da mesa. O movimento vertical do suporte é causado somente pela gravidade e não controlado por nenhum dispositivo. O suporte move-se para baixo como procede a estampagem e impulsionada pelo braço do robô no decorrer do processo [22].

Os benefícios do robô comparados a estampagem com máquinas fresadoras ou máquinas ISF são notáveis. O robô trás flexibilidade ao processo de fabricação e possibilita a combinação de várias fases da fabricação dentro da cadeia da mesma célula de fabricação. A chapa é apanhada e posicionada, o corte com laser e os tratamentos de superfície podem ser integrados na mesma célula de fabricação operado por um único robô industrial [22].

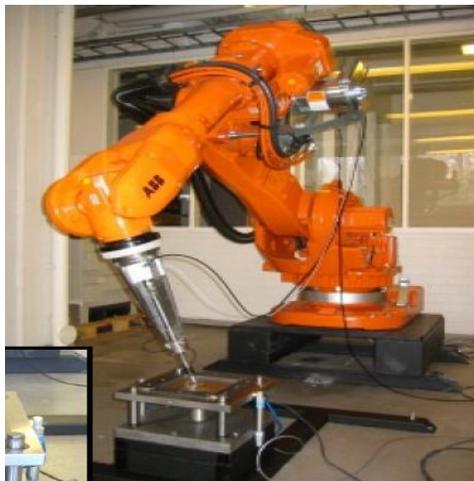


Figura 2-12: Robô usado na estampagem incremental [22].

A ferramenta de estampagem figura 2-13 é fixada ao pulso do robô com um ângulo de  $90^\circ$  para obter a máxima força na ferramenta e manter os movimentos dos eixos e motores do robô na máxima faixa de trabalho deles. O teste tem foi feito usando uma ferramenta de aço semi-esférica endurecida, com diâmetro de 10 mm [22].



Figura 2-13: Ferramentas de estampagem utilizadas na robótica [22].

Uma pesquisa mais recente desenvolvida por Meier estuda a estampagem incremental com robôs [15]. Em sua pesquisa foram utilizados dois robôs para a realização dos testes práticos. Os robôs durante a estampagem trabalham de forma sincronizada movimentando os dois pontos de apoio na chapa de forma simultâneos, figura 2-14.

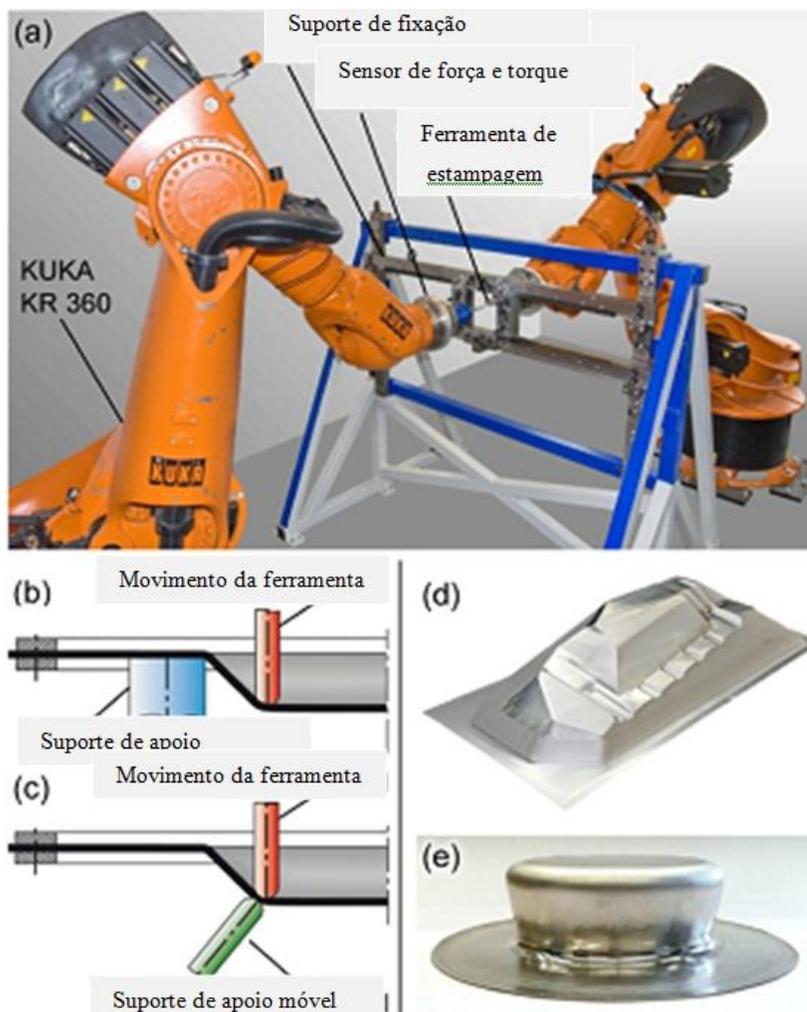


Figura 2-14: (a) Estampagem incremental robotizada, (b) Estampagem incremental com ponto de apoio fixo (DPIF-P), (c) Estampagem incremental com ponto de apoio móvel (DPIF-L), (d) Peça automotiva complexa e (e) Cilindro com sub-contração [15].

### 2.5.3 Máquinas Dedicadas Para Estampagem Incremental

Atualmente existem máquinas comerciais e máquinas protótipos (em pesquisa) e os exemplos mostrados neste trabalho são respectivamente da Amino Corporation e da Universidade de Cambridge.

Em 2004 Alwood, em seus estudos desenvolveu uma máquina dedicada a estampagem incremental. A chave do projeto de uma máquina de estampagem incremental é a predição das forças da ferramenta durante a estampagem, tabela 2-1.

Tabela 2-1: Especificação da máquina desenvolvida por Alwood [46].

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

Na figura 2-15, é mostrada a máquina de estampagem incremental dedicada, projetada e fabricada pelo Instituto para fabricação da universidade de Cambridge, segundo [46].

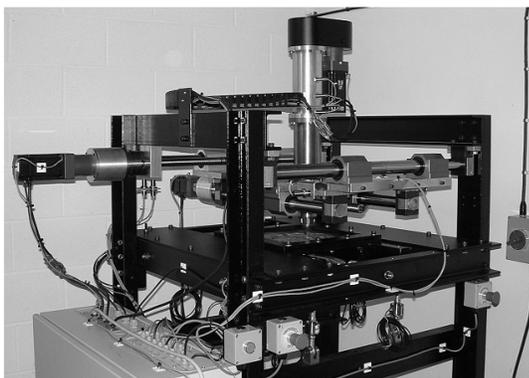


Figura 2-15: Máquina dedicada para ISF fabricada na universidade de Cambridge - Reino Unido [46].

A empresa japonesa *Amino Corporation* fabrica a máquina dedicada a tecnologia de estampagem NC sem Matriz. A figura 2-16 ilustra a máquina desenvolvida e alguns produtos obtidos.

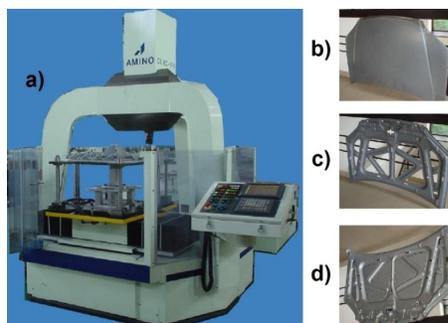


Figura 2-16: a) Máquina dedicada para ISF desenvolvida pela Amino Corporation; b) Capa externa de um capô de carro; c) Capa interna de um capô de carro; d) Montagem do capô de carro [19].

## 2.6 Órteses e Próteses

A utilização de órteses, (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), 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 restabelecer 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 [17].

As órteses, portanto, tem utilização temporária, são fixadas externamente e não substituem partes do corpo. Já as próteses, (são componentes artificiais que tem por finalidade suprir necessidades e funções de indivíduos seqüelados por amputações, traumáticas ou não). Estas 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 frequência em acidentes de trânsito [17].

Tanto em um caso como em outro, a finalidade da estampagem incremental é gerar peças que se adéquam 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 natureza emergencial do problema médico e para possibilitar sua aplicação a um maior número de pessoas [17].

A figura 2-17 retrata um implante de crânio fabricado em 0,7 mm em chapa de titânio comercialmente puro grau 2. Com o caminho de ferramenta multi-passo, foi possível formar ângulos de parede até a 61° respeitando os requisitos de espessura mínima [47].

Exemplo de prótese Craniana



Figura 2-17: Titânio do implante craniano (imagem cortesia direito de SimiCure) [47].

### 2.6.1 Traumatismos Cranianos

Os traumatismos cranianos podem ocorrer devido a tumores, infecções e principalmente por fraturas (impacto), decorrentes de acidentes automobilísticos ou atos interpessoais [17].

Os defeitos do crânio normalmente surgem devido a uma lesão traumática ou de uma cirurgia anterior durante o qual partes do crânio são removidas. Uma substituição do osso ausente por um implante craniano é necessário, neste caso, tanto a partir de um ponto de vista médico e estético. Requisitos que os implantes cranianos têm de cumprir são diversos e incluem aspectos biológicos, físicos e mecânicos. Neste momento, os implantes feitos de plásticos, cerâmicas e metais são utilizados. Entre esses materiais, o titânio se destaca, pois oferece uma taxa de infecção pós-operatória baixa e permite a fabricação de pré-operatório, o que garante boa precisão e resultados em curto tempo de cirurgia [48].

Quando a área atingida supera 100cm<sup>2</sup>, se torna necessária a utilização de implantes, pois a camada óssea perde a capacidade de regeneração e reintegração óssea, conforme figura 2-18. A maior parte dos implantes (91.2%) estão localizados nas regiões neurocranial e temporal, correspondentes às áreas 'G' e 'F' da figura 2-18 [4]. A figura 2-19 mostra um caso real mostrado por [17] em seus estudos, onde o paciente perde uma grande parte de massa óssea craniana.

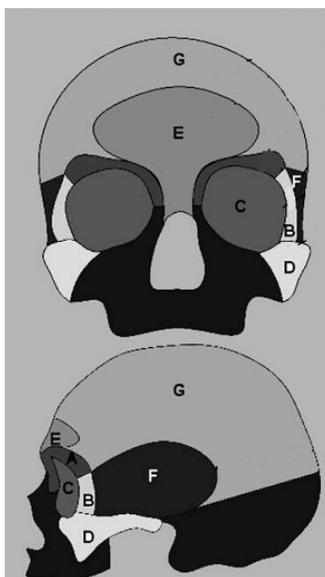


Figura 2-18: Divisão anatômica das partes constituintes da caixa craniana [4], [17].

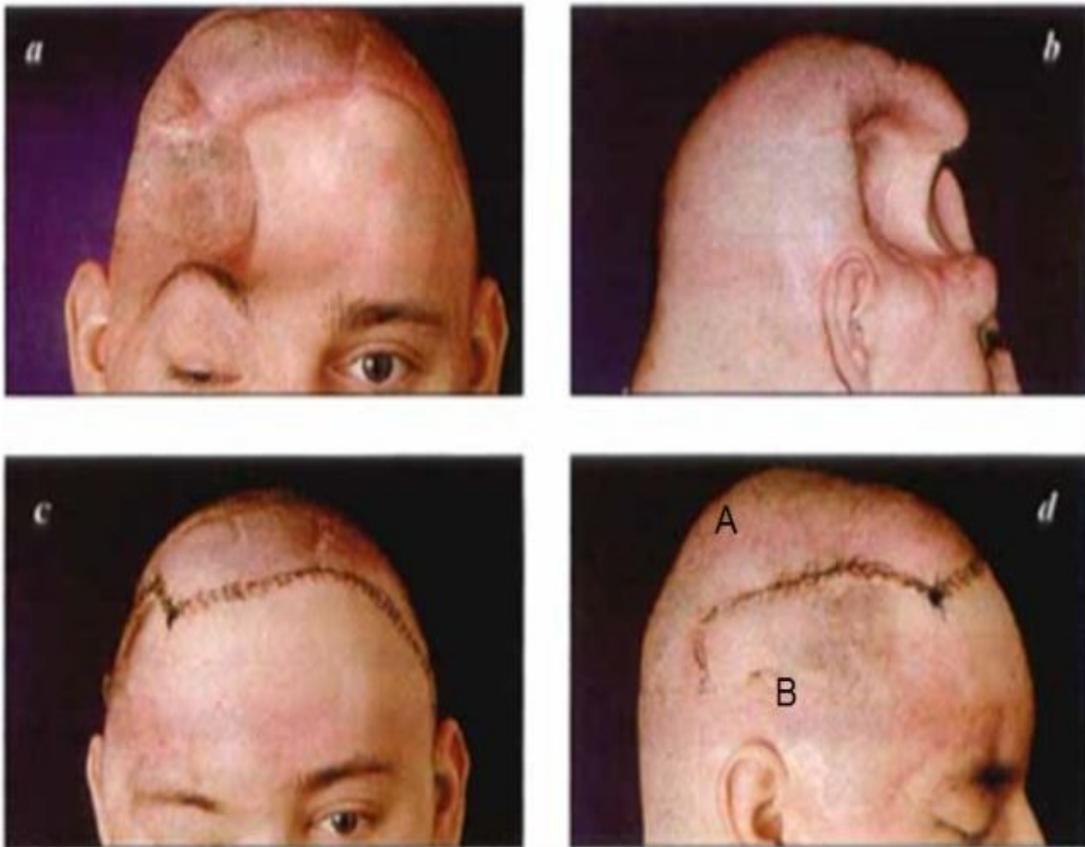


Figura 2-19: Traumatismo craniano severo. A grande perda de área óssea impede a regeneração e reintegração natural, exigindo o implante [17].

### 2.6.2 Prótese Fabricadas em Chapas de Titânio

Göttmann, estuda em seu trabalho o modelo CAD dos implantes produzidos que foi derivado a partir de um modelo de crânio stereolitografado de um paciente. O modelo de crânio foi digitalizado usando o software system ATOS (medição ótica). A geometria CAD gerada por um processo de engenharia reversa e usado para a fabricação de um molde de aço macio. O apoio inferior foi gerada a partir de um cilindro sólido com o diâmetro de 140 mm. A geometria do implante, também as operações de estampagem e o processos de corte foram programados com base no modelo CAD. A Figura 2-20 mostra o processo de desenvolvimento do implante feito de maneira gradual. A cadeia de produção de implantes cranianos inclui uma combinação de estampagem incremental, tratamento térmico e operação de corte final [48].

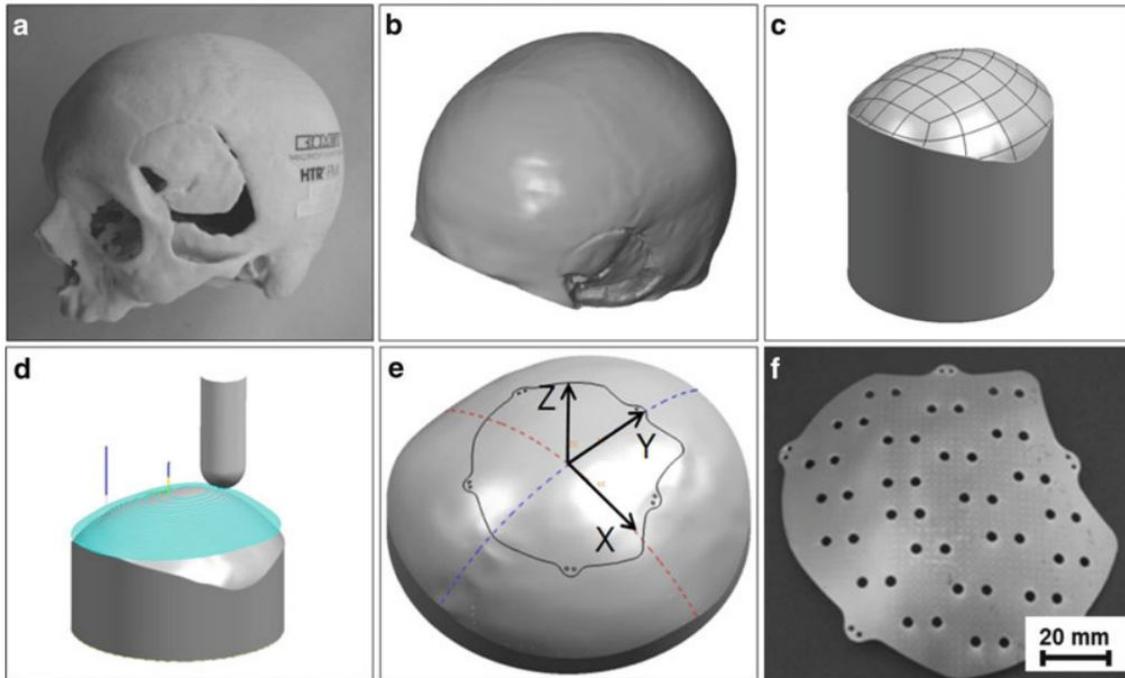


Figura 2-20: (a) Modelo stereolitografico do crânio. (b) Modelo digital do crânio. (c) Geometria do apoio inferior utilizado para TPIF. (d) A programação do caminho da ferramenta. (e) Área da chapa coberto pelo implante. (f) Implante craniano produzido [48].

## 2.7 Chapas de Titânio Puro – Ti cp grau 2

A utilização de implantes metálicos como os usados em artroplastia de quadril e de joelho, em osteossíntese de fraturas ou em implantodontia são por muitas vezes a última opção de tratamento e possibilitam significativa reparação das funções. A correta seleção de materiais para a fabricação desses dispositivos, que têm função estrutural, é de fundamental importância para o sucesso do tratamento [49].

O titânio e suas ligas têm sido largamente utilizados na fabricação de próteses crânio-maxilo-faciais, implantes dentários, dispositivos cardiovasculares (caixas e desfibriladores de marca-passo), instrumentos cirúrgicos e dispositivos especiais devido às suas 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 [9] *apud* [17].

### 2.7.1 Micrografia

Segundo [17], em seus experimentos, onde as amostras foram retiradas de uma região da chapa plana (não estampada), na espessura da chapa, figura 2-21. Nota-se um predomínio de uma estrutura isotrópica, 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 à deformação.

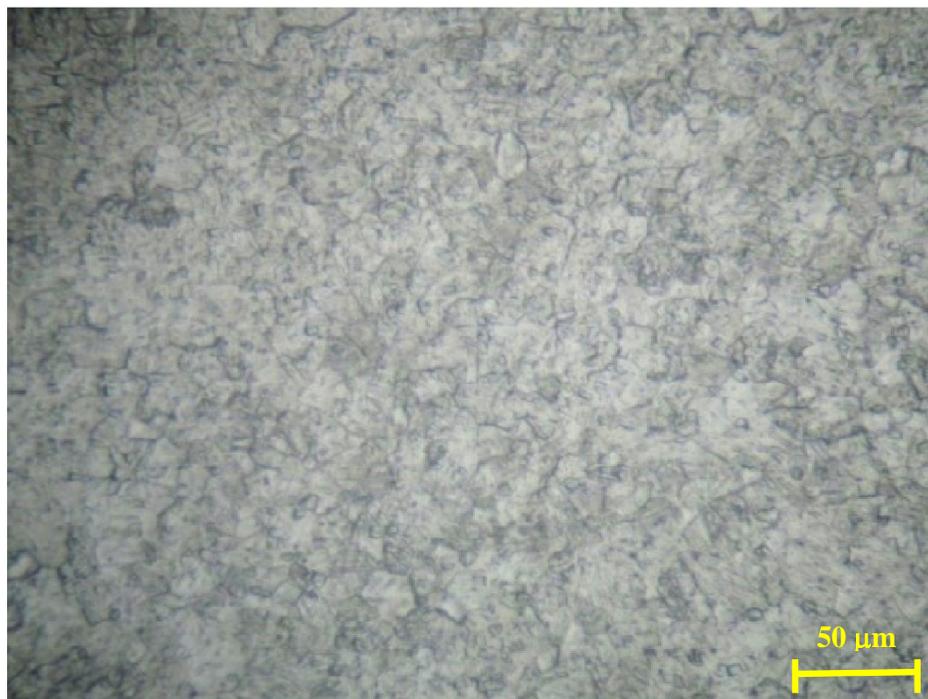


Figura 2-21: Microscopia ótica do Ti-CP F67 G2. Aumento de 200x [17].

Para [50], 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, neste caso, além de permitir a produção de peças únicas, também será utilizada para aumentar a sua conformabilidade, se adequando a geometrias complexas de conformação, tais como aplicações ortopédicas e implantes cranianos [51], [52], [17].

A análise da microestrutura feita na condição em que as chapas são fornecidas, segundo [53], figura 2-22: O titânio puro grau 2 apresenta grãos recristalizados de uma fase primária e fase b transformada contendo expressivo contorno de grão, enquanto a estrutura TiAl4V consiste em grãos alongados de uma fase (clara) e da fase b intergranular (cinzento) [53].

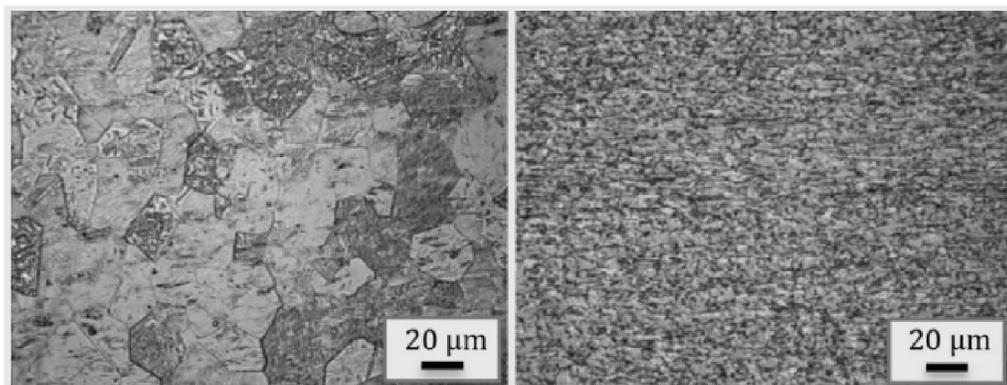


Figura 2-22: Microestrutura do titânio grau 2 (esquerda) e Ti6Al4V (direita) no estado em que as chapas são entregues [53].

### 2.7.2 Curva Tensão - Deformação de Engenharia da Chapa de Titânio

De acordo com Moosruggger, figura 2-23, a tensão máxima ( $\sigma_{\max}$ ) do Titânio (CP) é de 520 MPa (sentido longitudinal de laminação) e 540 MPa (sentido transversal de laminação) [13].

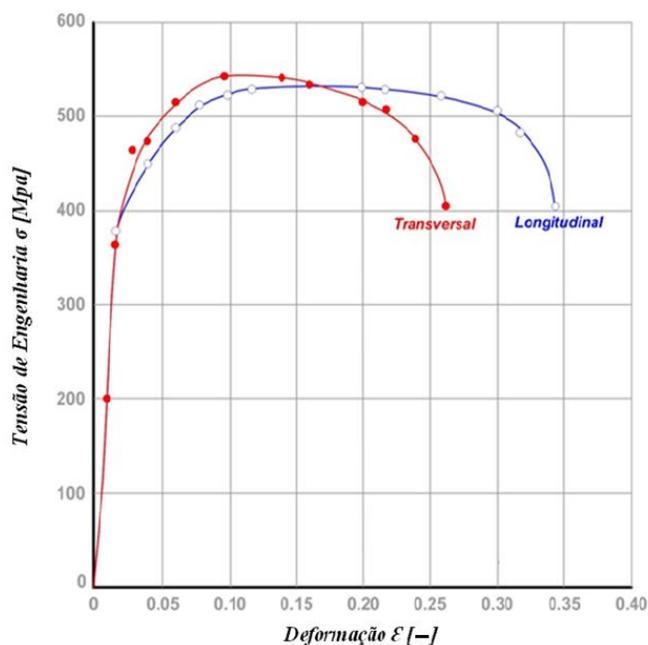


Figura 2-23: Curva tensão-deformação do titânio comercialmente puro (Ti-CP) grau 2 [13].

Castelan, em seu estudo obteve a curva tensão x deformação correspondente ao titânio comercialmente puro (CP). A tensão máxima obtida para os corpos de prova retirados a  $0^\circ$  em relação ao sentido de laminação foi de aproximadamente 460 MPa, conforme figura 2-24, [17].

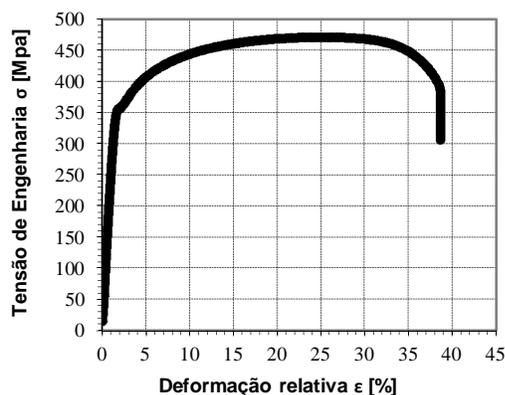


Figura 2-24: Curva convencional  $\sigma\epsilon$  do Ti-CP grau 2 a  $0^\circ$  [17].

### 2.7.3 Curva de Escoamento do Titânio

Moosrigger, apresenta a curva de escoamento do Titânio CP, figura 2-25. Para obter a curva, foi realizado o ensaio de tração com velocidade de 6 mm/min sobre uma chapa de 0.81mm de espessura [13].

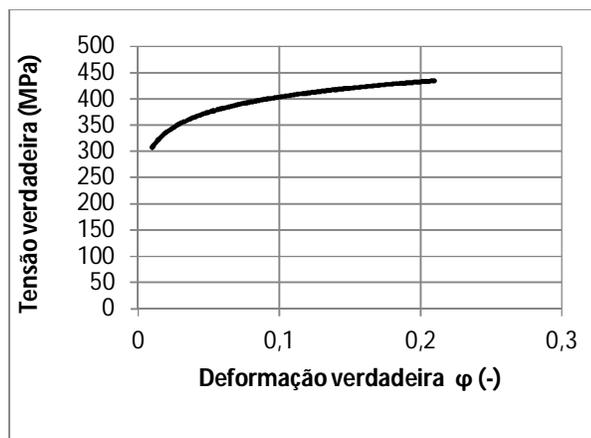


Figura 2-25: Curva de escoamento do Titânio CP [13].

Convertendo para uma curva em escala logarítmica, figura 2-26, pode-se obter o ângulo de inclinação da reta ( $\alpha$ ), que define o índice de encruamento  $n$  através da equação:

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

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

$$n = 0,21$$

O índice de encruamento representa o endurecimento de um material devido a alterações em sua rede cristalina originadas a partir da zona plástica de deformação [17].

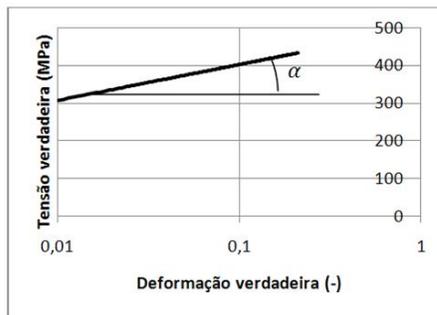


Figura 2-26: Curva de escoamento do Titânio CP em escala logarítmica [17].

#### 2.7.4 Índice de Anisotropia

Na laminação a frio de chapas, ocorre um fenômeno de alongamento dos grãos na direção da laminação, tornando o material anisotrópico e variando suas propriedades mecânicas. O índice de anisotropia pode ser determinado através do ensaio de tração e representa a razão entre as deformações principais na direção da largura do corpo de prova e a deformação na espessura [54].

A anisotropia aparece por causa da orientação preferencial dos grãos após uma grande deformação por trabalho mecânico (anisotropia cristalográfica) ou devido ao alinhamento de inclusões, vazios segregados ou alinhamento de uma segunda fase precipitada por causa também de trabalho mecânico [55].

O índice de anisotropia  $r$  é definido por:

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \quad (2-3)$$

Verifica-se que  $r$  é um valor adimensional. Como o erro para medida da deformação na direção da espessura ( $\varphi_s$ ) pode ser grande, quando se realiza o ensaios em chapas, é recomendado o uso da lei de constância de volume, substituindo a deformação na espessura ( $\varphi_s$ ) por  $(\varphi_b + \varphi_l)$  [54]:

$$r = \frac{\varphi_b}{-(\varphi_b + \varphi_l)} \quad (2-4)$$

Substituindo:

$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{-(\ln \frac{b}{b_0} + \ln \frac{l}{l_0})} \quad (2-5)$$

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.

