



**ASSOCIAÇÃO BENEFICENTE DA INDÚSTRIA
CARBONÍFERA DE SANTA CATARINA – CENTRO UNIVERSITÁRIO SATC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA
PPGEM/SATC**

CLAUBER ROBERTO MELO MARQUES

**Estudo do processo de estampagem incremental em chapas de
titânio comercialmente puro ASTM F-67 grau 2.**

Dissertação de Mestrado

Criciúma/SC

2022

**ASSOCIAÇÃO BENEFICENTE DA INDÚSTRIA
CARBONÍFERA DE SANTA CATARINA – CENTRO UNIVERSITÁRIO SATC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA
PPGEM/SATC**

**Estudo do processo de estampagem incremental em chapas de
titânio comercialmente puro ASTM F-67 grau 2.**

Clauber Roberto Melo Marques

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação Mestrado Profissional em Engenharia Metalúrgica da SATC, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Criciúma, SC

2022

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

Orientador: Anderson Daleffe

Coorientador: Daniel Fritzen

PPGEM/SATC

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Jovani Castelan (Unisatc)

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

Prof. Dr. Fabio Andre Lora (UFRB)

Suplente:

Prof. Dr. Eng. Alexandre Milanez (Unisatc)

Prof. Dr. Anderson Daleffe
Coordenador do PPGEM/SATC

Dedico a meu filho Vinícius e minha esposa Carolina, pelo inestimável apoio, paciência e incentivo durante a elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Deus por eu concluir este trabalho.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Anderson Daleffe, pelo incentivo, atenção dispensada, pelas valiosas informações técnicas e metodológicas repassadas, por todo acompanhamento nas atividades pertinentes a este trabalho, meu sincero agradecimento.

À minha esposa, Prof^a. Dra. Eng^a. Carolina Resmini Melo Marques, por ser diretamente a principal responsável pela minha qualificação profissional, pelas várias discussões acerca deste trabalho, pela paciência, motivação e compreensão das seguidas ausências de seu convívio.

Ao meu filho, Vinícius Melo Marques, por todo tempo que me mantive ausente para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Daniel Fritzen, por todas as orientações e discussões para melhoria desta dissertação.

À Unisatc, pela disponibilização de matéria-prima, máquinas e ferramentas necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação da Unisatc, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos bolsistas da Unisatc, Marcio Afonso de Souza e Gustavo Sebastião Scheffer, pelo apoio nas medições das deformações das peças estampadas.

Ao Prof. Dr. Fábio Pinto da Silva da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo processo de escaneamento 3D dos experimentos realizados.

A todos os colegas da Unisatc, que direta ou indiretamente colaboraram no desenvolvimento deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma do Trabalho.	17
Figura 2: Variantes da Estampagem Incremental de chapas.	21
Figura 3: Princípio do Processo de Estampagem Incremental.	21
Figura 4: Estampagem incremental de ponto simples sendo (a) situação inicial, e (b) situação final.	22
Figura 5: Estampagem incremental de ponto duplo, sendo: (a) uma ferramenta móvel e um suporte central; (b) uma ferramenta móvel e um suporte de matriz parcialmente positivo; (c) uma ferramenta móvel e um suporte de matriz totalmente positivo; (d) uma ferramenta móvel e um suporte de matriz totalmente negativo; e (e) duas ferramentas móveis articuláveis.	24
Figura 6: Representação esquemática do processo HISF.	25
Figura 7: a) Trajetória paralela da ferramenta b) Trajetória paralela da ferramenta ..	26
Figura 8: Exemplos de ferramentas de aço-carbono cimentadas.	28
Figura 9: Microestrutura formada por grãos alfa equiaxial em um aumento de 500X, da amostra de titânio puro (a) nacional e (b) importada.	35
Figura 10: Curva de Tensão <i>versus</i> Deformação para o titânio puro.	37
Figura 11: Curva de escoamento do Titânio CP grau 2.	38
Figura 12: Curva de escoamento representada com eixos logarítmicos.	39
Figura 13: Estruturas cristalinas do titânio, sendo (a) fase α e (b) fase β	42
Figura 14: Curvas limite de conformação na estampagem convencional e na estampagem incremental.	43
Figura 15: Dimensões esquemáticas em um ensaio de tração.	44
Figura 16: Exemplo de deformações representadas pela gravação de grade de círculos na peça.	46
Figura 17: Medição prática da deformação: (a) círculo inicial e (b) círculo após a deformação – elipse.	47
Figura 18: Tipos de deformação em chapas metálicas.	47
Figura 19: Dimensões dos corpos de prova.	51
Figura 20: Detalhamento do modelo CAD.	52
Figura 21: Vista Isométrica do modelo CAD.	53
Figura 22: (a) processo de gravação dos círculos e (b) Chapa bruta cortada, chanfrada e com os círculos gravados.	54

Figura 23: (a) Equipamentos utilizados nos experimentos e (b) ferramenta utilizada para o processo de estampagem incremental.....	56
Figura 24: Programação da estampagem incremental em software CAM.	57
Figura 25: Curva tensão x deformação dos corpos de prova 1, 2 e 3, 0° em relação ao sentido de laminação.	60
Figura 26: Curva tensão x deformação dos corpos de prova 1, 2 e 3, 45° em relação ao sentido de laminação.	61
Figura 27: Curva tensão x deformação dos corpos de prova 1, 2 e 3, 90° em relação ao sentido de laminação.	61
Figura 28: Curva de escoamento do titânio puro Grau 2, corpo de prova a 0° do sentido de laminação.	64
Figura 29: Curva de escoamento representada com eixos logarítmicos, corpo de prova 1 a 0° com relação ao sentido de laminação.....	64
Figura 30: Preparação do experimento número 1.....	68
Figura 31: Experimento 1 após a estampagem.....	68
Figura 32: Ferramenta com desgaste e ferramenta após nova usinagem.	69
Figura 33: Região de rompimento do experimento 7.	70
Figura 34: Região de rompimento do experimento 9.	71
Figura 35: Região de rompimento do experimento 10.	71
Figura 36: Região de rompimento do experimento 15.	72
Figura 37: Região de rompimento do experimento 16.	73
Figura 38: Região de rompimento do experimento 17.	73
Figura 39: Região de rompimento do experimento 18.	74
Figura 40: Gráfico comparativo do ângulo de parede vs raio de canto.	75
Figura 41: Comparação dos resultados de medição da rugosidade da superfície....	77
Figura 42: Comparação dos resultados de medição da massa.....	78
Figura 43: Resultado do escaneamento 3D.....	79
Figura 44: Sobreposição lateral do modelo CAD e escaneamento do corpo de prova do experimento 1.....	80
Figura 45: Gráfico comparativo dos deslocamentos encontrados através do escaneamento 3D.	81
Figura 46: Deformação ϕ x ponto medido a 0° em relação ao sentido de laminação no experimento número 6.	82

Figura 47: Deformação φ x ponto medido a 45° em relação ao sentido de laminação no experimento número 6.	82
Figura 48: Deformação φ x ponto medido a 90° em relação ao sentido de laminação no experimento número 6.	83
Figura 49: Deformação φ x ponto medido a 0° em relação ao sentido de laminação no experimento número 8.	84
Figura 50: Deformação φ x ponto medido a 45° em relação ao sentido de laminação no experimento número 8.	84
Figura 51: Deformação φ x ponto medido a 90° em relação ao sentido de laminação no experimento número 8.	85
Figura 52: Curva CLC do experimento 6.	85
Figura 53: Variação da espessura nos pontos de deformação medidos no experimento número 6.	86
Figura 54: Variação da espessura nos pontos de deformação medidos no experimento número 8.	87
Figura 55: Mev e EDS da amostra da peça 6 no sentido longitudinal ao sentido de laminação.	89
Figura 56: Mev e EDS da amostra do inserto da ferramenta.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Análise química conforme certificado de qualidade do material utilizado..	51
Tabela 2: Parâmetros utilizados nos experimentos realizados.....	54
Tabela 3: Parâmetros utilizados nos experimentos.....	55
Tabela 4: Características do centro de usinagem utilizado para realizar a ISF.....	55
Tabela 5: Índices de Anisotropia.	65
Tabela 6: Resultados dos experimentos de estampagem incremental.	67
Tabela 7: Resultados da medição de rugosidade da superfície, Ra.	75
Tabela 8: Resultados da medição de massa.....	77
Tabela 9: Deformações verdadeiras de acordo com o sentido de laminação (0°, 45° e 90°) do experimento número 6.....	81
Tabela 10: Deformações verdadeiras de acordo com o sentido de laminação (0°, 45° e 90°) do experimento número 8.....	83

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Inclinação da reta gerada pela curva de escoamento plotada na escala logarítmica
Δl	Deformação Absoluta no Comprimento
Δb	Deformação Absoluta na Largura
Δs	Deformação Absoluta na Espessura
Δr	Anisotropia planar
ϵ_l	Deformação Relativa no Comprimento
ϵ_b	Deformação Relativa na Largura
ϵ_s	Deformação Relativa na Espessura
n	Grau de encruamento
φ	Deformação Verdadeira
φ_1	Deformação Verdadeira no Comprimento
φ_2	Deformação Verdadeira na Largura
φ_3	Deformação Verdadeira na Espessura
σ_e	Tensão de escoamento Convencional
σ_B	Limite de resistência ou tensão máxima
δ	Alongamento
Ψ	Ângulo De Parede
A_0	Área Inicial
b_0	Largura inicial
b_1	Largura final
E	Módulo de elasticidade
F	Força Aplicada
k_f	Varição da Tensão de Escoamento
l_1	Comprimento final
l_0	Comprimento inicial
r	Índice de anisotropia
r_m	Anisotropia Média
s_0	Espessura Inicial
s_1	Espessura Final

LISTA DE ABREVIATURAS

ISF	Incremental Sheet Forming
ASTM	American Society for Testing and Materials
SPIF	Single Point Incremental Forming
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CAM	Computer Aided Manufacturing
TPIF	Two Point Incremental Forming
CISF	Conventional Incremental Sheet Forming
HISF	Hybrid Incremental Sheet Forming
CAD	Computer Aided Design
TI CP	Titânio Comercialmente Puro
CP	Corpo de Prova
CLC	Curva Limite de Conformação
CT Satc	Centro Tecnológico Satc
LACAMI	Laboratório de Caracterização Microestrutural
LdSM	Laboratório de Design e Seleção de Materiais

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da chapa de titânio puro ASTM F-67 grau 2 para o processo de estampagem incremental de chapas (*ISF – Incremental Sheet Forming*) baseado nos parâmetros: descida helicoidal da ferramenta, ângulo de parede (Ψ) e raio de canto. Os experimentos foram realizados utilizando a estampagem incremental de ponto simples (*SPIF- Single Point Incremental Forming*). Foram realizados 18 experimentos no total, com os quais buscou-se alcançar o melhor ângulo de parede com decida helicoidal da ferramenta e avaliar a influência do raio de canto. O raio base utilizado foi de 20 mm, com este, buscou-se atingir o melhor ângulo de parede possível. A partir disto variou-se o raio para avaliar a influência deste na estampagem incremental. Para os experimentos foram utilizados os seguintes recursos: *softwares* CAD/CAM, centro de usinagem CNC com três eixos, matriz incremental, ferramenta de estampagem incremental com inserto de titânio ASTM F-137 e um dispositivo prensa chapas. Foram avaliados a rugosidade da superfície utilizando o parâmetro R_a , a alteração de massa das peças antes e após a estampagem, as deformações verdadeiras (ϕ) e a discrepância geométrica. Os resultados mostram que a estratégia de descida helicoidal da ferramenta proporcionou aumento do ângulo de parede comparado com estudos já realizados nesta área; o raio de canto influencia na discrepância geométrica e no rompimento da peça durante a estampagem. Os índices de rugosidade ficaram dentro dos valores indicados para a fabricação de próteses de titânio. Com relação a alteração de massa verificou-se que nos experimentos concluídos sem apresentar rompimento houve ganho de massa, oriundo da adesão do material da ferramenta na peça estampada.

Palavras-chave: Estampagem incremental, titânio, ASTM F67, próteses, estratégia helicoidal.

ABSTRACT

The present work aims to evaluate the behavior of ASTM F-67 grade 2 pure titanium sheet for the incremental sheet forming process based on the parameters: helical low tool's down, wall angle (Ψ) and corner radius. The experiments were carried out using single point incremental forming. A total of 18 experiments were carried out, which we sought to achieve the best wall angle with the tool's helical down Ward path and to evaluate the influence of the corner radius. The base radius used was 20 mm, this, we sought to achieve the best possible wall angle. Following the radius was varied to evaluate its influence on the incremental sheet forming. The following resources were used for the experiments: CAD/CAM software, CNC machining center with three axes, incremental matrix, a tool for incremental forming with titanium insert and a sheet-press device. The surface roughness R_a , the change in mass of the parts before and after forming, the true deformations (φ) and the geometric discrepancy were evaluated. The results show that the helical tool's down ward path provided an increase in the wall angle compared to studies already carried out in this area; the corner radius influences the geometric discrepancy and breakage of the part during forming. The roughness indices were within the values indicated for the manufacture of titanium prostheses. Regarding the change in mass, it was found that in the experiments completed without breaking, there was a gain in mass, arising from the adhesion of the tool material to the forming part.

Keywords: Incremental sheet forming, titanium, ASTM F67, prostheses, helical strategy.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS.....	10
LISTA DE ABREVIATURAS.....	11
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivos Específicos.....	18
1.2 JUSTIFICATIVA	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	19
2.2 TIPOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	22
2.2.1 Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF)	22
2.2.2 Estampagem Incremental de Ponto Duplo (TPIF)	23
2.3 TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	25
2.3.1 Ferramenta para Estampagem Incremental.....	26
2.3.2 Lubrificação	28
2.4 APLICAÇÕES DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	29
2.5 MÁQUINAS PARA ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	31
2.5.1 Centros de Usinagem e Fresadoras CNC.....	31
2.5.2 Estampagem Incremental com Robôs	32
2.6 CHAPA DE TITÂNIO PURO – TI CP GRAU 2	33
2.6.1 Micrografia	34
2.6.2 Curva Tensão Deformação x Deformação.....	35
2.6.3 Curva de Escoamento.....	37
2.6.4 Índice de Anisotropia	40
2.6.5 Propriedades Físico-Químicas.....	41
2.6.6 Propriedades Mecânicas - Estrutura Cristalina.....	41
2.7 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO – CLC.....	42
2.8 DEFORMAÇÕES NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM.....	43
2.9 RUGOSIDADE	48

2.10	DISCREPÂNCIA GEOMÉTRICA	49
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	50
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE TITÂNIO PURO ASTM F-67 GRAU 2 ..	50
3.1.1	Curva Tensão X Deformação.....	50
3.1.2	Índice de Anisotropia	51
3.1.3	Análise Química.....	51
3.2	PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL	52
3.2.1	Modelagem da forma geométrica	52
3.2.2	Preparação das peças para os experimentos.....	53
3.2.3	Parâmetros utilizados no processo de estampagem	54
3.2.4	Dispositivos utilizados nos experimentos.....	55
3.3	MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE	57
3.4	MEDIÇÃO DA MASSA	57
3.5	MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES	58
3.6	ESCANEAMENTO 3D.....	58
3.7	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROMETRIA DISPERSIVA DE ENERGIA (EDS)	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE TITÂNIO PURO ASTM F-67 GRAU 2.....	60
4.1.1	Curva Tensão X Deformação.....	60
4.1.2	Curva de Escoamento.....	62
4.1.3	Índice de Anisotropia	65
4.2	RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL	66
4.3	RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE	75
4.4	RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE MASSA.....	77
4.5	ESCANEAMENTO 3D.....	79
4.6	RESULTADO DA MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES.....	81
4.7	MEV/EDS	87
	CONCLUSÕES	91
	PESQUISAS FUTURAS.....	93
	REFERÊNCIAS.....	94

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento do mercado no sentido da personalização, a demanda criada de adaptação à introdução contínua de novos produtos exige o desenvolvimento de novas técnicas de produção de baixo custo e facilidade de implementação. Para suprir tais necessidades, o processo de Estampagem Incremental tem sido objeto de estudo, por ser um processo inovador e ainda pouco aplicado industrialmente, com os frequentes estudos relacionados a este assunto, a busca pela otimização do processo é incessante.

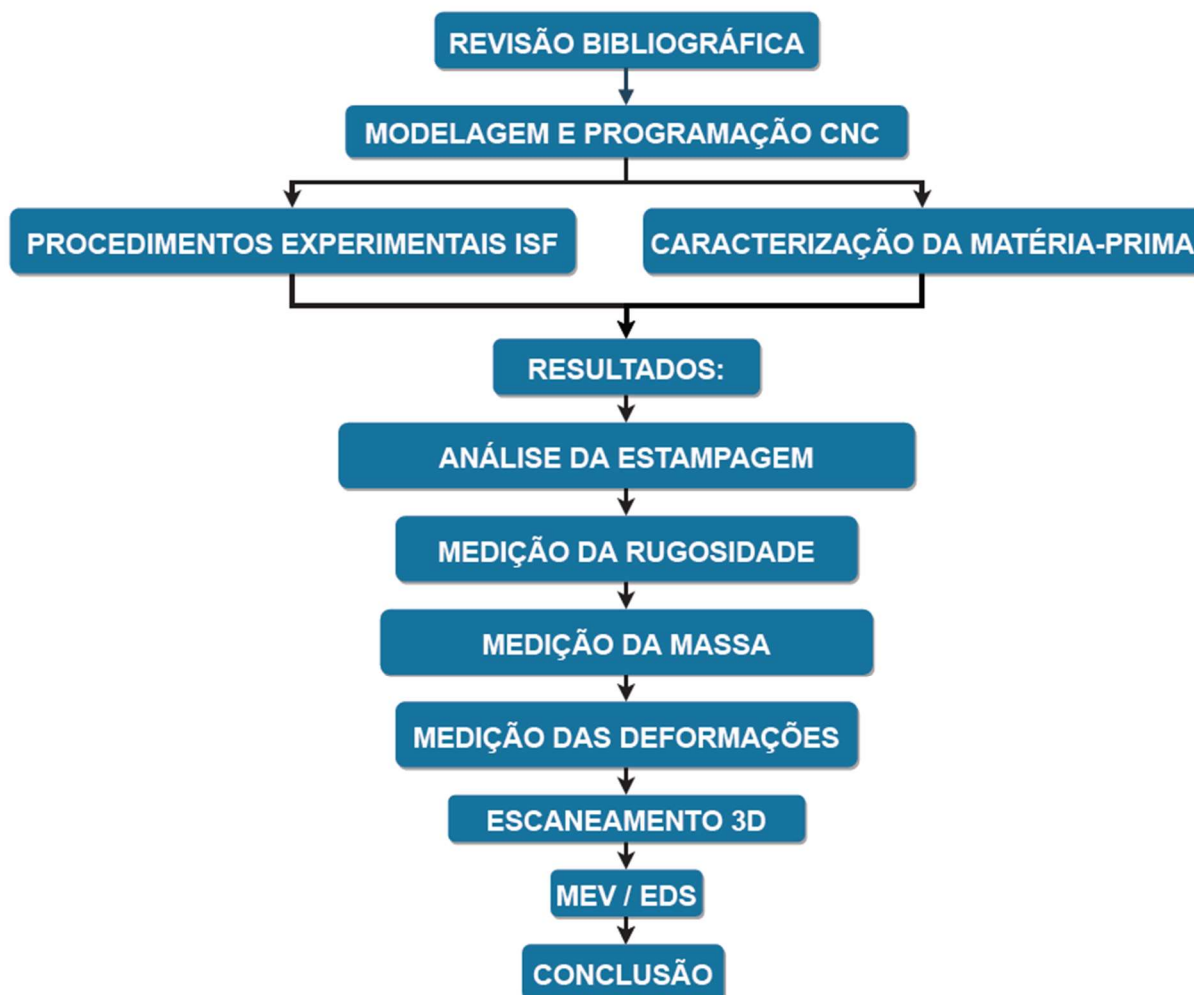
A Estampagem Incremental é um processo que tem como um de seus pontos fortes a alta customização aliada ao baixo custo, podendo realizar a conformação sem a necessidade de matrizes ou utilizando apenas matrizes de baixo custo, o que viabiliza a aplicação deste processo nas aplicações que apresentam grande variação de formatos. Sendo um forte processo a substituir os métodos tradicionais como usinagem e estampagem utilizando matrizes e prensas, processos esses que apresentam alto custo de fabricação para itens de baixa produtividade.

Inicialmente o processo de Estampagem Incremental foi aplicado principalmente na indústria automotiva, a fim de gerar prototipagem rápida de itens com geometria complexa. Com o desenvolvimento do processo outras aplicações surgiram para a Estampagem Incremental, como desenvolvimentos na área biomédica e aeroespacial[1].

O principal objetivo deste trabalho é o estudo para aumentar o ângulo de parede (ψ) durante o Processo de Estampagem Incremental de chapas - ISF (*Incremental Sheet Forming*). Castelan[2], em seus estudos, investigou a fabricação de implante craniano a base de chapas de titânio comercialmente puro por meio de processo de Estampagem Incremental. Em outra pesquisa, Daleffe [3] dedicou seus esforços na fabricação de prótese craniana personalizada em titânio puro, por meio da Estampagem Incremental. Visto os excelentes resultados alcançados nestas pesquisas, surge a possibilidade do desenvolvimento do processo de Estampagem Incremental para a fabricação de próteses para outras partes do corpo como face, mandíbula, entre outras, as quais necessitam de ângulos de parede maiores do que os necessários para as próteses cranianas.

Este estudo foi realizado conforme o cronograma apresentado no fluxograma exposto na Figura 1.

Figura 1: Fluxograma do Trabalho.



Fonte: Do autor

1.1 OBJETIVOS

Considerando o desenvolvimento do processo de estampagem incremental para aplicação na fabricação de próteses para áreas do corpo que exigem ângulos de parede maiores que 47° , o presente trabalho teve como finalidade primordial estudar o processo de estampagem incremental de chapa de titânio puro ASTM F-67 grau 2 com 0,5 mm de espessura, obtendo produtos de caráter experimental, visando obter dados relevantes para estudos futuros sobre fabricação de próteses e órteses.

1.1.1 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar a caracterização mecânica do titânio puro ASTM F-67 grau 2 para realização dos experimentos.
- ✓ Aplicar e avaliar parâmetro de descida helicoidal no processo de estampagem incremental de chapas de titânio.
- ✓ Verificar a influência de raios de canto em corpos de prova.
- ✓ Obter ângulos de parede (Ψ) (em chapas de titânio puro maiores que 47° através do processo de estampagem incremental.
- ✓ Avaliar os índices de rugosidade da superfície na peça estampada utilizando estratégia helicoidal de decida da ferramenta.
- ✓ Verificar a discrepância geométrica em peças de titânio puro ASTM F-67 grau 2 estampadas através do processo de estampagem incremental.

1.2 JUSTIFICATIVA

A comunidade acadêmica já realizou pesquisas acerca da aplicação da estampagem incremental na fabricação de próteses de titânio, comprovando a viabilidade técnica e financeira para este tipo de aplicação. Experimentos de fabricação foram realizados com sucesso na estampagem de próteses cranianas, mas com limites de ângulos de parede (Ψ) de 47° , demonstrando a necessidade de avanços nas pesquisas relacionadas à estampagem incremental de titânio puro. Possibilitar a fabricação de próteses e órteses de titânio puro grau 2 que necessitem de ângulos maiores que 47° , como as próteses bucomaxilofaciais para aplicações na região facial e mandibular, por exemplo, utilizando o processo de estampagem incremental justificam o presente estudo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica relacionada à caracterização de materiais, processo de estampagem incremental e análises realizadas com a finalidade de avaliar os parâmetros que influenciam neste processo de conformação.

2.1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL

As indústrias de estampagem de chapas metálicas frequentemente empregam diferentes métodos de conformação, os quais são baseados no uso de ferramentas com geometria precisa para as peças fabricadas. Estes métodos são normalmente empregados para produção em massa, desde que os custos destas matrizes possam ser diluídos em um grande número de peças estampadas. Entretanto, quando séries pequenas são exigidas, os métodos convencionais de estampagem baseados em matrizes, podem ser substituídos por novos métodos, desenvolvidos com objetivo de cumprir os requisitos impostos pelas indústrias que produzem pequenos lotes [4].

A indústria metal mecânica vem fornecendo opiniões desde a condição de produto final, até componentes necessários a outras atividades industriais. Deste modo, é importante observar que dentre os muitos processos usados na indústria metalmeccânica, a estampagem de chapas tem um destaque significativo nesta área [5].

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

constante de desenvolver protótipos. Os protótipos são feitos a fim de experimentar uma nova peça ou a sua funcionalidade [6].

O atual cenário mundial aponta um aprimoramento contínuo e incessante em todos os setores industriais, com a melhoria dos processos e a adaptação de novos materiais objetivando a flexibilidade, melhoria de qualidade e redução dos custos. Dentro deste viés, a ISF (*Incremental Sheet Forming*) tem ganhado muito espaço nas pesquisas a nível mundial [7].

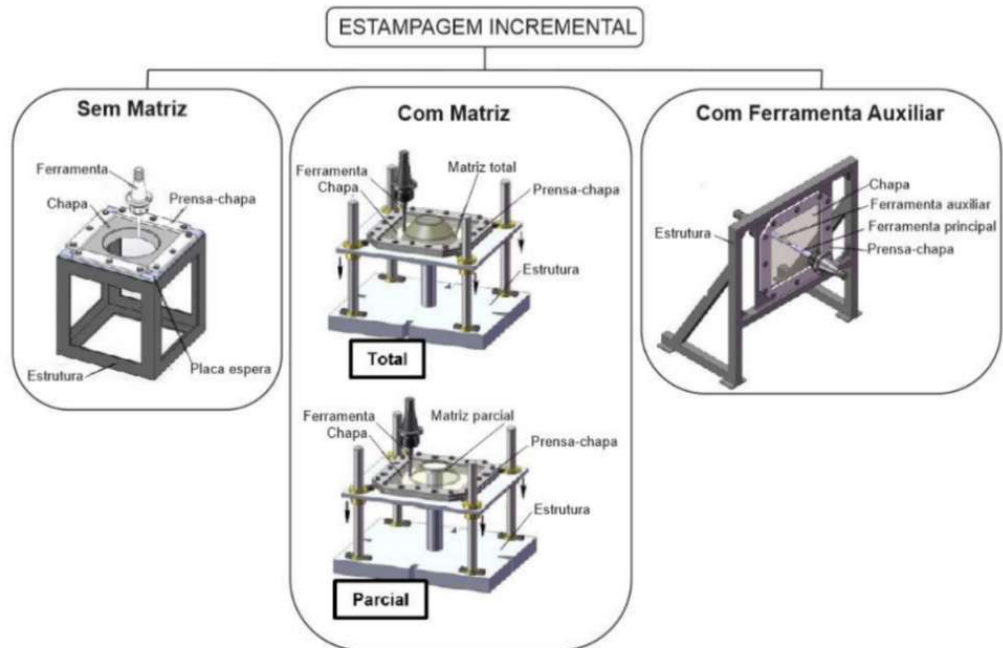
A ISF é atualmente um processo promissor no que diz respeito à conformação plástica de materiais em chapa, estando associada a novos campos de aplicação, como o caso da biomecânica e da prototipagem rápida, onde a produção em série de um produto não é a prioridade, mas sim a análise individual da peça a conceber [8].

O processo consiste na estampagem de chapas de metal de forma relativamente rápida e com razoável precisão a partir de arquivos de CAD (*Computer Aided Design*) em 3D, a trajetória da ferramenta é gerada por uma tecnologia CAM (*Computer Aided Manufacturing*) e controlada por programa CNC (Comando Numérico Computadorizado), que vai formando aos poucos a peça, através de pequenas deformações [9].

A ISF utiliza uma ferramenta semiesférica, que pode ser aplicada para vários produtos com diferentes formatos geométricos [10]. A chapa é presa sobre um dispositivo desenvolvido para esta tecnologia. A máquina usada para estampagem incremental pode ser um centro de usinagem CNC adaptado, um robô também adaptado ou máquinas desenvolvidas especialmente para a ISF [11].

Existem três variações de estampagem incremental de chapa, indicadas na Figura 2, que se denominam por estampagem incremental sem matriz, estampagem incremental com ferramenta auxiliar e estampagem incremental com matriz, sendo que a matriz pode ser parcial ou total. Em todas as variações são necessários encostadores, máquinas-ferramentas CNC, ferramentas e estruturas [12].

Figura 2: Variantes da Estampagem Incremental de chapas.

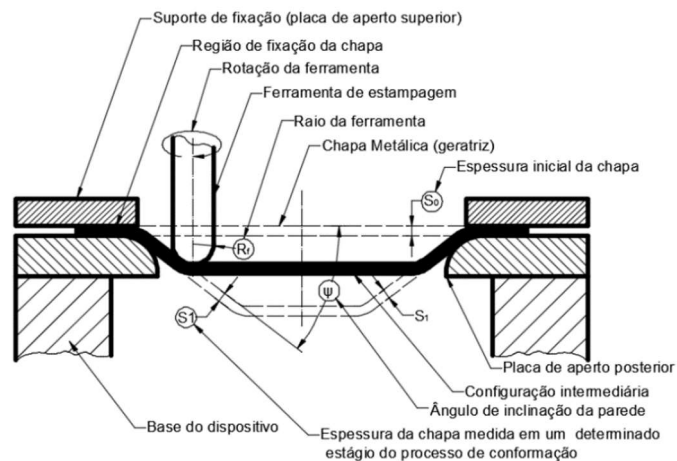


Fonte: Editado de [12]

Acoplada ao eixo árvore (spindle) de um dispositivo CNC, uma ferramenta de ponta semiesférica dá o início ao processo de ISF por meio do movimento contínuo sobre a superfície da chapa e vai, gradativamente, através de incrementos verticais negativos, realizando a conformação [13].

A fixação da chapa é feita por meio de um suporte prensa-chapas e o contato da chapa com a ferramenta ocorre numa pequena região que se move conforme a trajetória imposta, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3: Princípio do Processo de Estampagem Incremental.



Fonte: [14]

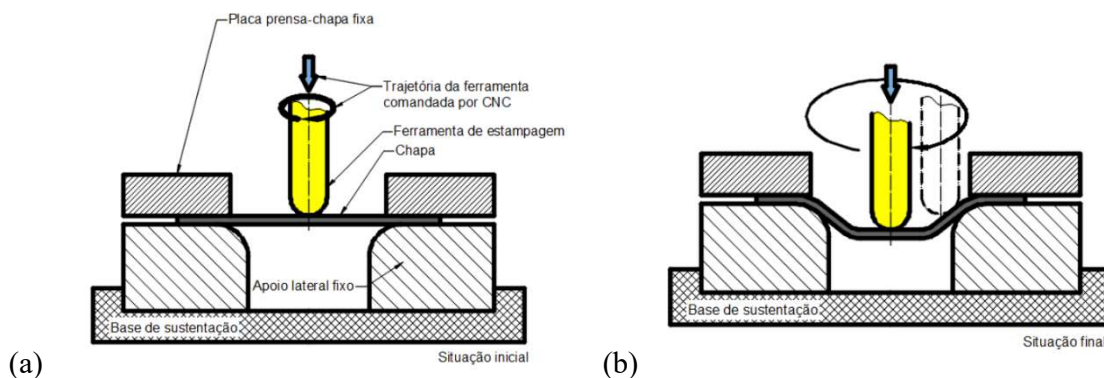
2.2 TIPOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

O processo de estampagem incremental pode apresentar variações quanto à quantidade de pontos de apoio e de ferramentas que utiliza para realizar a estampagem. O tipo mais comum é a estampagem de ponto único (*Single Point Incremental Sheet Forming* - SPIF), o qual utiliza apenas um ponto de apoio para efetuar o processo. Existe estampagem que utiliza uma segunda ferramenta na parte inferior como segundo ponto de apoio (*Two Points Incremental Sheet Forming*) para o processo e ainda pode-se citar o processo que se utiliza de múltiplos passes para efetuar a estampagem [15].

2.2.1 Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF)

Na SPIF a superfície da chapa não está suportada, ou seja, é deformada de uma forma “livre” pela ferramenta que desliza sobre a superfície da chapa, conforme ilustrado na Figura 4 [16].

Figura 4: Estampagem incremental de ponto simples sendo (a) situação inicial, e (b) situação final.



Fonte: [15]

É um processo de conformação com capacidade de produzir peças simétricas e não-simétricas. Neste processo a chapa é fixada em um suporte universal estacionário, o qual por uma ferramenta controlada por uma máquina CNC é dada a forma e o contorno da geometria desejada. Esse processo é utilizado para conformar chapas de metal ou polímero dentro de formas complicadas sem o uso de matrizes, usando uma fresadora CNC com três eixos junto com um software CAM para definir

e controlar a ferramenta de estampagem [17]. Este método é frequentemente usado para produtos com perímetros incomuns ou de formato único [18].

Uma limitação para o processo de estampagem incremental é o ângulo de parede (Ψ), sendo que existem valores máximos que possibilitam a deformação plástica sem que ocorra fraturas. O ângulo de parede (Ψ) é determinado por uma relação entre a espessura da chapa e seu ângulo de conformação, chamada Lei do Seno que é expressa pela seguinte equação (1):

$$s_1 = s_0 * \text{sen}(90 - \Psi) \quad (1)$$

Onde:

s_1 = espessura final da chapa (mm);

s_0 = espessura inicial da chapa (mm);

Ψ = ângulo de parede da peça estampada($^\circ$).

2.2.2 Estampagem Incremental de Ponto Duplo (TPIF)

Neste tipo de estampagem uma matriz é posicionada abaixo da chapa metálica, o que confere ao produto estampado menor discrepância geométrica, permitindo que a chapa assumira a forma desejada quando um perfil mais complexo é exigido. Este suporte é utilizado para expandir as possibilidades geométricas e também melhorar a acuidade das peças, ou seja, a correspondência entre peça virtual e peça real. A utilização do segundo ponto é particularmente importante para geometrias assimétricas [15] [19].

A TPIF tem duas vantagens principais sobre a SPIF, 1) deformação da chapa é mais restrita sendo que uma maior precisão pode ser alcançada; 2) recursos reentrantes podem ser formados dependendo da amplitude de movimento das ferramentas. No entanto, tem a desvantagem de exigir ferramentas especializadas para todas as configurações, exceto quando dois porta-ferramentas articulados são usados. Embora TPIF não seja um processo totalmente flexível, ele tem a vantagem de que apenas uma matriz é necessária e esta pode ser feita de um material de baixo custo, adequado para usinagem rápida, como madeira ou polímero [18].

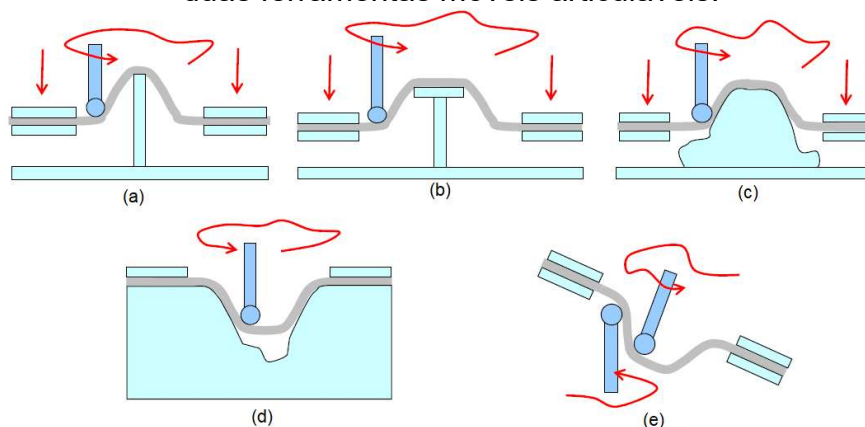
A TPIF com um suporte central (Fig. 5a) foi a configuração original do TPIF. Nesta configuração, a coluna de suporte pode se mover para cima ou a estrutura da peça

pode se mover para baixo para aumentar a profundidade da peça por meio de voltas sucessivas da ferramenta [18]. Um exemplo de aplicação da TPIF original pode ser visto no trabalho de Cheng (2019) [20], no qual ele compara a aplicação de vibração ultrassônica durante a formação de folha incremental de ponto único e dois pontos.

A TPIF com um suporte de matriz positivo parcial pode ser visto na Figura 5(b), e de matriz totalmente positiva na Figura 5(c), que oferece maior restrição à deformação [18]. Uma aplicação interessante de TPIF com matriz positiva foi nos estudos de Schefflera (2019) [21], no qual desenvolveu peças externas de um carro utilizando esta técnica.

Uma matriz negativa sendo utilizada na TPIF pode ser visualizada na Figura 5(d). Um exemplo de aplicação de matriz negativa foi no estudo de Centeno (2017) [22], no qual produziu prótese craniana utilizando esta técnica. As vantagens de usar uma matriz negativa em oposição a nenhuma matriz não foram explicadas, embora a matriz negativa provavelmente ofereça pouca ou nenhuma reação contra a formação da chapa, exceto no ponto de contato da ferramenta para geometrias côncavas simples [18]. Finalmente, TPIF com duas ferramentas móveis articuláveis (Figura 5(e)) é a configuração mais flexível do ISF. Embora esta técnica ofereça a maior flexibilidade e uma grande diversidade de produtos que é possível de formar, é o mais complicado de implementar em termos de planejamento do caminho da ferramenta e sincronização da máquina [18].

Figura 5: Estampagem incremental de ponto duplo, sendo: (a) uma ferramenta móvel e um suporte central; (b) uma ferramenta móvel e um suporte de matriz parcialmente positivo; (c) uma ferramenta móvel e um suporte de matriz totalmente positivo; (d) uma ferramenta móvel e um suporte de matriz totalmente negativo; e (e) duas ferramentas móveis articuláveis.

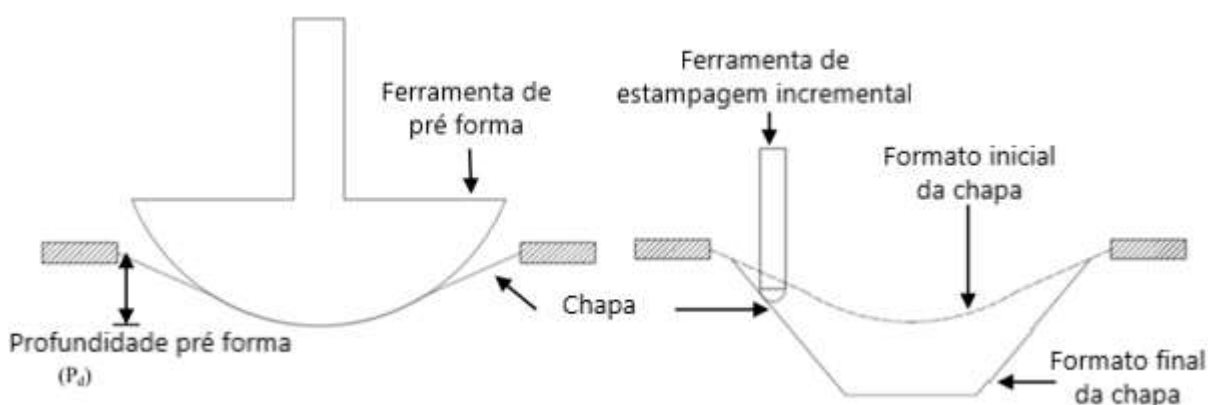


Fonte: [18]

Em estudos e pesquisas mais recentes apresentou-se a classificar os processos de estampagem incremental de chapas em dois grupos principais, a estampagem incremental convencional (CISF) e a estampagem incremental híbrida (*Hybrid incremental sheet forming* - HISF).

O processo HISF é uma nova metodologia que é capaz de superar as limitações do ISF, sendo um processo combinando ISF com alguns processos afins, como a conformação por estiramento combinada com o processo ISF. A Figura 6 apresenta um esquema do processo HISF compreendendo processo de formação por estiramento e SPIF. A pré-formação ou formação por estiramento é feita no primeiro estágio para obter a forma intermediária e a distribuição de espessura desejada. Na sequência o processo SPIF é então usado para completar a forma final da peça [23].

Figura 6: Representação esquemática do processo HISF.



Fonte: [23]

Um exemplo de aplicação de HISF pode ser visto no estudo de Lora (2014) [24], onde é abordada a aplicação de processos combinados de estampagem convencional e incremental em uma mesma chapa metálica de aço DC04.

2.3 TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL

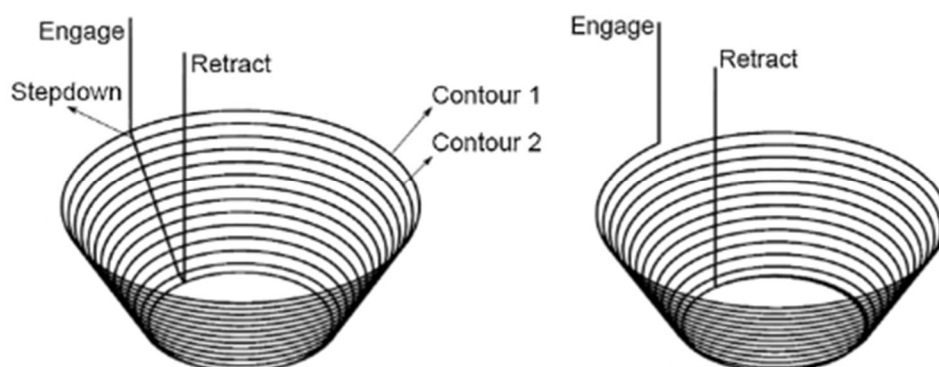
Segundo Furlanetti (2014) [25], a estampagem incremental é um processo no qual a trajetória da ferramenta é pré-definida, e imprime deslocamentos graduais e

localizados sobre a superfície de uma chapa. Conforme Yamauchi (2019) [26], a deformação local na chapa metálica é causada por uma ferramenta com geometria simples, podendo ser esférica ou hemisférica. No processo, a ferramenta é fixada em uma máquina CNC, com três ou mais graus de liberdade (eixos X, Y e Z) e percorre um caminho pré-definido ao longo da chapa com avanço incremental [6].

A maioria dos aplicativos de software no mercado que pode gerar programas CNC para fresamento pode ser usado para a geração de caminhos de ferramenta para ISF [27]. A preparação dos recursos para se iniciar o processo consiste em se montar o molde sobre a mesa de uma máquina CNC e dispor a chapa e o prendedor sobre o molde. A trajetória a ser executada pela ferramenta é definida por programação *off-line* no ambiente CAD. Normalmente, a trajetória escolhida é espiral com avanço de profundidade. Se a geometria da peça é complexa, ferramentas de suporte ou moldes são usados embaixo da chapa [28].