### 2.7.5 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 2-2.

Tabela 2-2: Propriedades físico-químicas do titânio comercialmente puro – grau 2 [51].

<b>Propriedade</b>	<i>Valor</i>
Densidade	4,51 g/cm <sup>3</sup>
Número atômico	22
Massa atômica	47,90 <i>u</i>
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/ $\Omega$ mm <sup>2</sup>
<b><i>Tensão de escoamento</i></b>	290 a 690 N/mm <sup>2</sup>

As classes de titânio ASTM-F67 e o ASTM-F136 têm aplicações específicas para a área biomédica. São fabricados com rigoroso controle de qualidade, já que se trata de componentes temporários ou permanentes a serem incorporados ao corpo humano, [51].

A tabela 2-3 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 2-3: Propriedades químicas do Ti-CP F67 G2 [56].

	<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 empresa REALUM, fornecedora da chapa de Ti-CP, enviou junto com as chapas um certificado de qualidade, onde estão descritos valores da composição química, ver tabela 2-4.

Tabela 2-4: Composição química conforme certificado de qualidade REALUM.

<i>Ti-CP</i>	<i>C</i> (%)	<i>Fe</i> (%)	<i>H</i> (%)	<i>N</i> (%)	<i>O2</i> (%)	<i>Ti</i>
ASTM F-67 GRAU 2	0,01	0,10	0,0019	0,004	0,11	BAL.

A quantidade dos elementos residuais (carbono, oxigênio, nitrogênio e ferro) encontrados no Ti-CP aumenta a resistência mecânica e diminuem a ductilidade do material. Na figura 2-27, 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 [17].

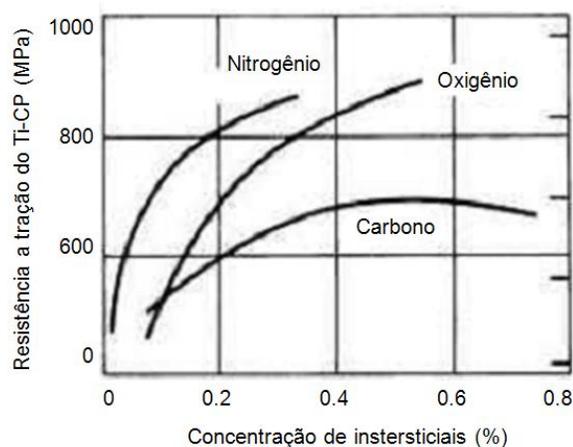


Figura 2-27: Influência dos elementos residuais do Ti-CP na resistência à tração [17].

### 2.7.6 Características Biomecânicas

Além das propriedades físicas, químicas e mecânicas diferenciadas do titânio, este metal apresenta características relacionadas especificamente com a biomecânica [44]:

- a) É resistente à corrosão e reativo, devido à rápida formação de uma camada de óxido na superfície, quando em contato com tecidos orgânicos;
- b) Densidade adequada para utilização como prótese ( $4,45 \text{ g/cm}^3$ ) – enquanto a do osso humano é  $1,35 \text{ g/cm}^3$ ;
- c) Possui módulo de elasticidade superior ao osso humano ( $E_{Ti} = 116 \text{ GPa}$ ;  $E_{osso} = 13,5\text{--}22,5 \text{ GPa}$ ).
- d) É biocompatível: sua presença no organismo não causa rejeições (inchaços e inflamações) no local do implante ou no sistema biológico (alergias);
- e) É biofuncional: cumpre tanto as funções estéticas quanto as práticas (estáticas e dinâmicas), devido à sua estabilidade dimensional;
- f) É bioinerte: praticamente não há formação do encapsulamento fibroso ao redor da prótese;
- g) É esterilizável;

O titânio é um elemento altamente reativo e, ao entrar em contato com tecido 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 [57] *apud* [58].

### 2.7.7 Propriedade Mecânica – Estrutura Cristalina

O titânio puro à temperatura ambiente possui uma estrutura hexagonal compacta denominada fase alfa ( $\alpha$ ). Nesta fase, o fator de empacotamento atômico é de 0,74 (74% do volume da célula é ocupado por átomos). Na temperatura de  $885^\circ\text{C}$  a estrutura transforma-se em cúbica de corpo centrado (CCC) denominada fase 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, ver figura 2-28 [58].

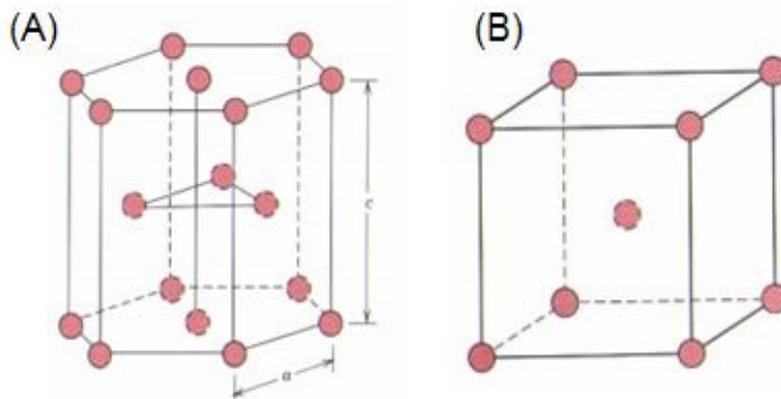


Figura 2-28: Estrutura cristalina do titânio: a) Hexagonal compacta na temperatura ambiente; b) Cúbica de corpo centrado na temperatura de transformação alfa-beta [17].

## 2.8 Propriedades Mecânicas Associadas a Biocompatibilidade Superficial

Em virtude de propriedades como excelente biocompatibilidade, alta resistência à corrosão e baixo peso específico o titânio tem se tornando um material de grande interesse para a medicina e odontologia. Com isso, torna-se importante o estudo de suas características biomecânicas.

### 2.8.1 Molhabilidade

Com relação aos materiais biomédicos, uma importante característica associada à superfície do material é a ósseo-integração. A ósseo-integração de implantes é afetada pela rugosidade e molhabilidade da superfície.

A molhabilidade é uma característica física da superfície de materiais biocompatíveis que amplia a aposição (fixação) óssea e que promovem a adesão, crescimento e proliferação de células sobre a superfície do implante, tornando-o mais estável e aderido aos tecidos orgânicos. É uma técnica que envolve a medida do ângulo formado na interface líquido-ar-superfície; sendo em específico o ângulo formado entre um plano tangente a uma gota do líquido e um plano contendo a superfície onde o líquido se encontra depositado, conforme figura 2-29.



Figura 2-29: Definição do ângulo de molhabilidade (Adaptado de [59])

Definição de ângulo de contato  $\theta$  entre uma gota líquida e uma superfície plana e horizontal.  $\gamma_S$  e  $\gamma_{LV}$  são a energia de superfície do sólido e a tensão superficial do líquido em equilíbrio com o vapor;  $\gamma_{SL}$  é a energia da interface sólido-líquido [59].

A molhabilidade é um parâmetro que indica o quanto um líquido pode se espalhar sobre uma superfície. Quando uma gota líquida é depositada sobre uma superfície horizontal a molhabilidade estará ligada ao comportamento do ângulo de contato entre a linha tangente à superfície do líquido e esta superfície horizontal. Quando este ângulo de contato estiver acima de  $90^\circ$ , a superfície não molha, ou seja, é considerada hidrofóbica; se o ângulo estiver abaixo de  $90^\circ$ , a superfície molha e será chamada de hidrofílica. Logo, quanto menor o ângulo formado entre a gota e o substrato, mais hidrofílica será a superfície [60].

Uma única superfície pode se comportar de maneira diversa quando em contato com diferentes líquidos; assim para um mesmo fluido pode este apresentar também um comportamento distinto ao estar em contato com diferentes superfícies [60].

Abaixo está representada a figura 2-30, mostrando a diferença em termos de uma superfície hidrofóbica e hidrofílica.

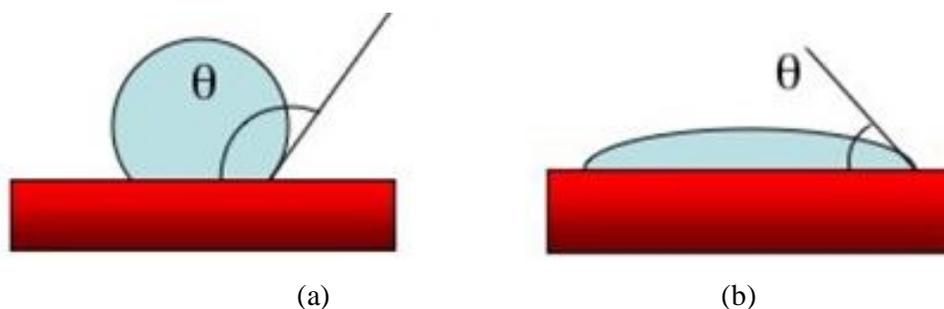


Figura 2-30: Representação do ângulo formado entre a gota e a superfície: (a) Superfície hidrofóbica (b) Superfície hidrofílica (Adaptado de [61]).

Energia de superfície, composição, rugosidade, e topografia, todos influenciam as respostas biológicas dos implantes, tal como a adsorção de proteínas e adesão celular, proliferação e diferenciação. No estudo realizado por [62], as diferentes estruturas de superfície de implantes de titânio foram construídas usando técnicas de superfície fáceis para

criar vários micros, nano-topografia e nano/micro escala composta [62]. O fluido utilizado para testar a folhabilidade foi (SBF) – Fluido corporal simulado a base de KOKUBO.

Os ângulos de contato (molhabilidade) obtidos nas amostras foram: figura 2.31 A – 82,3°, figura 2.31 B – 70,4°, figura 2.31 C – 47,7°, e figura 2.31 D – 5,92°.

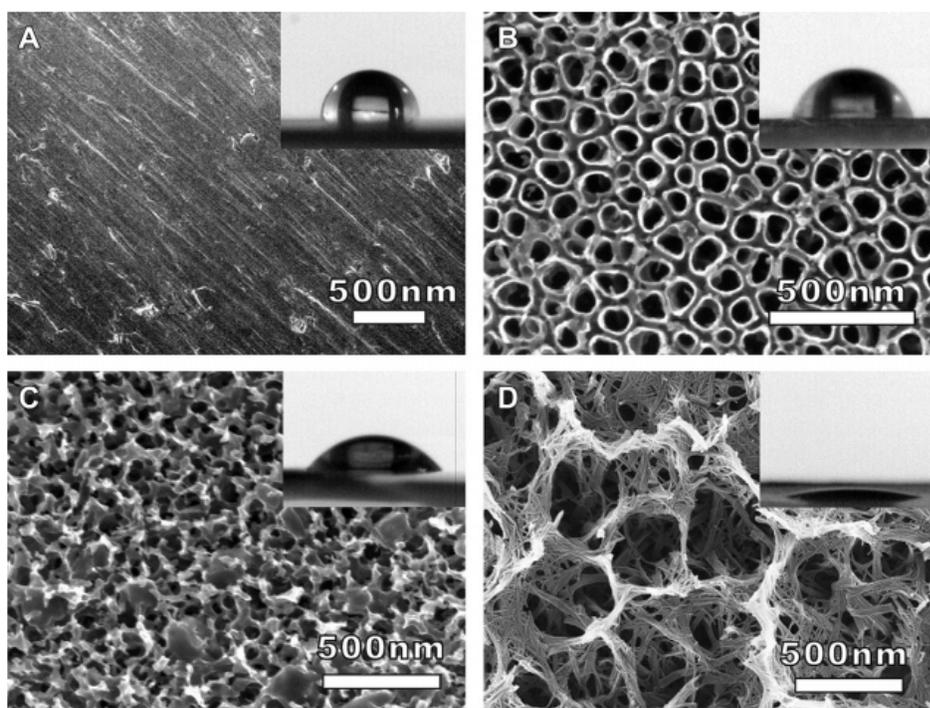


Figura 2-31: Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de amostras sob diferentes tratamentos superficiais [62].

Na figura 2-31 foram fabricados três tipos de estruturas hierárquicas de TiO<sub>2</sub> revestidos sobre os implantes de titânio, incluindo nanotubos . Na figura 2-31 A, substrato Ti em branco e ângulo de contato correspondente, no detalhe. 2-31 B, TiO<sub>2</sub> nanotubos (anodização a 20 V), e ângulo de contato correspondente, no detalhe. 2-31 C, estrutura esponjosa como TiO<sub>2</sub> (anodização a 50 V), e correspondente ângulo de contato, no detalhe. 2-31 D Nano/micro com a estrutura de TiO<sub>2</sub> preparado por tratamento hidrotérmico alcalino, e correspondente ângulo de contato, no detalhe [62].

### 2.8.2 Rugosidade

Na fabricação de peças não é possível produzir superfícies ideais. A superfície de uma peça é, se observada ao microscópio, dotada de regiões com maior ou menor planicidade

que é definida como sendo rugosidade da peça, mesmo que estas peças, num aspecto microscópico, sejam completamente lisas [45] *apud* [63].

O parâmetro mais utilizado para medição da rugosidade, para efeito de comparação com a literatura técnica é o parâmetro  $R_z$ , conforme utilizado por [45], em sua pesquisa.

O parâmetro de rugosidade  $R_z$  atual segue a NBR 4287/2002, figura 2-32, onde a soma da altura máxima dos picos do perfil ( $Z_p$ ) e a maior das profundidades dos vales do perfil ( $Z_v$ ), no comprimento de amostragem ( $\ell_m$ ) [64].

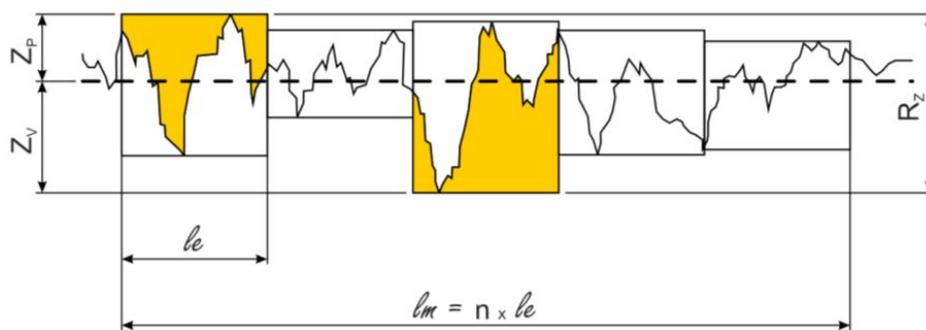


Figura 2-32: Esboço representativo do parâmetro  $R_z$ , conforme NBR4287/2002 [65].

A média da rugosidade  $R_z$  é definida como sendo a média aritmética das rugosidades singulares dos cinco trechos de medição sucessivos. Matematicamente, tem-se a definição abaixo [18] *apud* [66].

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Z_i \quad (2.3)$$

Conforme consulta ao médico e Prof. Dr. Newton Fuentefria, realizada em 19 de novembro de 2010, a rugosidade na face externa do titânio não é desejada porque, após o implante, haverá maior aderência bacteriana em sua superfície, aumentando o risco de infecções [17].

O valor da rugosidade (parâmetro  $R_z$ ) depende do material da chapa e da ferramenta, do tipo de lubrificação e dos valores de passo vertical e avanço. Para os implantes cranianos as rugosidades internas (onde houve contato com a ferramenta) e externas, são de extrema importância, considerando que o implante é posicionado entre os tecidos do corpo e a rugosidade superficial influencia ambos os lados da chapa [17].

A rugosidade micrométrica é analisada em três dimensões. A rugosidade média  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ),  $R_z$  ( $\mu\text{m}$ ), sendo a média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial,

considerando os pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média e o  $R_t$  ( $\mu\text{m}$ ) como sendo a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo [59].

Um estudo realizado *in vitro*, [67], verifica que a rugosidade superficial favorece o desenvolvimento de algumas atividades celulares, como a aderência destas à superfície do implante aloplástico. Além da aderência, há a sinterização de colágenos, formação de matrizes extracelulares e crescimento de osteoblastos. Todos estes fenômenos fazem parte da osteogênese e foram medidos de acordo com diferentes valores de rugosidade. A figura 2-33 foi gerada a partir da tabela original publicada pelos autores. Os valores da escala X (0,24 – 0,69 – 0,83 – 1,91) são os valores de  $R_a$  (rugosidade média) em  $\mu\text{m}$ ; os valores da escala Y (0 a 400) é a porcentagem de crescimento em relação ao número inicial de células [67].

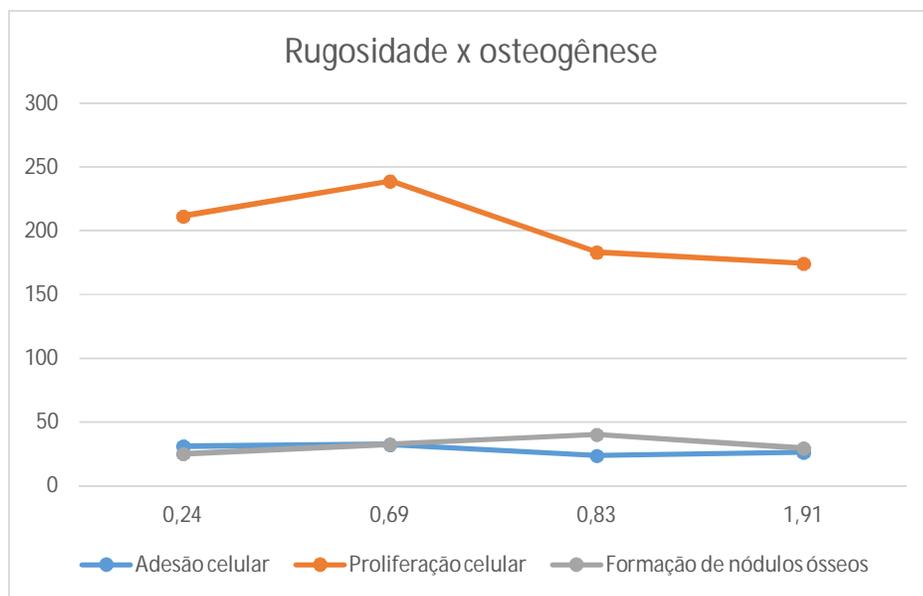


Figura 2-33: Variação da adesão e proliferação de células e formação de nódulos ósseos de acordo com a variação de rugosidade [67].

Percebe-se que a maior proliferação se deu na rugosidade de 0,69  $\mu\text{m}$ , mais que dobrando o número de células (241,44%) após 21 dias; a maior adesão celular ocorreu sobre o mesmo valor; já a maior formação de nódulos ósseos (osteoblastos) foi registrada sobre a superfície com rugosidade de 0,83  $\mu\text{m}$ . Entretanto o valor percentual de osteoblastos (32,63% para a rugosidade de 0,69  $\mu\text{m}$  e 40,36% para a rugosidade de 0,83  $\mu\text{m}$ ) apresentou um desvio padrão de 18% em ambas as medições. Assim, pode-se considerar que a rugosidade de 0,69 foi a que apresentou melhores resultados relacionados à osteogênese. [68] e [69] encontraram valores em torno de 1  $\mu\text{m}$ . [70] demonstrou em seu trabalho que a proliferação celular é maior em rugosidades de até 1  $\mu\text{m}$ .

## 2.9 Deformações na Peça Estampada

As deformações verdadeiras são os parâmetros empregados nas análises dos processos de conformação. O conhecimento das deformações que ocorrem num processo de conformação pode fornecer informações importantes, com possibilidade de reduzir etapas do processo e conhecimento sobre o limite máximo de deformações [71].

As deformações em diferentes locais de um componente estampado variam de um ponto a outro. Estas deformações localizadas podem ser analisadas através da gravação eletroquímica (grades circulares, por exemplo), como na figura 2-34. As grades devem ser gravadas sobre a chapa antes de ocorrer a estampagem (na geratriz) [45].



Figura 2-34: Exemplo de deformações que ocorrem em um componente estampado [45].

Após o processo de estampagem avaliam-se as deformações dessa grade as quais darão informações necessárias sobre a variação das deformações em regiões críticas. A figura 2-35 mostra um círculo esquemático colocado na geratriz. A elipse é a figura medida após a estampagem. A espessura da chapa tem as dimensões  $s_0$  antes da deformação e  $s_1$  após a deformação [45] *apud* [71].

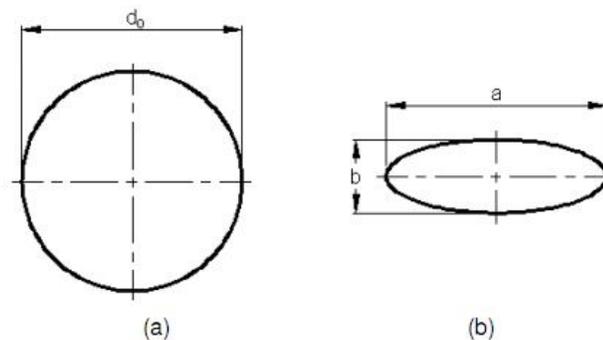


Figura 2-35: Medição prática da deformação: a - Círculo inicial, b - Elipse após a deformação [71].

As três deformações principais em uma chapa são calculadas por:

$$\varphi_1 = \ln \frac{a}{d_0} \quad (2.4)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{b}{d_0} \quad (2.5)$$

$$\varphi_3 = \ln \frac{S_1}{S_0} \quad (2.6)$$

Considerando a Lei de Constância de Volume tem-se:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (2.7)$$

Ou ainda:

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (2.8)$$

As medições na rede deformada levam a uma relação entre as deformações. Na figura 2-36 observa-se como podem ser classificadas as deformações em função das solicitações que ocorreram durante a estampagem.

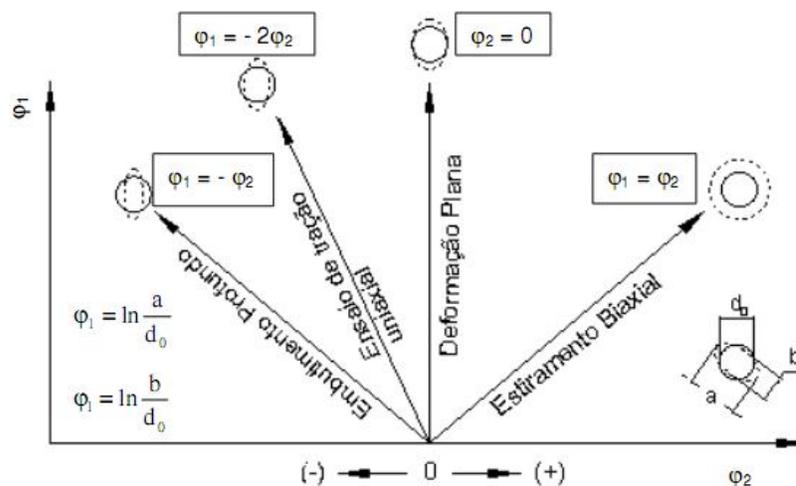


Figura 2-36: Deformação em diferentes posições em uma linha de uma peça estampada [71].

## 2.10 Curvas Limite de Conformação - CLC

A curva limite de conformação do material corresponde ao lugar geométrico dos pontos de máxima deformação de uma chapa submetida a processos de conformação por estampagem e estiramento. Esta prevê a máxima deformação que o material sofre até o instante em que ocorre ruptura, de forma que o seu conhecimento é de fundamental importância para que o processo de estampagem em escala industrial não exceda um percentual de deformação seguro e, assim, garanta a qualidade da peça final [72].

O comportamento das deformações de um componente estampado é comparado com a CLC do material em questão; escolha do lubrificante correto torna mais precisa a curva-limite de conformação. Durante a estampagem profunda de peças metálicas, a curva-limite de conformação (CLC) permite prever o nível máximo de deformações que um dado material pode atingir antes do seu rompimento [73].

Fatores como espessura, textura, atrito, entre outros, influenciam o posicionamento da CLC, podendo deslocar a curva mais para cima ou mais para baixo, isto é, aumentando ou diminuindo a estampabilidade do material [73].

A curva-limite de conformação descreve o caminho das deformações sofridas pelo material durante a estampagem, ou seja, é uma função que representa como a deformação principal  $\varphi_1$  varia com relação a deformação  $\varphi_2$  [73].

Na figura 2-37 tem-se o esboço de um diagrama-limite de conformação completo, com a CLC do material e as retas (a, b, c e d) que representam os principais esforços envolvidos na estampagem.

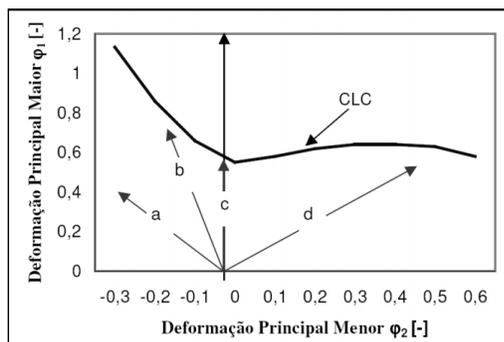
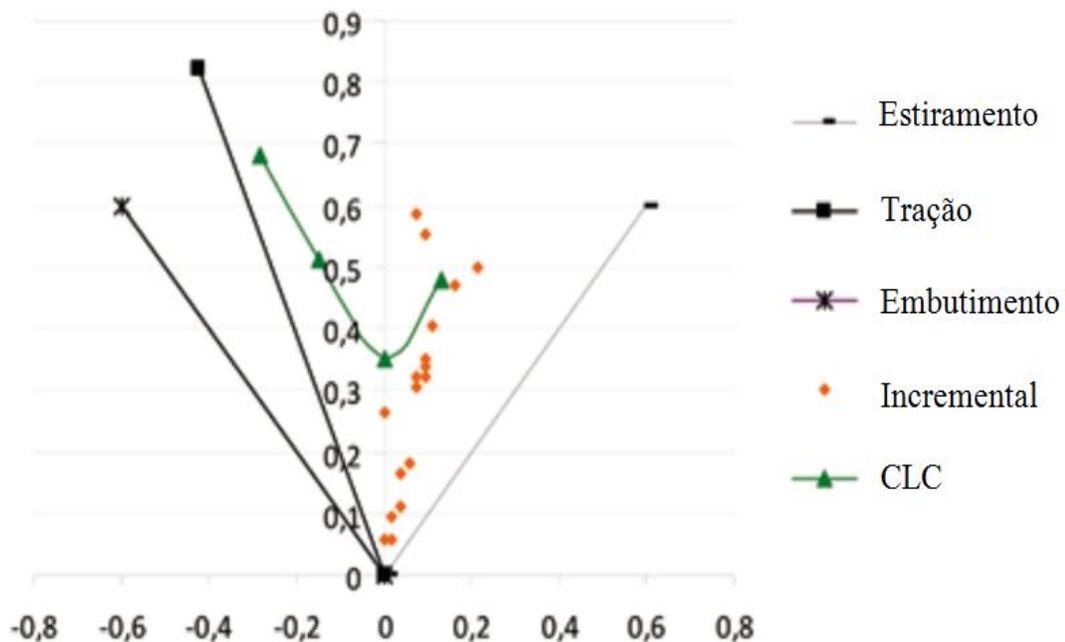


Figura 2-37: Curva-limite de conformação esquemática [ISO 12004:1997], onde (a) é o embutimento profundo ( $\varphi_1 = -\varphi_2$ ), (b) é a tração uniaxial ( $\varphi_1 = -2\varphi_2$ ), (c) é a deformação plana ( $\varphi_2 = 0$ ) e (d) é o estiramento biaxial ( $\varphi_1 = \varphi_2$ ) [73].

Admitindo-se que a curva representa os valores possíveis das combinações de deformação do corpo de prova que apontam sinais de início de ruptura, a curva pode ser interpretada como uma fronteira entre regiões de falha e segurança [74].

A CLC divide o diagrama-limite de conformação em duas zonas: zona própria para conformação: região abaixo da curva e zona imprópria para conformação: região acima da curva [73].

Segundo [75], após ter montado a curva CLC para o titânio, figura 2-38, define que para aplicações que exijam formas extremamente complexas, o processo de estampagem incremental pode ser considerado inviável devido à limitação do ângulo de conformação ( $45^\circ$ ). O esqueleto craniofacial, por sua vez, apresenta regiões, principalmente na face, que apresentam geometria complexa, o que exigiria a conformação da chapa em ângulos superiores ao limite determinado, inviabilizando o processo. O crânio, por sua vez, apresenta curvatura suave, o que possibilita que ele seja fabricado por estampagem incremental [75].