A trajetória da ferramenta pode ser definida em paralela e helicoidal. Na Figura 7 (a) podemos visualizar a trajetória paralela de descida, a qual consiste em realizar o incremento de uma única vez na vertical e o deslocamento lateral ocorre sempre na mesma profundidade. A Figura 7 (b) mostra a estratégia helicoidal, que é definida pelo movimento em hélice, a ferramenta executa a descida juntamente com o movimento lateral [76].

Figura 7: a) Trajetória paralela da ferramenta b) Trajetória helicoidal da ferramenta



Fonte: [76]

2.3.1 Ferramenta para Estampagem Incremental

Para selecionar a ferramenta de conformação mais indicada, é indispensável encontrar o diâmetro ideal para a esfera da ferramenta, sendo essencial conhecer a

geometria a conformar na chapa, o tipo de material, e a que profundidade a esfera na extremidade da ferramenta em movimento vai trabalhar.

Geralmente, são usados dois tipos de ferramentas para a estampagem incremental. O primeiro tipo é uma ferramenta hemisférica em que o formato arredondado é fabricado no próprio corpo da ferramenta. O segundo tipo é uma ferramenta esférica, no formato de uma ponta de caneta, na qual se usa uma esfera de aço de maior dureza que rotaciona livremente na ponta da ferramenta que a acomoda. Experimentalmente, a ferramenta com ponta esférica promove acabamento da superfície de melhor qualidade, já que a esfera rotaciona com menor atrito do que a ponta hemisférica [26].

Vários estudos já foram realizados acerca do tipo de ferramenta utilizada e sua influência nos parâmetros do processo. Vanhove (2019) [29] estudou a influência de uma ferramenta elíptica comparada a uma ferramenta hemisférica padrão em alumínio AA5754. Isidore (2016) [30] estudou o efeito do uso de ferramentas planas na diminuição de efeitos indesejáveis na peça final, utilizando alumínio 1050. Já Zhang (2019) [31] realizou um estudo voltado aos fenômenos relacionados à transferência de calor que ocorre entre a ferramenta e o material a ser fabricado. Novos designs de ferramentas para estampagem incremental foram pesquisados por Grzancic (2017) [32].

O diâmetro da ponta da ferramenta pode variar conforme a aplicação. Os maiores diâmetros são para peças maiores, e isto requer mais força na máquina, pois a área de contato é maior. O diâmetro também influencia na qualidade da superfície podendo ou não causar ondulações, dependendo do incremento usado [26].

Normalmente, ferramentas rotativas são usadas com fresadoras, enquanto outras máquinas usam ferramentas rígidas que não giram. Este uso de ferramentas não rotativas tem efeitos consideráveis nas condições de fricção em comparação com ferramentas rotativas ativa ou passivamente. O óleo de conformação a frio é geralmente espalhado na superfície da folha para reduzir o atrito [27].

Para reduzir o atrito e para aumentar a vida útil da ferramenta, a ferramenta pode ser revestida com ou até mesmo ser feita de carboneto cimentado. A Figura 8 apresenta exemplos de ferramentas de aço carbono cimentadas, de diferentes diâmetros [17].

Figura 8: Exemplos de ferramentas de aço-carbono cimentadas.



Fonte: [17].

Em alguns casos, ferramentas com a ponta em material polimérico são usadas para evitar reações químicas com o material da chapa e isto ajuda a aumentar a qualidade da superfície da peça confeccionada. O desgaste das ferramentas deve ser levado em consideração e por isso, utilizar lubrificação pode aumentar consideravelmente a vida útil delas [17].

2.3.2 Lubrificação

A lubrificação exerce uma função de extrema importância no processo de estampagem incremental, contribuindo para diminuir o aquecimento da ferramenta e da peça, atenua o esforço de trabalho da ferramenta em relação a peça, baixa o coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça, apresenta um melhor acabamento da superfície no produto e diminui o desgaste da ferramenta [33][35].

O fluido penetra entre as superfícies em contato através do fenômeno da capilaridade, ajudado pela vibração entre ferramenta, peça e cavaco. Se o fluido não conseguir chegar na região de corte, ele não vai conseguir ter efeito lubrificante. Devido a isto, a ação lubrificante fica prejudicada quando se aumenta a velocidade de corte, pois para o fluido chegar na região de corte é necessário que ele seja impulsionado com alta pressão, o que vai exigir dele, dentre outras características, que não se vaporize quando submetido a essas pressões altas [36].

Muitos pesquisadores já investigaram os efeitos da lubrificação durante o processo de estampagem incremental. Zhang (2010) [37] investigou os lubrificantes adequados e métodos de lubrificação para SPIF em chapa de liga de magnésio. Hmida (2013) [38] investigou o tamanho do grão antes e depois de chapa de cobre ser submetida a

estampagem incremental e o efeito da lubrificação no tamanho e na forma do grão. Azevedo (2015) [39] estudou a influência do tipo de lubrificante utilizado no processo SPIF, principalmente no alumínio 1050 e chapas DP780, no que diz respeito à qualidade da superfície das peças finais.

Conforme Kobayashi (1989) [40], deve-se avaliar as funções básicas dos lubrificantes tais como controlar o atrito e por conseguinte reduzir o desgaste da ferramenta, prevenir contra a aderência progressiva do material da peça na ferramenta, reduzir os esforços necessários à conformação, diminuir as etapas de estampagem, aumentar os limites de deformação, proteger contra corrosão e dissipar o calor.

O atrito cavaco-ferramenta depende principalmente da rugosidade das superfícies em contato e da afinidade físico-química dos dois materiais. O primeiro fator pode ser minimizado através de um bom acabamento da superfície de saída da ferramenta. O segundo fator pode ser minimizado utilizando-se material da ferramenta e/ou da peça com baixo coeficiente de atrito, ou através da formação de uma camada de óxidos entre os dois materiais em contato que o fluido de corte proporciona [36].

Os diversos fluidos de corte podem ser classificados em ar, tipos aquosos (água e emulsões) e óleos (óleos minerais, óleos graxos, óleos compostos e óleos de extrema pressão) [36].

2.4 APLICAÇÕES DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Com o estudo contínuo da estampagem incremental, percebeu-se que o limite de conformação é muito maior em comparação com outros processos de conformação convencionais devido à localização da deformação plástica [41]. Portanto, a conformabilidade e o mecanismo de deformação da estampagem incremental tornaram-se uma característica intrínseca para sua ampla aplicação.

Vários pesquisadores já realizaram estudos abordando como tema principal a estampagem incremental, em diferentes áreas, tais como na área da saúde, no setor automotivo e também no aeronáutico, para produção de diferentes peças.

Na área da saúde, alguns pesquisadores investigaram e comprovaram a viabilidade do processo de estampagem incremental para a fabricação de implantes

em diversos aspectos, incluindo a fabricação com diferentes tipos de materiais, o custo de todo o processo e a qualidade de formação dos implantes produzidos. Em termos de materiais para implantes biomédicos, os materiais comumente utilizados podem ser divididos em material metálico e material polimérico [42]. Por exemplo, Ambrogio (2017) [43] estudou o desenvolvimento de próteses utilizando ligas de titânio, assim como Racz (2018) [44]; já Bagudanch (2017) [45] utilizou um polímero (polietileno de alto peso molecular) para confecção de implantes cranianos; Kuroda (2020) [46] desenvolveu uma liga de titânio com adição de tântalo e zircônio para aplicações biomédicas, visto que tântalo é considerado um elemento β -estabilizador e o zircônio atua como elemento estabilizador desta fase. Um estudo bastante ousado e promissor foi desenvolvido por AL-Obaidi (2019) [47], no qual ele desenvolveu um laminado híbrido combinando uma chapa de alumínio com poliamida termoplástica reforçada com fibra de basalto, para utilização como material para fabricação de produtos ortopédicos, utilizando para tal a estampagem incremental.

Em muitas aplicações industriais, como a indústria automotiva, diminuições de massa e economia de combustível constituem características muito importantes. Ligas leves são amplamente utilizadas em aplicações automotivas e, simultaneamente, o constante progresso industrial força rotas de usinagem inovadoras de baixo custo a serem utilizadas após o processo de manufatura voltado para transformar o produto na forma correta com alta precisão da geometria e boa qualidade na superfície [48]. Por exemplo, Duc-Toan (2011) [49] estudou a produção de peças para a carroceria de um automóvel e An (2018) [50] confeccionou uma tampa de abertura de recarga automotiva.

Pesquisadores de todo o mundo vêm desenvolvendo estudos também no setor aeroespacial. Por exemplo, Gupta (2019) [51] desenvolveu peças para testes de vibração de fuselagem de aeronaves e Hussain (2010) [52] estudou a aplicação de ligas de alumínio na fabricação de peças para aviões.

Daleffe [3], obteve sucesso com 47° na estampagem incremental de chapas de titânio puro grau 2 de espessura 0,5 mm utilizando estratégia paralela de descida, a qual a ferramenta entra e sai do perfil a ser estampado a cada incremento de profundidade.

2.5 MÁQUINAS PARA ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Em princípio, qualquer máquina controlada por computador que permite uma ferramenta de formação para se mover ao longo de uma trajetória de ferramenta definida no espaço pode ser usada para executar a conformação por estampagem incremental. As principais máquinas usadas na prática incluem fresadoras CNC e robôs industriais. Disponibilidade, velocidade, volume de trabalho, rigidez e os custos são os fatores-chave na decisão do tipo de máquina [27].

2.5.1 Centros de Usinagem e Fresadoras CNC

A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo. Apesar dessa popularidade, trata-se de um processo bastante imprevisível e a definição paradoxal que se segue relata com exatidão toda a sistemática que o envolve: processo complexo e simples ao mesmo tempo, no qual se produzem peças removendo-se o excesso de material na forma de cavacos. É um processo complexo devido às dificuldades em determinar as imprevisíveis condições ideais de corte. É simples porque, uma vez determinadas essas condições, o cavaco se forma corretamente, dispensando qualquer tipo de intervenção do operador. As condições ideais de corte são as capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível [53].

A fresagem é um processo de usinagem mecânica. Consiste em uma operação de usinagem em que o metal é removido por uma ferramenta giratória – chamada “fresa” – de múltiplos gumes cortantes. Cada gume remove uma pequena quantidade de metal em cada revolução do eixo onde a ferramenta é fixada. A operação propicia a usinagem de superfícies apresentando qualquer orientação, porque tanto a peça quanto a ferramenta podem ser movimentadas em mais de uma direção, ao mesmo tempo. A máquina que realiza essa operação chama-se fresadora. Basicamente, há três tipos de fresadoras: horizontais, verticais e universais [54].

Segundo Diniz (2010) [36], o processo de fresamento pode ser classificado segundo a disposição dos dentes ativos da fresa como:

- Fresamento tangencial - operação na qual os dentes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta, o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo usinada.
- Fresamento frontal - operação na qual os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta, o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada.
- Fresamento de topo - operação na qual os dentes ativos da fresa estão tanto na superfície cilíndrica como na superfície frontal da ferramenta, o eixo da fresa pode estar paralelo ou perpendicular à superfície usinada.

Atualmente, a utilização do CNC é a saída mais apropriada para a solução dos mais complexos problemas de usinagem. Onde anteriormente se exigia uma máquina ou uma ferramenta especial, atualmente é feito com o CNC de uma forma muito simples. O CNC é um equipamento eletrônico que recebe informações da forma em que a máquina vai realizar uma operação, por meio de linguagem própria, denominado programa CNC, processa essas informações, e devolve-as ao sistema através de impulsos elétricos. Os sinais elétricos são responsáveis pelo acionamento dos motores que darão à máquina os movimentos desejados com todas as características da usinagem, realizando a operação na sequência programada sem a intervenção do operador [55].

2.5.2 Estampagem Incremental com Robôs

Os robôs industriais podem suportar um grande volume de trabalho, são ágeis, porém apresentam baixa rigidez e forças máximas de trabalho limitadas. Um caso especial de uma aplicação com robô é utilizá-lo para conformar incrementalmente por movimentos de martelamento, ao invés de uma ferramenta rígida com contato direto em uma trajetória. Isto pode ser considerado benéfico em um robô industrial para compensar parcialmente a falta de rigidez do braço do robô [26].

O processo de uso de robôs na estampagem incremental é muito parecido com o que é empregado nas máquinas CNC, usando a mesma estratégia de conformação. O processo se inicia com o modelo 3D em CAD, o qual na sequência é fatiado em camadas horizontais no software CAM e transferido para a linguagem de programação do robô. A metodologia é muito parecida com outros métodos de ISF, só que neste

caso o robô é utilizado no lugar da máquina CNC ou outra máquina qualquer que tenha a mesma finalidade [11].

Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos utilizando robôs para realização da estampagem incremental. Storkle (2018) [56] utilizou dois robôs industriais em um processo de estampagem incremental para estudar a influência da força de apoio e o ângulo de apoio da ferramenta na precisão geométrica. Belchior (2014) [57] utilizou análise de elementos finitos para avaliar as forças na interface entre a ferramenta e a chapa durante a fase de estampagem incremental, para melhorar a precisão geométrica da peça que foi confeccionada por um robô. Linnemann (2019) [58] sugeriu dois conceitos de conformação inovadores diferentes que aprimoram as tecnologias de conformação de alta velocidade e acionadas por pulsação de conformação eletro-hidráulica e conformação eletromagnética, aplicando uma estratégia incremental, com uma descrição das diferentes configurações necessárias para a realização do movimento incremental na sequência de conformação, empregando trilhos guia e um robô industrial.

2.6 CHAPA DE TITÂNIO PURO – TI CP GRAU 2

O titânio metálico é o nono elemento químico em abundância na crosta terrestre, contudo não é encontrado livremente na natureza. Dentre os diversos minerais portadores do metal, a ilmenita e o rutilo são os mais utilizados comercialmente para sua obtenção.

Titânio não ligado é primeiramente baseado na quantidade de oxigênio e ferro. As grades de alta pureza (baixo conteúdo intersticial) são piores em termos de resistência mecânica, dureza e temperatura de transformação do que aqueles com maior conteúdo intersticial, porém são mais deformáveis. As ligas de titânio são subdivididas em quatro grupos: α , quase- α , β e $\alpha+\beta$. A liga $\alpha+\beta$ Ti-6Al-4V é a mais utilizada, representando aproximadamente 45% da produção total de titânio. As grades não ligadas (sem elementos de liga) correspondem a aproximadamente 30% da produção e todas as outras formas combinadas, o restante, 25%. Em termos de aplicações biomédicas, Ti-6Al-4V e os titânios comercialmente puros são, também, os materiais

mais utilizados, apesar de que na última década houve um aumento no uso das ligas de titânio com fase β para aplicações em implantes cirúrgicos [59].

O titânio conhecido como comercialmente puro (Ti-CP) apresenta teores de pureza que variam entre 98 a 99,5%. Os graus do Ti-CP são conferidos de acordo com a concentração de elementos residuais decorrentes do processo de purificação. Suas propriedades físicas podem alterar de acordo com o grau de impurezas de elementos residuais [60].

Os recentes avanços científicos permitiram um pioneiro estudo na área de materiais, sendo assim, descobriu-se novas aplicabilidades e versatilidade para materiais metálicos. Dentre os materiais metálicos destaca-se o titânio para aplicação de próteses ortopédicas por ser um material biocompatível, não cancerígeno, resistente à corrosão e possui baixo desgaste. O titânio também se destaca na indústria aeroespacial, naval e civil por ser muito resistente a altas temperaturas, ter excelentes propriedades mecânicas e elevada razão resistência mecânica/densidade [61].

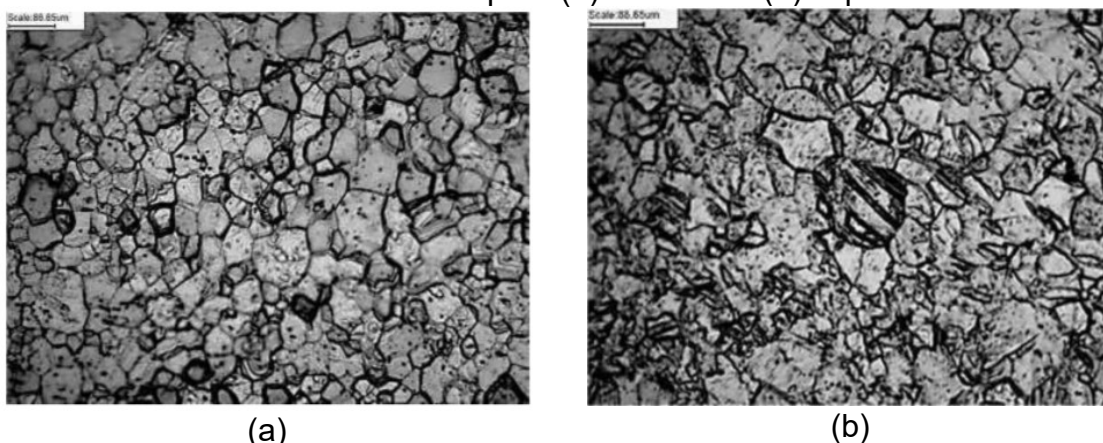
2.6.1 Micrografia

O titânio puro é um metal de baixa densidade que apresenta dimorfismo, isto é, sofre uma transformação alotrópica à temperatura de 882,5 °C. Tal transformação alotrópica está associada à mudança da estrutura cristalina hexagonal compacta (fase α) para a cúbica de corpo centrado (fase β) (DONACHIE, 1988, apud CARVALHO, 2017). Uma fase intermediária $\alpha + \beta$ pode ser encontrada durante a transição de fase [62].

Apesar da pequena quantidade de impurezas de O, Fe, N, C e H presentes no “titânio puro”, consideráveis mudanças em algumas propriedades mecânicas ocorrerão, principalmente devido ao O e ao Fe. Isto porque estes elementos passam a ocupar áreas dentro do arranjo cristalino (interstícios) e causam desalojamento parcial dos átomos de titânio, o que acarreta um “travamento”, diminuindo o eventual deslizamento dos átomos quando sujeitos a forças externas, aumentando desta forma a resistência a possíveis deformações plásticas [62].

No estudo de Wolz (2018) [63], amostras de titânio puro nacional e importada foram cortadas, embutidas, lixadas e polidas, e foi realizada avaliação microestrutural e de tamanho de grãos. Este estudo revelou que os titânios puros nacional e importado apresentam grãos homogêneos de 10 e 10,32 μm , respectivamente, e estrutura cristalina alfa equiaxial. As microdurezas das amostras obtidas com microdurômetro revelaram média de 171,4 e 168,6 Vickers (HV), para as amostras nacionais e importadas, respectivamente. A análise de micrografia revelou uma semelhança na estrutura cristalina das amostras analisadas. Com o objetivo de analisar a microestrutura e o tamanho de grão, as amostras foram submetidas ao ataque químico utilizando o reagente Kroll (6 mL de HNO_3 , 3 mL de HF e 91 mL de H_2O), assim, as análises foram realizadas em um microscópio Optika B-1000 MET. As microestruturas estão apresentadas na Figura 9.

Figura 9: Microestrutura formada por grãos alfa equiaxial em um aumento de 500X, da amostra de titânio puro (a) nacional e (b) importada.



Fonte: [63].

2.6.2 Curva Tensão Deformação x Deformação

Um dos ensaios para definir algumas propriedades mecânicas dos materiais é o ensaio de tração, pois ele permite obter [64]:

- Módulo de elasticidade (E);
- Tensão de escoamento Convencional (σ_e);
- Limite de resistência ou tensão máxima (σ_B);
- Limite de ruptura (σ_R);
- Alongamento (δ);

- Grau de encruamento (n);
- Índice de anisotropia (r).

Realizando a medição da força (F) e do comprimento (l_1) se obtém a tensão (σ) e a deformação relativa (ε) em cada instante do ensaio.

A tensão é calculada pela Equação (2):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (2)$$

Onde:

F = Força aplicada (N);

A_0 = Área inicial do corpo de prova (mm²).

A deformação relativa (ε) é obtida pela Equação (3):

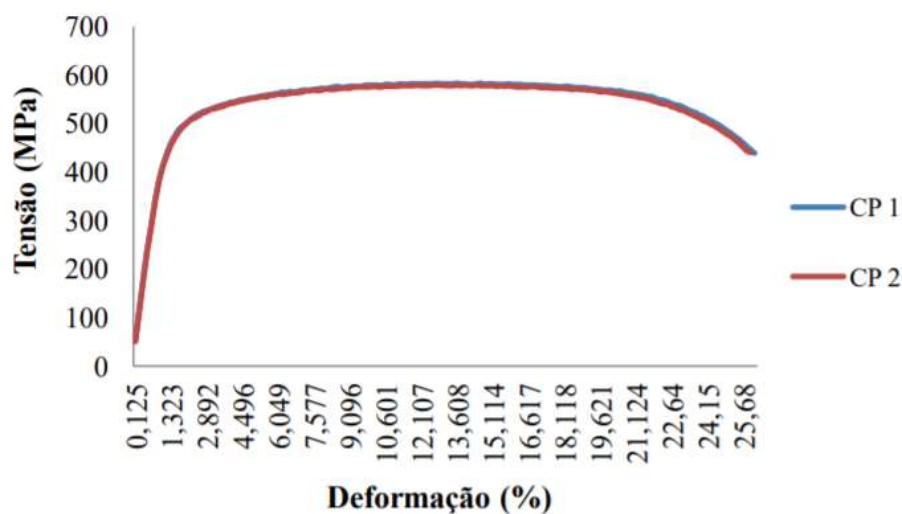
$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} (\%) \quad (3)$$

Onde:

l_1 = Comprimento (mm);

l_0 = Comprimento inicial (mm).