2-38: Diagrama-limite de conformação das chapas de titânio [75].

A CLC (representada por FLC no diagrama da figura 2-39) limita a zona de segurança para a conformação convencional do titânio comercialmente puro grau 2 e pode ser determinada à custa das deformações reais na zona de estrição dos corpos de prova da tração, do coeficiente de encruamento,  $n$ , e das deformações reais na zona de estrição das chapas sujeitas aos ensaios de expansão biaxial [1].

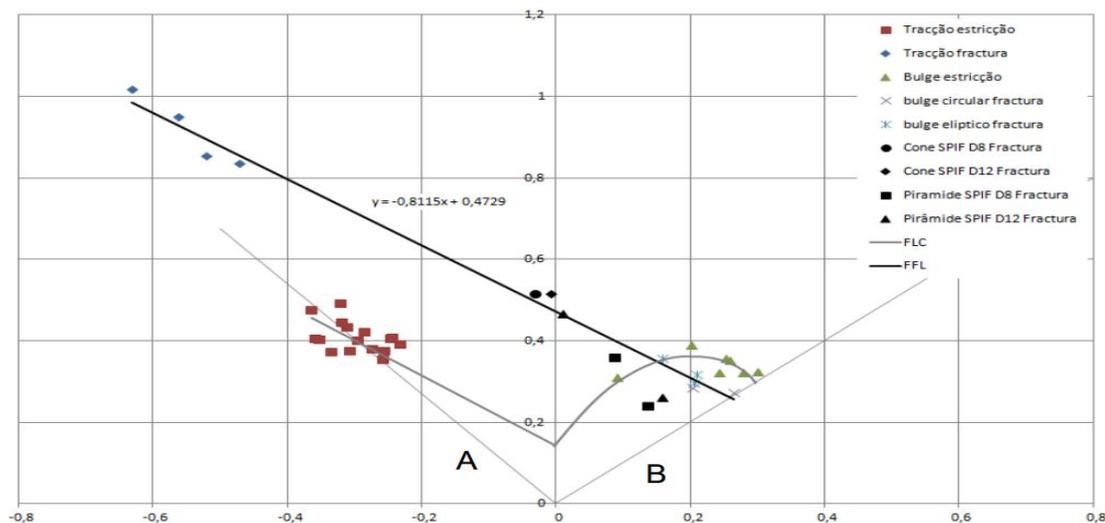


Figura 2-39: Diagrama limite de conformação e curva limite de fratura do TiCp Gr2 [1].

A determinação do coeficiente de anisotropia,  $r$ , permitiu a determinação da trajetória de deformação plástica à tração, tal como pode ser observado na linha “A” do diagrama, figura 2-39. No domínio da expansão biaxial, as deformações acontecem de igual forma nas direções 1 e 2, sendo que a trajetória de deformação é representada pela reta “B” de declive igual a 1, [1].

## 2.11 Discrepância Geométrica

Como é bem conhecido, no design de um componente mecânico são necessárias algumas decisões sobre tolerâncias. Muitas vezes, o produto tem de ser fabricado de acordo com restrições de montagem, o que implica uma definição cuidadosa da configuração do processo. No caso da estampagem incremental, os problemas causados pelo retorno elástico são maiores que a estampagem tradicional. Embora seja um processo de fácil implementação e de baixo custo, o mecanismo de deformação que o caracteriza é bastante complexo, sendo que o consequente retorno elástico penaliza bastante a precisão final. Além disso os parâmetros do processo possuem influências, muitas vezes opostas, em diferentes aspetos do resultado final, desde a formabilidade do material, precisão da geometria, rugosidade de superfície e tempo do processo. Todas estas características tornam a compensação do retorno elástico na estampagem incremental num desafio [1].

O caso mais simples que podemos considerar na estampagem incremental é o da produção de uma geometria de um tronco cônico, no qual a chapa é presa ao longo do perfil exterior e não é suportada durante a ação da ferramenta. Neste caso podem ser detectados três diferentes tipos de erro no produto final quando a ação do punção é removida, figura 2-40. Em primeiro lugar, ocorre uma dobragem relevante na chapa perto da base principal. Esta imprecisão é normalmente resolvida através da utilização de uma chapa de apoio simples. Em segundo lugar quando a ação do punção é relaxada, a chapa “sobe” e a profundidade final da peça é menor do que o valor desejado. Finalmente, podemos ainda observar um efeito de “almofada” na base menor do produto, que determina a curvatura côncava do material não deformado [31].

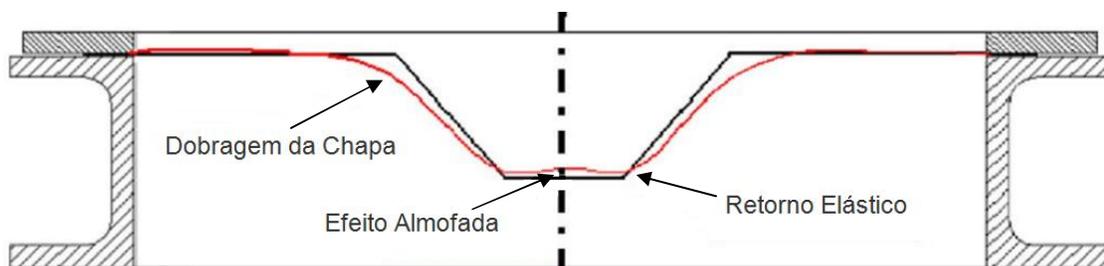


Figura 2-40: Erros geométricos durante o processo de SPIF [31].

De forma a reduzir o erro, podemos considerar diferentes abordagens, desde a simples aplicação de uma chapa de apoio, à definição de uma trajetória da ferramenta mais adequada. No entanto é necessário ter ainda em conta, que os passos subsequentes do processo, momentaneamente a remoção do sistema de fixação e o corte da chapa, possuem uma grande influência na precisão final da geometria. Basicamente, em ambos os casos, o material “procura” um novo equilíbrio, e por isso ainda ocorrem algumas distorções. Estas distorções dependem fortemente da forma da peça e do material assim como da espessura da chapa. Consequentemente estes parâmetros devem ser cuidadosamente tidos em consideração em cada caso [31].

## 2.12 Tratamento Térmico Para Alívio de Tensões do Titânio Puro

O tratamento térmico pode ser definido como o aquecimento ou resfriamento controlado dos metais feito com a finalidade de alterar suas propriedades físicas e mecânicas, sem alterar a forma do produto final [76].

Na figura 2-41 foi descrito no gráfico como proceder no tratamento térmico, descrevendo uma rampa de aquecimento, o tempo de permanência no forno a uma temperatura determinada e a rampa de resfriamento.

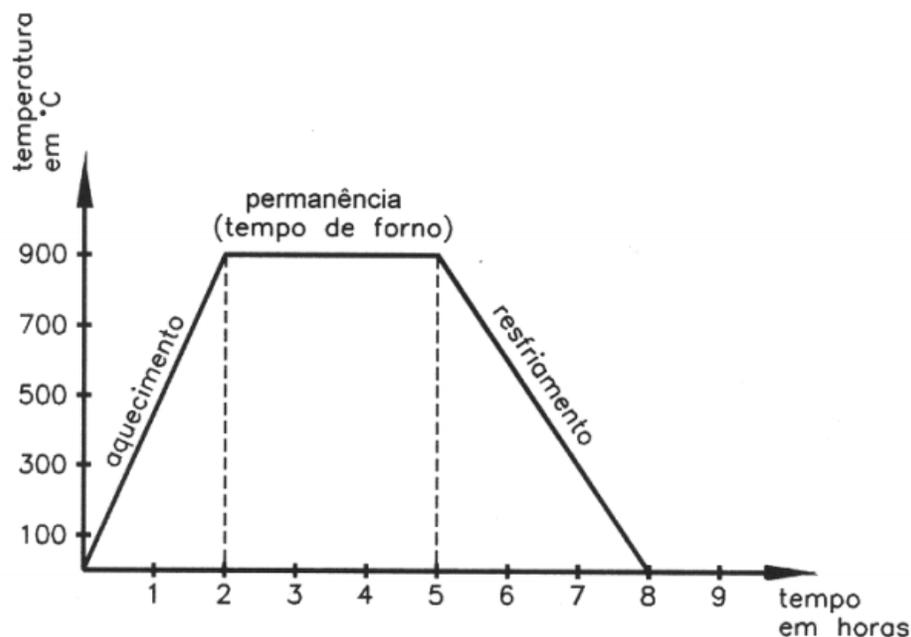


Figura 2-41: Gráfico esquemático do tratamento térmico [76].

O titânio comercialmente puro pode ser submetido a tratamentos térmicos de alívio de tensões sem efeitos adversos a resistência mecânica e a ductilidade. Esse tipo de tratamento reduz as tensões residuais indesejáveis que resultam da estampagem incremental e do processo de fabricação da chapa [77].

A remoção dessas tensões ajuda a manter a estabilidade de forma e elimina condições desfavoráveis como a perda de resistência ao escoamento em compressão [77].

O alívio de tensões pode também ser incorporado a outros tipos de tratamentos térmicos, como o recozimento, por exemplo. O envelhecimento também pode aliviar tensões residuais [77].

No titânio comercialmente puro (todos os graus) o alívio de tensões ocorre nas temperaturas de 480 a 595 °C e entre 24 minutos e 4 horas [77].

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE TITÂNIO USADA NOS TESTES

Para fazer a caracterização das chapas de titânio usadas nos testes práticos foram feitos as seguintes análises:

- Ensaio de tração;
- Metalografia;
- MEV e EDS;
- Medição da rugosidade e molhabilidade;
- Testes de ISF – Definição do ângulo máximo de inclinação da parede.
- Curvas Limite de Conformação – CLC;
- Microdureza.

#### 3.1 Ensaio de Tração do Material a Ser Estampado

A melhor maneira para se determinar as propriedades mecânicas de um metal por tração é ensaiar um corpo de prova retirado da peça. Assim, os ensaios de tração geralmente são feitos em corpos de prova normalizados pelas várias normas técnicas [55].

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, com o sentido de laminação variando entre 0, 45 e 90°, em relação a direção de laminação. O formato segue a norma ABNT 6152 / DIN EM 10002, para corpos de prova de ensaio de tração para chapas, conforme figura 3-1.

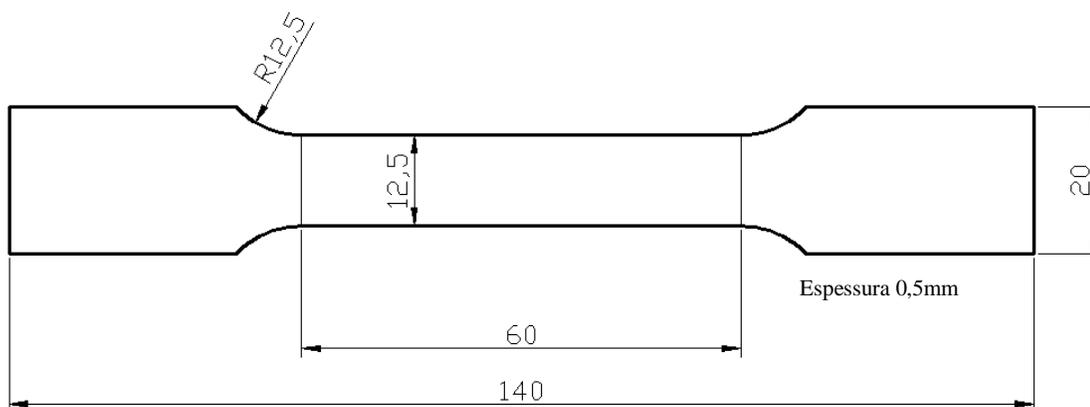


Figura 3-1: Corpo de prova com as dimensões padronizadas.

### 3.1.1 Ensaio de Tração na Chapa de Titânio Sem Tratamento Térmico

Após realizados os ensaios de tração na máquina de tração EMIC modelo DL10000 capacidade 100 kN, foram geradas as curvas tensão-deformação convencionais para cada corpo de prova retirado em relação ao sentido de laminação, 0°, 45° e 90° (figura 3-2, figura 3-3 e figura 3-4).

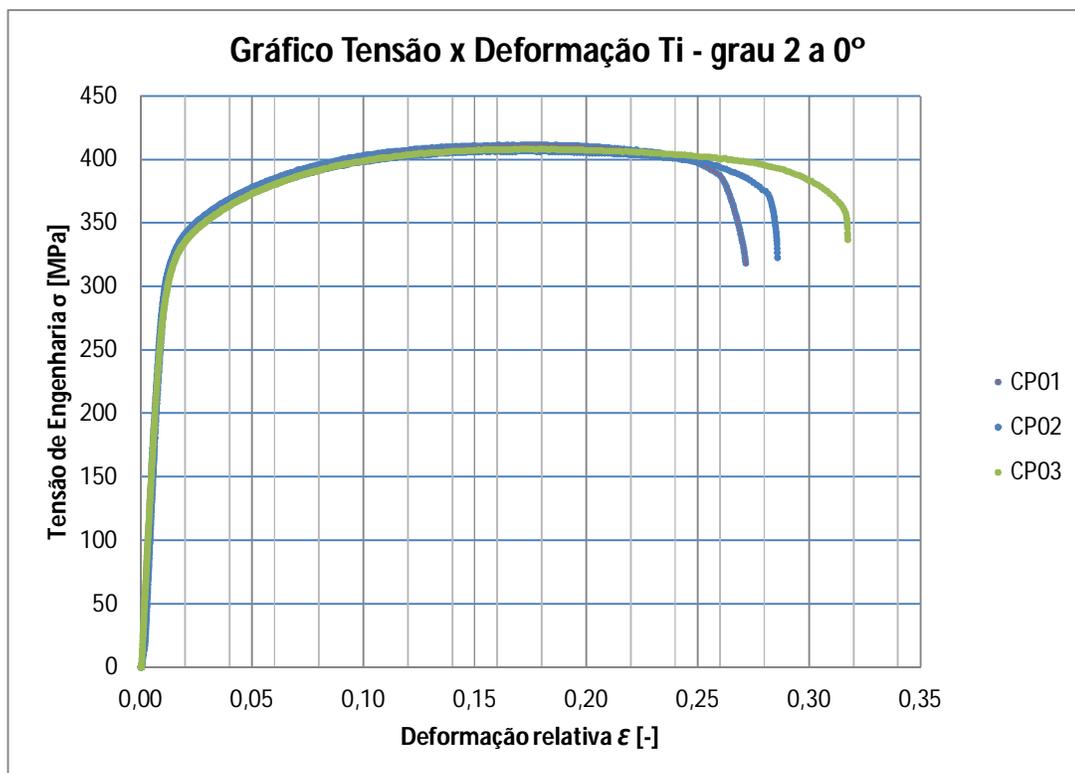


Figura 3-2: Curva convencional  $\sigma \times \epsilon$  do Ti-CP Grau 2 para ângulo de laminação 0°.

No gráfico da figura 3-2 foi representada a curva de cada corpo de prova ensaiado e identificados como CP01, CP02 e CP03, respectivamente.

A curva obtida no ensaio de tração figura 3-2, ficou semelhante a da literatura figura 2-23. A tensão máxima desta última é de aproximadamente 520MPa, enquanto a curva obtida apresentou a tensão máxima de 420MPa, indicando ser um pouco mais dútil que a curva da literatura. Esta comparação foi feita entre as curvas obtidas a partir do corpo de prova retirado no sentido paralelo à direção de laminação da chapa (0°).

Fazendo uma comparação com a deformação ( $\epsilon$ ) obtida próximo de 0,275 com a obtida por [13], onde a deformação ( $\epsilon$ ) foi 0,35, e foi possível observar que a deformação obtida ficou próxima da literatura.

No ensaio realizado a  $90^\circ$  foi obtida a curva conforme figura 3-3, com tensão máxima ( $\sigma_{\max}$ ) de 400 MPa, porem esta curva esta diferente da encontrada por [13], conforme figura 2-23, onde a tensão máxima ( $\sigma_{\max}$ ) foi de 540 MPa. Da mesma forma foram retirados três corpos de prova e ensaiados conforme a norma. A diferença obtida na tensão máxima indica que a chapa de titânio utilizada neste trabalho possui uma melhor ductilidade.

A deformação relativa ( $\epsilon$ ) obtida no gráfico figura 3-3, foi de aproximadamente 0,20 ficando muito próxima da obtida por [13], figura 2-23, onde a deformação ( $\epsilon$ ) foi de 0,26.

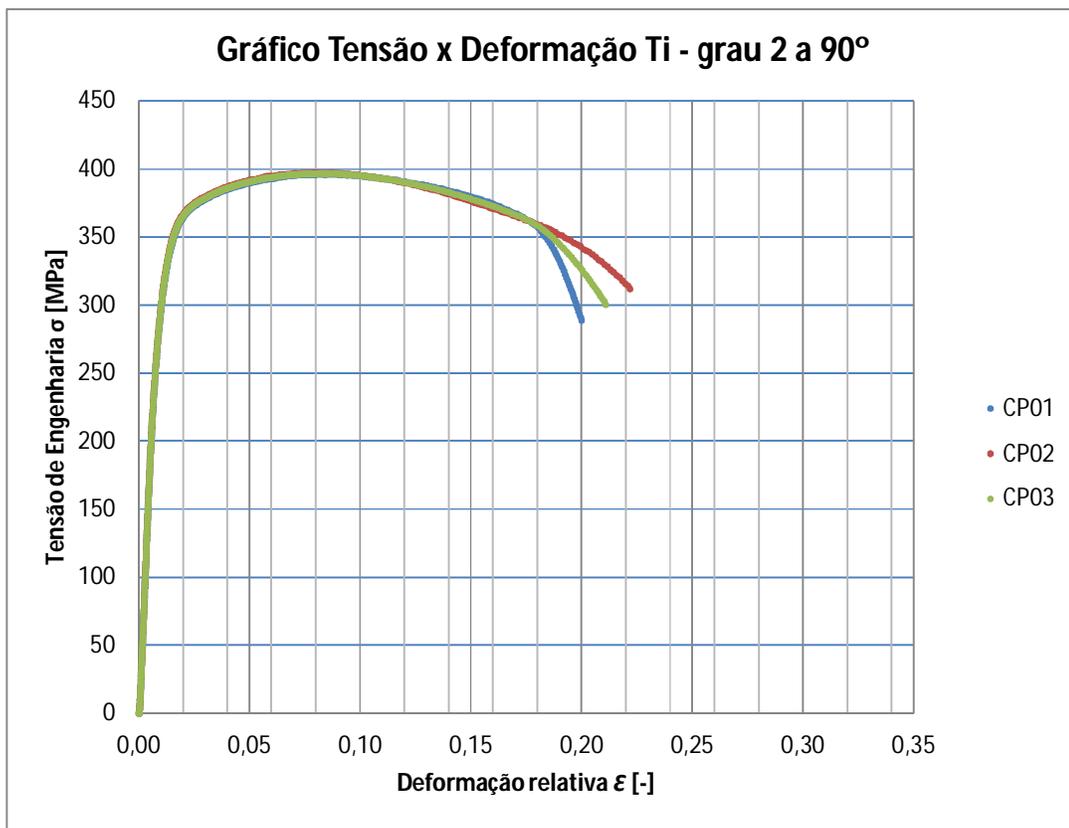


Figura 3-3: Curva convencional  $\sigma \times \epsilon$  do Ti-CP Grau 2 para ângulo de laminação  $90^\circ$ .

A  $45^\circ$  do sentido de laminação foram retirados três corpos de prova e ensaiados. Os resultados obtidos estão descritos na figura 3-4, e mostram o comportamento de Ti-CP grau 2 no ensaio de tração. Sendo que os três ensaios para  $45^\circ$  do sentido de laminação mostraram um curva com uma pequena diferença, conforme CP01, CP02 e CP03. Isto pode ter ocorrido porque durante os ensaios não foi utilizado o equipamento para medir o alongamento,

(extensômetro), apenas foram coletados os dados gerados pela própria máquina de ensaio de tração.

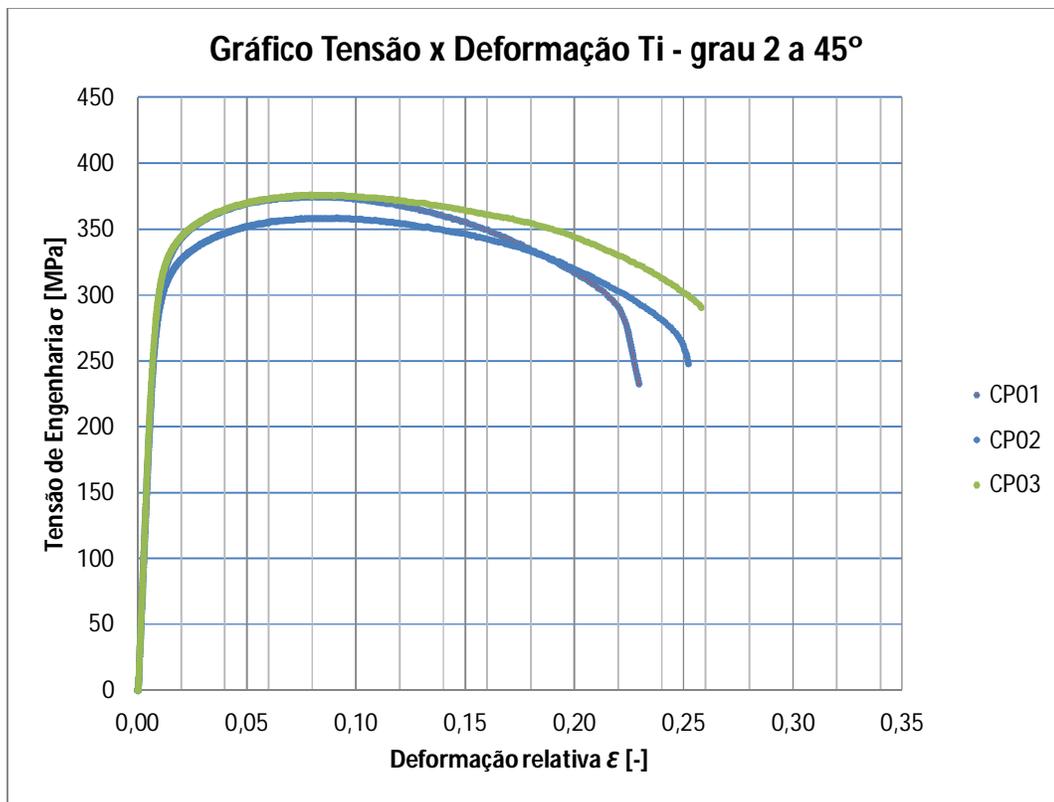


Figura 3-4: Curva convencional  $\sigma X \epsilon$  do Ti-CP Grau 2 para ângulo de laminação 45°.

Observando-se o tipo de fratura na figura 3-5 (direção de laminação 0°), constatou-se que a chapa de Ti-CP grau 2 apresentou uma fratura do tipo dútil, com estrição visível.

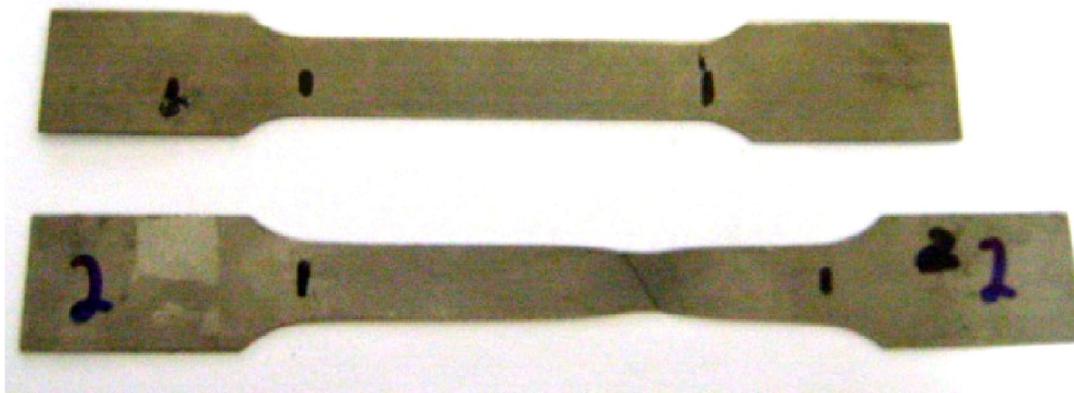


Figura 3-5: Fratura dútil da chapa (sentido de laminação paralelo ao corpo de prova), caracterizada pelo ângulo de ruptura (aprox. 45°) e pela estrição visível.

Após obter o ensaio de tração foi possível obter 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 do rompimento. Os valores obtidos a seguir, as tabelas e gráficos resultantes referem-se ao corpo de prova retirado no sentido paralelo à direção de laminação da chapa ( $0^\circ$ ).

a) Deformação relativa ( $\varepsilon$ ):

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

$$\varepsilon = \left( \frac{84,08 - 60}{60} \right)$$

$$\varepsilon = 0,40$$

b) Alongamento ( $\delta$ ):

No ensaio de tração o corpo de prova sofre um alongamento específico, gerado pela força de tração. Para determinar este alongamento realiza-se a medição do corpo de prova antes e depois do ensaio figura 3-6, desta forma é possível extrair o valor do alongamento.

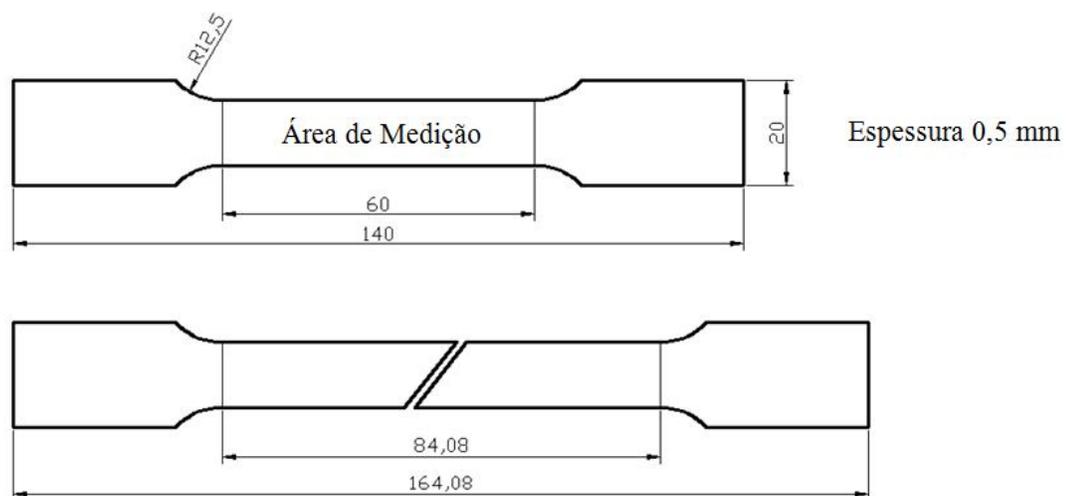


Figura 3-6: Dimensões do corpo de prova antes e depois do ensaio de tração.

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

$$\delta = 24,08mm$$

c) Tensão máxima ( $\sigma_{MAX}$ );

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

$$\sigma_{MAX} = \frac{2.535,00}{6,25}$$

$$\sigma_{MAX} = 405,6MPa$$

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

As curvas de escoamento, que sempre são obtidas experimentalmente, podem ser descritas por uma função matemática. Em geral, na deformação a frio, esta equação tem a seguinte forma [17] apud [71]:

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

- C é uma constante do material, para  $\varphi = 1$

- n é o índice de encruamento do material.

Os demais dados necessários para a determinação da curva de escoamento são [17] apud [78]:

- a deformação relativa no instante de tensão máxima ( $\varepsilon = 0,20$ ) (é extraído 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 e é calculada com o valor da deformação relativa no instante de tensão máxima ( $\varepsilon$ ) retirado do ensaio de tração (figura 3-2):

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

$$\varphi = \ln(1 + 0,20)$$

$$\varphi = 0,0791$$

Tem-se que:

$$n = 0,0791$$

Tensão verdadeira ( $kf$ ) correspondente a tensão máxima do material [17] apud [78]:

$$kf = \sigma_{\max} (1 + \varepsilon) \quad (3-7)$$

$$kf = 405,6(1 + 0,25) = 507 \text{ MPa}$$

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

$$kf = C \cdot \varphi^n \quad (3-8)$$

$$507 = C \cdot 0,0791^{0,0791}$$

$$C = 619,67 \text{ MPa}$$

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

$$kf = 619,67 * \varphi^{0,0791}$$

e está representada na figura 3-7:

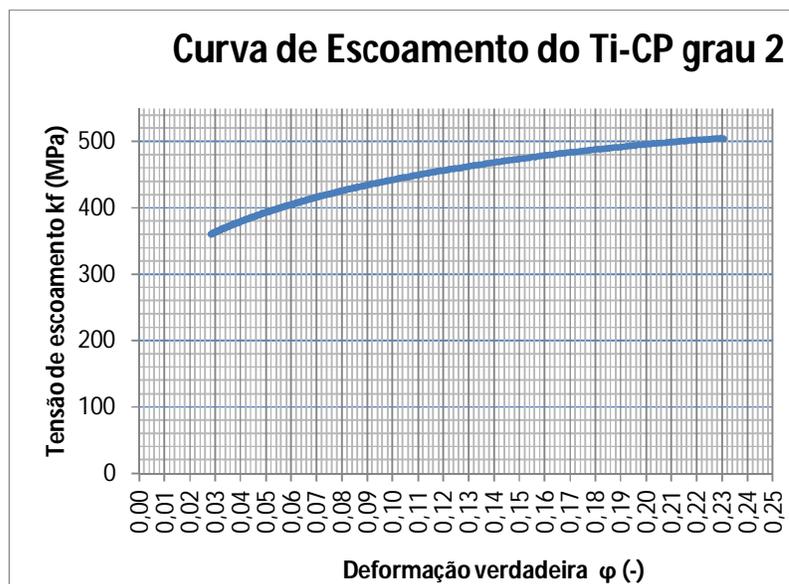


Figura 3-7: Curva de escoamento do Titânio CP, Grau 2.

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 desta reta (Equação 2-2). A figura 3-8 apresenta a plotagem logarítmica e o valor de  $n$ :

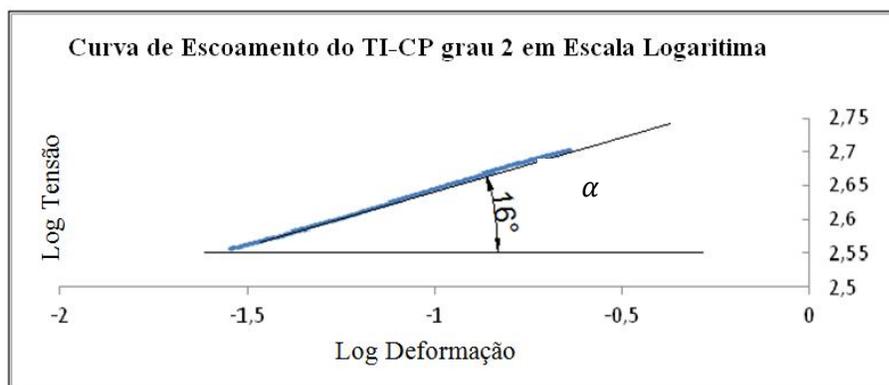


Figura 3-8: Curva de escoamento representada com eixos logarítmicos, ensaio 1 a  $0^\circ$ .

$$n = tg. \alpha$$

$$n = 0,28$$

Sendo que a curva de escoamento da literatura figura 2-30, apresentou  $n=0,21$ . A curva apresentada por [17] é de  $n=0,25$ . Quanto maior a inclinação da curva, menor será sua ductilidade.

### 3.1.2 Ensaio de Tração na Chapa de Titânio Com Tratamento Térmico

Após o tratamento térmico de alívio de tensões foram retirados três corpos de prova, figura 3-9, para cada direção em relação ao sentido de laminação da chapa e foi feito os ensaios de tração, onde foram obtidas as curvas de tensão deformação.



Figura 3-9: corpos de prova tratados termicamente.

O ensaio de tração realizado nos corpos de prova plotaram uma curva característica do titânio e demonstrada na figura 3-10.

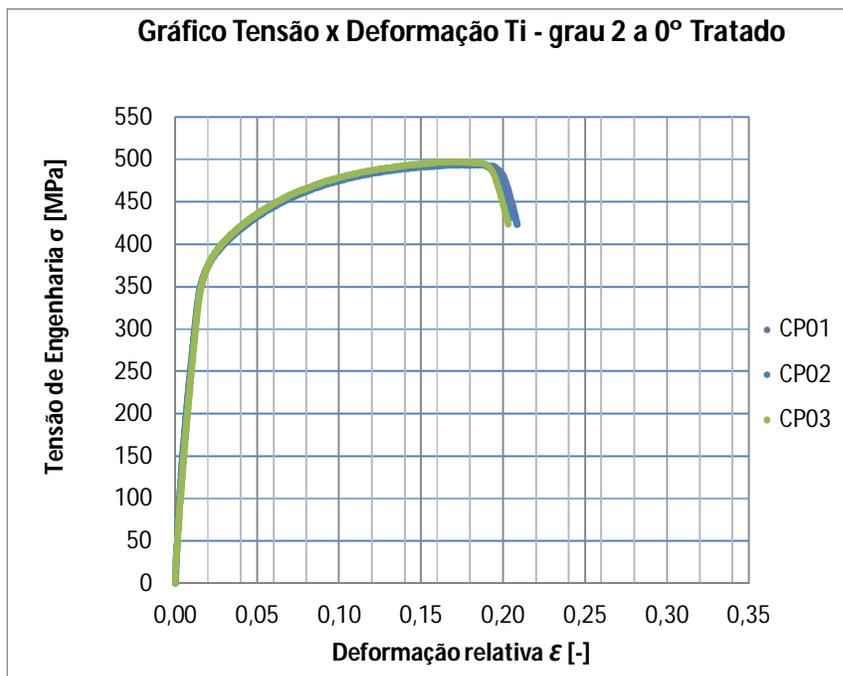


Figura 3-10: Curva convencional  $\sigma X \epsilon$  do Ti-CP Grau 2 tratado termicamente, para ângulo de laminação 0°.

Fazendo uma comparação com a curva obtida sem tratamento térmico houve um aumento da tensão máxima ( $\sigma_{\max}$ ) de 420 para 500 MPa respectivamente. O aumento na tensão foi devido ao alívio das tensões internas providas do processo de fabricação das chapas de titânio. Comparando a deformação ( $\epsilon$ ) obtida, a sem tratamento ficou em 0,275 e a com tratamento ficou em 0,19.

Analisando as diferença obtidas nos ensaios realizados nos corpos de prova retirados a 90° e 45°, (figura 3-11 e 3-12), com tratamento térmico pode-se concluir que o tratamento térmico de alívio de tensões aumentou as tensões máximas ( $\sigma_{\max}$ ) de 400 e 370 MPa respectivamente para 480 e 450 MPa.

Para os corpos de prova retirados a 45° em relação ao sentido de laminação da chapa a curva teve o desenvolvimento segundo a figura 3-11.

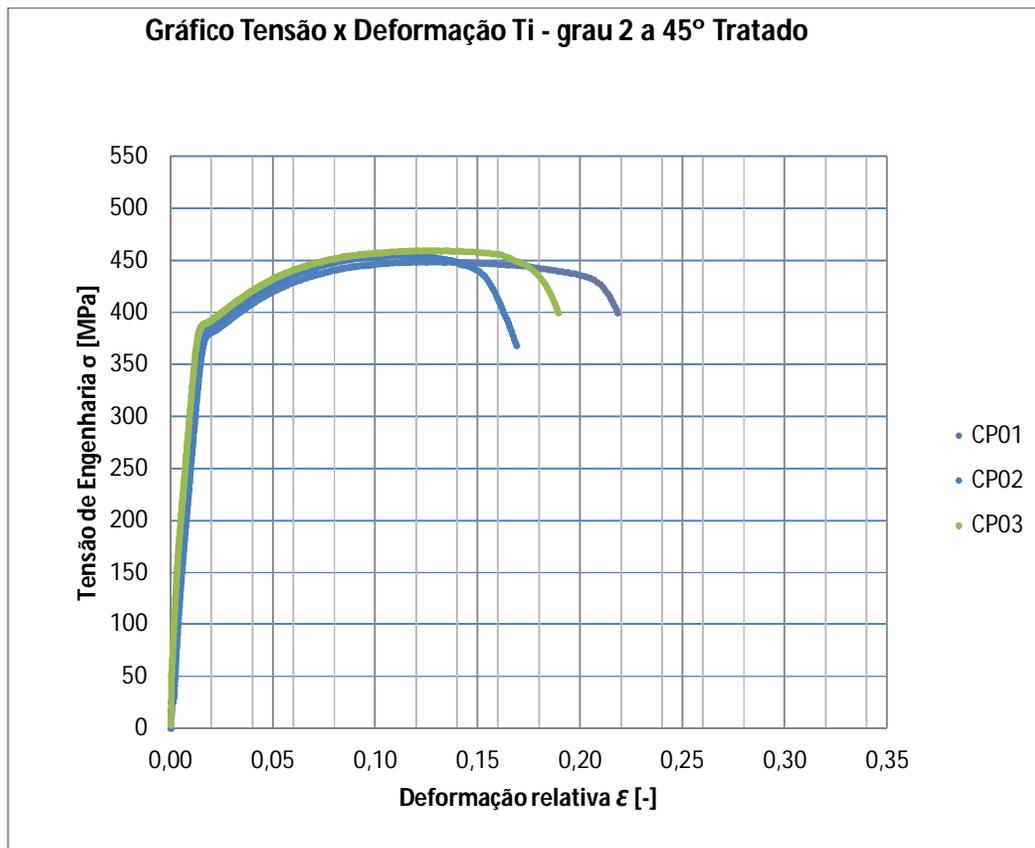


Figura 3-11: Curva convencional  $\sigma X \epsilon$  do Ti-CP Grau 2 tratado termicamente, para ângulo de laminação 45°.

Na direção 90° em relação ao sentido de laminação a curva resultante dos ensaios de tração é mostrada na figura 3-12.

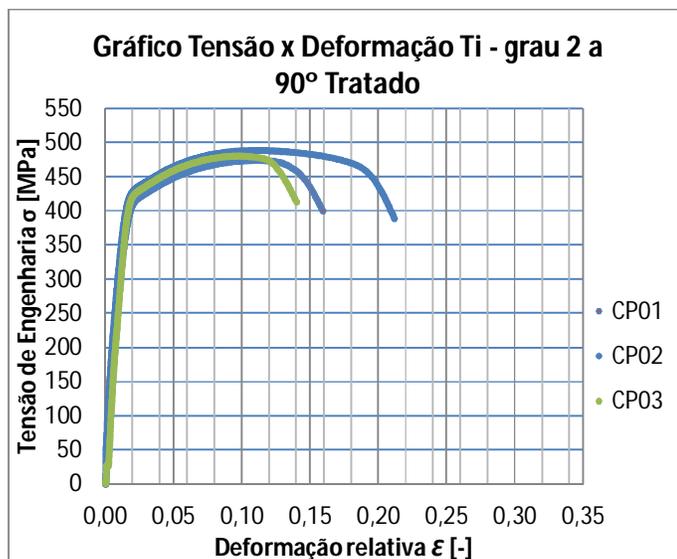


Figura 3-12: Curva convencional  $\sigma \times \epsilon$  do Ti-CP Grau 2 tratado termicamente, para ângulo de laminação  $90^\circ$ .

Com os resultados obtidos no ensaio de tração foi possível plotar a curva de escoamento da chapa de titânio com tratamento térmico de alívio de tensões. A curva plotada na figura 3-13, mostra que houve um aumento na tensão de escoamento chegando próximo dos 600 MPa, em relação a curva de escoamento da chapa de titânio sem tratamento figura 3-7, onde o valor da tensão de escoamento é 500 MPa.

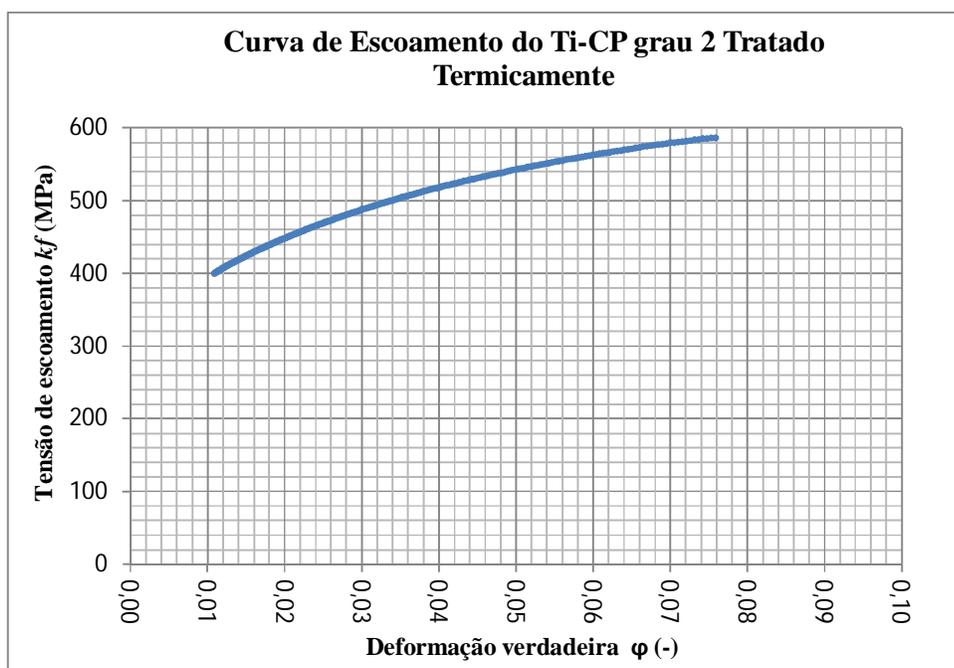


Figura 3-13: Curva de escoamento Titânio comercialmente puro com tratamento térmico de alívio de tensões.

Para visualizar os resultados dos ensaios de tração de maneiras objetiva e comparar os resultados foi montada uma tabela 3-1.

Tabela 3-1: Resultado dos ensaios de tração.

Sentido Laminação	Tratamento Térmico	$\sigma_{\max}$ [MPa]	Deformação relativa $\varepsilon$ [-]
0°	Sim	500	0,190
0°	Não	420	0,275
45°	Sim	460	0,200
45°	Não	400	0,200
90°	Sim	480	0,200
90°	Não	380	0,250

### 3.2 Cálculo do Índice de Anisotropia

Com os valores obtidos do ensaio de tração, foi possível obter os índices ' $r$ ' de anisotropia para os corpos de prova retirados paralelos ao sentido de laminação (0°), oblíquo (45 °) e perpendicular (90 °), conforme tabela 3-2.

Tabela 3-2: Índice de anisotropia.

Corpo de prova	Paralelos ao sentido de laminação (0°). $r_0$	Oblíquo ao sentido de laminação (45 °). $r_{45}$	Perpendicular ao sentido de laminação (90 °). $r_{90}$
<b>Resultados obtidos</b>	1,142	1,718	2,175

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:

$$r_m = \frac{1}{4}(r_0 + 2r_{45} + r_{90}) \quad (3-7)$$

$$r_m = 1,688$$

Um material que não apresenta alterações em suas propriedades mecânicas segundo o sentido de laminação é chamado de material “isotrópico” e apresenta  $r_m = 1$  , com boas

características de estampabilidade e quanto maior ou menor for este valor, isto significa que são considerados como materiais anisotrópicos.

### 3.3 Ângulo Máximo de Inclinação da chapa de titânio puro na SPIF

O objetivo dos testes práticos de estampagem incremental SPIF – estampagem sem ponto de apoio, é determinar o ângulo de parede limite para a chapa de Titânio F67 – Grau 2 com 0,5 mm de espessura.

Foram realizados quatro testes conforme tabela 3-3.

Tabela 3-3: Dados da estampagem SPIF.

<i>Testes</i>	<i>Estratégia de estampagem</i>	<i>Tempo de simulação EdgeCAM (h)</i>	<i>Tempo de estampagem CNC (h)</i>	<i>Incremento vertical (mm)</i>	<i>Avanço XY (mm/min)</i>	<i>Avanço Z (mm/min)</i>	<i>Rotação (RPM)</i>	<i>Ângulo de parede</i>
1	Paralela	00:15:51	00:16:05	1	800	300	0	45°
2	Paralela	00:17:51	00:08:00	1	800	300	0	50°
3	Paralela	00:16:44	00:18:00	1	800	300	0	47°
4	Paralela	00:17:07	00:11:00	1	800	300	0	48°

Todos os testes foram realizados com o formato da peça tronco de pirâmide cujas dimensões são 110 mm x 110 mm com profundidade de estampagem de 50 mm.

O ângulo de parede foi mudado de acordo com cada teste realizado e a estratégia de entrada da ferramenta adotada foi 90° em Z e em X e Y entrada em raio no valor de 5 mm, mesmo raio da ferramenta de estampagem, mostrado na figura 3-14, isto porque nos três primeiros testes esta estratégia de entrada mostrou melhores resultados para a chapa de titânio.

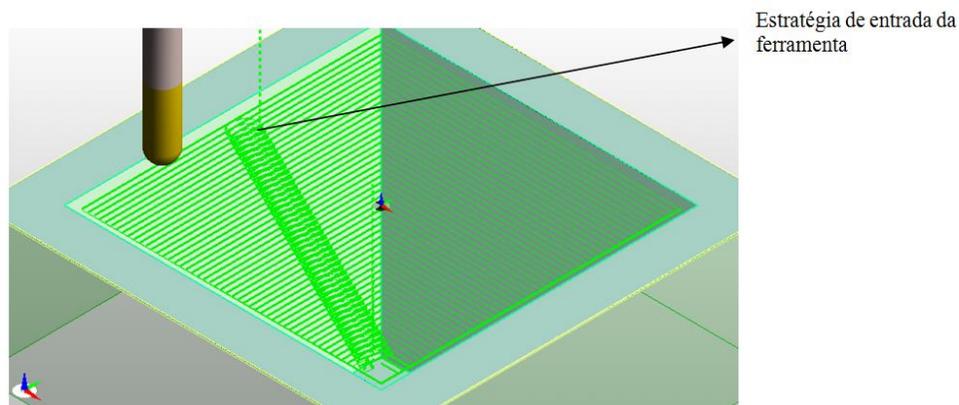


Figura 3-14: Modo de entrada da ferramenta.

### 3.3.1 Resultado dos Testes que Determinam o Ângulo Máximo de Parede

Os resultados destes quatro testes mostram qual é o ângulo máximo de parede antes da ruptura da chapa, mostram também o formato das rupturas para chapa de titânio F67 – grau 2.

O primeiro teste realizado foi à estampagem com ângulo de parede de 45° e mostrou que a chapa não rompe. Houve um rompimento no final da estampagem, figura 3-15, mas este foi ocasionado pela estratégia de entrada da ferramenta, que ao formar o raio de entrada em X e Y colidiu com as paredes da chapa.

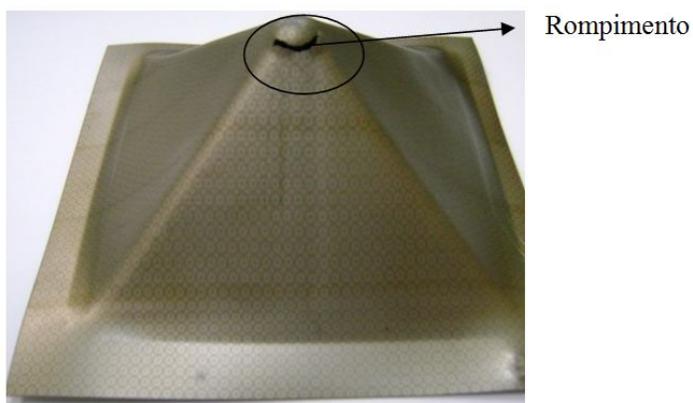


Figura 3-15: Teste de estampagem SPIF com 45° de ângulo de parede.

O segundo teste realizado foi com ângulo de parede de 50° e houve o rompimento da chapa com a profundidade de estampagem de 16 mm. O rompimento da chapa foi em um dos cantos conforme figura 3-16.

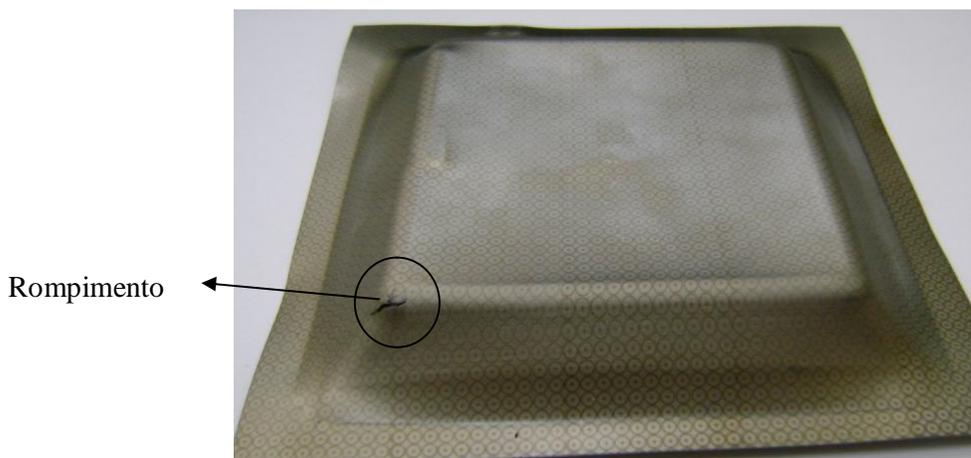


Figura 3-16: Teste de estampagem SPIF com 50° de ângulo de parede.

No terceiro teste o ângulo de parede usado foi de  $47^\circ$ , com este ângulo de parede a estampagem ocorreu até o final sem haver o rompimento da chapa, conforme figura 3-17.

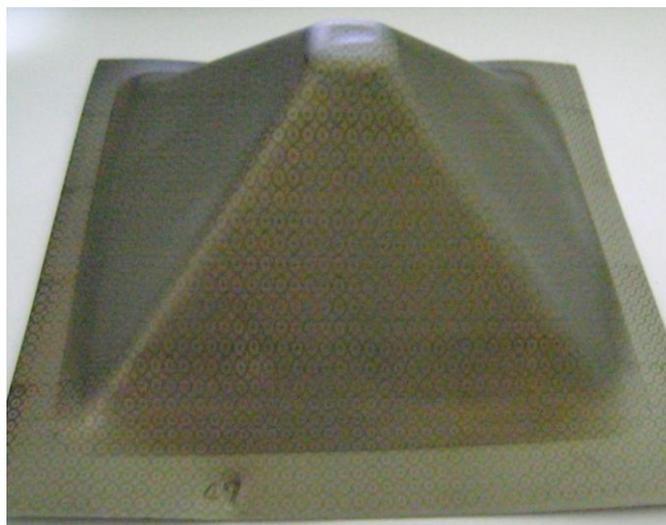


Figura 3-17: Teste de estampagem SPIF com  $47^\circ$  de ângulo de parede.

No quarto e ultimo teste feito com ângulo de parede de  $48^\circ$  foi constatado o rompimento da chapa com uma profundidade de estampagem de 22 mm. O rompimento da chapa também ocorreu em um dos cantos conforme figura 2.18.

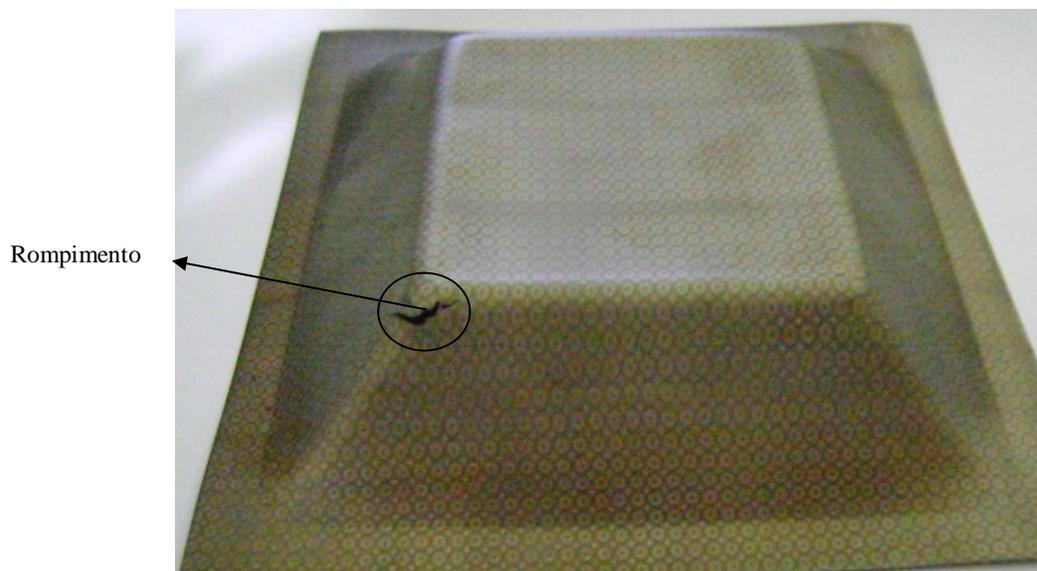


Figura 3-18: Teste de estampagem SPIF com  $48^\circ$  de ângulo de parede.

Com a realização destes quatro testes foi possível determinar que o ângulo limite de inclinação de parede para chapa de titânio F67 – grau 2 e espessura de 0,5 mm, com as condições de estampagem descritas na tabela 3-3 é  $47^\circ$ , conforme mostrado na figura 3-17.

### 3.3.2 Deformações

Para medir as deformações  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  foi utilizada a peça estampada a  $47^\circ$  onde foi obtida a maior profundidade de estampagem sem o rompimento. Antes da estampagem, foram gravados eletroquimicamente círculos de  $\varnothing 2,5$  mm sobre a superfície da chapa, figura 3-19.

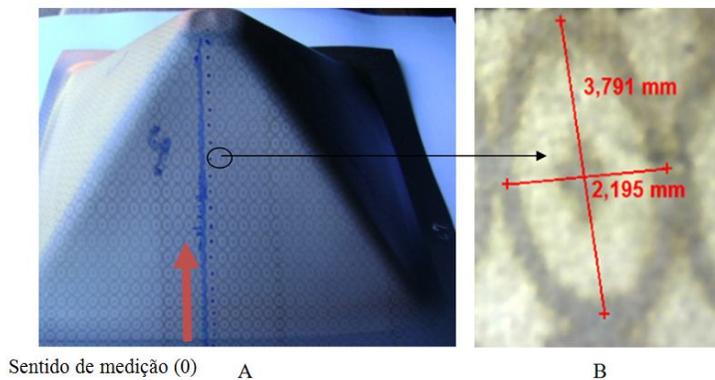


Figura 3-19: Sistema de medição das esferas, A - gravação eletroquímica na chapa de Titânio, B - medição das elipses.

O tipo de deformação obtida foi a deformação do tipo plana, isto é comprovado pela maior deformação dos círculos em  $\varphi_1$  e mínima deformação nos círculos em  $\varphi_2$ , conforme mostrado na figura 3-20.

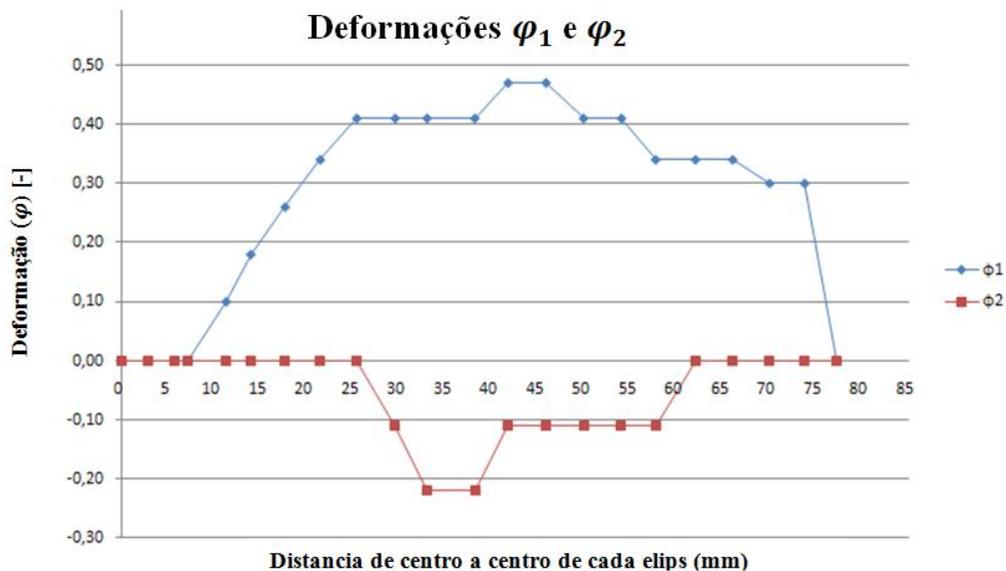


Figura 3-20: Verificação das deformações  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$ .