Landuci (2016) [65] realizou em seu estudo ensaios de tração para o titânio puro grau 2, para dois corpos de prova (CP1 e CP 2). Os resultados são apresentados na Figura 10. O equipamento utilizado foi o Bionix Servohydraulic Test System da MTS Systems Corporation. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM E8/E8M. O software foi ajustado com uma taxa de deformação adequada e configurado conforme a área da seção reduzida. Foram utilizados dois corpos de prova do material para os ensaios até atingirem seu rompimento. O deslocamento e a força do atuador foram resetados em cada início de teste para uma captação adequada da tensão e deformação. A frequência utilizada foi de 6 pontos captados por segundo e as amostras foram tracionadas a uma velocidade média de deformação de 0,03 mm/s ou 1,8 mm/min.

Figura 10: Curva de Tensão *versus* Deformação para o titânio puro.

Fonte: [65]

O Quadro 1 quantifica as propriedades mecânicas para o material de titânio puro dos corpos de prova que foram submetidos aos testes de tração, no trabalho de Landuci (2016) [65].

Quadro 1: Propriedades mecânicas do Ti-CP grau 2.

Material		Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
Ti – CP	CP 1	427,73	582,93	26,87	103
G2	CP 2	424,25	579,21	26,69	103

Fonte: [65]

2.6.3 Curva de Escoamento

A variação da Tensão de Escoamento (k_f) que determinado material apresenta durante uma deformação, que são obtidas experimentalmente, pode ser descrita por uma função matemática. Em geral na deformação a frio esta equação tem a forma da Equação (4) e (5):

$$k_f = \sigma_B (1 + \varepsilon) \quad (4)$$

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (5)$$

Onde:

k_f = tensão de escoamento (Mpa);

C = constante do material, para $\varphi=1$;

n = índice de encruamento do material.

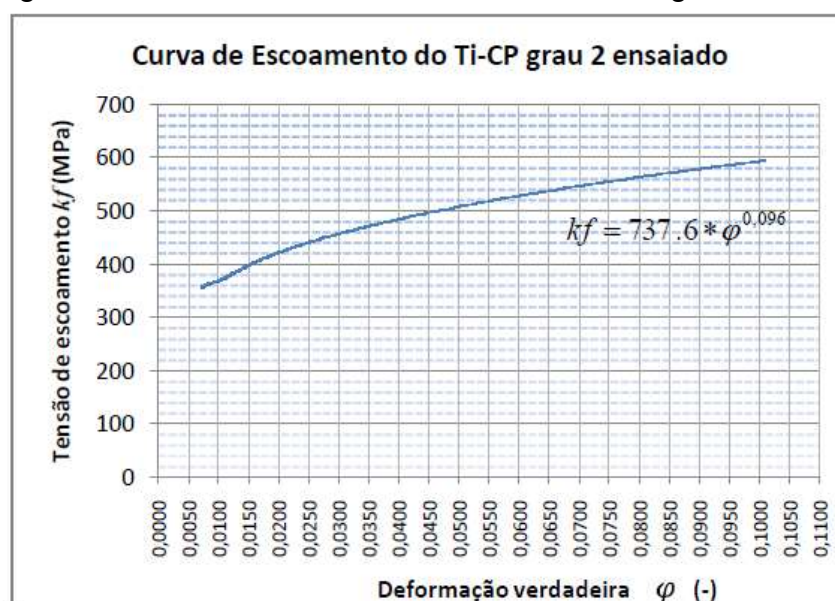
Para o instante de tensão máxima calculada tem-se que a deformação (φ) é igual ao coeficiente de encruamento (n).

A deformação verdadeira (φ) é calculada com o valor da deformação relativa no instante da tensão máxima (ε), conforme a Equação (6):

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

Castelan (2010) [2], em seu estudo, apresenta a curva de escoamento do Titânio CP grau 2, conforme Figura 11. Para obter a curva, o ensaio de tração foi realizado sobre uma chapa de 0,5 mm de espessura, com formatos de corpo de prova seguindo a norma ABNT 6152/DIN EM 10002.

Figura 11: Curva de escoamento do Titânio CP grau 2.



Fonte: [2]

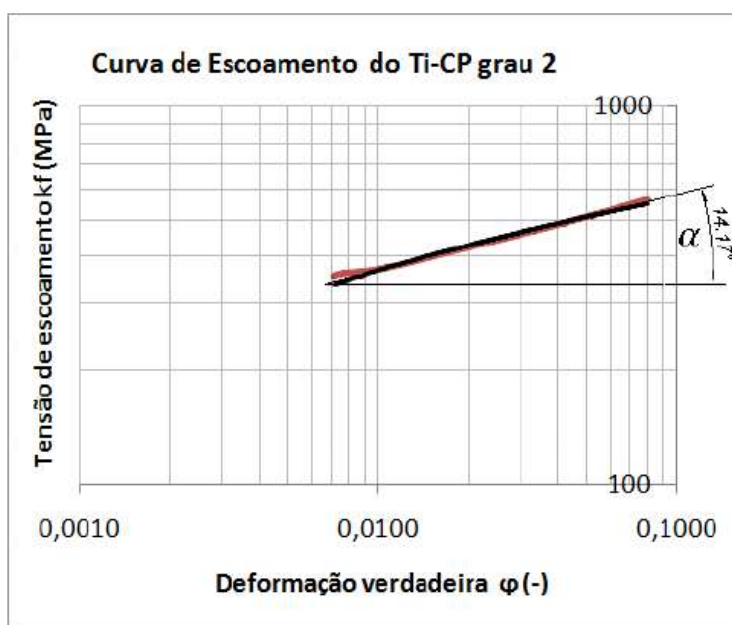
Quando um material sofre deformação plástica o mesmo sofre um endurecimento devido a modificações permanentes na rede cristalina. Este endurecimento por deformação plástica é chamado de encruamento [66].

Uma maneira de definir o encruamento é através da combinação de equações matemáticas com o ponto de início da zona de estrição localizada, ou ponto de declividade nula de uma curva de tração versus deformação [64].

Plotando a curva de escoamento em escala logarítmica, pode-se obter o índice de encruamento do material. Normalmente se obtém uma reta e o valor do encruamento é dado pela inclinação dessa reta, como pode ser visto no trabalho de Castelan (2010) [2], na Figura 12, para o Titânio CP grau 2, chegando ao valor de encruamento de 0,25. A equação para determinar o índice de encruamento é dado pela Equação (7):

$$n = \tan \alpha \quad (7)$$

Figura 12: Curva de escoamento representada com eixos logarítmicos.



Fonte: [2]

2.6.4 Índice de Anisotropia

A deformação da microestrutura de chapas metálicas durante o processo de laminação gera grãos mais alongados na direção em que a chapa foi laminada, originando uma heterogeneidade nas propriedades da chapa. A quantificação deste efeito é realizada pelo índice de anisotropia. A anisotropia é responsável pelo fenômeno conhecido como "orelhamento" em processos de estampagem profunda [64].

A anisotropia apresenta valores diferentes, que dependem de como os corpos de prova são cortados de acordo com a direção que o material foi laminado, uma vez que a laminação modifica a orientação da estrutura dos grãos que compõem o material. Como o erro para medida da deformação na direção da espessura pode ser grande, quando se faz a análise em chapas, é recomendado uma simplificação através da Lei de Constância de Volume [66].

Usualmente, as peças laminadas possuem dois tipos de anisotropia: anisotropia planar, resultante das propriedades mecânicas no plano da chapa que mudam com a direção em que são medidas; e anisotropia normal, onde as propriedades segundo a espessura são diferentes daquelas obtidas no plano da chapa [67].

O índice de anisotropia é calculado por três razões de deformação (r) que são obtidos através de ensaio de tração realizados em corpos de prova retirados nas três direções diferentes em relação a direção de laminação (0° , 45° e 90°).

A razão de deformação (r) é definida por Shaeffer [68], e pode ser vista na Equação (8):

$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{b_0 l_0}{b l}} \quad (8)$$

Onde:

b_0 = Largura inicial do corpo de prova no ensaio de tração (mm);

b = Largura final do corpo de prova no ensaio de tração (mm);

l_0 = Comprimento inicial do corpo de prova no ensaio de tração (mm);

l = Largura final do corpo de prova no ensaio de tração (mm).

A partir das três razões de deformação são calculados os valores de anisotropia média (r_m) e da anisotropia planar (Δ_r), através das Equações (9) e (10):

$$r_m = \frac{1}{4} (r_{0^\circ} + 2 * r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (9)$$

$$\Delta_r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} \quad (10)$$

2.6.5 Propriedades Físico-Químicas

Algumas propriedades físico-químicas do Titânio CP grau 2 estão listadas no Quadro 2 (GRANDINI, 2006, apud, CASTELAN, 2010 [2]).

Quadro 2: Propriedades físico-químicas do Titânio CP grau 2.

Propriedade	Valor
Densidade	4,51 g.cm ⁻³
Número atômico	22
Massa atômica	47,90 u.m.a
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
Condutividade elétrica	1,5 a 2,5 m/Ωmm ²
Tensão de escoamento	290 a 690 N/mm ²

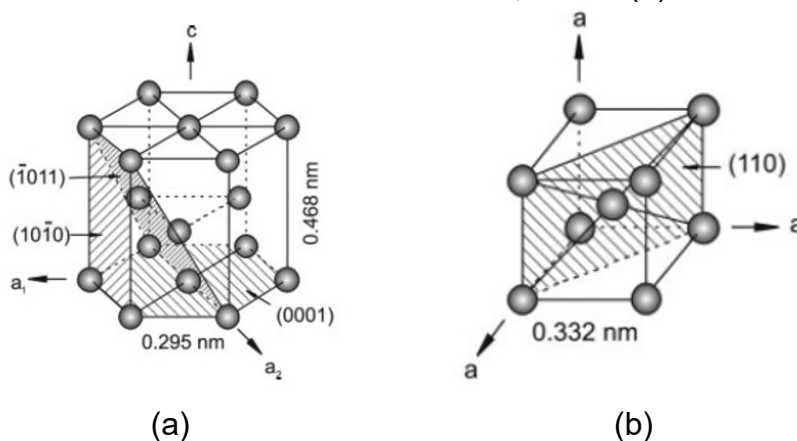
Fonte: Grandini (2006, apud, Castelan, 2010 [2]).

2.6.6 Propriedades Mecânicas - Estrutura Cristalina

O titânio sofre uma transformação alotrópica à temperatura de 882,5 °C. Abaixo desta temperatura o titânio existe na forma alotrópica α -Ti de estrutura hexagonal compacta, com parâmetros da rede cristalina $a = 0,295$ nm e $c = 0,468$ nm. Para

temperaturas superiores a 882,5 °C, o titânio existe na forma de β -Ti com a estrutura cristalina de corpo centrado, com o parâmetro $a = 0,332$ nm [62], [69]. A Figura 13 apresenta a estruturas cristalinas do titânio.

Figura 13: Estruturas cristalinas do titânio, sendo (a) fase α e (b) fase β .



Fonte: [69]

2.7 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO – CLC

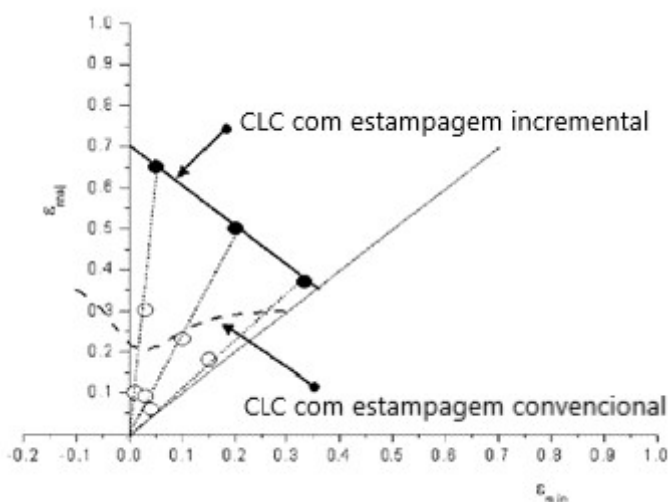
As curvas limites de conformação (CLC) são utilizadas para avaliar a criticidade das deformações do material durante os processos de conformação, correlacionando os valores de deformações principais máximas e mínimas. Os materiais possuem diferentes comportamentos quando submetidos a uma combinação de deformações, o que torna esta avaliação mais complexa. Neste sentido, as curvas são utilizadas para prever falhas mecânicas no processo comparando as deformações sofridas pelo material com as curvas obtidas em laboratórios [70].

Essa curva, descrita no espaço de deformações, estabelece o limite entre as condições de estampagem que podem ser utilizadas sem a falha do componente e as que irão acarretar nas ocorrências de instabilidade plástica e/ou de fratura [71].

As curvas mostram como a combinação das principais deformações, provenientes das diferentes solicitações durante um processo de estampagem, influencia no limite de conformação de um material. Esse recurso ajuda a evitar falhas provenientes da escolha de um material de baixa qualidade, assim como elevados custos na utilização de materiais com qualidade desnecessariamente alta [67].

A Figura 14 apresenta a CLC para a estampagem convencional e a estampagem incremental. Pode-se perceber que para a estampagem incremental os valores são superiores quando comparados a estampagem convencional.

Figura 14: Curvas limite de conformação na estampagem convencional e na estampagem incremental.



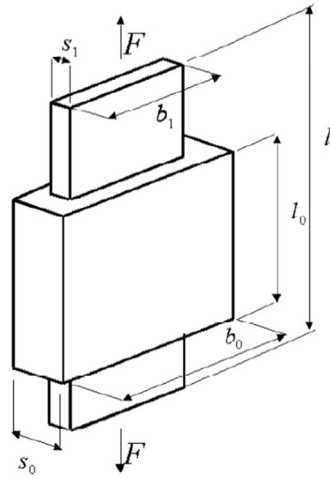
Fonte: [67]

2.8 DEFORMAÇÕES NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM

O processo de fabricação por conformação mecânica resulta em peças que foram deformadas. O objetivo do processo é deformar plasticamente o material para dar a geometria desejada, para isso são aplicadas forças para efetuar a deformação. As deformações podem ser caracterizadas como: absoluta, relativa ou verdadeira [24].

Os cálculos das deformações são baseados em um ensaio de tração convencional, a Figura 15 mostra as principais geometrias que servem como base para definir as deformações.

Figura 15: Dimensões esquemáticas em um ensaio de tração.



Fonte:[64]

A deformação absoluta no comprimento Δl é definida pela Equação (11):

$$\Delta l = l_1 - l_0 \text{ (mm)} \quad (11)$$

A deformação absoluta na largura Δb é definida pela Equação (12)

$$\Delta b = b_1 - b_0 \text{ (mm)} \quad (12)$$

A deformação absoluta na espessura Δs é definida pela Equação (13):

$$\Delta s = s_1 - s_0 \text{ (mm)} \quad (13)$$

A deformação relativa no comprimento ε_l é definida pela Equação (14):

$$\varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0} * 100 \text{ (\%)} \quad (14)$$

A deformação relativa na largura ε_b é definida pela Equação (15):

$$\varepsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0} * 100 \text{ (\%)} \quad (15)$$

A deformação relativa na espessura ε_s é definida pela Equação (16):

$$\varepsilon_s = \frac{s_1 - s_0}{s_0} * 100 (\%) \quad (16)$$

Todas as dimensões utilizadas nas Equações (11) a (16) podem ser vistas na Figura 15.

As deformações verdadeiras são parâmetros empregados nas análises dos processos de conformação. Conhecer as deformações que ocorrem no processo de conformação podem trazer informações relevantes, como a situação das tensões internas, possibilidade de reduzir etapas no processo e conhecimento do limite máximo de deformações [64].

A deformação verdadeira no comprimento φ_1 é definida pela Equação (17):

$$\varphi_1 = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \quad (17)$$

A deformação verdadeira na largura φ_2 é definida pela Equação (18):

$$\varphi_2 = \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) \quad (18)$$

A deformação verdadeira na espessura φ_3 é definida pela Equação (19):

$$\varphi_3 = \ln\left(\frac{s_1}{s_0}\right) \quad (19)$$

A lei da constância do volume é aplicada a todas as peças que são fabricadas pelo processo de conformação mecânica. Ela define que o volume da peça antes do processo de conformação é igual ao volume da peça após o processo de conformação e é definida pela Equação (20) [68]:

$$V_0 = V_1 \quad (20)$$

Aplicando a lei da constância de volume às deformações verdadeiras tem-se a Equação (21):

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (21)$$

As deformações em um componente estampado variam de um ponto para outro. Estas deformações podem ser analisadas através de gravações eletroquímicas, gravando uma grade circular na superfície da peça antes da estampagem por exemplo. Na Figura 16 pode-se observar a gravação eletroquímica em uma peça com as deformações oriundas do processo de estampagem [72].

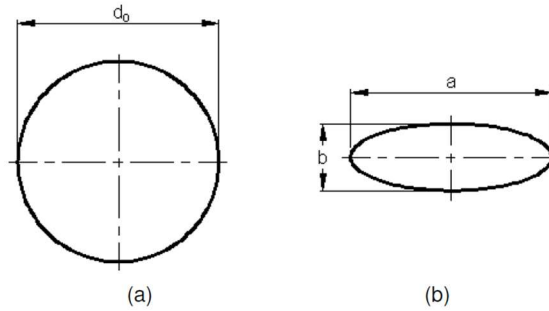
Figura 16: Exemplo de deformações representadas pela gravação de grade de círculos na peça.



Fonte:[72]

Após o processo de estampagem avaliam-se as deformações dessa grade que darão as informações necessárias sobre as deformações nas regiões críticas. A Figura 17 mostra um círculo esquemático e a elipse é a figura medida após a estampagem. A espessura da chapa tem medida s_0 antes da estampagem e s_1 após a estampagem[64].

Figura 17: Medição prática da deformação: (a) círculo inicial e (b) círculo após a deformação – elipse.



Fonte:[64]

As três deformações principais são calculadas pelas Equações (22), (23) e (24):

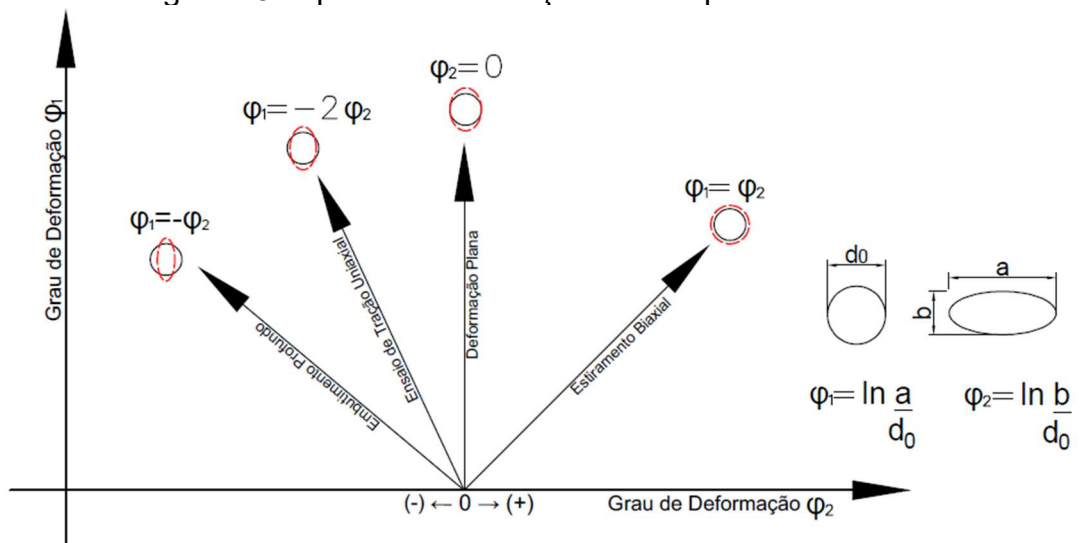
$$\varphi_1 = \ln\left(\frac{a}{d_0}\right) \tag{22}$$

$$\varphi_2 = \ln\left(\frac{b}{d_0}\right) \tag{23}$$

$$\varphi_3 = \ln\left(\frac{s_1}{s_0}\right) \tag{24}$$

As medições da rede deformada levam a uma relação entre as deformações. Na Figura 18 observa-se como podem ser classificadas as deformações em função das solicitações que ocorrem durante a estampagem[72].

Figura 18: Tipos de deformação em chapas metálicas.



Fonte: Adaptado de [64]

2.9 RUGOSIDADE

Na escala de micron, a rugosidade é claramente importante. A pesquisa casual na literatura revelou vários artigos sobre a rugosidade do titânio e seu efeito biológico. Existe uma gama substancial de rugosidades e texturas que são consideradas importantes para quando o material entra em contato direto com uma estrutura óssea [73].

Na fabricação de peças por estampagem incremental não é possível produzir superfícies totalmente lisas. A superfície de uma peça é, se observada ao microscópio, dotada de regiões com maior ou menor planicidade que é determinada como sendo a rugosidade da peça, mesmo que estas peças, em um aspecto macroscópico, sejam completamente lisas.

A rugosidade é uma medida topográfica da superfície de interesse, um conjunto de desvios micro geométricos caracterizados pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes na superfície, segundo a norma ABNT NBR ISO4287 [70]. Existem vários parâmetros de rugosidade para descrever a topografia da superfície. Eles são divididos em três grupos diferentes: parâmetros de amplitude, espaçamento e rugosidade híbrida [73]. O Quadro 3 apresenta os principais parâmetros de rugosidade de amplitude utilizados industrialmente.

Quadro 3: Abreviação e definição dos parâmetros de rugosidade de amplitude.

Prâmetro de rugosidade	Definição	Descrição
R_a [μm]	$R_a = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m z(x_i) $	A média aritmética dos valores absolutos de altura de todos os (m) pontos do perfil; também chamado de CLA (altura média da linha central).
R_q [μm]	$R_q = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m z^2(x_i)}$	A raiz quadrada média dos valores de todos os pontos do perfil; também chamado de RMS (raiz quadrada).
R_t [μm]	-	A altura máxima do pico ao vale de todo o traçado de medição.

Prâmetro de rugosidade	Definição	Descrição
R_{zDIN} [μm]	$R_{zDIN} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^m z(x_i)$	A média aritmética do pico máximo à altura do vale dos valores de rugosidade z (x_1) a Z (x_5) de cinco seções de amostragem consecutivas sobre o perfil filtrado.

Fonte: adaptado de BRUNETTI, 2001 [73].

2.10 DISCREPÂNCIA GEOMÉTRICA

Uma característica presente nos processos de estampagem em geral que acontece na estampagem incremental e que determina limites de qualidade geométrica é o retorno elástico. Além da deformação plástica programada, a deformação elástica produz discrepâncias geométricas entre o produto final e seu modelo correspondente em CAD [74].

Uma forma de determinar a discrepância geométrica é utilizar um *scanner 3D* para medição da peça acabada, gerando pontos que são mapeados e transformados em superfície, para posterior comparação com o modelo CAD original da peça final. Desta maneira é possível calcular o desvio entre o modelo teórico e o causado pelo retorno elástico da chapa.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste tópico serão descritas todas as metodologias de preparação e execução dos ensaios utilizadas para caracterização da matéria-prima, como também do processo de Estampagem Incremental desenvolvido neste estudo.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE TITÂNIO PURO ASTM F-67 GRAU 2

Nesta seção serão abordados os ensaios de propriedades mecânicas realizados com a matéria-prima, titânio puro grau 2 (ASTM F-67 GRAU 2) com espessura de 0,5 mm, a fim de caracterizar o material. A chapa de titânio foi adquirida da Empresa Realum Soluções em Titânio.

A caracterização do material foi realizada antes do processo de estampagem incremental, para isso foram utilizados os equipamentos e insumos descritos a seguir.

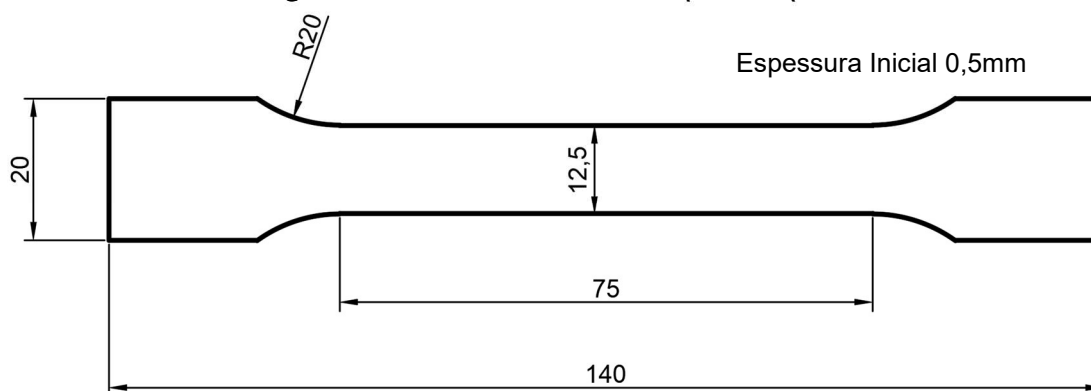
As análises foram realizadas no CT Satc – Centro Tecnológico Satc, e no LACAMI – Laboratório de Caracterização Microestrutural do Departamento de Engenharia Mecânica Unisatc – Centro Universitário Satc.

3.1.1 Curva Tensão X Deformação

Foram confeccionados nove corpos de prova, seguindo o formato normatizado pela ABNT NBR ISO 6892-1:2013, tipo de corpo de prova 1. A Figura 19 apresenta o desenho do corpo de prova que foi fabricado para o ensaio de tração.

Os corpos de prova foram cortados conforme o sentido de laminação da chapa, sendo três amostras para cada direção em relação à laminação (0°, 45°, 90°), cortados no processo de corte à laser.

Figura 19: Dimensões dos corpos de prova.



Fonte: Do Autor

Os ensaios de tração foram realizados no equipamento de marca EMIC modelo DL-10000, com capacidade de 100 KN. Os ensaios foram realizados segundo norma NBR 6673:1981 com velocidades constantes de 10,0 mm/min.

Após os ensaios os corpos de prova foram medidos manualmente para obtenção dos valores de alongamento.

3.1.2 Índice de Anisotropia

O índice de anisotropia foi determinado através dos ensaios de tração e representa a razão entre as deformações verdadeiras de comprimento e largura do corpo de prova, segundo o sentido de laminação.

3.1.3 Análise Química

A análise química da Chapa de Titânio Puro – ASTM F67 Grau 2 utilizada neste estudo estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Análise química conforme certificado de qualidade do material utilizado.

Corrida	Liga	Lote MPR.	C	Fe	H	N	O	Ti
Hn0460	0102	17412	0,005	0,11	26Ppm	0,007	0,09	Balanço

Fonte: Do Autor

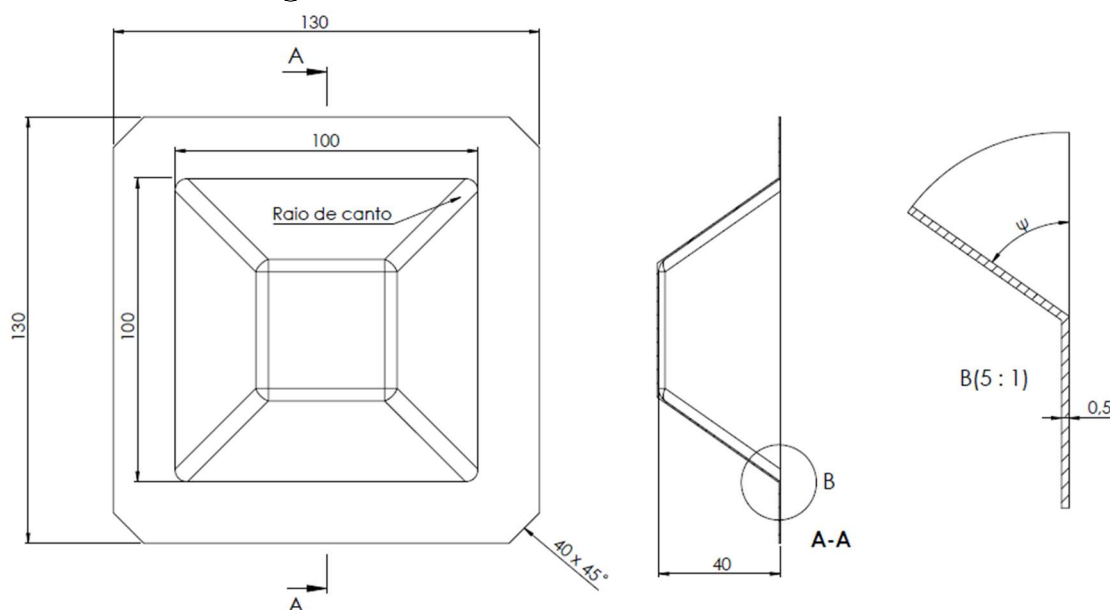
3.2 PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Para a execução dos testes foi necessário o desenvolvimento do arquivo CAD com a forma geométrica para o presente estudo, a definição dos parâmetros a serem utilizados do processo de Estampagem Incremental, preparação dos corpos de prova, escolha da máquina-ferramenta e ferramenta e por fim programação CAM, utilizando o *software* EdgeCam, para o processo.

3.2.1 Modelagem da forma geométrica

O modelo de estudo foi baseado em um tronco de pirâmide de base quadrada com 100 mm de lado e 40 mm de profundidade como mostrado na Figura 20.

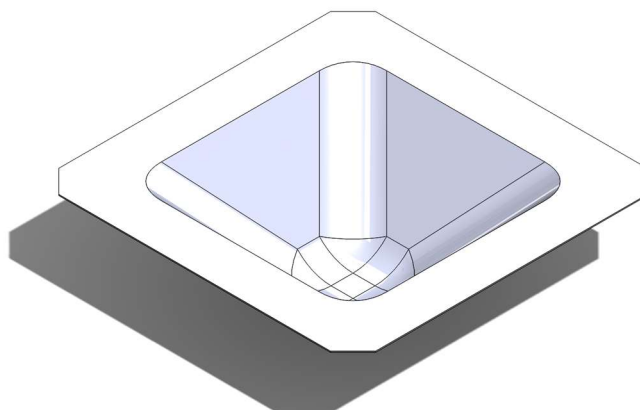
Figura 20: Detalhamento do modelo CAD.



Fonte: Do Autor

Para o projeto deste modelo, foi utilizado o software CAD SolidWorks®. A Figura 21 mostra uma visão isométrica do modelo.

Figura 21: Vista Isométrica do modelo CAD.

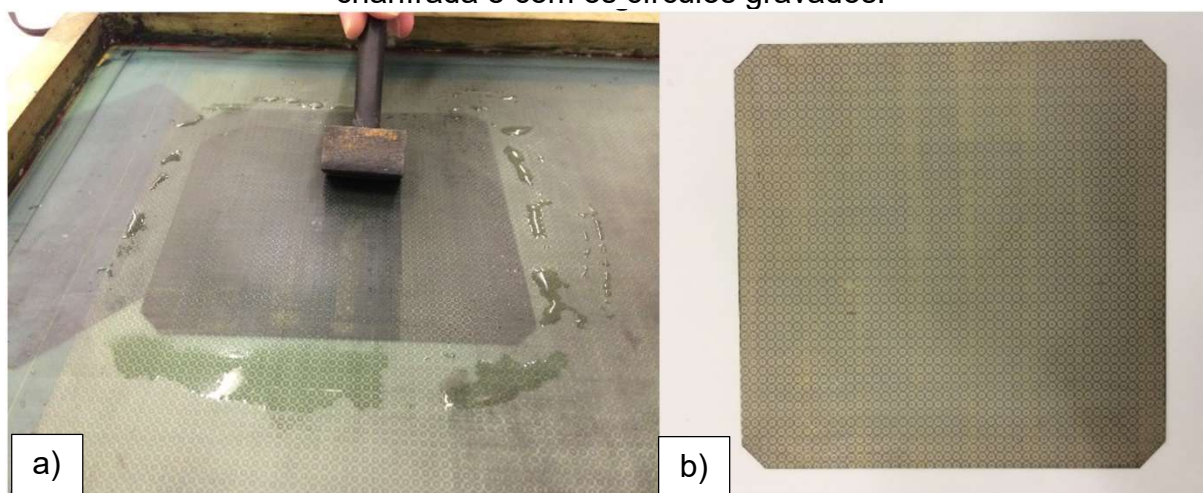


Fonte: Do Autor

3.2.2 Preparação das peças para os experimentos

A chapa bruta foi cortada utilizando uma guilhotina, de acordo com as dimensões estabelecidas na base do modelo, ou seja, 130x130 mm - Chapa de Titânio Puro ASTM F-67 Grau 2 com 0,50 mm de espessura. Após o corte, as chapas foram gravadas na superfície inferior com círculos de diâmetro inicial (d_0) de 2,5mm através de um processo eletroquímico. Para efetuar a gravação foi utilizado um gravador de metais Gravamet Ônix, uma tela de serigrafia com círculos de diâmetro 2,5 mm desenhados e um ácido para efetuar a marcação no titânio. A gravação tem como objetivo proporcionar a medição das deformações φ_1 e φ_2 após a estampagem. A Figura 22(a) mostra o processo de gravação dos círculos na chapa e a Figura 22(b) a chapa (*blank*) cortada e devidamente chanfrada para a posterior montagem no conjunto do dispositivo de estampagem. Pode-se verificar ainda na Figura 22 a marcação dos círculos já executada na chapa.

Figura 22: (a) processo de gravação dos círculos e (b) Chapa bruta cortada, chanfrada e com os círculos gravados.



Fonte: Do Autor

3.2.3 Parâmetros utilizados no processo de estampagem

Os testes realizados visaram obter ângulos de parede (Ψ) maiores que 47° , utilizando estratégia de decida helicoidal no processo ISF. Foram realizados 7 (sete) experimentos incrementando apenas o ângulo de parede (Ψ) até se obter o melhor resultado. Com o melhor resultado obtido variou-se o raio de canto da geometria estampada para avaliar a sua influência, para isso realizou-se mais 03 (três) experimentos. Para o maior ângulo de parede obtido foi ainda realizado mais 2 experimentos para cada raio decanto utilizado, sendo estes repetições dos experimentos 6, 8, 9 e 10, totalizando 18 (dezoito) experimentos realizados. A Tabela 2 apresenta os dados referentes a todos os testes realizados.

Tabela 2: Parâmetros utilizados nos experimentos realizados.

Experimento	Ângulo de parede Ψ ($^\circ$)	Estratégia	Raio de Canto (mm)
1	48	Helicoidal	R20
2	49	Helicoidal	R20
3	50	Helicoidal	R20
4	51	Helicoidal	R20
5	52	Helicoidal	R20
6	53	Helicoidal	R20
7	54	Helicoidal	R20
8	53	Helicoidal	R15

Experimento	Ângulo de parede Ψ (°)	Estratégia	Raio de Canto (mm)
9	53	Helicoidal	R10
10	53	Helicoidal	R25
11	53	Helicoidal	R15
12	53	Helicoidal	R15
13	53	Helicoidal	R20
14	53	Helicoidal	R20
15	53	Helicoidal	R25
16	53	Helicoidal	R25
17	53	Helicoidal	R10
18	53	Helicoidal	R10

Fonte: Do Autor

Todos os experimentos foram realizados utilizando os mesmos parâmetros de velocidade conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros utilizados nos experimentos.

Estratégia de descida	Profundidade de descida/volta	Avanço lateral	Avanço Vertical	Rotação da ferramenta
Helicoidal	1 mm	800 mm/min	300 mm/min	Livre

Fonte: Do Autor

3.2.4 Dispositivos utilizados nos experimentos

Para realizar a estampagem incremental foi utilizado um centro de usinagem vertical D600, fabricado pela Industrias Romi S.A.. A Tabela 4 apresenta as principais características da máquina.

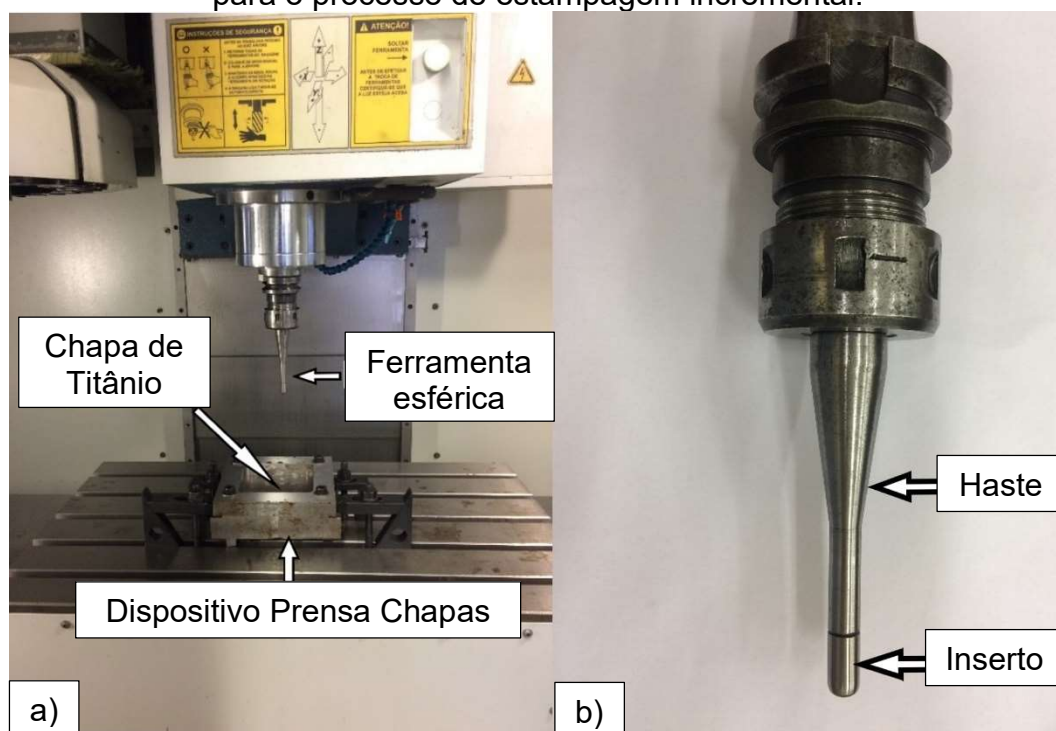
Tabela 4: Características do centro de usinagem utilizado para realizar a ISF.

Curso da mesa no eixo X	Curso da mesa no eixo Y	Curso da mesa no eixo Z	Cone do Eixo árvore	Faixa de Velocidades	Potência do motor	CNC
600mm	530mm	580mm	Iso 40	10-10000 RPM	20 CV	Fanuc 0I- MD

Fonte: Do Autor

Para o processo de estampagem incremental foi utilizado uma ferramenta composta por duas partes, haste fabricada em aço 4340 e inserto fabricado em Titânio ASTM F-137, material biocompatível devido à baixa quantidade de oxigênio, nitrogênio e ferro, porém com elementos de liga como alumínio e vanádio. O inserto possui um perfil semiesférico de diâmetro de 10 mm, a ponta utilizada na ferramenta foi de titânio a fim de evitar contaminações da chapa a ser estampada. Para fixação da chapa na máquina foi utilizado um dispositivo prensa chapas, na Figura 23 pode-se visualizar a ferramenta e o dispositivo de fixação utilizados nos experimentos.

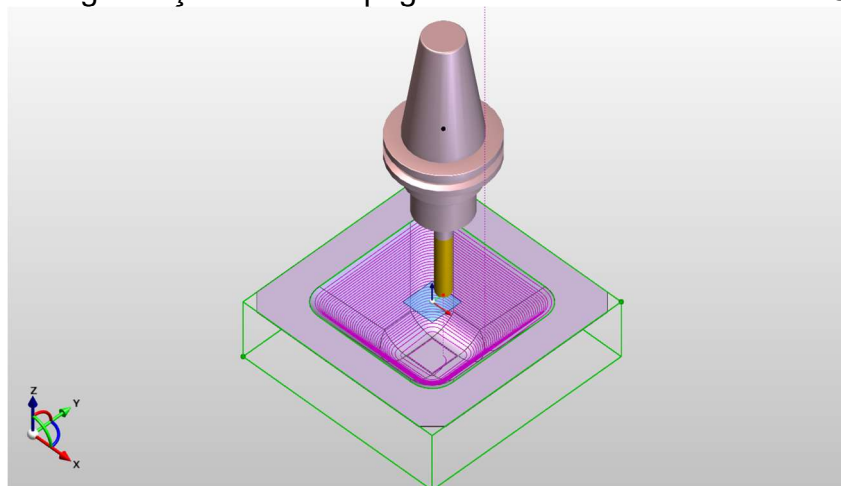
Figura 23: (a) Equipamentos utilizados nos experimentos e (b) ferramenta utilizada para o processo de estampagem incremental.



Fonte: Do Autor

Com os equipamentos e parâmetros definidos foi possível executar a programação CNC através de software CAM, para a programação foi utilizada a estratégia de descida helicoidal a qual faz com que a ferramenta permaneça em constante contato com a peça, evitando marcas de entrada e saída da trajetória. Na Figura 24 é mostrada a programação desenvolvida no software CAM.

Figura 24: Programação da estampagem incremental em software CAM.



Fonte: Do Autor

A fim de reduzir o atrito entre a ferramenta e a chapa a ser estampada foi utilizado como lubrificante gordura animal (banha de porco), para a escolha do lubrificante foi levada em consideração a não contaminação da chapa de titânio com lubrificantes sintéticos como graxas, visto que é um material muito utilizado em próteses.

3.3 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE

Após as peças passarem pelo processo de estampagem foi efetuada a medição da rugosidade da superfície em todas as peças. A medição foi realizada seguindo o parâmetro de rugosidade R_a , sendo medido 2 (duas) superfícies internas da peça já estampada, 1 (uma) superfície paralela ao sentido de laminação e 1 (uma) superfície perpendicular ao sentido de laminação. Para cada superfície foram realizadas 3 (três) medições e feita a média aritmética destas.

Para as medições foi utilizado um rugosímetro digital marca Mitutoyo modelo SJ-310 e adotado como comprimento da amostragem (Cut off) 0,8 mm.

3.4 MEDIÇÃO DA MASSA

Para avaliar se após o processo de estampagem incremental a peça perderia massa por atrito com a ferramenta ou se o material era apenas arrastado de um ponto para outro as peças foram pesadas antes e após a estampagem, para esta medição

foi utilizada uma balança digital marca Bel modelo M214Ai com capacidade de medição de 10 mg a 210 g e erro de 1 mg. Foram efetuadas 3 (três) medições antes e 3 (três) medições após a estampagem.