Os valores de  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  foram obtidos através de um microscópio que fotografa as elipses e as mede através de um software específico, conforme figura 3-19, este sistema de medição proporciona uma melhor resolução.

### 3.3.3 Variação da Espessura da chapa de titânio

A variação na espessura ( $s_1$ ) é um dado muito importante quando se analisa a estampagem de chapa. Após o final dos testes o experimento nº3 (Ângulo de parede 47°), foi cortado para medição das espessuras, como mostra a figura 3-21 A. Para a execução das medições foi usado um Micrômetro da marca Mitutoyo com 0,02 mm de resolução.

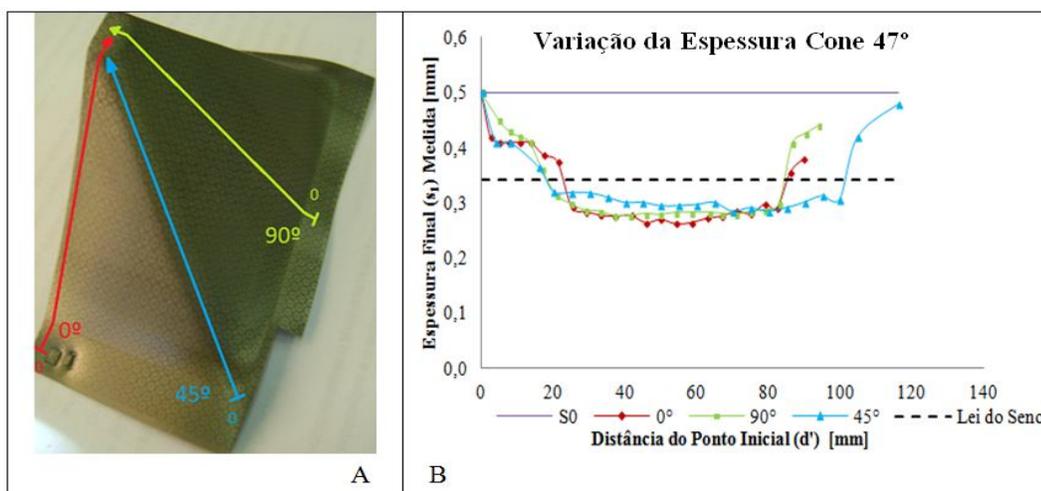


Figura 3-21: A) Sentido de laminação; B) Gráfico da variação das espessuras.

No gráfico da figura 3-21 B é plotado a variação da espessura de acordo com as medições realizadas. O gráfico mostra a linha S<sub>0</sub>, que é a espessura inicial da chapa, também mostra a linha pontilhada sendo esta calculada através da lei do seno. As demais linhas mostram a variação da espessura da chapa nas três direções de acordo com o sentido de laminação.

### 3.4 Curva limite de Conformação – CLC do Titânio

Para realização do ensaio prático para a obtenção da curva limite de conformação do titânio comercialmente puro usado nos testes práticos de estampagem incremental foram cortados os corpos de prova conforme ensaio Nakajima.

O ensaio Nakajima foi realizado em uma prensa hidráulica no laboratório do LDTM-UFRGS, de duplo efeito da marca Dan-Press, figura 3-22, com capacidade de até 20 toneladas (6 toneladas no punção inferior).

Para o levantamento da CLC, segundo o método tradicional de ensaio, foram utilizados oito corpos de prova, quantidade esta considerada suficiente para o propósito esperado.



Figura 3-22: Prensa hidráulica usada nos testes – LDTM-UFRGS.

Os corpos de prova foram cortados a laser, conforme especificações do ensaio Nakajima, onde os corpos de prova mais estreitos tendem a romper próximos ao raio da matriz, pela ação do prensa chapa, por isso foram preparados com entalhe, figura: 3-23.

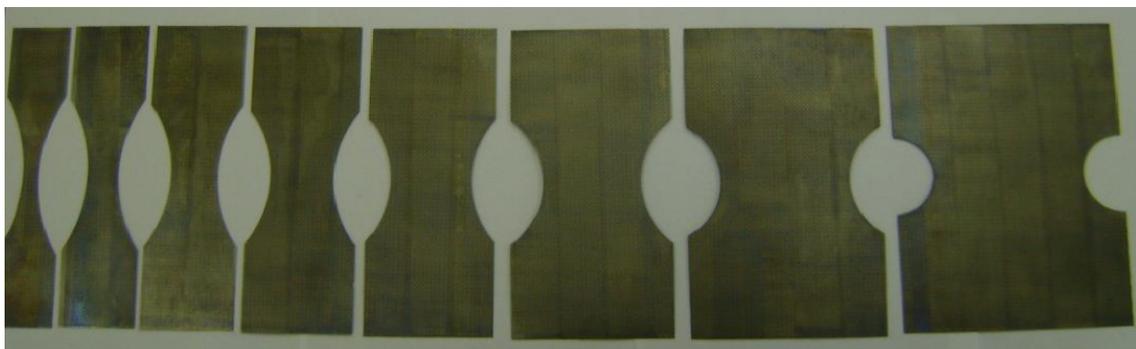


Figura 3-23: corpos de prova cortados a laser, conforme ensaio Nakajima.

Foi feita a gravação eletroquímica dos círculos para a medição das deformações obtidas após o ensaio Nakajima. Para medir as deformações foi utilizado um microscópio digital. Com o microscópio foi possível a obtenção das deformações com uma resolução 0,01mm, conforme figura 3-24.

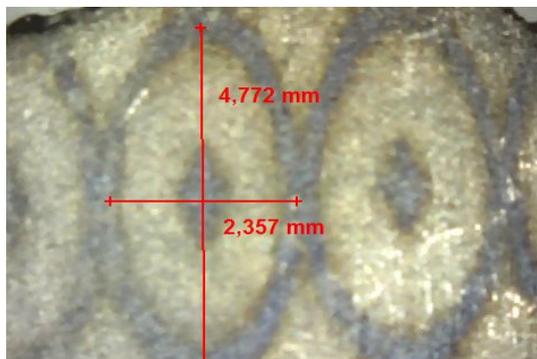


Figura 3-24: Medição das esferas.

A malha inicial de gravação era composta por círculos com diâmetro inicial ( $d_0$ ) de 2,5 mm. Após o ensaio, a malha que se deformou com o corpo de prova, assume uma geometria de elipse, na qual o eixo com maior deformação ( $d_1$ ) corresponde à variação do comprimento e o eixo com menor deformação ( $d_2$ ) corresponde à variação da largura. As deformações do comprimento ( $\varphi_1$ ) e da largura ( $\varphi_2$ ) são calculadas por:

$$\varphi_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (3-8)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} \quad (3-9)$$

Já a deformação da espessura ( $\varphi_3$ ) é calculada por meio da Lei da Constância do Volume, ou seja:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (3-10)$$

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (3-11)$$

Para a geração da curva CLC foram medidas as esferas próximas a ruptura nos corpos de prova, a figura 3-25, mostra uma das esferas medidas e a posição de  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  em relação a elipses formada após a deformação.

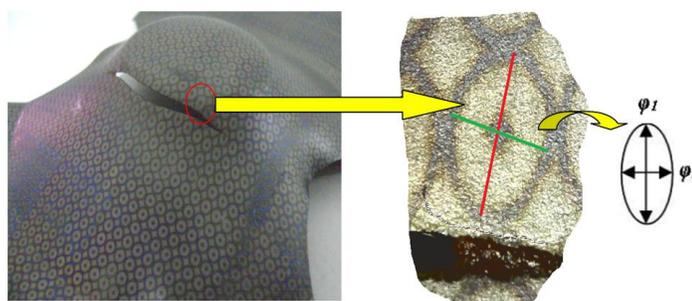


Figura 3-25: Forma de medição das elipses.

O limite de deformação, onde  $\varphi_1$  (deformação do comprimento) corresponde ao eixo das ordenadas e  $\varphi_2$  (deformação da largura) corresponde ao eixo das abscissas. A curva CLC passa por entre a nuvem de pontos plotados formando uma curva média, conforme figura 3-26.

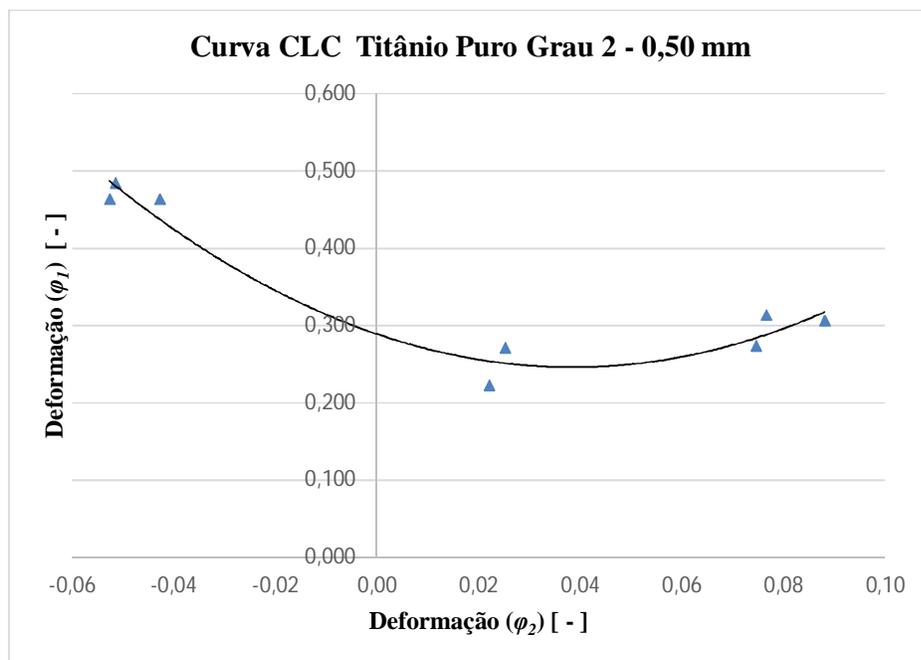


Figura 3-26: Curva CLC para o titânio comercialmente puro de grau 2.

A curva plotada na figura 3-26 indica que para estampagem incremental de formas extremamente complexas haverá a ruptura da chapa em função do ângulo máximo de estampagem ( $47^\circ$ ). Conforme citado por [75], o crânio por sua vez, apresenta curvaturas suaves, o que possibilita que as próteses sejam fabricadas por estampagem incremental.

### 3.5 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), as superfícies das chapas de titânio puro foram submetidas ao polimento mecânico com lixas d'água de granulação de 200 a 1.200, seguido de polimento com feltro embebido em solução aquosa de alumina com granulação  $0,3\mu\text{m}$ , em politriz elétrica. Posteriormente, as superfícies polidas foram submetidas ao ataque químico, por 4 segundos, com reagente de Kroll, (3 ml de ácido fluorídrico e 6ml de ácido nítrico, diluídos em 100 ml de água destilada). Imediatamente após

o ataque químico, as amostras foram colocadas no microscópio para análise química, onde foi revelada a microestrutura conforme figura 3-27.

Foi feita análise metalográfica na espessura da chapa antes da estampagem, figura 3-27 A, onde o titânio puro grau 2 apresenta um contorno de grãos destacado e os grãos são relativamente grandes. A figura 3-27 B mostra a metalografia da chapa de titânio puro grau 2 com tratamento térmico de alívio de tensões, onde o contorno de grãos continua destacado mas o tamanho do grão diminuiu.

O tamanho pequeno do grão diminui as descontinuidades e aumenta a resistência à deformação da chapa.

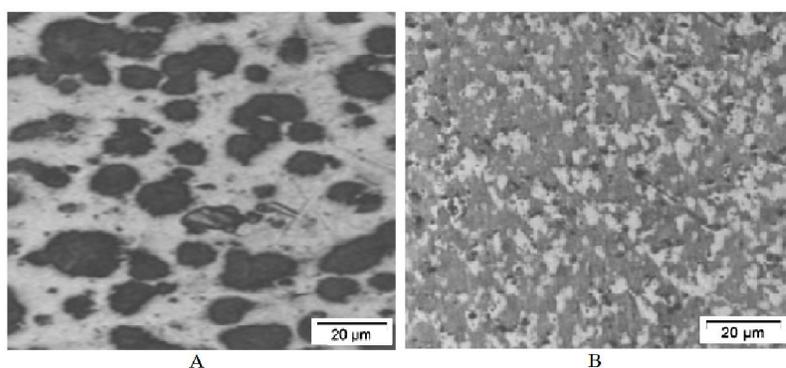


Figura 3-27: Microscopia ótica do Ti-CP F67 grau 2. A microscopia do titânio comercialmente puro. B microscopia do titânio comercialmente puro tratado termicamente.

### 3.6 Análise do Titânio Estampado

Nesta etapa da caracterização foi realizada a estampagem incremental de duas peças em formato de cone de pirâmide em um centro de usinagem Discovery D600, comando Fanuc e utilizou uma ferramenta de ponta esférica com diâmetro de contato de 10mm, com haste em aço 4340, e inserto de Titânio puro grau 2. Os dados técnicos da estampagem incremental foram: velocidade de avanço de 2.000 mm/min; rotação de 50 RPM e incremento vertical de 1mm. Das duas chapas estampadas uma delas foi submetida a tratamento térmico, onde foi realizado em um forno tipo câmara, da marca Jung. A rampa de aquecimento foi de 2h para o aquecimento, 4h mantido a 500°C e resfriamento de 18h, com atmosfera natural.

As amostras de titânio comercialmente puro grau 2, foram caracterizadas quanto à morfologia por MEV, Microscopia ótica, rugosidade e molhabilidade. A composição química foi avaliada por EDS.

### 3.6.1 Retirada das Amostras

Os corpos de prova foram retirados da amostra estampadas, conforme revelam a figura 3-28, de uma chapa conformada pelo processo de estampagem incremental. De acordo com a tabela 3-4, podemos verificar a descrição de cada amostra, sendo as letras A e B as regiões em que as amostras foram retiradas da peça original; a letra L (Longitudinal – corpos de prova retirados no sentido de laminação), T (Transversal – corpos de prova retirados no sentido transversal de laminação), LT (amostra de corte longitudinal com tratamento térmico), TT (amostra de corte transversal com tratamento térmico), R (face interna, dentro da pirâmide, figura 3-28) e r (face externa, fora da pirâmide, figura 3-28). As amostras eram quadradas com lado = 1,0 cm (área de 1,0 cm<sup>2</sup>).

Tabela 3-4: Descrição das amostras para os sistemas estudados.

Amostras	Descrição das amostras
AL-r	Amostras de corte longitudinal da face externa.
BL-R	Amostras de corte longitudinal da face interna.
AT-r	Amostras de corte transversal da face externa.
BT-R	Amostras de corte transversal da face interna.
ALT-r	Amostras de corte longitudinal com tratamento térmico da face externa.
BLT-R	Amostras de corte longitudinal com tratamento térmico da face interna.
ATT-r	Amostras de corte transversal com tratamento térmico da face externa.
BTT-R	Amostras de corte transversal com tratamento térmico da face interna.

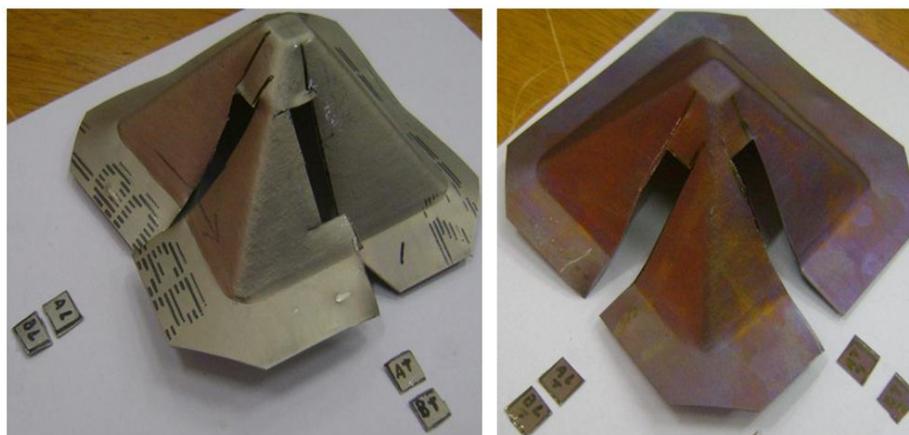


Figura 3-28: Obtenção dos corpos-de-prova sem tratamento térmico.

### 3.6.2 Desengraxe das Amostras

Todas as amostras após serem recebidas foram desengraxadas de uma a uma em solução cuja proporção foi 1:1 de água e sabão neutro, a 50°C e com sistema de agitação ligado durante um período de 10 minutos para cada amostra. Após esse período as amostras eram retiradas e lavadas com álcool etílico e posteriormente secas com ar frio.

### 3.6.3 Microscopia Óptica do Titânio Puro Grau 2

As análises de microscopia óptica foram realizadas por meio de um microscópio óptico da marca OLYMPUS CX31, plan C N, FN22 e as ampliações foram de 4x e 10x/25.

### 3.6.4 Perfilometria de Contato da Superfície do Titânio Puro Grau 2

A técnica de perfilometria é empregada para quantificar a topografia superficial de um material. Há o registro dos movimentos de uma sonda que se move sobre a superfície do material, gerando sinais elétricos que são representados graficamente.

Foram realizadas análises por perfilometria de contato em linha (2D) utilizando um perfilômetro CETR PRO500 3D, em que se procurou avaliar a rugosidade superficial da amostra, seguindo os parâmetros descritos na tabela 3-5.

Realizaram-se medidas de rugosidade 2D em três diferentes áreas de cada face e medida de rugosidade 3D em uma área de cada face.

Tabela 3-5: Parâmetros de perfilometria de contato.

Parâmetros	Valores
Faixa Vertical	500µm
Cut-off	300µm
Velocidade de Digitalização	Médium
Pontos de Digitalização	1000
Resolução de Dados	0,3µm
Força de Contato	15mg

Os parâmetros utilizados nas análises por perfilometria de contato foram baseado na norma ISO 4288, no entanto, devido à limitações no equipamento e software aproximou-se o *Cut-off* para 300µm buscando uma melhor resolução na análise.

### **3.6.5 Teste de Molhabilidade**

O teste foi realizado pelo método do ângulo de contato a partir de um aparato desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LAPEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul que determina o ângulo de contato formado através da interação entre a gota de água e o substrato analisado. Nessa técnica é analisado a maior ou menor capacidade hidrofílica do substrato. O ângulo de contato foi determinado por meio de um programa de análise de imagens adquirido pelo mesmo laboratório citado.

Para todos os casos mediu-se o ângulo de contato da superfície das amostras com dois tipos de soluções, PBS (phosphate buffered saline, 91,3:1,8:2,8:1 NaCl:KCl:Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>:KHPO<sub>4</sub>) e KOKUBO em três diferentes áreas de cada face. Ambas as soluções simulam a composição de um fluido corpóreo.

### **3.6.6 (MEV/EDS) (Microscopia Eletrônica de Varredura)**

A caracterização morfológica das amostras foi realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em microscópio modelo JSM 6510LV – marca JEOL aplicando 20 kV.

### **3.6.7 Resultados dos Ensaios da Chapa de Titânio Estampado**

Os resultados obtidos nos ensaios realizados na chapa de titânio após a estampagem serão descritos de acordo com o procedimento de obtenção de cada resultado e analisadas.

#### **3.6.7.1 Micrografia**

A figura 3-29 mostra as regiões internas (R, regiões que entraram em contato com a ferramenta), com seções longitudinais (L) e transversais (T) em relação ao sentido de laminação da chapa fria, ou seja, que não sofreu tratamento térmico. Houve o deslocamento de material e ruptura na camada superficial do substrato. Esse deslocamento de material está relacionado ao aumento da rugosidade da face interna, tabela 3-6. As regiões escuras, conforme análise por microscopia óptica corresponde ao material do substrato que ao ser

solicitado no processo de estampagem, sofreu ruptura em camadas e se incorporou à superfície.

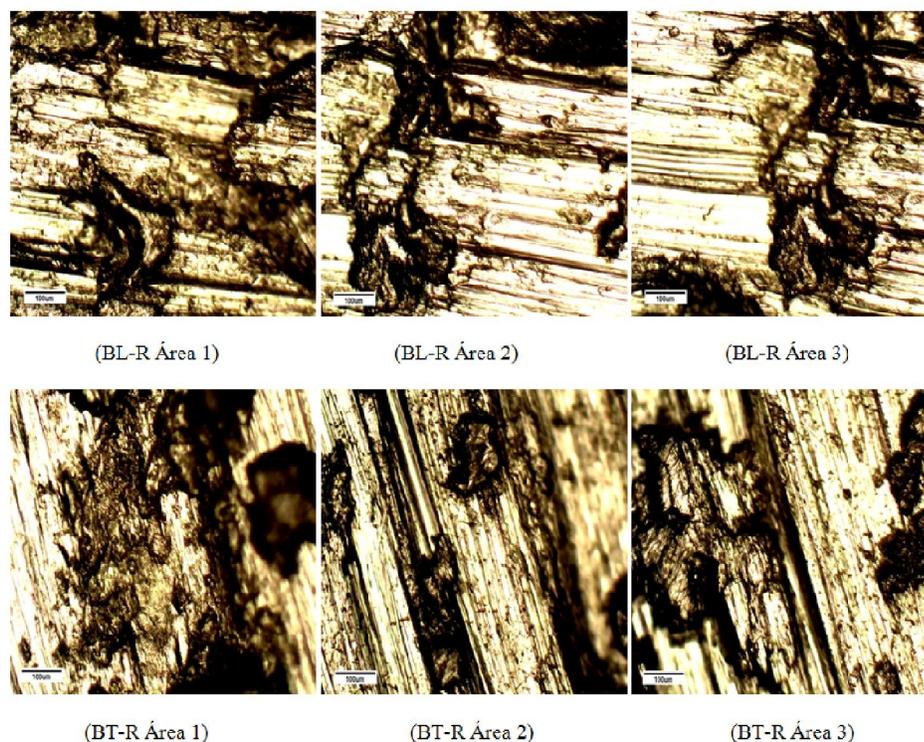


Figura 3-29: Imagens por microscopia óptica das chapas de Titânio.

Tabela 3-6: Medidas de rugosidade micrométrica ( $\mu\text{m}$ ).

Amostra	Área	Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )			Médias ( $\mu\text{m}$ )		
		Ra	Rt	Rms	Ra	Rt	Rms
AL-r	Área 1	1,52	7,39	1,74	1,30 $\pm$ 0,25	7,16 $\pm$ 0,85	1,58 $\pm$ 0,29
	Área 2	1,42	8,07	1,82			
	Área 3	0,95	6,02	1,17			
BL-R	Área 1	1,66	7,08	1,86	2,41 $\pm$ 0,63	12,26 $\pm$ 3,68	2,92 $\pm$ 0,78
	Área 2	3,20	15,31	3,71			
	Área 3	2,38	14,39	3,20			
AT-r	Área 1	1,32	9,26	1,77	1,74 $\pm$ 0,32	10,67 $\pm$ 1,00	2,16 $\pm$ 0,29
	Área 2	2,08	11,53	2,48			
	Área 3	1,83	11,21	2,24			
BT-R	Área 1	3,67	18,52	4,70	4,65 $\pm$ 0,81	19,25 $\pm$ 0,58	5,46 $\pm$ 0,62
	Área 2	5,66	19,93	6,23			
	Área 3	4,61	19,29	5,45			
ALT-r	Área 1	1,28	6,82	1,54	1,06 $\pm$ 0,17	6,49 $\pm$ 0,33	1,31 $\pm$ 0,18
	Área 2	1,04	6,61	1,26			
	Área 3	0,87	6,03	1,12			
BLT-R	Área 1	3,70	20,41	4,43	4,00 $\pm$ 0,86	19,52 $\pm$ 2,57	4,79 $\pm$ 0,99
	Área 2	3,13	16,03	3,80			
	Área 3	5,18	22,13	6,14			
ATT-r	Área 1	1,33	7,02	1,62	1,84 $\pm$ 0,61	9,85 $\pm$ 3,06	2,22 $\pm$ 0,69
	Área 2	1,49	8,42	1,85			
	Área 3	2,70	14,10	3,19			
BTT-R	Área 1	4,85	16,87	5,41	2,84 $\pm$ 1,42	11,57 $\pm$ 3,76	3,27 $\pm$ 1,51
	Área 2	1,95	8,65	2,22			
	Área 3	1,73	9,18	2,19			

### 3.6.7.2 Molhabilidade da Chapa de Titânio Puro Grau 2

Em consequência do aumento da rugosidade pelas superfícies estampadas, observa-se uma diminuição nos valores de molhabilidade ( $\theta < 60^\circ$ ) conforme tabela 3-8, tornando as superfícies mais hidrofílicas.

Tabela 3-7 Medidas de ângulos de contato.

Amostra	Área	Ângulos de contato ( $^\circ$ )		Médias ( $^\circ$ )	
		Solução KOKUBO	Solução PBS	Solução KOKUBO	Solução PBS
AL-r	Área 1	64,3 $\pm$ 1,9	64,4 $\pm$ 0,5	68,8 $\pm$ 4,5	64,8 $\pm$ 2,1
	Área 2	74,9 $\pm$ 1,7	67,6 $\pm$ 2,0		
	Área 3	67,2 $\pm$ 2,0	62,4 $\pm$ 1,1		
BL-R	Área 1	63,0 $\pm$ 1,8	61,0 $\pm$ 1,1	59,1 $\pm$ 5,2	60,0 $\pm$ 2,1
	Área 2	62,5 $\pm$ 1,7	57,1 $\pm$ 1,1		
	Área 3	51,7 $\pm$ 0,3	61,9 $\pm$ 1,2		
AT-r	Área 1	70,7 $\pm$ 0,6	65,1 $\pm$ 0,4	65,1 $\pm$ 4,2	65,7 $\pm$ 2,4
	Área 2	63,9 $\pm$ 0,8	68,8 $\pm$ 2,2		
	Área 3	60,7 $\pm$ 2,9	63,1 $\pm$ 1,2		
BT-R	Área 1	58,8 $\pm$ 1,3	60,2 $\pm$ 0,7	49,1 $\pm$ 6,9	57,5 $\pm$ 1,9
	Área 2	44,2 $\pm$ 1,7	55,6 $\pm$ 1,1		
	Área 3	44,3 $\pm$ 1,8	56,8 $\pm$ 1,8		
ALT-r	Área 1	55,0 $\pm$ 1,8	55,1 $\pm$ 0,9	51,3 $\pm$ 3,2	60,2 $\pm$ 3,6
	Área 2	51,8 $\pm$ 0,4	63,1 $\pm$ 1,2		
	Área 3	47,2 $\pm$ 0,4	62,3 $\pm$ 1,7		
BLT-R	Área 1	62,3 $\pm$ 0,6	64,7 $\pm$ 1,7	59,4 $\pm$ 2,4	73,2 $\pm$ 6,1
	Área 2	59,6 $\pm$ 1,2	76,3 $\pm$ 2,0		
	Área 3	56,4 $\pm$ 0,6	78,6 $\pm$ 1,4		
ATT-r	Área 1	36,1 $\pm$ 0,8	72,0 $\pm$ 0,8	36,2 $\pm$ 4,1	70,9 $\pm$ 2,6
	Área 2	41,3 $\pm$ 1,3	67,3 $\pm$ 0,7		
	Área 3	31,2 $\pm$ 2,0	73,3 $\pm$ 0,8		
BTT-R	Área 1	48,2 $\pm$ 1,6	80,7 $\pm$ 1,3	47,8 $\pm$ 2,1	79,9 $\pm$ 0,6
	Área 2	50,1 $\pm$ 1,6	79,9 $\pm$ 1,1		
	Área 3	45,0 $\pm$ 0,6	79,2 $\pm$ 1,1		

Plotando através de um gráfico, figura 3-30, os valores obtido na rugosidade média ( $R_a$ ) da tabela 3-6 com o ângulo de contato (molhabilidade), na solução KOKUBO e solução PBS, podemos observar a variação do ângulo de contato das soluções em relação a rugosidade da amostras obtidas.