3.5 MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES

O método utilizado para medir as deformações foi a gravação de uma malha de círculos com diâmetro inicial (d_0) 2,5 mm gravados antes do processo de estampagem através da gravação eletroquímica na parte inferior da chapa a ser estampada.

As deformações foram medidas utilizando um microscópio digital de lupa eletrônica modelo RoHS utilizando aumento de 40X, foram medidas a deformação correspondente à variação do comprimento (a) e à variação da largura (b), das elipses geradas com a deformação do processo.

A deformação real de comprimento (φ_1) e de largura (φ_2) foram calculadas utilizando as Equações (17) e (18), respectivamente; e a deformação de espessura (φ_3) pela Equação (19).

Os experimentos analisados foram os números 6 e 8 (Tabela 2), ambos com ângulo de parede máximo alcançado nos experimentos de 53°.

As medições foram realizadas em três sentidos, a 0°, 45° e 90° com relação a direção de laminação, sendo medidas 10 elipses para cada direção.

3.6 ESCANEAMENTO 3D

Para as peças estampadas sem nenhum rompimento, foi feito o escaneamento 3D em 1 (uma) das peças para cada ângulo de parede e raio de canto com resultado positivo (experimentos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 8), para verificar a discrepância geométrica em relação ao modelo CAD. O escaneamento foi realizado no LdSM (Laboratório de Design e Seleção de Materiais) da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), usando um *scanner* 3D marca Tecnodrill modelo Digimill. As peças foram digitalizadas com uma resolução de 0,1 mm e foram utilizados aproximadamente 1,2 milhões de pontos para cada análise, foi utilizada uma lente de

150 mm com precisão em Z de 0,035 mm. Todas as peças foram orientadas com o eixo Z normal ao plano de referência das chapas, visto que a origem é o centro dessa chapa plana, o rebaixo fica no sentido negativo. Cada peça foi sobreposta com seu modelo CAD correspondente.

3.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROMETRIA DISPERSIVA DE ENERGIA (EDS)

A caracterização morfológica foi realizada nas peças que obtiveram o melhor resultado, sendo elas as peças 6 e 8 e também no inserto da ferramenta, nas peças foram retiradas 2 (duas) amostras na superfície interna estampada, uma na direção longitudinal da laminação e uma no sentido transversal à laminação, na ferramenta foi avaliada a parte esférica, onde ocorre o contato com a peça. Para realizar a análise no MEV foi utilizado um microscópio marca ZEISS modelo MA10, para a análise EDS foi utilizado um detector Bruker modelo Quantax EDS for SEM.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados todos os resultados da caracterização e estampagem obtidos no estudo, visando avaliar os parâmetros empregados no processo de estampagem incremental.

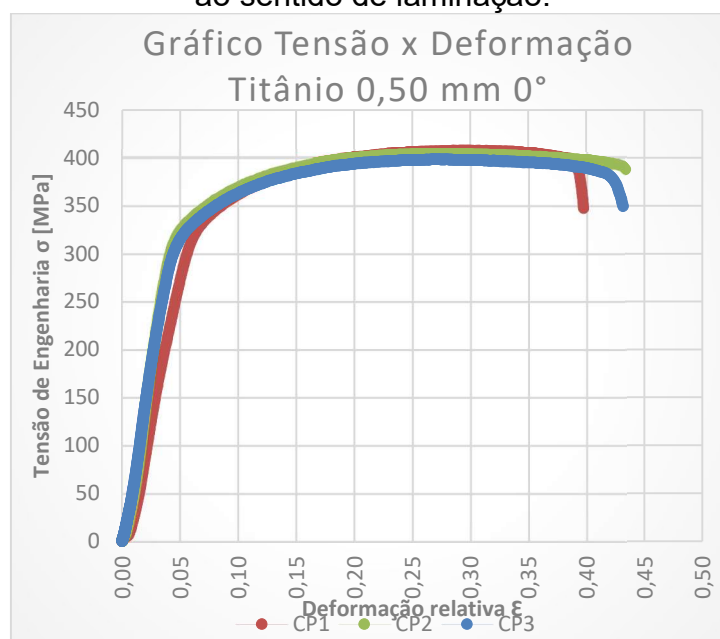
4.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE TITÂNIO PURO ASTM F-67 GRAU 2

Antes de efetuar os experimentos foi efetuada a caracterização da chapa de titânio puro ASTM F-67 grau 2.

4.1.1 Curva Tensão X Deformação

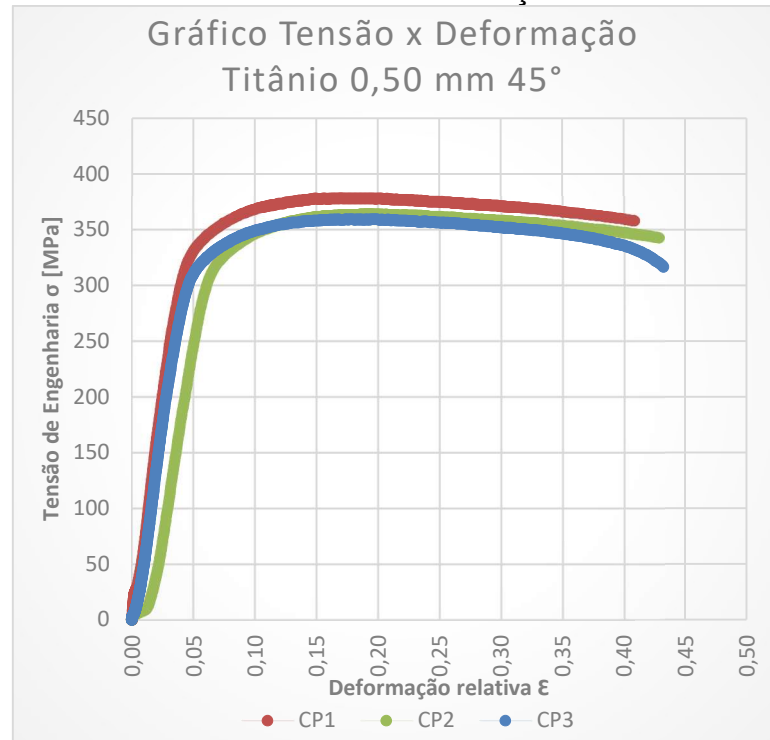
Com os parâmetros definidos foram executados os ensaios de tração a fim de se obter as curvas tensão x deformação, com os ensaios realizados foi plotado um gráfico para cada direção dos corpos de prova retirados (0° , 45° e 90°) em relação a direção de laminação. A Figura 25 apresenta a curva para os corpos de prova a 0° , a Figura 26 para os corpos de prova a 45° e a Figura 27 para os corpos de prova a 90° .

Figura 25: Curva tensão x deformação dos corpos de prova 1, 2 e 3, 0° em relação ao sentido de laminação.



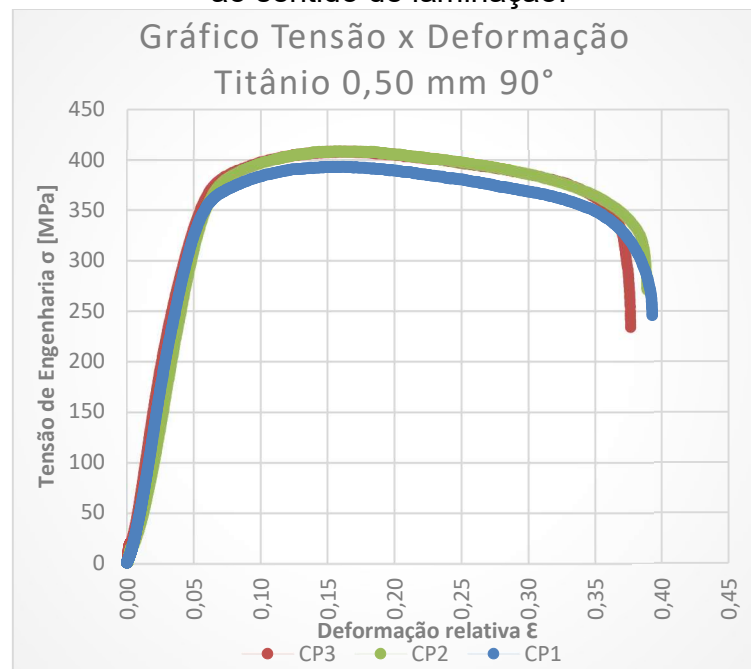
Fonte: Do Autor

Figura 26: Curva tensão x deformação dos corpos de prova 1, 2 e 3, 45° em relação ao sentido de laminação.



Fonte: Do autor

Figura 27: Curva tensão x deformação dos corpos de prova 1, 2 e 3, 90° em relação ao sentido de laminação.



Fonte: Do autor

Através dos ensaios de tração foi possível obter os valores de tensão máxima (σ_B), deformação relativa (ε), alongamento (δ) e a curva de escoamento do material.

Os cálculos apresentados abaixo são referentes ao corpo de prova 1 retirado a 0° em relação ao sentido de laminação.

Para calcular a tensão máxima foi aplicada a Equação (2):

$$\sigma_B = \frac{F}{A_0}$$

$$\sigma_B = \frac{2549,10}{6,25}$$

$$\sigma_B = 407,85 \text{ MPa}$$

O valor de tensão máxima obtido, 407,85Mpa, é abaixo do encontrado na literatura, que é de 520 MPa, indicando que o material utilizado é mais dúctil.

Para calcular a deformação relativa foi aplicada a Equação (3):

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$$

$$\varepsilon = \frac{75,9 - 60}{60}$$

$$\varepsilon = 0,265$$

O alongamento (δ) é dado pela diferença entre o comprimento final e o comprimento inicial.

$$\delta = l - l_0$$

$$\delta = 75,9 - 60$$

$$\delta = 15,90 \text{ mm}$$

4.1.2 Curva de Escoamento

Para definição da curva de escoamento foi necessário aplicar inicialmente a Equação (6) para calcular a deformação verdadeira:

$$\begin{aligned}\varphi &= \ln (1 + \varepsilon) \\ \varphi &= \ln (1 + 0,265) \\ \varphi &= 0,23 \\ \varphi &= n = 0,23\end{aligned}$$

Para o cálculo da tensão verdadeira (k_f) correspondente à tensão máxima do material foi aplicada a Equação (4):

$$\begin{aligned}k_f &= \sigma_B (1 + \varepsilon) \\ k_f &= 407,85 (1 + 0,265) \\ k_f &= 515,93\end{aligned}$$

Desta forma aplicando a Equação (5) foi possível chegar na constante C:

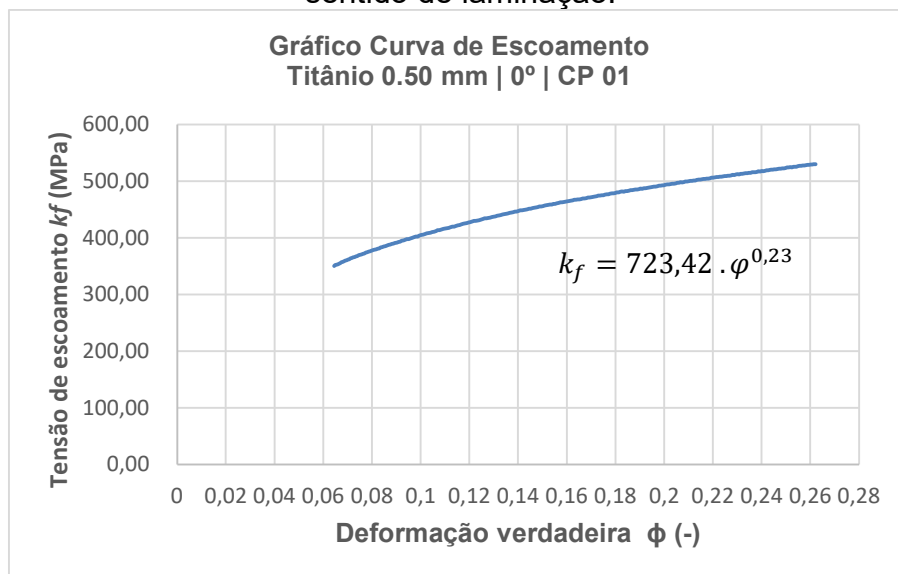
$$\begin{aligned}k_f &= C \cdot \varphi^n \\ 515,93 &= C \cdot 0,23^{0,23} \\ C &= 723,42\end{aligned}$$

Assim a curva de escoamento ($k_f \times \varphi$) do titânio puro grau 2 pode ser definida matematicamente por:

$$k_f = 723,42 \cdot \varphi^{0,23}$$

A Figura 28 apresenta o gráfico plotado a partir dos cálculos apresentados.

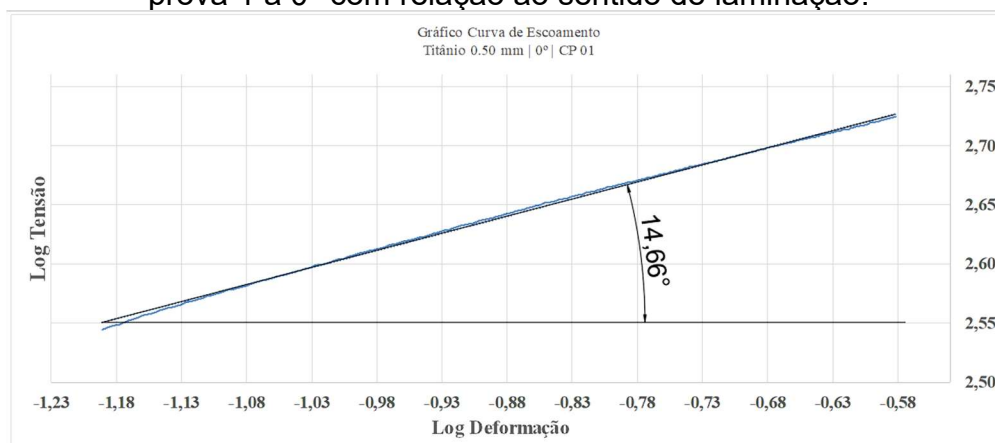
Figura 28: Curva de escoamento do titânio puro Grau 2, corpo de prova a 0° do sentido de laminação.



Fonte: Do Autor

Plotando a curva de escoamento em escala logarítmica pode-se obter o índice de encruamento (n) do material. A partir da curva logarítmica obtém-se uma reta, o índice de encruamento é dado pela inclinação desta reta (α). A Figura 29 apresenta a curva de escoamento representada com eixos logarítmicos.

Figura 29: Curva de escoamento representada com eixos logarítmicos, corpo de prova 1 a 0° com relação ao sentido de laminação.



Fonte: Do Autor

Para determinar o índice de encruamento foi aplicada a Equação (7):

$$n = \tan \alpha$$

$$n = \tan 14,66$$

$$n = 0,26$$

4.1.3 Índice de Anisotropia

Com os valores obtidos através dos ensaios de tração, foi possível obter os índices de anisotropia (r) para os corpos de prova retirados paralelos ao sentido de laminação (0°), oblíquo ao sentido de laminação (45°) e perpendicular ao sentido de laminação (90°). Para obter os valores de (r) foi utilizada a Equação (8), a Tabela 5 apresenta os valores dos índices de anisotropia.

Tabela 5: Índices de Anisotropia.

Direção	Corpo de Prova	b_0 (mm)	b (mm)	l_0 (mm)	l (mm)	r	Média (r)
0°	1	12,5	11	60	75,90	1,19	1,19
	2	12,5	11,1	60	75,96	1,01	
	3	12,5	10,9	60	76,00	1,38	
45°	1	12,5	10,8	60	75,97	1,63	1,63
	2	12,5	10,8	60	75,71	1,69	
	3	12,5	10,9	60	75,92	1,39	
90°	1	12,5	11	60	75,94	1,19	1,26
	2	12,5	10,9	60	76,69	1,26	
	3	12,5	10,9	60	76	1,38	

Fonte: Do Autor

A anisotropia média (r_m) representa a capacidade de uma chapa metálica resistir a redução de espessura quando esta é submetida a forças de tração, a anisotropia média é calculada utilizando a Equação (9):

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

$$r_m = \frac{1}{4} (1,19 + 2 * 1,63 + 1,26)$$

$$r_m = 1,427$$

Materiais que não apresentam variações nas propriedades mecânicas independente do sentido de laminação são denominados materiais isotrópicos, este apresenta $r_m=1$, quanto maior ou menor for o valor diferente de 1 indica que o material é anisotrópico, valores $r_m>1$ indicam que o material oferece maior resistência à deformação plástica na espessura.

A anisotropia planar Δr mede a variação de r entre as direções longitudinal e transversal de laminação. Para definir tal valor foi utilizada a Equação (10):

$$\Delta_r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ}$$

$$\Delta_r = \frac{1,19 + 1,26}{2} - 1,63$$

$$\Delta_r = -0,405$$

O valor de anisotropia planar Δr negativo indica, conforme visto na Tabela 5, que o índice de anisotropia a 45° é maior do que a 0° e 90° em relação ao sentido de laminação, o que indica a tendência ao orelhamento no ângulo de 45° em casos de embutimento.

4.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados referentes aos experimentos de estampagem incremental.

Os experimentos de 1 a 7 foram definidos como raio de canto o valor de 20 mm, variando apenas o ângulo de parede (Ψ) incrementando 1° a cada novo experimento até se obter o melhor resultado com este raio, com o melhor resultado obtido variou-se o valor do raio de canto afim de avaliar sua influência na estampagem incremental, a variação do raio de canto foi realizada com incremento/decremento de 5 mm. A Tabela 6 apresenta os resultados de rompimento dos experimentos realizados.

Tabela 6: Resultados dos experimentos de estampagem incremental.

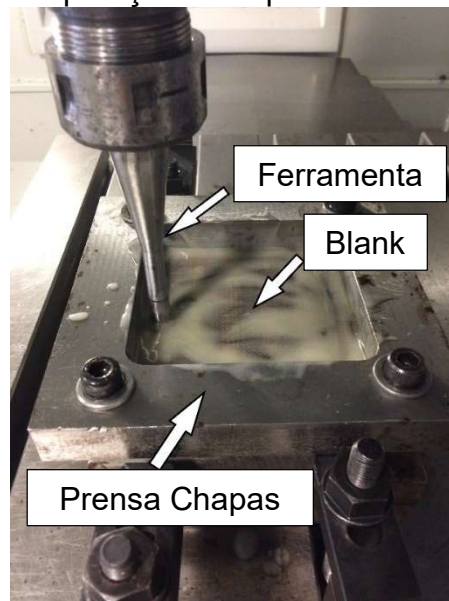
Experimento	Ângulo de parede Ψ (°)	Estratégia	Raio de Canto (mm)	Resultado
1	48	Helicoidal	R20	Não rompeu.
2	49	Helicoidal	R20	Não rompeu.
3	50	Helicoidal	R20	Não rompeu.
4	51	Helicoidal	R20	Não rompeu.
5	52	Helicoidal	R20	Não rompeu.
6	53	Helicoidal	R20	Não rompeu.
7	54	Helicoidal	R20	Rompeu / 15mm
8	53	Helicoidal	R15	Não rompeu.
9	53	Helicoidal	R10	Rompeu / 15,5mm
10	53	Helicoidal	R25	Rompeu / 22,5mm
11	53	Helicoidal	R15	Não rompeu.
12	53	Helicoidal	R15	Não rompeu.
13	53	Helicoidal	R20	Não rompeu.
14	53	Helicoidal	R20	Não rompeu.
15	53	Helicoidal	R25	Rompeu / 30mm
16	53	Helicoidal	R25	Rompeu / 25,5mm
17	53	Helicoidal	R10	Rompeu / 14,6mm
18	53	Helicoidal	R10	Rompeu / 14,9mm

Fonte: Do Autor

No primeiro experimento, optou-se por um ângulo de parede (Ψ) de 48° baseado nos estudos de Daleffe [3], que obteve sucesso com 47° na estampagem incremental de chapas de titânio puro grau 2 de espessura 0,5 mm utilizando estratégia paralela de descida, a qual a ferramenta entra e sai do perfil a ser estampado a cada incremento de profundidade.

O experimento número 1, com ângulo de parede (Ψ) de 48° foi concluído com sucesso, validando a estratégia escolhida para os estudos. A Figura 30 mostra o método de fixação da chapa e a aplicação do fluido utilizado.

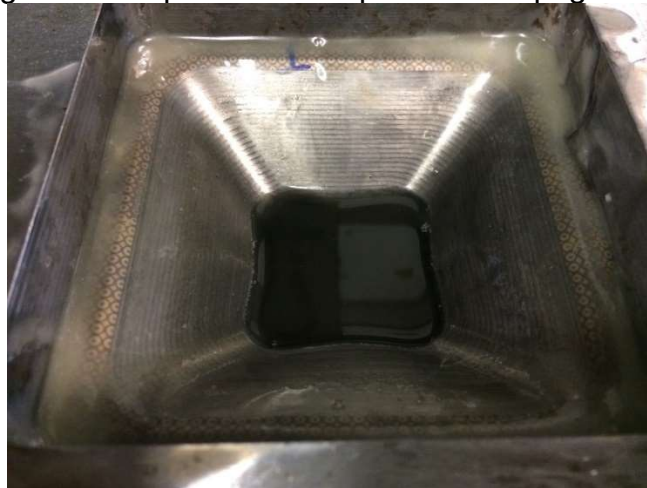
Figura 30: Preparação do experimento número 1.