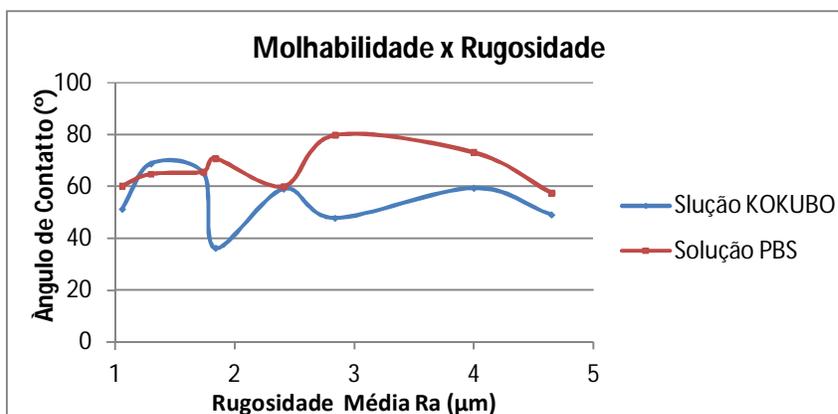


Figura 3-30: Gráfico Molhabilidade x Rugosidade.

### 3.6.7.3 Análise Química

Na figura 3-31 são apresentados os resultados de morfologia e análise superficial de elementos químicos por MEV/EDS, da amostra B (figura 3-31 – chapa sem tratamento térmico), retirada do sentido paralelo à laminação (L) e face interna (R). Todas as amostras listadas na tabela 3-6, foram analisadas. Porém, foi dado maior ênfase às análises das faces internas (de chapas com e sem tratamento térmico), pois foi onde ocorreu o contato com a ferramenta de estampagem.

No detalhe "a" observa-se o desprendimento de material do substrato (rebarbas), provocadas pela ação da ferramenta sobre a chapa. Estas rebarbas poderiam ter sido minimizadas se a rotação da ferramenta estivesse em concordância com a velocidade de avanço, ou seja, se a velocidade de avanço da ferramenta, em mm/min, combinada com sua rotação, em RPM, produzisse a rolagem de um ponto da superfície cilíndrica da ferramenta sobre apenas um ponto da superfície da chapa. Como a rotação mínima do eixo árvore da máquina CNC<sup>2</sup> utilizada era de 50 RPM, o valor ideal do avanço seria de 1.570 mm/min<sup>(3)</sup>, considerando a retificação do diâmetro da ferramenta. Nos experimentos práticos, a velocidade de avanço da ferramenta no plano XY foi de 2.000 mm/min.

Nas figuras 3-30b, 3-30c e 3-30d, a análise feita por EDS indica que não houve contaminação da chapa por outros elementos químicos. Este resultado foi possível devido a três fatores : a) utilização de ferramenta com inserto do mesmo material da chapa (Ti CP grau 2) ; b) a utilização de lubrificante à base de gordura animal e c) processo de limpeza e desengraxe.

Com relação às amostras submetidas a tratamento térmico, os resultados de MEV/EDS estão consolidados na figura 3-32. Também é visível o deslocamento de material produzido pela ação da ferramenta de estampagem. Entretanto, no detalhe (3-32 a) a superfície se apresenta sem rebarbas. As análises químicas (3-32 b, 3-32 c e 3-32 d) demonstraram os mesmos resultados das amostras “frias”, o que comprovou que a atmosfera não controlada do forno não as contaminou.

---

<sup>2</sup> Centro de Usinagem Romi Discovery D600

<sup>3</sup> Distância percorrida em XY pela ferramenta, durante 1 minuto, que é igual ao deslocamento linear (retificado) de um ponto do diâmetro da ferramenta, durante o mesmo período de tempo.

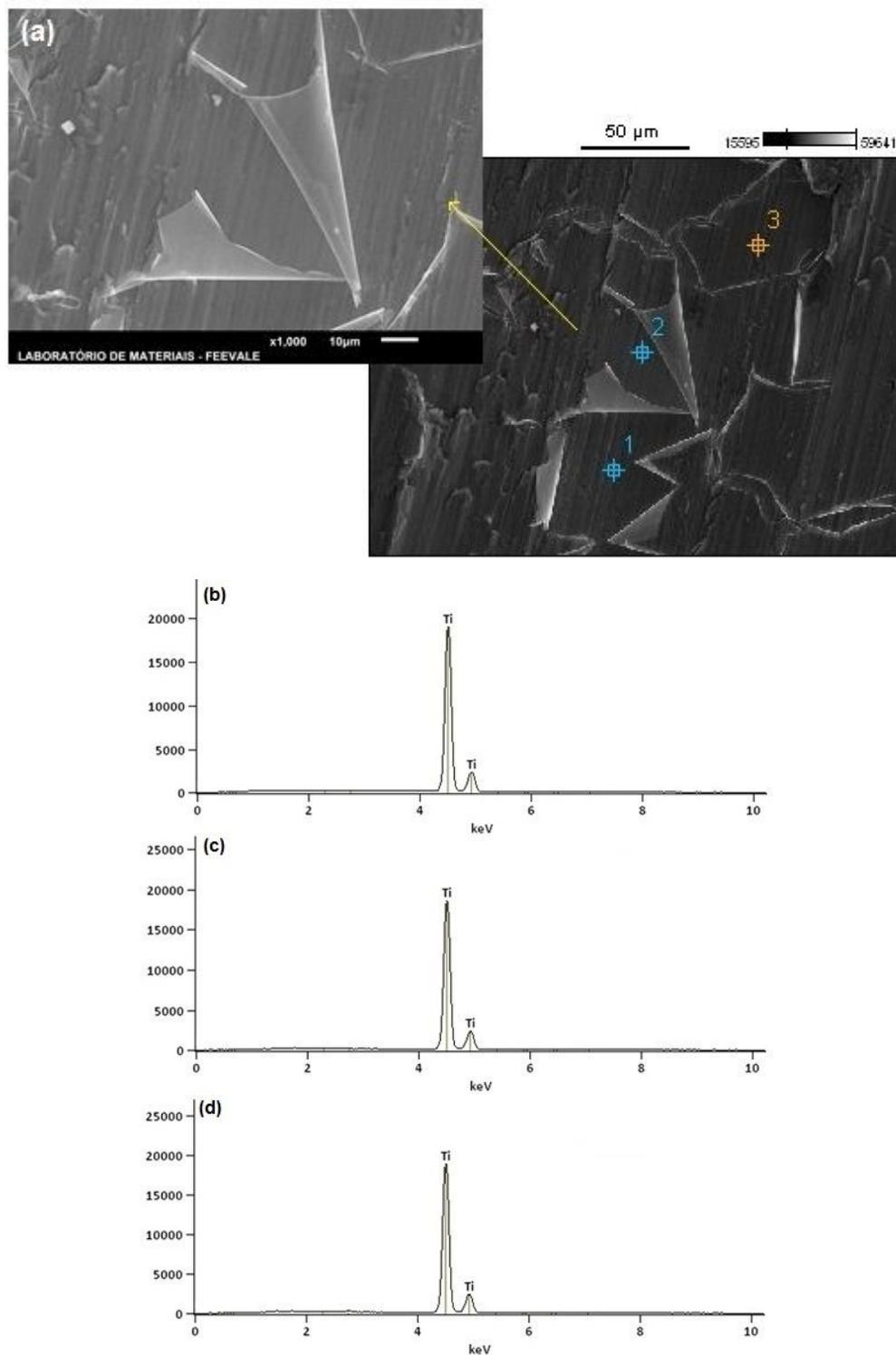


Figura 3-31: Amostra BL-R. (a) Imagem de MEV região 2, (b) Análise Pontual de EDS ponto 1, (c) Análise Pontual de EDS ponto 2, (d) Análise Pontual de EDS ponto 3.

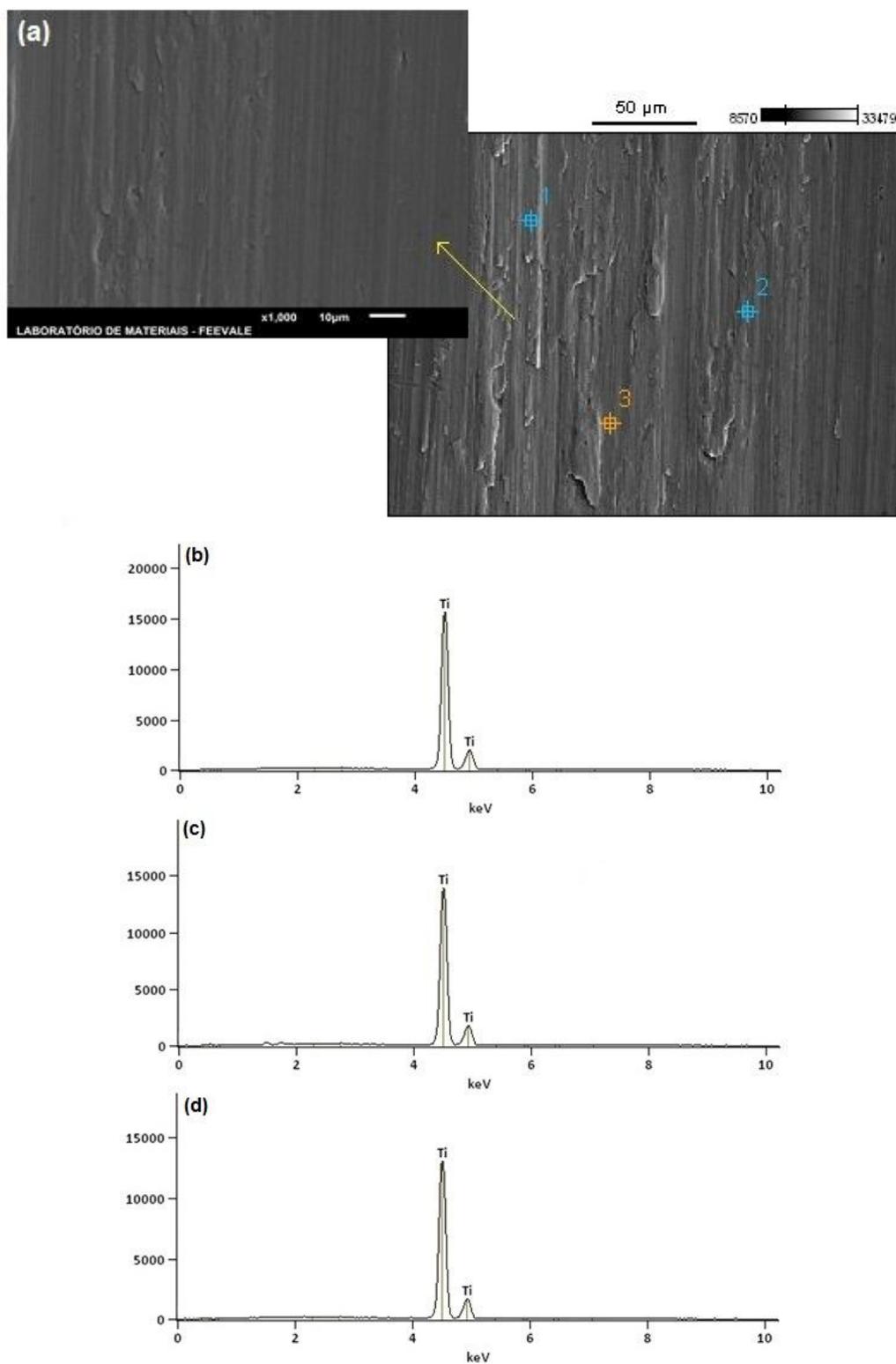


Figura 3-32: Amostra BLT-R. (a) Imagem de MEV região 1, (b) Análise Pontual de EDS ponto 1, (c) Análise Pontual de EDS ponto 2, (d) Análise Pontual de EDS ponto 3.

### 3.7 Microdureza

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado com um microdurômetro HMV micro hardness tester SHIMADZU. Foi traçado um perfil da microdureza para verificar o comportamento da dureza ao longo da espessura da chapa. As amostras foram retiradas de uma região estampada da chapa. Foi medida a microdureza a cada décimo de milímetro conforme figura 3-33.



Figura 3-33: Perfil de medição da microdureza.

As amostras foram retiradas da chapa de Ti em regiões distintas, sem estampagem e em regiões estampadas e foram separadas em amostras tratadas e não tratadas. A tabela 3-8 traz a descrição das amostras.

Tabela 3-8: Descritivo das amostras.

<b>Descrição das amostras</b>	
Amostra 1	Foi retirada da chapa de Ti sem estampagem e não foi feito o tratamento térmico de alívio de tensão.
Amostra 2	Foi retirada da chapa de Ti estampada e não foi feito o tratamento térmico de alívio de tensão.
Amostra 3	Foi retirada da chapa de Ti sem estampagem e foi feito o tratamento térmico de alívio de tensão.
Amostra 4	Foi retirada da chapa de Ti estampada e foi feito o tratamento térmico de alívio de tensão.

Após o ensaio realizado foi gerado o gráfico, figura 3-34, onde foi demonstrado o comportamento da dureza do titânio puro de grau 2.

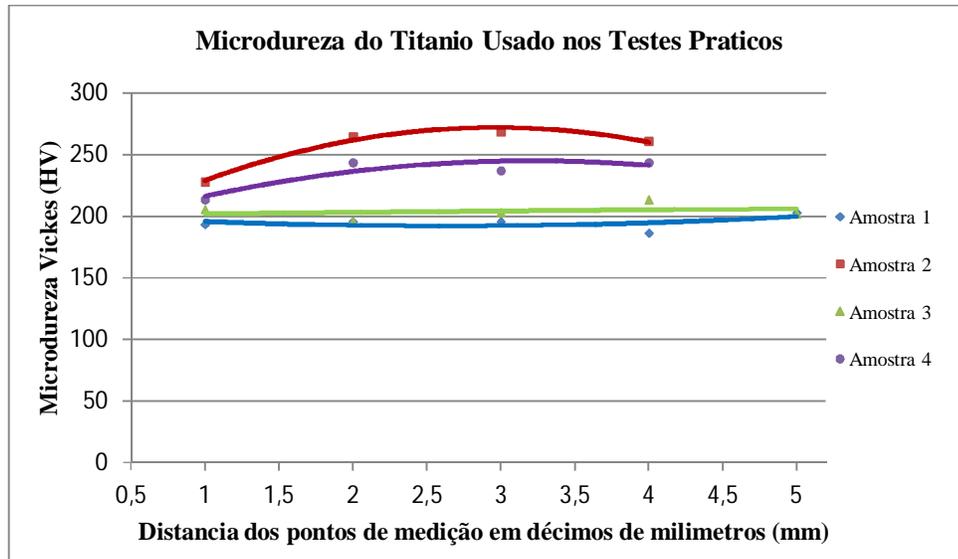


Figura 3-34: Gráfico da microdureza.

Analisando o gráfico figura 3-33 é possível perceber que nas amostras 1 e 3 o comportamento da microdureza é o mesmo, mantendo-se em média em 200 HV. Nas amostras 2 e 4 o comportamento foi diferente, na amostra 2 (chapa de titânio estampada) houve um acréscimo na dureza para 260 HV, isso ocorreu em função do encruamento da chapa durante o processo de estampagem incremental. Na amostra 4 (chapa de titânio estampada e tratada termicamente) houve um decréscimo da dureza para 240 HV em relação a amostra 2. Isso ocorreu em função do tratamento térmico de alívio de tensões. De acordo com a literatura a microdureza para o titânio puro grau 2 é 160 HV [51]. A chapa de titânio puro grau 2 adquirida para os ensaios práticos já havia uma dureza pouco maior que a da literatura 200 HV como é mostrado no gráfico figura 3-33. Castelan 2010 usou em sua pesquisa chapas de titânio puro grau 2 e encontrou uma microdureza média de 202,1 HV [17].

## 4 FABRICAÇÃO DA PROTESE EM CHAPA DE TI

A fabricação de implantes é dividida em duas etapas: modelagem e manufatura. Cada etapa tem procedimentos operacionais específicos, descritos a seguir. Também foi feita a usinagem do crânio do paciente com a perda real da massa óssea.

### 4.1 Modelagem

Modelagem, imagens DICOM referentes às seções longitudinais do crânio defeituoso do paciente, cedidos por um médico e paciente, são obtidas via tomografia computadorizada. A conversão das DICOM em arquivo vetorial CAD 3D, extensão STL, é executada no software Invesalius<sup>4</sup>. Neste estudo, 742 imagens DICOM foram processadas para gerar o sólido, mostrado na figura 4-1.

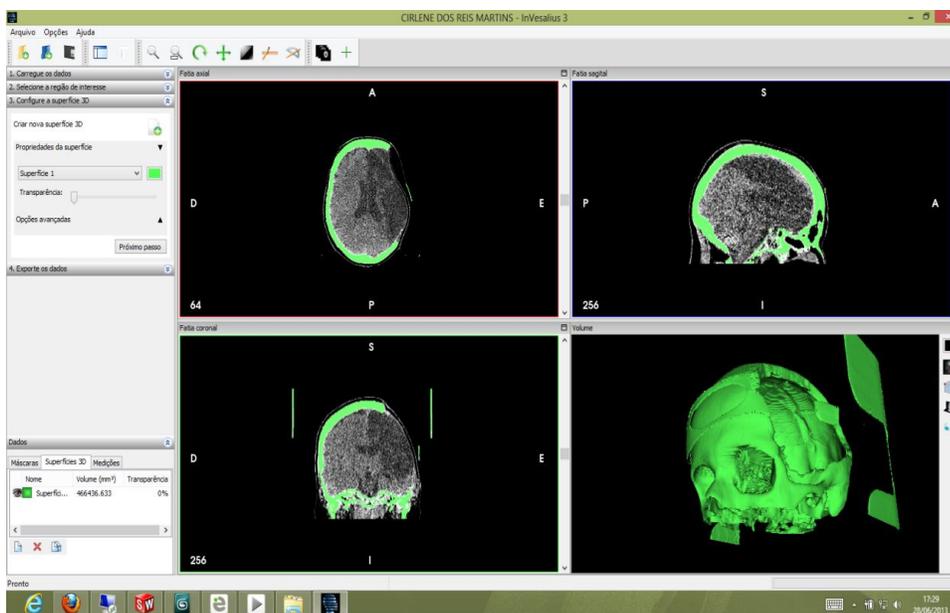


Figura 4-1: Tela do Invesalius, com o arquivo vetorial 3D gerado.

<sup>4</sup> 1 InVesalius é um software público para área de saúde que visa auxiliar o diagnóstico e o planejamento cirúrgico. A partir de imagens em duas dimensões (2D) obtidas através de equipamentos de tomografia computadorizada ou ressonância magnética, o programa permite criar modelos virtuais em três dimensões (3D) correspondentes às estruturas anatômicas dos pacientes em acompanhamento médico. O software tem demonstrado grande versatilidade e vem contribuindo com diversas áreas dentre as quais a medicina, odontologia, veterinária, arqueologia e engenharia. O programa foi desenvolvido pelo antigo CenPRA atual CTI(Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer), unidade do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), através das linguagens de programação Python e C++. Atualmente opera em GNU Linux (Ubuntu, Fedora e OpenSuse já foram testados) e Windows (XP e Vista), sendo que é licenciado pela CC-GNU GPL (Licença Pública Geral) versão 2 (em português).

O modelo digital do implante (denominado a partir daqui como ‘implante’) foi realizado no Solidworks<sup>5</sup>. Esta modelagem é feita a partir do modelo digital do crânio defeituoso (denominado como ‘modelo’), disponível na extensão STL gerado anteriormente. Os contornos periféricos (linhas de contorno do implante) são projetados baseados no perímetro geométrico da fratura. Além do contorno, outras linhas-guia são criadas, para servirem como esqueleto da superfície do implante, baseadas na simetria axial existente entre os lados esquerdo e direito do crânio. A figura 4-2 mostra o modelo do implante finalizado.

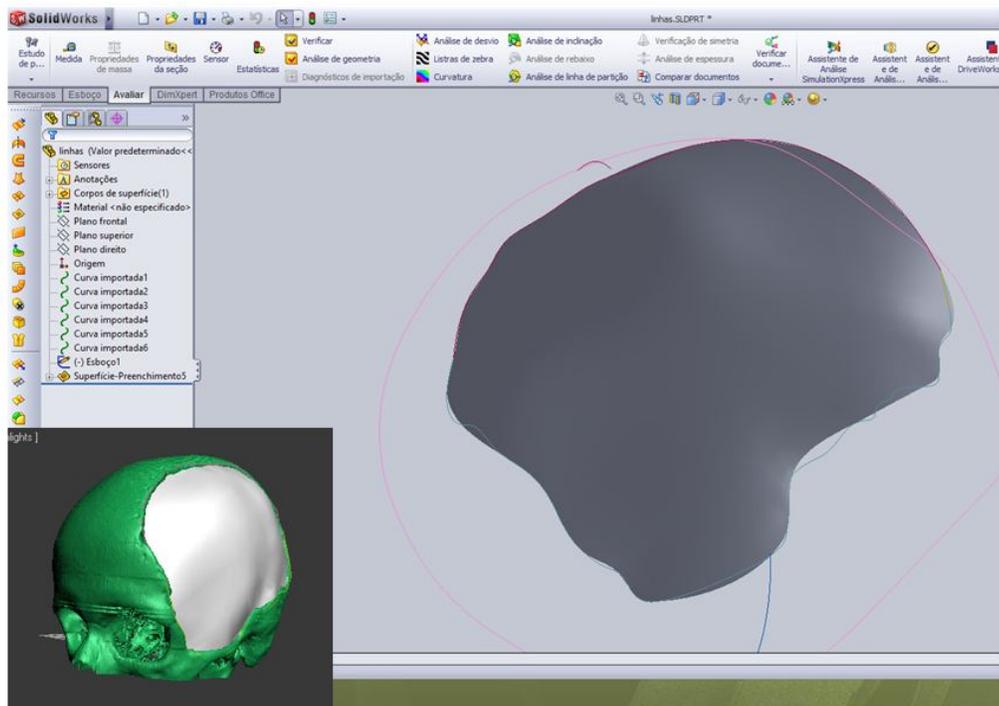


Figura 4-2: Modelo CAD 3D do implante finalizado. Para a modelagem, foram utilizados recursos avançados de modelagem de superfícies. No detalhe, a montagem implante-modelo.

## 4.2 Manufatura

O planejamento da manufatura do implante é realizado no software EdgeCAM. Este software é destinado originalmente à área da indústria de transformação metal-mecânica e a um processo de fabricação específico: a usinagem dos metais. Porém, neste estudo será utilizado para duas finalidades específicas: a usinagem do molde inferior e para a estampagem

---

<sup>5</sup> Software CAD mid-range, voltado para as áreas de design de produto e mecânica, desenvolvido pela empresa 3DS Systems, baseada em Paris/França e fornecido pela empresa SKA/São Leopoldo/RS

da chapa de titânio. Antes de enviar o arquivo CAD da superfície do implante para o ambiente CAM, é necessário gerar a região excedente de conformação, pois a estampagem incremental inicia em uma chapa plana e horizontal. Como o perímetro do implante é irregular, há a necessidade de se criar uma região que una este perímetro à uma superfície horizontal.

Com os modelos CAD 3D da superfície de estampagem e do implante definidos, inicia-se a etapa de geração da programação de manufatura. Na programação são definidas as características, velocidades e estratégias de movimentação da ferramenta. São duas programações: a primeira refere-se à usinagem do molde inferior, figura 4-3a, fabricado em polímero e que também serve para a conformação da chapa; a segunda é utilizada para fazer o recorte do implante, figura 4-3b. A tabela 4-1 indica os dados tecnológicos.

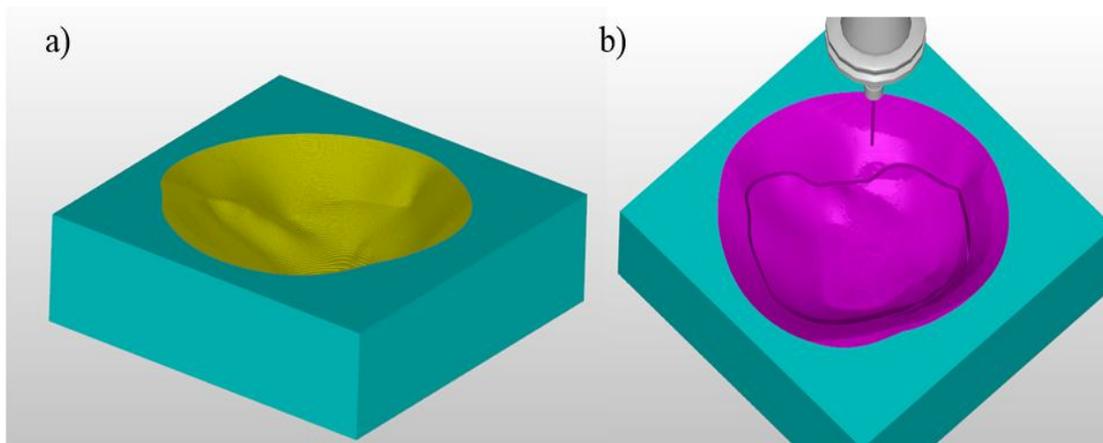


Figura 4-3: Simulações da usinagem do molde inferior de polímero (a) e da estampagem e recorte do implante (b).

Tabela 4-1: Parâmetros tecnológicos da etapa de manufatura

Processo	Operação	Ferramenta	Velocidade de avanço (eixos XY, mm/min)	Velocidade de mergulho (eixo Z, mm/min)	Rotação (RPM)	Estratégia de movimentação da ferramenta	Incremento em Z (mm)
Usinagem do polímero	Desbaste	Fresa topo Ø10	4.000	2.000	3.000	Paralela	1,0
	Acabamento	Fresa ballnose Ø8	2.000	2.000	4.000	Helicoidal	0,1
Estampagem e recorte da chapa	Estampagem	Especial* Ø10	1.500	1.500	50	Helicoidal	0,1
	Recorte	topo 4mm	1000	500	7000	Canal	1

\*Ferramenta com inserto de Ti, ponta semi-esférica, sem arestas de corte, Ø10mm.

Com as simulações prontas, são gerados os programas e transmitidos à máquina CNC<sup>6</sup> para realizar as operações. A máquina CNC Romi D 600 é originalmente destinada a usinagem dos metais e possui uma configuração robusta, para uso intensivo e produção seriada em ambiente industrial. No detalhe da figura 4-4 é mostrada a ferramenta, composta por duas peças: a haste em aço 4340 (não-biomédico) e o inserto (ponta) fabricado em titânio puro grau 2. A utilização de inserto de titânio é justificada para que elementos químicos nocivos à saúde, presentes na liga 4340 (Mn, Si, Ni, Cr), não impregnem a chapa de titânio.



Figura 4-4: Ferramenta de estampagem incremental, especialmente desenvolvida.

Outra questão importante relativa à contaminação da chapa é a lubrificação. Devido às características do processo de estampagem incremental, onde a ferramenta desliza sobre a chapa, há a ocorrência de atrito. O atrito causa o desgaste prematuro da ferramenta e o arranque de material da superfície da chapa. Assim, a lubrificação é essencial para que a ferramenta deslize e distribua a pressão de toque sobre a chapa, preservando a integridade de ambas. Lubrificantes industriais a base de compostos minerais derivados do petróleo tem excelentes propriedades. Entretanto, seus componentes químicos são nocivos à saúde (Zn, Pb, Ni Cu), impedindo seu uso neste trabalho. Assim, é necessária a utilização de lubrificantes

---

<sup>6</sup> Centro de usinagem vertical ROMI D600. Dimensões (alt/larg/prof, em mm): 2.700/2.120/2.280; Peso (Kg): 5.000; Potência total instalada (kVA): 30; Potência motor principal (CV) 25; Superfície da mesa (área de trabalho, em mm): 1.320 x 560; capacidade de armazenamento de ferremantas: 30; Rotação máxima do eixo principal (RPM): 8.000.

alternativos, de característica inerte, como vaselina, glicerina e propilenoglicol ou ainda os de origem animal, como a gordura de porcos, amplamente utilizada na usinagem de roscas internas e parafusos, com excelentes resultados funcionais.

A estampagem incremental e corte da prótese foi realizada em três etapas: primeiro foi usinado o molde negativo em P.U, (poliuretano de alta densidade), figura 4-5.

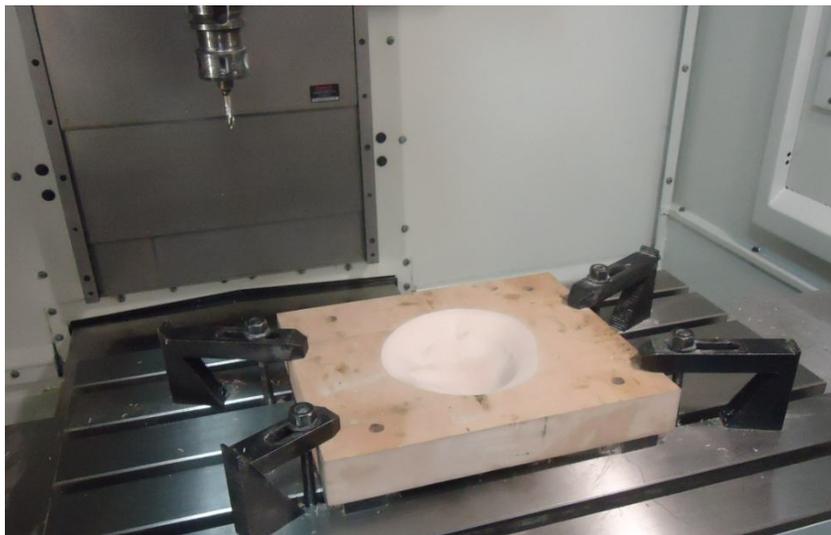


Figura 4-5: Usinagem modelo em PU.

Na segunda etapa foi feita a fixação da chapa de titânio puro F67 grau 2, através do dispositivo prensa chapas e realizada a fabricação da prótese, figura 4-6. Foi usado como lubrificante gordura de origem animal, (banha de porco).



A



B

Figura 4-6: Estampagem Incremental, A) Fixação da chapa e lubrificação usada, B) Processo de estampagem.

O corte da prótese foi realizado na terceira etapa, na mesma máquina CNC que realizou a estampagem incremental. A fresa de topo de diâmetro 4mm seguindo uma trajetória criada pelo CAM faz o corte da prótese no formato anteriormente definido na modelagem

CAD, conforme figura 4-7. Para evitar que a prótese sofresse deformação pela ação da ferramenta durante o corte foi necessária a fixação da mesma com parafusos.

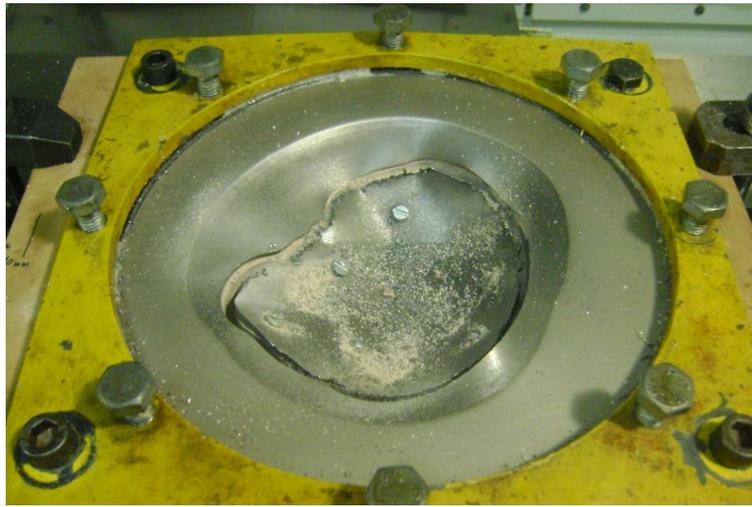


Figura 4-7: Corte da prótese.

Durante a retirada da prótese foi detectado o retorno elástico, conforme figura 4-8. Este retorno elástico inviabilizou o uso da prótese, pois deformou completamente o formato final da peça.



Figura 4-8: Retirada da prótese.

Foram feitos teste de estampagem da mesma prótese com as mesmas característica do teste anterior, antes de cortar a prótese a chapa de titânio foi tratada termicamente, figura 4-9, para eliminar tensões residuais do processo de estampagem e assim minimizar o retorno elástico e possivelmente viabilizar o processo.

O tratamento térmico realizado foi o tratamento de alívio de tensões, onde a peça foi levada a um forno tipo mulfla, com atmosfera sem controle. O processo foi feito com uma rampa de aquecimento de 2 horas até o forno atingir a temperatura de 500 °C, esta temperatura foi mantida durante 4 horas e foram 18 horas para resfriamento, totalizando 24 horas de tratamento térmico para a peça, figura 4-9.

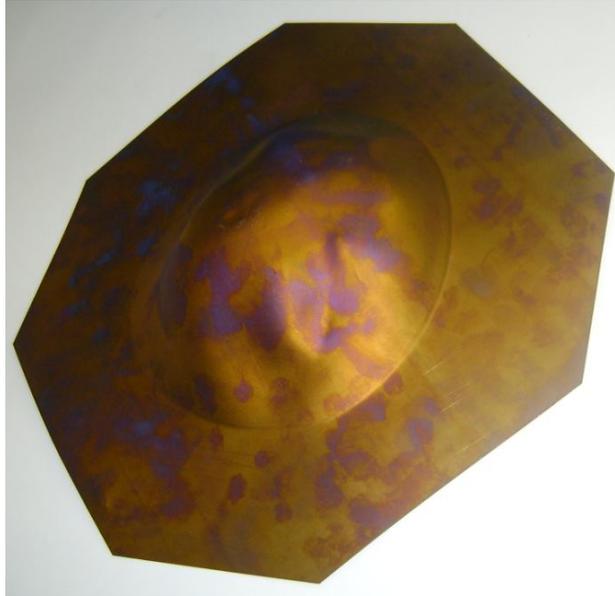


Figura 4-9: Chapa de titânio estampada e tratada termicamente.

Após o tratamento térmico a peça foi montada no suporte prensa chapas usado anteriormente para fazer a estampagem incremental e foi feito o corte da prótese, figura 4.10.



Figura 4-10: Corte da prótese chapa tratada.

#### 4.2.1 Manufatura do Crânio Com as Medidas Reais do Paciente

Através da imagem extraída na tomografia computadorizada foi possível gerar em softwares CAD um biomodelo do crânio do paciente que perdeu parte da camada óssea. O protótipo do crânio foi usinado em madeira, para fazer os testes probatórios da prótese e obter com antecedência parâmetros e dados necessários para o bom andamento e agilidade na cirurgia de implante.

Para fazer a usinagem do crânio em madeira foi necessário bipartir o modelo CAD, figura 4-11, e fazer a adaptação na qual fosse possível realizar a usinagem no mesmo centro de usinagem CNC.

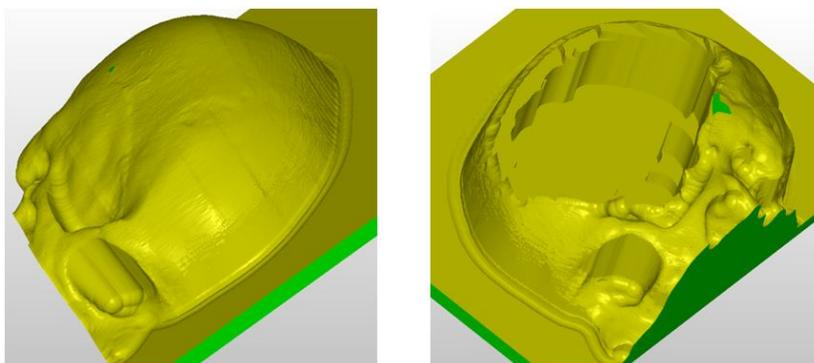


Figura 4-11: Modelo bipartido para usinagem.

O crânio foi usinado em duas etapas, conforme figura 4-12.



Figura 4-12: Manufatura do crânio em madeira.

### 4.3 Planilha de Custo da Prótese – Processo de Fabricação

Para a fabricação da prótese conforme a proposta deste trabalho, foram necessários os recursos citados na tabela 4-2. Foram adquiridos itens para o processo de estampagem incremental, usinagem do ferramental envolvido, custo de projeto da prótese, programação CAM, matéria prima para ferramental e estampagem, hora homem máquina, custo com análises laboratoriais.

Tabela 4-2: Planilha de custos para fabricação da prótese por estampagem incremental.

Itens	Quantidade	Descrição do produto/serviço	Valor Unitário em reais R\$	Valor total em reais R\$
01	1peça	Chapa de titânio comercialmente puro grau 2. Dimensão 0,5 x 300 x 300mm	210,00	210,00
02	1peça	Ferramenta para estampagem incremental com inserto de titânio	500,00	500,00
03	1peça	Placa de P.U para matriz inferior	250,00	250,00
04	1 kg	Gordura animal (banha de porco)	10,00	10,00
05	1peça	Fresa de topo diâmetro 20mm com pastilhas intercambiáveis	500,00	500,00
06	1peça	Fresa de topo diâmetro 10mm em aço rápido	90,00	90,00
07	1peça	Fresa de topo diâmetro 10mm com ponta redonda	250,00	250,00
08	1peça	Fresa de topo diâmetro 6mm com ponta redonda	185,00	185,00
09	1peça	Fresa de topo diâmetro 4mm	120,00	120,00
10	1 peça	Madeira especial para usinagem	150,00	150,00
11	50 horas	Projeto CAD da prótese a partir das imagens tomográficas.	250,00	12.500,00
12	80 horas	Desenvolvimento do processo e engenharia (usinagem, CAM, tratamento térmico, ensaios e análises) estudos relacionados.	200,00	16.000,00
13	20 horas	Set-up de Ferramentas, Usinagem e Estampagem.	180,00	3.600,00
14	1 peça	Tratamento Térmico	700,00	700,00
15	3 ensaio	MEV/EDS	250,00	750,00
16	3 ensaio	Rugosidade	180,00	540,00
17	_____	Materiais diversos (parafusos, porcas, elementos de fixação, etc...)	250,00	250,00
			<b>Valor total</b>	<b>36.605,00</b>

Os valores contidos na tabela 4-2 são referentes a orçamentos realizados para este estudo com valores em reais e praticados na região de sul do estado de S.C.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Resultados observados nas análises feitas a partir das amostras retiradas de peças e próteses estampadas em titânio comercialmente puro grau 2.

### 5.1 Contaminação Química

Conforme pode ser observado pelas análises de EDS (figuras 3-30 e 3-31), não foi detectado para nenhuma das amostras a presença de outros elementos químicos diferentes do Ti. Isso indica que não ocorreu a incorporação de componentes do lubrificante à chapa de titânio CP grau 2. Da mesma forma, a possível presença de elementos químicos contidos na atmosfera do forno, oriundos de atividades anteriores associados ao tratamento térmico de aços (Fe, Cr, Mn, Si), não foi detectada. Portanto, o processo de limpeza e desengraxe citado no item que descreve a preparação das amostras se mostrou eficiente.

### 5.2 Rugosidade

Conforme a tabela 3-6, os valores médios de  $R_a$  indicam que a região interna (onde houve o contato com a ferramenta) apresentou valores maiores do que a superfície externa. A média dos  $R_a$  internos foi de  $3,47\mu\text{m}$ , enquanto o externo foi de  $1,48\mu\text{m}$ . Pesquisas na literatura - Rosa e Beloti (2003), Zhu et al (2004), Bigerelle (2002) e Ponsonnet (2003) indicam a rugosidade em torno de  $1\mu\text{m}$  como a ideal para promover a osteogênese. O valor do  $R_a$  interno é afetado pela velocidade de avanço da ferramenta (F). No presente trabalho, o valor de F foi de  $2.000\text{ mm/min}$ , promovendo a passagem de mais de um ponto da ferramenta sobre o mesmo local da chapa. Isto promoveu o aumento do atrito e, conseqüentemente o aumento da rugosidade. A utilização do valor de  $1.570\text{ mm/min}$  poderá contribuir para a diminuição da rugosidade, já que faz uma concordância entre os movimentos de rotação e translação da ferramenta.

Comparando-se as rugosidades das chapas frias e tratadas termicamente, os valores médios de  $R_a$  foram  $2,52$  e  $2,43\mu\text{m}$ , respectivamente. Isto mostra que o tratamento térmico contribuiu para a diminuição da rugosidade. Lin 2014 em seus estudos obteve melhores resultados com superfícies super-hidrofílicas em rugosidades mais altas [62].

### 5.3 Molhabilidade

A molhabilidade média das faces externas (letras “r” minúsculas), em solução KOKUBO foi de aproximadamente 55°; as faces internas (letras “R” maiúsculas) apresentaram um ângulo próximo de 54°. Isto mostra que os dois lados são caracterizados como superfícies hidrofílicas, ou seja, que tem a capacidade de absorção física. Na absorção física, os fluídos corpóreos ficam retidos à superfície do implante, contribuindo para a aposição óssea e para a fixação, crescimento e proliferação de células – principais fenômenos da osteogênese.

Comparando os valores médios de molhabilidade entre as amostras frias e tratadas termicamente, temos os valores em torno de 60° e 49° respectivamente, indicando que o tratamento térmico contribuiu para aumentar a característica hidrofílica da superfície.

A característica hidrofílica pode ser melhorada segundo Lin 2014, [62], com a aplicação de tratamentos superficiais. Em seu estudo foram testados quatro tipos de tratamentos superficiais no implante de titânio, figura 2-31. A figura 2-31 D mostra a estrutura nano/micro de TiO<sub>2</sub> com preparação superficial por tratamento hidrotérmico alcalino, onde o resultado encontrado foi uma superfície super-hidrofílica formando o menor ângulo de contato, indicando a melhor molhabilidade.

A modificação eletroquímica da superfície pode tornar-se uma abordagem poderosa para melhorar implantes de metal para integração óssea em aplicações ortopédicas [62].

### 5.4 Comparação Entre CLC e Deformações por Estampagem Incremental

Foi gerado um gráfico com a curva CLC do titânio e os pontos correspondentes a deformação gerada pela estampagem incremental do titânio, conforme mostrado na figura 5-1.

A curva CLC gerada para chapa de titânio comercialmente puro usada nos testes práticos para fabricação da prótese ficou muito próximo com as curvas encontrada na literatura conforme figura 2-38, Bertol [75] e figura 2-40, Lopes [1].

Fazendo uma análise com as deformações obtidas por estampagem incremental figura 5-1, foi observado que os pontos no gráfico representando a ISF a 45° e 47° de ângulo de inclinação de parede, estão todos abaixo da linha correspondente a CLC e as ISF com ângulo de inclinação de parede 50° onde na estampagem incremental houve a ruptura da chapa os pontos ficam próximos e acima da linha da CLC.

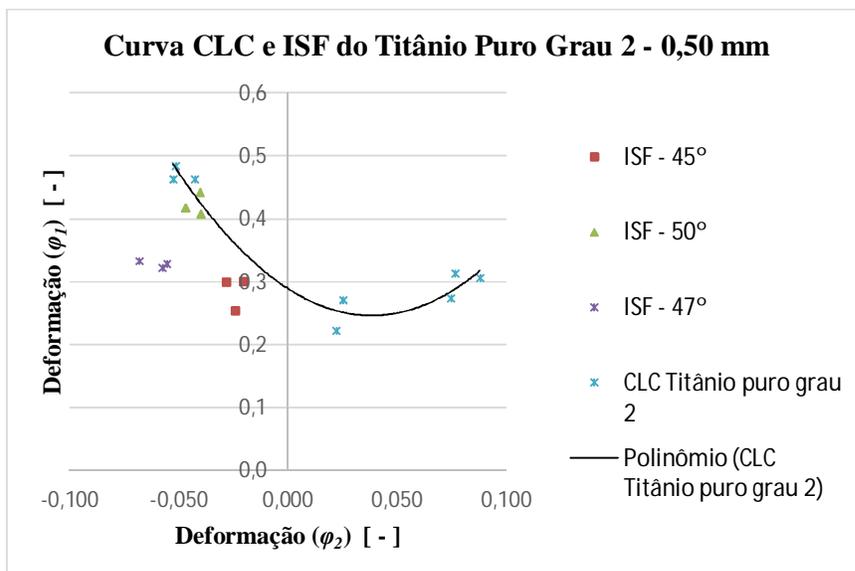


Figura 5-1: CLC e ISF (incremental Sheet forming) plotada no gráfico – chapa de Titânio.

### 5.5 Comparação Física da Prótese Estampadas

Após finalizado o processo de produção das prótese foi possível verificar o formato final das mesmas, figura 5-2. A prótese figura 5-2 A, possui visivelmente a forma geométrica conforme projetada em modelo CAD, isto devido ao tratamento térmico realizado antes do corte. A prótese figura 5-2 B, esta visivelmente deformada isso devido ao retorno elástico gerado pelas tensões residuais do processo de estampagem incremental.

Göttmann, afirma que normalmente, após a conformação a frio do titânio, um tratamento térmico ou dimensionamento quente é necessário para minimizar o retorno elástico e aumentar a precisão geométrica [48].

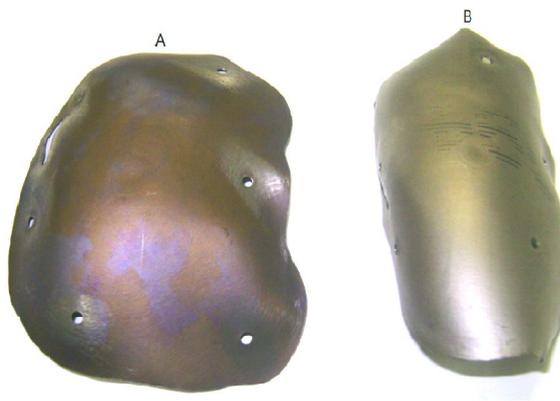


Figura 5-2: Próteses finalizadas.

O corte final da prótese sem deformação, só foi possível após o tratamento térmico de alívio de tensões, feito logo após a estampagem incremental. Isso minimizou as tensões residuais, mantendo as dimensões conforme o projeto.

### 5.6 Montagem da Prótese no Modelo do Crânio Usinado em Madeira

A figura 5-3 apresenta a montagem da prótese no modelo do crânio fabricado por usinagem em madeira e pode-se verificar o ajuste entre os perímetros da fratura e do implante e também a semelhança geométrica entre o perfil original (lado esquerdo) e o perfil do implante (lado direito). Estas duas características influenciam a funcionalidade e a estética, respectivamente.

A fabricação do modelo do crânio em madeira foi feito por usinagem e garante uma fidelidade dimensional na casa de 0,2mm, com um custo baixo. Este modelo do crânio é usado pelo médico para planejar, mostrar e explicar ao paciente o processo cirúrgico, bem como a geometria e simetria final da cabeça com a prótese fixada. Com isto o paciente e médico mesmo ante da cirurgia podem visualizar o resultado e a satisfação de ambos é grande em relação aos métodos empregados.

Em consulta com o neurocirurgião Dr. Sandro de Medeiros (Hospital São José, Criciúma, Santa Catarina), foi possível perceber a satisfação do mesmo em poder planejar e visualizar a cabeça e o implante fixados antes da cirurgia. Isto é com certeza um grande avanço tecnológico para a medicina, se comparado ao método antigo de corte e preparação da prótese, que era realizado durante a cirurgia.



Figura 5-3: Montagem implante-modelo. O modelo em madeira foi pintado. A chapa de titânio foi presa ao modelo por meio de parafusos.

A partir do modelo virtual da “cabeça” do paciente, é feito o crânio modelo, em polímero, com o apoio de uma impressora “3D” (prototipagem rápida), um equipamento capaz de produzir um modelo tridimensional por meio de sucessivas camadas de material. Este modelo do crânio é usado pela equipe médica para avaliar a prótese e para o planejamento do procedimento operatório, o que ajuda a reduzir o tempo da operação e evitar eventuais complicadores, como potenciais dificuldades para a fixação da peça, conforme figura 5-4, [80].

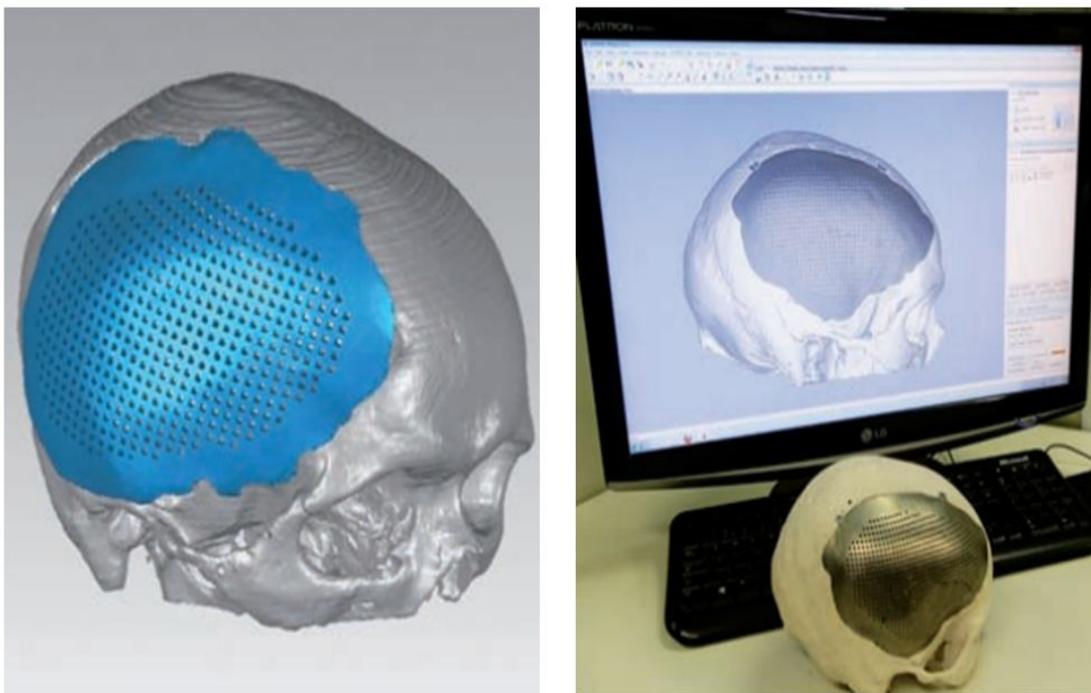


Figura 5-4: Uma prótese de titânio pronta, acoplada em um modelo de crânio [80].

Com a impressão 3D é possível reconstruir o crânio do paciente, praticamente uma escultura digital. Nessa etapa, comparando o lado sadio com a parte afetada, os pesquisadores conseguem criar uma prótese com dimensão e formato mais adequados, preservando a aparência e recuperando a função original de proteção ao cérebro [80].

### 5.7 Retorno Elástico na Prótese

No processo de estampagem incremental, o retorno elástico após a passagem da ferramenta de corte, provoca discrepâncias dimensionais entre o modelo em CAD e a peça final. A figura 5-5 mostra as dimensões CAD e o modelo formado pela nuvem de pontos

coletados por escâner. Foi feita uma montagem do modelo CAD e do modelo gerado pelo escâner, no próprio software do equipamento e foi possível visualizar a discrepância geométrica. A peça em verde é a prótese estampada e a parte vermelha é a nuvem de pontos.

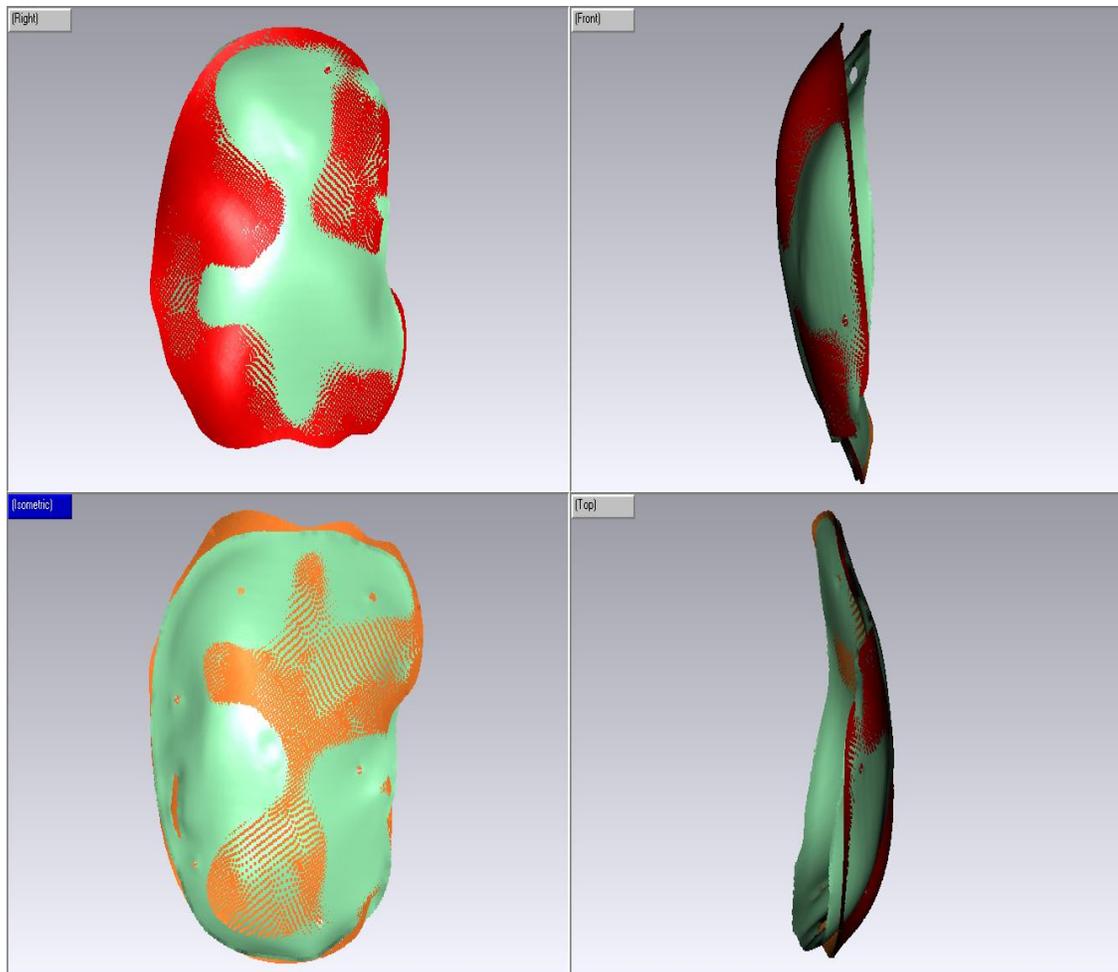


Figura 5-5: Medição da prótese por escâner.

A diferença máxima entre os dois modelos, apresentados na figura 5-5, não comprometem a eficiência do implante. A utilização de apoio inferior em polímero, com o formato específico do implante, contribui para que a discrepância dimensional entre modelo CAD e peça não comprometa sua estética e funcionalidade.

A discrepância geométrica indicada na figura 5-6 em azul e amarelo foi no máximo de 3,5 mm nas extremidades da prótese, isso ocorreu devido a ferramenta de usinagem durante o corte, que desloca as extremidades cortadas para o centro da prótese.

Outro problema foi a rebarba gerada pelo processo de corte, que por se tratar de chapa fina a remoção do mesmo contribuiu para mudança no dimensional da prótese.