Fonte: Do Autor

Durante a execução do experimento percebeu-se que o fluido de origem animal foi adicionado de forma pastosa, Figura 30, e após a execução do experimento ele se apresentou de forma líquida, como pode-se observar na Figura 31, o que mostra leve aquecimento durante o processo.

Figura 31: Experimento 1 após a estampagem.

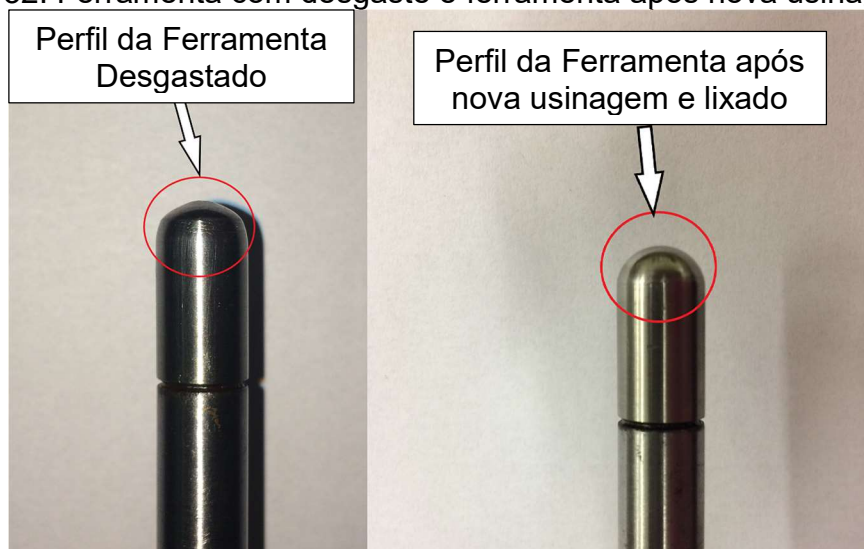


Fonte: Do Autor

Após o primeiro experimento executado percebeu-se que a ferramenta apresentou desgaste considerável, comprometendo a geometria esférica como podemos observar na Figura 32, para garantir a padronização em todos os experimentos o inserto da ferramenta foi reusinado pelo processo de torneamento CNC após cada

experimento, garantindo assim a forma geométrica da ferramenta. Após o processo de torneamento foi utilizada lixa com granulometria 800 para realizar acabamento da superfície na ferramenta.

Figura 32: Ferramenta com desgaste e ferramenta após nova usinagem.



Fonte: Do Autor

Para o experimento número 2 incrementou-se o ângulo de parede em 1° , obtendo resultado positivo. Repetiu-se o procedimento até o experimento número 7, que com ângulo de parede (Ψ) de 54° rompeu durante a execução da estampagem incremental na profundidade de 15 mm, o valor da profundidade foi obtido através das coordenadas de movimentação disponíveis no painel da máquina utilizada, sendo abortado o experimento no momento do rompimento. O rompimento ocorreu na parede transversal ao sentido de laminação, próximo ao raio de canto.

O rompimento do experimento número 7 foi do tipo fratura, que aparenta ser uma trinca que se propaga à medida que a estampagem vai acontecendo. Na Figura 33 pode-se observar o rompimento ocorrido no experimento 7.

Figura 33: Região de rompimento do experimento 7.



Fonte: Do Autor

Com o rompimento do experimento 7 com ângulo de parede de 54° , foi adotado o ângulo de parede do experimento anterior, número 6, 53° , como melhor resultado, mantendo este valor como padrão para os próximos experimentos.

Os experimentos 8, 9 e 10 foram realizados com ângulo de parede de 53° , porém variando o raio de canto afim de avaliar se este teria influência no resultado.

O experimento número 8 foi realizado com ângulo de parede de 53° e raio de canto de 15 mm, este experimento obteve sucesso e conseguiu ir até o final sem rompimento.

O experimento 9 foi variado o raio de canto para 10 mm, o mesmo apresentou rompimento do tipo fratura com 15,5 mm de profundidade após o início da estampagem. Assim como o experimento 7, o rompimento ocorreu na parede transversal ao sentido de laminação e próximo ao raio de canto, na Figura 34 pode-se observar a região do rompimento e a inscrição da chapa indicando o sentido de laminação.

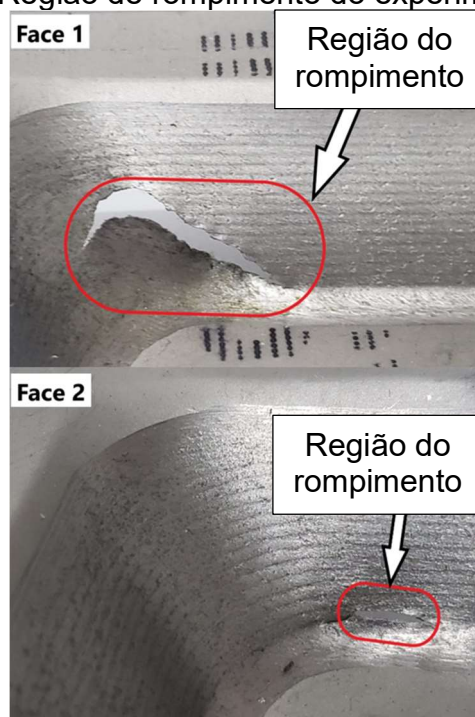
Figura 34: Região de rompimento do experimento 9.



Fonte: Do Autor

O experimento 10 foi alterado o raio de canto para cima do raio de canto base que era 20 mm, sendo este executado com raio de canto de 25 mm. Porém, este experimento não obteve sucesso, tendo ruptura aos 22,5 mm de profundidade após o início da estampagem, o rompimento foi do tipo fratura, ocorrendo em duas faces da peça, ambas faces transversais ao sentido de laminação próximas ao raio de canto, conforme pode-se observar na Figura 35.

Figura 35: Região de rompimento do experimento 10.



Fonte: Do Autor

Com o experimento 10 realizado, não foi mais alterado o valor de raio de canto, sendo assim os experimentos de 11 a 18 foram repetidos duas vezes todos os experimentos com ângulo de parede de 53° .

Os experimentos 11 e 12 foram executados com raio de canto de 15 mm, tendo ambos sido concluídos sem nenhum tipo de rompimento assim como o experimento número 8.

Os experimentos 13 e 14 foram executados com raio de canto de 20 mm, e assim como o experimento número 6 foram concluídos sem apresentar nenhum tipo de ruptura.

Os experimentos 15 e 16 foram estampados com raio de canto de 25 mm e assim como o experimento número 10 apresentaram rompimento. O experimento número 15 rompeu com 30 mm de profundidade após o início da estampagem, e o experimento número 16 rompeu com 25,5 mm de profundidade após o início da estampagem, ambos experimentos apresentaram rompimento no sentido transversal ao sentido de laminação e próximos ao raio de canto, o rompimento foi do tipo fratura nos dois experimentos. Nas Figuras 36 e 37 pode-se observar o rompimento dos experimentos 15 e 16.

Figura 36: Região de rompimento do experimento 15.



Fonte: Do Autor

Figura 37: Região de rompimento do experimento 16.



Fonte: Do Autor

Os experimentos 17 e 18 foram executados com raio de canto de 10 mm, assim como o experimento número 9 apresentaram rompimento tipo fratura. O experimento 17 rompeu com 14,6 mm de profundidade após o início da estampagem e o experimento 18 rompeu com 14,9 mm de profundidade. Ambos os rompimentos ocorreram no sentido transversal ao sentido de laminação e próximos ao raio de canto, nas Figuras 38 e 39 pode-se observar os rompimentos.

Figura 38: Região de rompimento do experimento 17.



Fonte: Do Autor

Figura 39: Região de rompimento do experimento 18.

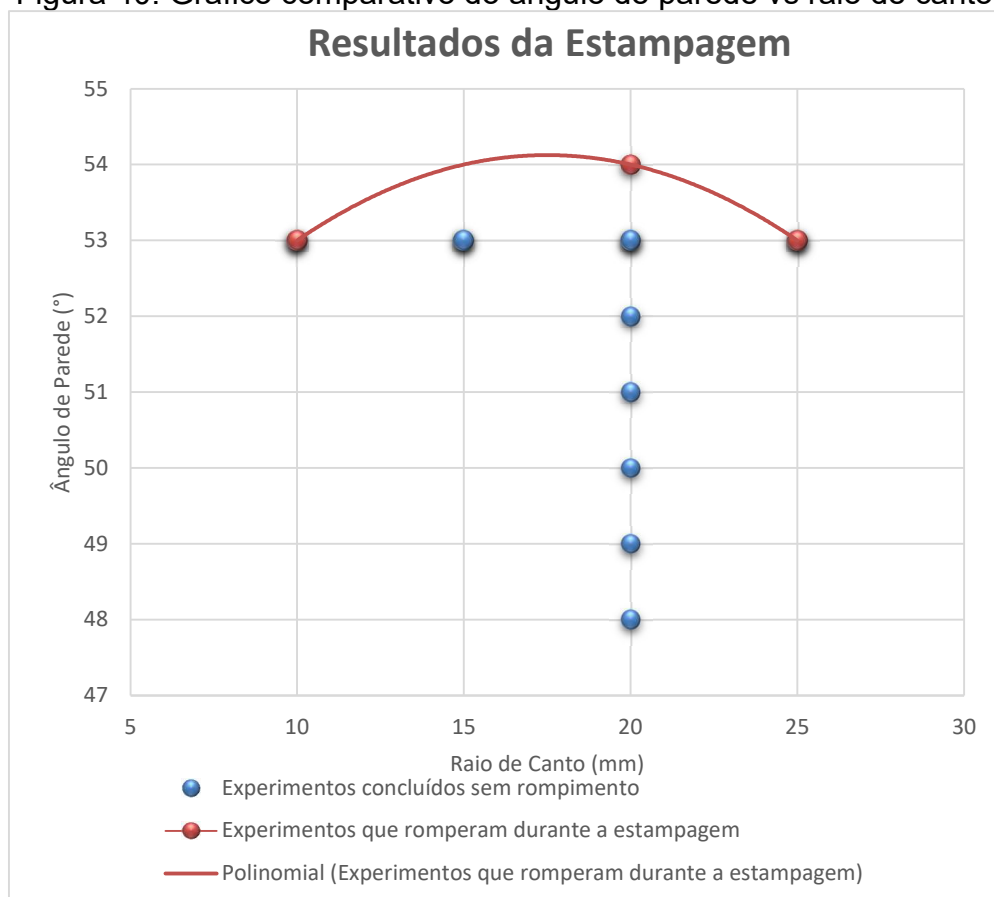


Fonte: Do Autor

Com os experimentos concluídos os melhores resultados foram com ângulo de parede de 53° e raio de canto de 20 mm (experimentos 6, 13 e 14) e 15 mm (experimentos 8, 11 e 12).

As peças que apresentaram rompimento foram as realizadas nos experimentos 7, 9, 10, 15, 16, 17 e 18, todas apresentaram rompimento no sentido transversal ao sentido de laminação e próximas ao raio de canto. Isso indica que esta é a região de maior concentração de tensões, tendendo a ser o ponto de ruptura. Na Figura 40 está plotado o gráfico que apresenta os resultados da estampagem, Tabela 6, relacionando o ângulo de parede com raio de canto das peças estampadas.

Figura 40: Gráfico comparativo do ângulo de parede vs raio de canto.



Fonte: Do Autor

4.3 RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE

Com as peças estampadas foi realizada a medição da rugosidade conforme os parâmetros estabelecidos. Foram realizadas as medições em todas as peças que foram estampadas. A Tabela 7 apresenta a média aritmética de três valores obtidos com a medição.

Tabela 7: Resultados da medição de rugosidade da superfície, Ra.

Experimento	Rugosidade no sentido longitudinal a direção de laminação (μm)	Rugosidade no sentido transversal a direção de laminação (μm)
1	0,832	0,833
2	1,179	1,097
3	0,985	0,901
4	1,209	1,254
5	0,958	0,824

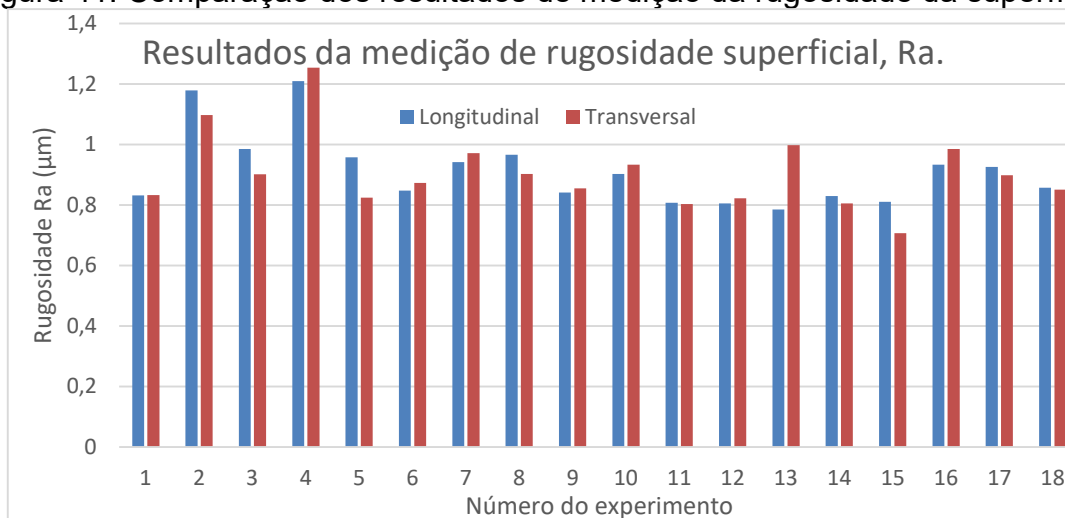
Experimento	Rugosidade no sentido longitudinal a direção de laminação (μm)	Rugosidade no sentido transversal a direção de laminação (μm)
6	0,847	0,873
7	0,942	0,971
8	0,966	0,903
9	0,841	0,855
10	0,902	0,933
11	0,807	0,803
12	0,805	0,822
13	0,785	0,998
14	0,83	0,805
15	0,81	0,707
16	0,933	0,985
17	0,926	0,898
18	0,857	0,851

Fonte: Do Autor

Segundo estudos realizados por Ponsonnet [75] a rugosidade em peças de titânio influencia na proliferação celular após o implante, em seus estudos constatou que a rugosidade ideal para que haja a proliferação é entre 0,08 e 1 μm .

Os resultados de rugosidade obtidos nas peças estampadas ficaram dentro da faixa citada como ideal para a proliferação celular, com exceção dos experimentos número 4 e 2, que ficaram pouco acima de 1 μm , possivelmente nestes casos isolados possa ter sido influenciado pela rugosidade da ferramenta, como já mencionado, o inserto da ferramenta foi usinado novamente antes de cada experimento afim de garantir a forma geométrica da ferramenta, o acabamento após a usinagem da ferramenta foi realizado de maneira manual utilizando lixa, o que pode ter gerado diferenças de rugosidade na ponta da ferramenta para cada experimento refletindo na rugosidade da peça estampada. Na Figura 41 podemos verificar a comparação dos valores de rugosidade medidos.

Figura 41: Comparação dos resultados de medição da rugosidade da superfície.



Fonte: Do Autor

De modo geral os resultados de rugosidade da superfície utilizando a estratégia de estampagem incremental com descida helicoidal foram melhores do que os resultados encontrados por Daleffe [3] que utilizou a estratégia paralela de descida chegando a gerar valores de rugosidade na casa de 5 µm. Os valores encontrados, avaliando principalmente os experimentos com resultados positivos, indicam que a aplicação desta estratégia na fabricação de próteses elimina a necessidade de outros processos de acabamento após a estampagem como polimento.

4.4 RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE MASSA

Assim como a medição de rugosidade da superfície, a medição da massa das peças foi realizada em todas as peças estampadas. A Tabela 8 mostra a média aritmética após 3 medições em cada peça.

Tabela 8: Resultados da medição de massa.

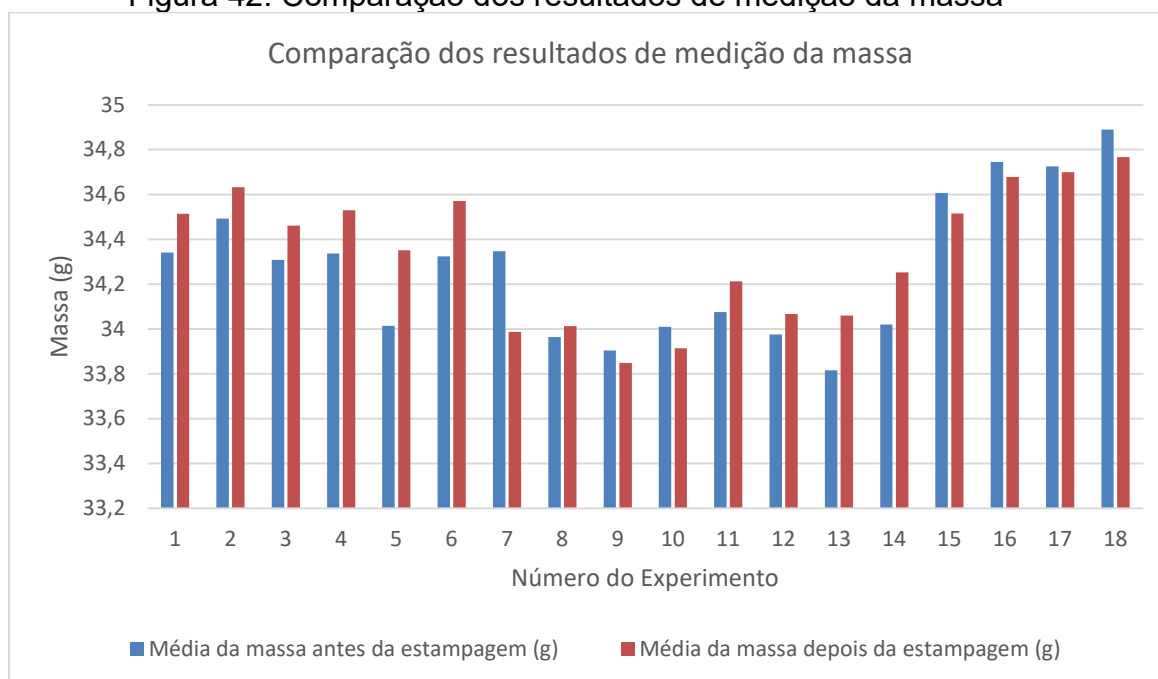
Experimento	Média da massa antes da estampagem (g)	Média da massa depois da estampagem (g)
1	34,3405	34,5132
2	34,4924	34,6317
3	34,3082	34,4606
4	34,3364	34,5288
5	34,0145	34,3516
6	34,3243	34,5705
7	34,3462	33,9869

Experimento	Média da massa antes da estampagem (g)	Média da massa depois da estampagem (g)
8	33,9638	34,0129
9	33,9041	33,8489
10	34,0099	33,9134
11	34,0758	34,2124
12	33,9748	34,0665
13	33,8161	34,0596
14	34,0195	34,6524
15	34,6062	34,5149
16	33,9781	34,7452
17	34,7257	34,6994
18	34,8892	34,7662

Fonte: Do Autor

Com a medição da massa antes e depois da estampagem pode-se constatar que houve ganho de massa nas peças que tiveram a estampagem concluída sem apresentar nenhum tipo de rompimento e as peças que romperam durante o processo apresentaram perda de massa. Os ganhos de massa indicam relação com o desgaste do inserto da ferramenta, de modo que se pode pressupor que o material da ferramenta aderiu à peça durante o processo. Na Figura 42 podemos verificar a comparação dos valores de massa medidos.