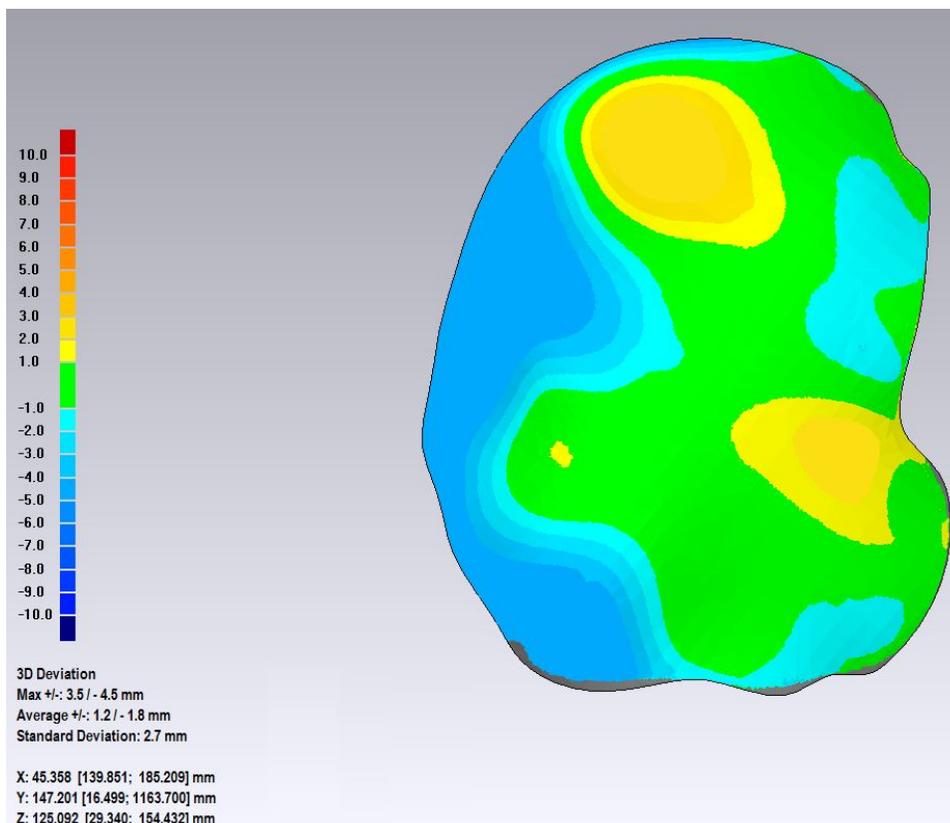


Figura 5-6: Comparação entre o modelo CAD e a prótese.

Para comprovar o resultado obtido na medição por escâner foi feito a modelagem da prótese no Solidworks utilizando a nuvem de pontos coletada pelo escâner. Após gerado os dois modelos eles foram sobrepostos, figura 5-7, e foi feita a análise dimensional. Na cor verde esta sendo mostrado o desenho CAD da prótese e na cor rosa as dimensões da peça (nuvem de pontos). O resultado obtido na análise foi uma discrepância dimensional máxima de 3,5mm.

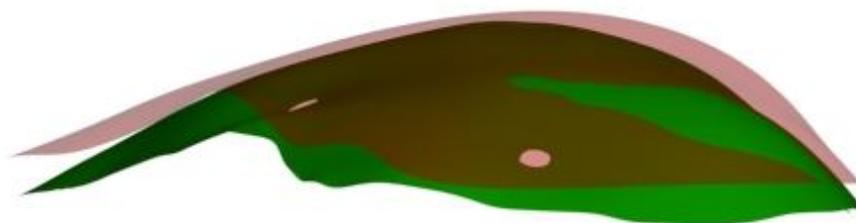


Figura 5-7: Medição com Solidworks.

### 5.8 Análise Dimensional na Ferramenta de Ponta Esférica de Titânio

Foi feita a verificação das dimensões da ferramenta desenvolvida em titânio para a estampagem da prótese. Após ser realizada a estampagem da prótese com lubrificação através de gordura animal (banha de porco), foi feita uma medição da ponta da ferramenta para verificar se houve desgaste na mesma.

O controle dimensional foi feito através do microscópio digital com resolução de 0,01mm. Após o posicionamento da ferramenta foi retirada uma foto e em seguida com o auxílio do próprio software do microscópio foi feita a medição, conforme figura 5-8, o resultado obtido foi 0,216mm.

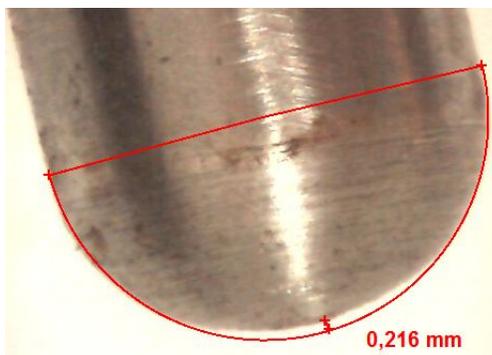


Figura 5-8: Desgaste da ponta da ferramenta.

O desgaste da ferramenta mostrado na figura 5-8 é resultante da estampagem incremental de seis próteses. Então para estampar uma prótese o desgaste da ferramenta é de 0,036mm, este desgaste não influencia nas dimensões finais da prótese.

Göttmann, utilizou em suas pesquisa uma ferramenta de ponta esférica com o diâmetro de 30 mm, que foi produzida a partir de plástico duro GESADUR WN (Sachsenröder GmbH, Wuppertal, Alemanha), [48].

### 5.9 Comparação de Custo da Prótese

De acordo com o neurocirurgião Dr. Sandro de Medeiros (Hospital São José, Criciúma, Santa Catarina), responsável pela cirurgia do implante craniano com as mesmas características do implante usado nesta pesquisa, (as dimensões obtidas por imagem tomográfica usadas neste estudo foram de uma paciente de Criciúma que sofreu um edema cerebral, e por conta deste edema teve que utilizar uma prótese fabricada em titânio pelos

métodos tradicionais). A mesma prótese foi produzida por estampagem incremental, com imagens tomográficas cedidas pelo médico e paciente.

A prótese fabricada em titânio pelo processo tradicional (usinagem a partir de bloco maciço de titânio) custou R\$ 92.000,00, mais os suportes de fixação e parafusos tudo em titânio. Ainda de acordo Dr Sandro de Medeiros, o custo dos implantes cranianos fabricados em polímero biocompatível ou titânio pode chegar R\$ 90 – 100.000.00, dependendo da área, forma e processo de fabricação (moldagem ou usinagem de um bloco sólido).

Neste estudo foi fabricado o protótipo da mesma prótese com as dimensões reais da prótese implantada e foi realizada a análise do custo aproximado. O custo da prótese fabricada pelo processo de estampagem incremental pronta é aproximadamente R\$ 36.000,00, conforme tabela 4-2. Este custo é o custo real para fabricação sem os percentuais de lucro para o fabricante.

Para efeito de análise se for estimado um lucro real de aproximadamente 100% para fabricar a prótese por estampagem incremental mesmo assim o valor de venda seria de R\$ 72.000,00, está é uma redução de custo considerável em relação ao preço da prótese fabricada pelo processo tradicional.

Silva relata em suas pesquisas que atualmente, próteses sob medida, fabricada em titânio, são produzidas apenas no exterior e com alto custo. Outras, construídas com diferentes materiais (metacrilato, cerâmica, por exemplo), no Brasil, podem custar mais de R\$ 100 mil [80].

## 6 CONCLUSÃO

Mediante os experimentos práticos, foi comprovado que é possível adaptar recursos da área de usinagem (softwares CAD/CAM, equipamentos, ferramentas e centros de usinagem CNC) para a fabricação de implantes cranianos, utilizando o processo de estampagem incremental e obtendo imagem tomográfica do crânio fraturado.

A fabricação de implantes personalizados, com as características de cada paciente gera a perfeita correção física/estética da parte óssea perdida ou danificada. O implante não gera protuberâncias ou cavidades externas no corpo, podendo fazer que sua existência passe esteticamente despercebida do ponto de vista da prótese.

A modelagem 3D do crânio e da parte fraturada é de extrema importância, pois possibilita o teste funcional antes da cirurgia de implante, podendo o médico estudar as características estéticas e funcionais da prótese. Também é possível a análise da prótese impressa em 3D com a prótese fabricada em chapa de titânio.

Durante os testes práticos foram feitos testes de estampagem incremental para verificar o ângulo máximo de estampagem para as chapas de titânio usadas na fabricação da prótese. O ângulo máximo encontrado foi de 47° para a chapa de 0,5mm. Na fabricação da prótese não foram encontrados problema quanto ao ângulo de parede.

O tratamento térmico da chapa de titânio é um recurso que contribui para a diminuição dos valores de rugosidade e ângulo de molhabilidade. Além disso, promove na rugosidade superficial características isotrópicas, ou seja, sem uma orientação definida, o que é importante para a proliferação de células em várias direções. Além das características relacionadas à osseointegração, o tratamento térmico (alívio de tensões), promove a estabilidade dimensional.

A utilização da ferramenta de estampagem incremental com ponta semi-esférica em titânio puro conservou a composição química original da chapa de titânio puro grau 2 após a estampagem incremental. Em experimento anterior foi utilizando ferramenta inteira de aço 4340, a análise de EDS indicou a presença de elementos não biocompatíveis (Cr, Mn e Si), desprendidos da ferramenta e aderidos à superfície do implante, os quais não foram removidos pelo processo de desengraxe e limpeza.

O corte da prótese foi realizado com ferramenta de usinagem e isso contribuiu para o aumento de discrepância geométrica. A ferramenta durante o corte abre um canal por onde passa seu próprio corpo e as facas de corte da ferramenta mais as rebarbas geradas deslocam a

parede da prótese para o centro da mesma. A discrepância geométrica encontrada na prótese pode ser reduzida usando corte a laser.

O lubrificante, a base de gordura animal (banha de porco), usado na estampagem incremental das chapas de titânio para fabricação da prótese mostrou-se eficiente, pois reduziu o atrito, melhorou o acabamento superficial e não contaminou a prótese conforme mostrou a análise em EDS.

O desgaste observado na ponta esférica da ferramenta fabricada em titânio comercialmente puro foi de 0,036mm, este desgaste não compromete a fabricação do implante. A ponta da ferramenta é intercambiável e pode ser trocada a cada prótese fabricada com um custo baixo.

A geração da curva CLC para o titânio é importante, pois a curva limita a zona própria para a estampagem e a zona imprópria para a estampagem. Na comparação feita com a estampagem incremental, em relação ao ângulo máximo de inclinação de parede é possível concluir que no ângulo de inclinação de parede 50° onde houve ruptura da chapa os pontos plotados no gráfico CLC ficam acima da curva, indicando que este ângulo é impróprio para a estampagem incremental.

A discrepância geométrica obtida na prótese estampada foi de 3,5mm. Esta discrepância geométrica não influencia a montagem da prótese, isto ficou comprovado na montagem feita no modelo do crânio usinado em madeira. O processo de fabricação usado nesta pesquisa é adequado para fabricação de prótese craniana, proporcionando ao paciente a proteção física e estética funcional.

Os procedimentos assépticos adotados neste trabalho foram eficientes, já que a análise EDS não indicou nenhum elemento químico além do titânio na superfície.

Analisando o custo de fabricação da prótese usado neste trabalho e comparando com o custo de aquisição atual da prótese no Brasil, é possível concluir que este trabalho de pesquisa obteve uma redução expressiva no custo final da prótese. Este é um resultado que pode contribuir para que um número maior de pacientes possa ser beneficiado.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O corte da prótese foi feito através de usinagem com uma fresa de topo, isso proporcionou uma discrepância geométrica na peça em relação ao modelo CAD da prótese. Uma possibilidade é fazer o corte da peça estampada com laser, que é uma técnica onde não tem contato com a peça durante o corte, desta forma as dimensões geométricas serão preservadas.

O tratamento térmico foi realizado na prótese com o propósito de manter as dimensões geométricas durante e após o corte, isso ocorreu, porém não foi feito um estudo e testes práticos mais aprofundados. A sugestão para um trabalho futuro é testar outras temperaturas e atmosfera controlada para fazer o tratamento térmico do titânio estampado.

Uma importante sugestão para estudos futuros é realizar o implante da prótese em animais e fazer um estudo do comportamento do implante verificando a osseointegração, crescimento celular e posteriormente implantes em seres humanos.

As tensões residuais são tensões internas do material providas muitas vezes do processo de manufatura de produtos a partir de chapas metálicas estampadas. Na estampagem incremental isso ocorre e pode ser o responsável por inviabilizar o processo. Estas tensões podem ser estudadas e minimizadas na estampagem incremental.

Um importante trabalho futuro é estudar e determinar o retorno elástico da chapa de titânio para estampagem incremental de prótese craniana. A partir deste estudo desenvolver um modelo matemático para calcular e minimizar este retorno.

Fazer testes de estampagem incremental em multi estágios na chapa de titânio para verificar a possibilidade de obtenção de ângulos maiores de inclinação da chapa na parede da peça. O ângulo máximo de inclinação de parede testado para chapa de titânio puro com 0,5mm de espessura foi de 47°. Este é um fator que dependendo da região em que se deseja obter a prótese pode inviabilizar o processo.

Uma pesquisa futura muito importante é a análise da rugosidade superficial do implante fabricado em chapas de titânio e estampado pelo processo de estampagem incremental, visando polimentos eletroquímicos que podem adequar a rugosidade ao crescimento celular.

A modificação eletroquímica da superfície do implante estampado e tratado termicamente é um importante estudo a ser realizado, para formar superfícies benéficas para vários processos biológicos que contribuam para a adsorção de proteínas; a adesão celular, o crescimento e diferenciação celular; e finalmente osteointegração.

## 8 BIBLIOGRAFIA

- [1] Lopes, Tiago. R.S. **Estampagem Incremental: Compensação do Retorno Elástico e Análise à Rotura.** vol. I, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP, p. 156, 2013.
- [2] Chulvi, V.; Sancho, A.; Cebrian, D.; Jimenez, R.; Munoz, C.; Vidal, R. **“Knowledge-based engineering in cranioplasty implant design.”** ICED 2007: Proceedings of the 16th International Conference in Engineering Design Aug. 28-31, 2007.
- [3] Sicoli, M.; Mirad, T. **“Oportunidade no Mercado Brasileiro de Produtos e Equipamentos Medicos.”** 2010. [Online]. Available: Disponível em <<http://pfarma.com.br/noticia-setor-farmaceutico/varejo-farmaceutico/353-mercado-brasileiro-produtos-equipamentos-medicos.html>>. [Acesso em 30 agosto 2010].
- [4] Eufinger, H. **“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, vol. I, n. 1281, p. 827-831, 2005.
- [5] Wei, S.; Pallavi, L. **“Recent development on computer aided tissue engineering a review.”** Computer Methods and Programs in Biomedicine, vol. I, n. 67, p. 85–103, 2002.
- [6] Singare, S.; Dichen, L.; Bingheng, L.; Yanpu, L.; Zhenyu, G.; Yaxiong, L. **“Design and fabrication of custom mandible titanium tray based on rapid prototyping.”** Medical Engineering & Physics, vol. I, n. 26, p. 671-76, 2004.
- [7] Lieger, O.; Richards, R.; Lui, M.; Lloyd, T. **“Computer-assisted design and manufacture of implants in the late reconstruction of extensive orbital fractures.”** Arch Facial Plast Surgery, p. 186-91, 2010.
- [8] Hou, J S.; Chen, M.; Pan, C B.; Wang, M.; Wang, J G.; Zhang, B.; Tao, Q.; Wang, C.; Hong-Zhang, H. **“Application of CAD/CAM-assisted technique with surgical treatment in reconstruction of the mandible.”** Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery, vol. I, n. 40, p. 432-37, 2012.
- [9] Wang, K. **“The use of titanium for medical applications in the USA.”** Materials Science and Engineering. vol. I, n. A 213, p. 134-137, 1996.
- [10] Bertol, L S.; Escobar, C F.; Kindlein Júnior, W.; Santos, L A.; Medeiros, E B.; Torriani,

- M A.; Bergmann, C. P. **“Projeto, fabricação e avaliação de implantes craniofaciais personalizados: proposta de utilização de materiais combinados.”** Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, vol. I, n. 26, p. 80-82, 2010.
- [11] Tig. **“Titanium Alloys in Medical Applications.”** 29 junho 2013. [Online]. Available: Disponível em <<http://www.titaniuminfogroup.co.uk/>>.
- [12] Azevedo, C. R. F. **“Microestrutura do titânio e suas ligas para implantes cirúrgicos.”** Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Laboratório de Metalografia e Análise de Falhas. Revista Metalurgia e Materiais, p. 445-447, 2003.
- [13] Moosruggger, C. **Atlas of Stress - Strain Curves.** 2ª Edição ed., vol. I, ASM international, 2007.
- [14] Martins, P. A. F.; Bay, M.; Skjoedt, M.; Sil, M. B. **“Theory of single incremental forming.”** CIRP Annals – Manufacturing Technology, vol. I, n. 57, p. 247-252, 2008.
- [15] Meier, H.; Magnus, C.; Smukala, V. **“Impact of superimposed pressure on dieless incremental sheet metal forming with two moving tools.”** CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011.
- [16] Daleffe, A. **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapa de Alumínio Puro.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre - RS. 2008. Dissertação de Mestrado.
- [17] Castelan, J. **Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano.** UFRGS. Porto Alegre. 2010. Tese de Doutorado.
- [18] Cavaler, L. C. D. C. **Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço Inoxidável AISI 304L.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, p. 74. 2010. Tese de Doutorado.
- [19] Amino. **Dieless NC Forming.** Amino Corporation. Fujinomiya, p. 30. 2006.
- [20] E. Leszak. **Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming.** Patent US3342051A1, 1967.
- [21] Sena, J. I. V. D. **Estampagem incremental: Um novo conceito de produção.** Universidade de Aveiro. Aveiro - Portugal, p. 102. 2009. Dissertação de Mestrado.
- [22] Lamminen, L.; Tuominen, T.; Kivivuori, S. **Incremental Sheet forming with an Industrial Robot.** Institute of Materials Engineering Australasia Ltd, p. 331-335, 2005.
- [23] Kitazawa, k.; Hayashi, S.; Yamazaki, S. **“Hemispherical stretch-expanding of aluminium sheet by computerized numerically controlled incremental forming**

- process with two path method.”** Journal of Japan Institute of Light Metals, vol. 46, 2001.
- [24] Jeswiet, J.; Hagan, E. **“Rapid proto-typing of a headlight with sheet metal, proceedings of shemet.”** April 2001.
- [25] Kim, T.J.; Yang, D.Y. **“Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process.”** International Journal of Mechanical Sciences, 2001.
- [26] Leach, D.; Green, A J.; Bramley, A.N. **“A new incremental sheet forming process for small batch and prototype parts.”** 2001.
- [27] Matsubara, S. **Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical tool.** Journal of the JSTP, vol. 35, pp. 1311-1316, 1994.
- [28] Marques, T. A. F. **Estampagem Incremental de Polímeros.** Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, p. 109. 2010. Dissertação de Mestrado.
- [29] Rodrigues, J. M. C.; Martins, P. A. F. **“Tecnologia Mecânica.”** Escolar Editora, 2005.
- [30] Franzen, V.; Kwiatkowski, L.; Neves, J.; Martins, P A.F.; Tekkaya, A. E. **“On the capability of singlepoint incremental forming for manufacturing polymer sheet parts.”** 9th ICTP – International Conference on Technology of Plasticity, 2008.
- [31] Micari, F.; Ambrogio, G.; Filice, L. **Shape and dimensional accuracy in Single Point Incremental Forming: State of the art and future trends.** Journal of Materials Processing Technology, p. 390-395, 2007.
- [32] Allwood, J. M. *et al.* **A novel method for the rapid production of inexpensive dies and moulds with surfaces made by incremental sheet forming.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 2006 220: 323, p. 323-327, 2005.
- [33] Castelan, J; Schaeffer, L; Daleffe, A. **“Desenvolvimento de produtos personalizados através de estampagem incremental para aplicação na medicina ortopédica.”** *Ferramental*, 2009.
- [34] Attanasio, A.; Ceretti, E.; Giardini, C.; Mazzoni, L. **“Asymetric two pointis incremental forming: Improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization.”** J. Materials Processing Technology, 2008.
- [35] Castelan, J.; Daleffe, A.; Schaeffer, L.; Casagrande, J.; Gruber, V.; Fritzen, D.; **“Development of Graniel Implant Through Incremental Sheet Forming For Medical Orthopedic Applications.”** International Journal of Materials Engineering and

- Technology, 2010.
- [36] Dongkai, Xu.; Weichao, Wu.; Rajiv, Malhotra.; Jun, Chen.; Bin, Lu.; Jian, Cao. **“Mechanism investigation for the influence of tool rotation and laser surface texturing (LST) on formability in single point incremental forming.”** International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. I, n. 73, p. 37–46, 2013.
- [37] Hagan, E.; Jeswiet, J. **“A review of conventional and modern single point sheet metal forming methods.”** Journal of Engineering Manufacture, 2003.
- [38] Young, D.; Jeswiet, J. **“Wall Thickness Variations in single Point Incremental Forming.”** Journal of Engineering Manufacture, vol. 217 B11, 2003.
- [39] Jeswiet, J. **“Recent results for SPIF.”** Seminar on Incremental Forming.” *Cambridge*, 2004.
- [40] Lu, B.; Fang, Y.; Xu, D.K.; Chen, J.; Ou, H.; Moser, N.H.; Cao, J. **“Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool.”** International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. I, n. 85, p. 14–29, 2014.
- [41] Hirt, G.; Ames, J.; Bambach, M.; Koop, R. **“Forming strategies and Process Modeling for CNC Incremental Sheet Forming.”** Materials Technology/Precision Forming, Saarland University, Saarbrücken, Germany. Metal Forming Institute, RVVTH Aachen, 2004.
- [42] Shim, M. S.; Park, J. J. **“The formability of aluminium sheet in incremental forming.”** Journal of Materials Processing Technology, vol. I, n. 113, 2001.
- [43] Allwood, J. M.; King, G. P. F.; Dufloy, 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. Vol 219, p. 239-244, 2004.
- [44] Bazan, O. **“Usinagem de próteses para cranioplastia a partir de imagens.”** 2004.
- [45] Cavaler, L. D. C. **“Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço Inoxidável AISI 304.”** UFRGS, Porto Alegre, 2010.
- [46] Allwood, J.M.; Houghton, N.E.; Jackson, K.P. **“The Design of an Incremental Sheet Forming Machine.”** Institute for Manufacturing, University of Cambridge, Mill Lane, Cambridge CB2 1RX, United Kingdom, 2004.

- [47] Duflou, J R.; Verbert, J.; Belkassam, B.; Gu, J.; Sol, H.; Henrard, C.; Habraken, A M. **“Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths.”** CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2008.
- [48] Göttmann, A.; Korinth, M.; Schäfer, V.; Araghi, B.T.; Bambach, M.; Hirt, G. **“Manufacturing of Individualized Cranial Implants Using Two Point Incremental Sheet Metal Forming.”** Future Trends in Production Engineering, vol. I, n. 1, p. 287-295, 2014.
- [49] Lopes, E. S. N. **Correlação entre transformações de fases e comportamento mecânico de ligas Ti-Nb-Sn e sua aplicação na concepção de implantes ortopédicos com propriedades otimizadas.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica, 2009.
- [50] Chen, Fuh-Kuo.; Kuan-Hua, Chiu. **“Stamping formability of pure titanium sheets.”** Journal of Materials Processing Technology 170, 2005.
- [51] Grandini, C. R.; Almada, L, H.; Pintão, C. A. F. **“Módulo de elasticidade dinâmico de ligas de tí usadas como biomaterial.”** 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 2006.
- [52] Jacobs, J. J.; Gilbert, J. L.; Urban, R. M. **“Corrosion of metal orthopaedic implants.”** J Bone Joint Surg. V.1, n. 8, 1998.
- [53] Ambrogio, G.; Gagliardi, F.; Bruschi, S.; Filice, L. **“On the high-speed Single Point Incremental Forming of titanium alloys.”** CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2013.
- [54] Schaeffer, L. **Conformação de Chapas Metálicas.** Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
- [55] Souza, S. A. **Ensaio Mecânico de Materiais Metálicos - Fundamentos Teoria e Prática.** 5ª Edição ed., São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1982.
- [56] Realum C. M. **“Dados técnicos do titânio.”** 2011.
- [57] 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, v. 1, p. 35 – 46, 1997.
- [58] Melo, A. L.V. **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.

- [59] Borsari, V.; Giavaresi, G.; Fini, M.; Torricelli, P.; Tchon, M.; Chiesa, R.; Chiusoli, I.; Salito, A.; Volpert, A.; Gardino, R. **“Comparative in vitro study on a ultra-high roughness and dense titanium coating.”** *Biomaterials*, vol. 26, 2005.
- [60] Burkarter, E. **“Construção de imagens por padrões hidrofóbico/hidrofílico.”** Dissertação de Mestrado em Ciências, Curitiba PR, 2006.
- [61] A. Santos. **“Efeito da oxidação anódica de titânio comercialmente puro revestido ou não com fibronectina na interface osteoblastos humanos-superfície de titânio.** Tese de Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.” 2008.
- [62] Lin, Liwen.; Wang, Hui.; Ni, Ming.; Rui, Yunfeng.; Cheng, Tian-Yuan.; Cheng, Cheng-Kung.; Pan, Xiaohua.; Li, Gang.; Lin, Changjian. **“Enhanced osteointegration of medical titanium implant with surface modifications in micro/nanoscale structures.”** *Journal of Orthopaedic Translation*, vol. 2, p. 35-42, 2014.
- [63] Allwood, J.; Jackson, K. **An introduction to incremental sheet forming in Cambridge.** CMI workshop on sandwich sheets. Cambridge, United Kingdom. 21st June 2005.
- [64] ABNT.NBR-4287. **“Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.”** Rio de Janeiro, 2002.
- [65] Piratelli F. A. **“Rugosidade Superficial.”** III Seminário Metrologia, Brasília, 2011.
- [66] Jeswiet, J.; Hagan, E.; Szekeres, A. **“Proceedings of the institution of mechanical engineers part B.”** *Journal of Engineering Manufacture*. Vol. 212. N.10, p. 1367 – 137. 2002.
- [67] Rosa, A. L.; Beloti, M. M. **“Effect of cpTi surface roughness on human bone marrow cell attachment proliferation and differentiation.”** 2003.
- [68] Zhu, X.; Chen, J.; Scheideler, L.; Reichl, R.; Geis-Gerstorfer, J. **“Effects of topography and composition of titanium surface oxides on osteoblast responses.”** 2004.
- [69] Bigerelle, M, **“Improvement in the morphology of Ti-based surfaces; a new process to increase in vitro human osteoblast response.”** 2002.
- [70] Ponsonnet, L, **“Relationship between surface properties (roughness, wettability) of Ti and Ti alloys and cell behaviour.”** 2003.
- [71] Schaeffer, L. **Conformação Mecânica.** Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

- [72] Henriques, A. D.; Assis, G. M.; Carneiro, G. C.; Batista, F. A.; Landre, J. **“Análise Comparativa Numérico-Experimental para Obtenção da Curva Limite de Conformação do Aço.”** Nono Simpósio de Mecânica Computacional, 2010.
- [73] Folle, L. F.; Arruda, R. P.; Marca, D.; Schaeffer, L. **“Escolha do lubrificante correto torna mais precisa a curva-limite de conformação.”** Corte & Conformação de Metais, Abril 2008.
- [74] Hirt, G.; Junk, S.; Bambach, M.; Chouvalova, I. e Ames J. **Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation.** Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP). Saarland University, Germany. 2003.
- [75] Bertol, L. s.; Folle, L.; Schaeffer, L.; Kindlein Júnior, W. **“Avaliação dos ângulos-limite na estampagem incremental de alumínio e titânio.”** Corte e Conformação, 2012.
- [76] Tschiptschin, A. P. **Tratamento térmico dos Aços.** 2014.
- [77] Araújo, F. A. **“Processamento e Análise de Imagens Aplicado na Caracterização de Superfícies do Titânio Submetido a um Ensaio de Cultura de Células.”** Universidade Federal do Rio Grande do Norte Centro de Ciências Exatas de da Terra - Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais - PPGCEM, Natal, 2009.
- [78] Schaeffer, L.; Rocha. **A Conformação Mecânica – Cálculos Aplicados em Processos de Fabricação.** Porto Alegre: Imprensa Livre, 2007.
- [79] ABNT, ISO 4288. **“ABNT ISO 4288 - Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade.”** 1996.
- [80] Silva, A. **“Laboratório testa próteses ‘biofabricadas’ em humanos.”** Jornal da Unicamp, p. 6-7, 26 agosto 2013.
- [81] Bambach, M.; Hirt, G.; Ames. **“Modeling of Optimization Strategies in the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process”** Proceedings of the 8th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes, 2004.
- [82] Hirt, G. *et al.* **Forming strategies and process modeling for CNC incremental sheet forming.** CIRP Annals, p. 203-206, 2004.