Figura 42: Comparação dos resultados de medição da massa

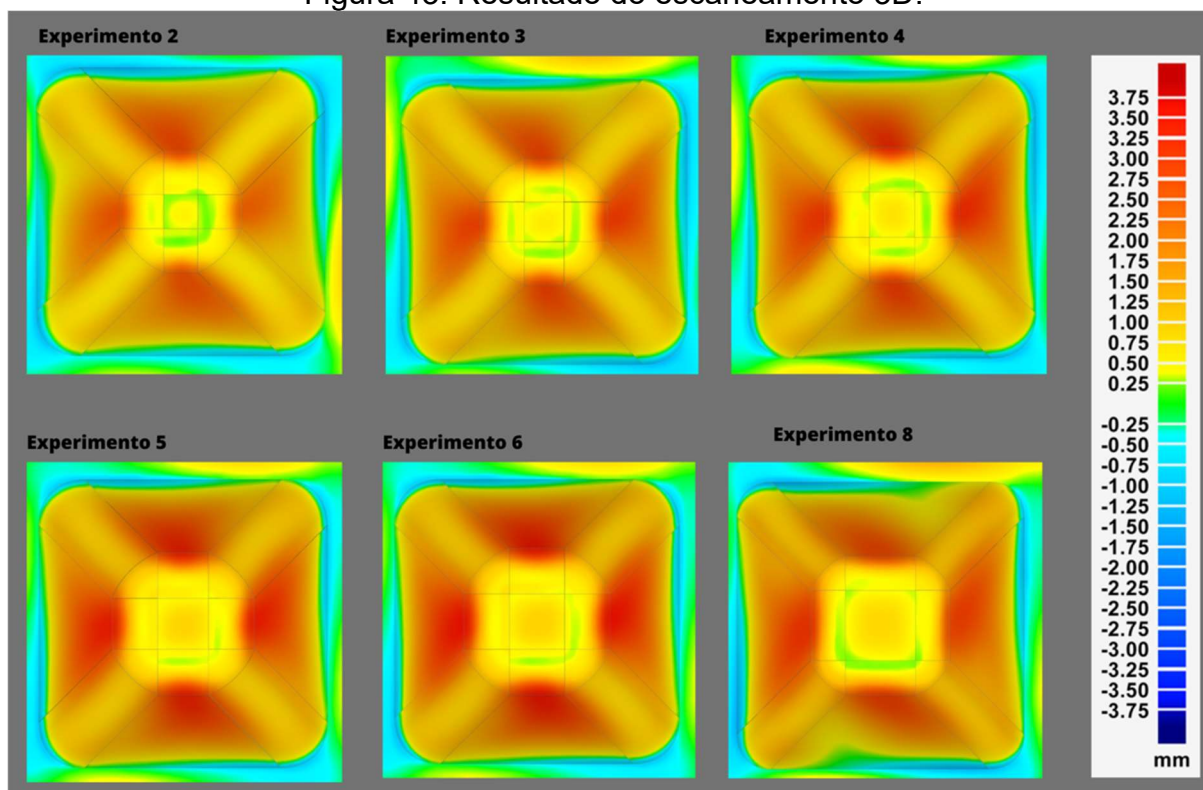


Fonte: Do Autor

4.5 ESCANEAMENTO 3D

O escaneamento 3D foi realizado nos corpos de prova dos experimentos 1, 2, 3, 4, 5, 6, e 8 que foram os que apresentaram resultados positivos para cada ângulo e raio de canto analisados. Foi utilizado para a comparação o lado interno da peça estampada (região onde a ferramenta entrou em contato com a peça), desprezando o lado externo. A Figura 43 apresenta os resultados dos desvios geométricos das dos experimentos 2, 3, 4, 5, 6 e 8. As análises são vistas de topo, sendo assim as áreas em tons de vermelho estão deslocadas no sentido positivo. Observa-se que os rebaixos das peças, em geral vermelhos, estão acima da referência, caracterizando que estão menores, como um deslocamento para dentro.

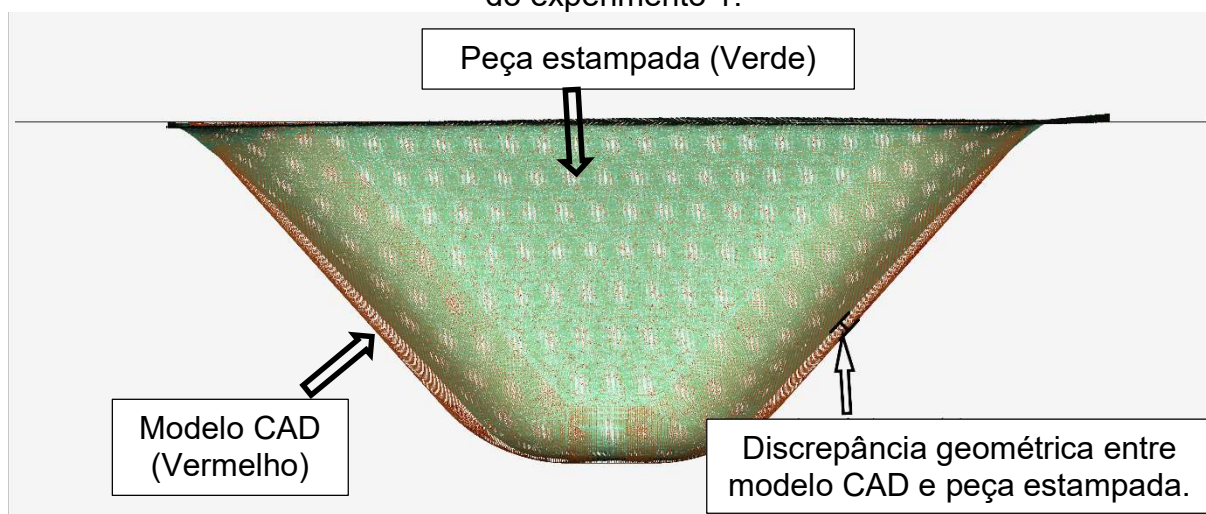
Figura 43: Resultado do escaneamento 3D.



Fonte: Do Autor

Na Figura 44 se pode observar a sobreposição lateral do corpo de prova do experimento número 1, onde fica evidente o deslocamento para dentro. Na imagem os pontos em vermelho representam o modelo CAD e os pontos verdes representam a peça escaneada.

Figura 44: Sobreposição lateral do modelo CAD e escaneamento do corpo de prova do experimento 1.



Fonte: Do Autor

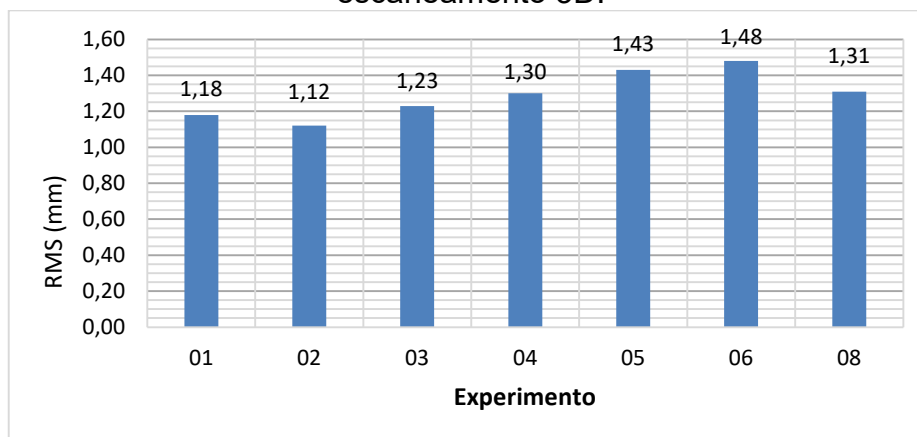
Os tons em azul ficam todos na chapa de cima, visto que havia alguns empenamentos, cabe destacar que a borda do CAD possui cantos vivos na transição da área plana superior para a região estampada, mas as bordas das peças estampadas ficaram levemente arredondadas, aparecendo em azul também.

Conforme já citado, o ângulo de parede aumenta a cada experimento, tendo 48° no experimento 1 e 53° no experimento 6 e 8. Pode-se afirmar que o erro dimensional aumenta em função do aumento do ângulo de parede, uma possível explicação seria que as paredes mais verticais demandam uma maior deformação plástica da chapa, que não é plenamente atingida, sofrendo possivelmente um retorno elástico que gera o erro dimensional. Observa-se que nos raios de canto o erro dimensional é menor do que nas paredes laterais, e que ocorre um abaulamento das faces laterais. O erro dimensional aumenta conforme a profundidade da peça, com exceção do plano inferior, visto que o processo de estampagem se inicia de fora para dentro, a região do centro não tem contato com a ferramenta de estampagem, sofrendo menores deformações, conseqüentemente menores discrepâncias geométricas.

Em relação a peça 8, ela possui geometria semelhante à peça 6, com mesmo ângulo de parede (53°), porém, com raio de canto menor (15 mm). Na região dos raios de canto o erro dimensional é muito semelhante às demais peças (2, 3, 4, e 5). A maior diferença ocorre nas faces inclinadas, as quais ficam com erro menor, tendo menos abaulamento. Uma possível razão para isso seria o aumento da largura/área das faces laterais, fazendo com que se comportem melhor frente à deformação. Na

Figura 45 está plotado o gráfico comparativo das deformações em milímetros de cada experimento.

Figura 45: Gráfico comparativo dos deslocamentos encontrados através do escaneamento 3D.



Fonte: Do Autor

4.6 RESULTADO DA MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES

Com a medição das deformações através dos círculos gravados da chapa bruta foi possível calcular as deformações verdadeiras. Foram medidos 10 pontos sendo o ponto número 1 o mais próximo da borda superior e o ponto número 10 o mais próximo do fundo da peça estampada. A Tabela 9 apresenta os valores das deformações encontrados para o experimento 6.

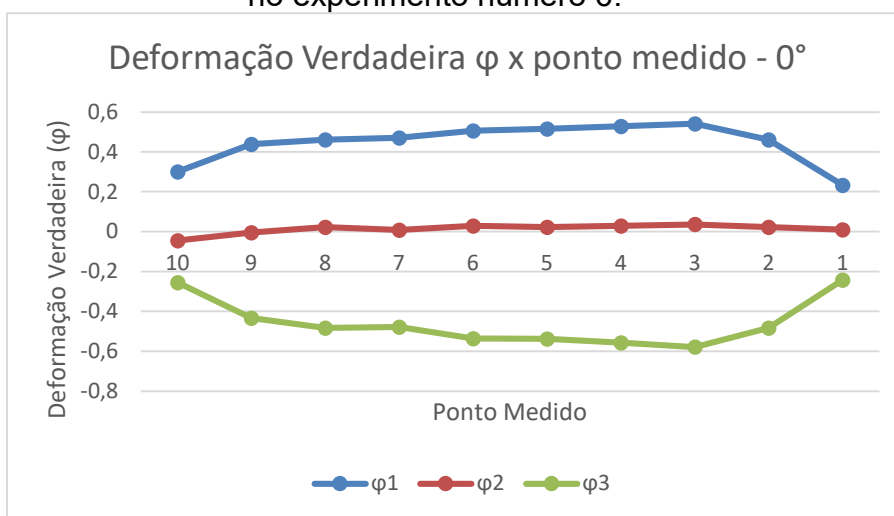
Tabela 9: Deformações verdadeiras de acordo com o sentido de laminação (0° , 45° e 90°) do experimento número 6.

Ponto medido	0°			45°			90°		
	$\varphi 1$	$\varphi 2$	$\varphi 3$	$\varphi 1$	$\varphi 2$	$\varphi 3$	$\varphi 1$	$\varphi 2$	$\varphi 3$
1	0,23	0,01	-0,24	0,09	0,01	-0,10	0,18	-0,06	-0,12
2	0,46	0,02	-0,48	0,21	0,06	-0,28	0,38	-0,07	-0,31
3	0,54	0,04	-0,58	0,38	0,09	-0,46	0,39	-0,10	-0,29
4	0,53	0,03	-0,56	0,30	0,05	-0,35	0,38	-0,07	-0,31
5	0,52	0,02	-0,54	0,31	0,03	-0,34	0,37	-0,06	-0,31
6	0,51	0,03	-0,54	0,31	0,04	-0,35	0,34	-0,11	-0,23
7	0,47	0,01	-0,48	0,35	0,06	-0,42	0,37	-0,07	-0,30
8	0,46	0,02	-0,48	0,32	0,04	-0,36	0,40	-0,08	-0,32
9	0,44	-0,01	-0,43	0,29	0,04	-0,34	0,35	-0,08	-0,27
10	0,30	-0,04	-0,26	0,27	0,01	-0,29	0,18	-0,15	-0,04

Fonte: Do Autor

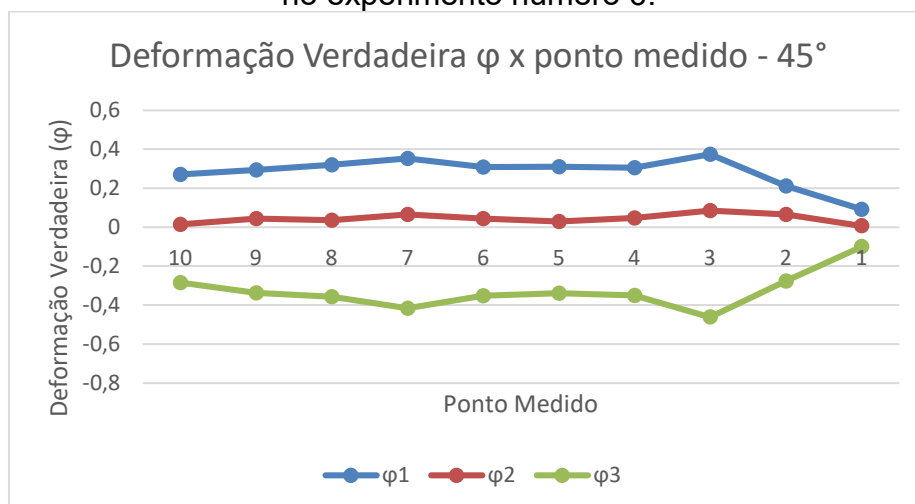
Nas Figuras 46, 47 e 48 estão plotados os resultados apresentados na Tabela 9 de acordo com seu sentido de laminação. Os gráficos mostram uma tendência que as deformações ocorrem de maneira semelhante à deformação plana ($\varphi_2=0$). Observe-se que os valores máximos de deformação, 0,54, ocorre a 0° em relação ao sentido de laminação, e a 45° e 90° os valores das deformações são mais próximos entre si.

Figura 46: Deformação φ x ponto medido a 0° em relação ao sentido de laminação no experimento número 6.



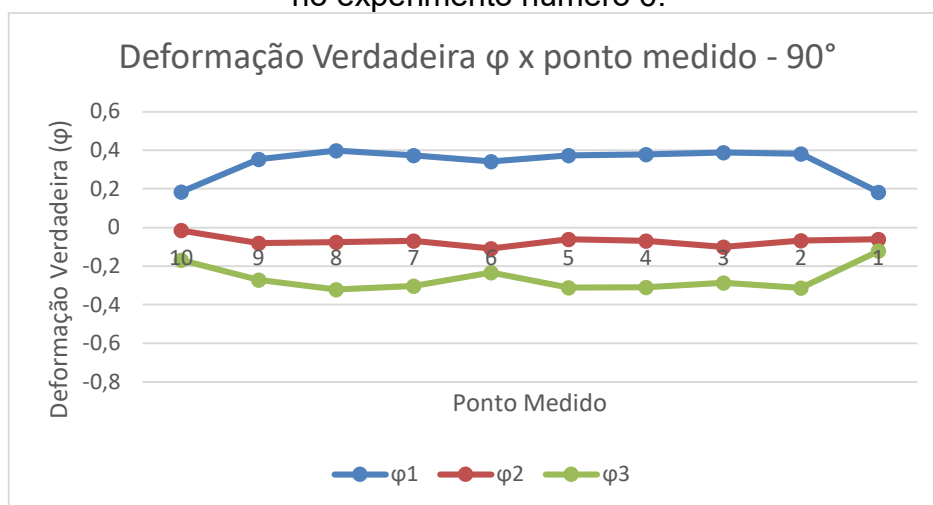
Fonte: Do Autor

Figura 47: Deformação φ x ponto medido a 45° em relação ao sentido de laminação no experimento número 6.



Fonte: Do Autor

Figura 48: Deformação φ x ponto medido a 90° em relação ao sentido de laminação no experimento número 6.



Fonte: Do Autor

Do mesmo modo, foram realizadas as medições das deformações no experimento número 8. Nas Figuras 49, 50 e 51 estão plotados os resultados apresentados na Tabela 10.

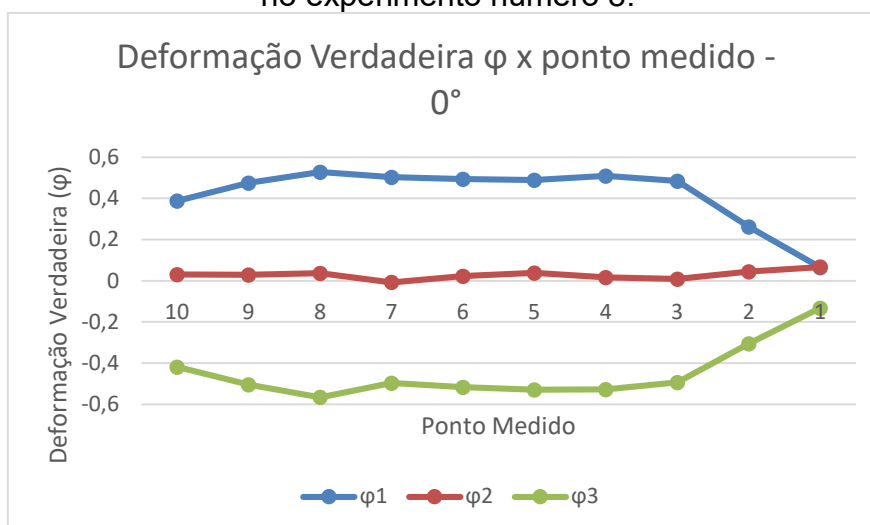
Assim como as análises das deformações do experimento número 6, as deformações do experimento número 8 se aproximam da deformação plana ($\varphi_2=0$). Observa-se que os valores máximos de deformação, 0,53, ocorre a 0° em relação ao sentido de laminação.

Tabela 10: Deformações verdadeiras de acordo com o sentido de laminação (0° , 45° e 90°) do experimento número 8.

Ponto medido	0°			45°			90°		
	φ_1	φ_2	φ_3	φ_1	φ_2	φ_3	φ_1	φ_2	φ_3
1	0,07	0,07	-0,13	0,20	0,11	-0,31	0,28	-0,01	-0,26
2	0,26	0,04	-0,31	0,28	0,03	-0,32	0,44	-0,01	-0,43
3	0,49	0,01	-0,49	0,29	0,05	-0,34	0,45	-0,01	-0,44
4	0,51	0,02	-0,53	0,31	0,06	-0,37	0,47	0,01	-0,48
5	0,49	0,04	-0,53	0,32	0,09	-0,41	0,48	-0,01	-0,47
6	0,49	0,02	-0,52	0,30	0,07	-0,37	0,47	0,00	-0,47
7	0,50	-0,01	-0,50	0,28	0,09	-0,37	0,49	-0,01	-0,48
8	0,53	0,04	-0,57	0,34	0,09	-0,43	0,46	-0,04	-0,42
9	0,47	0,03	-0,50	0,32	0,09	-0,40	0,41	-0,04	-0,36
10	0,39	0,03	-0,42	0,24	0,04	-0,28	0,36	-0,01	-0,35

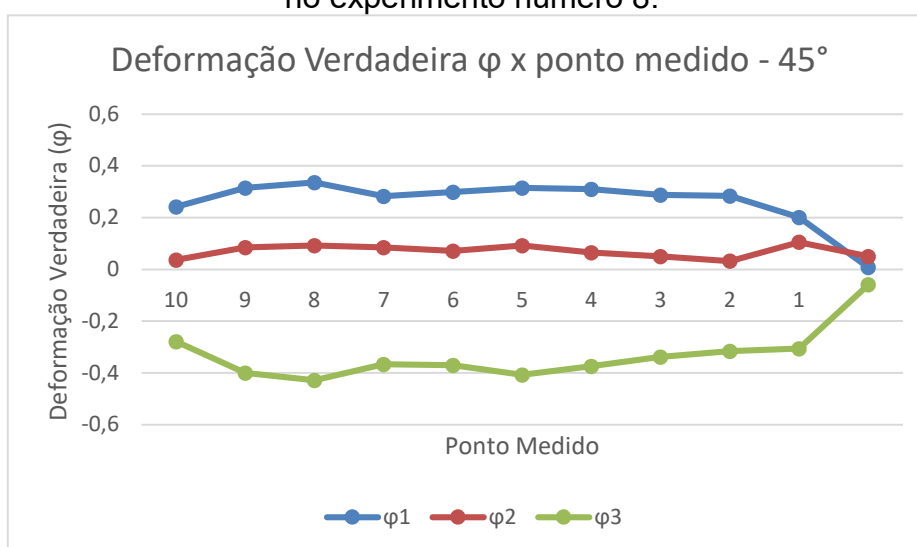
Fonte: Do Autor

Figura 49: Deformação φ x ponto medido a 0° em relação ao sentido de laminação no experimento número 8.



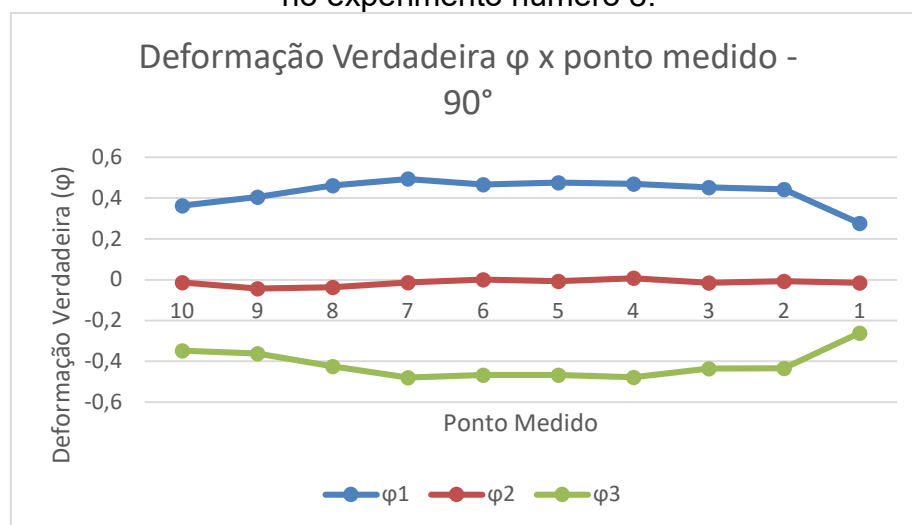
Fonte: Do Autor

Figura 50: Deformação φ x ponto medido a 45° em relação ao sentido de laminação no experimento número 8.



Fonte: Do Autor

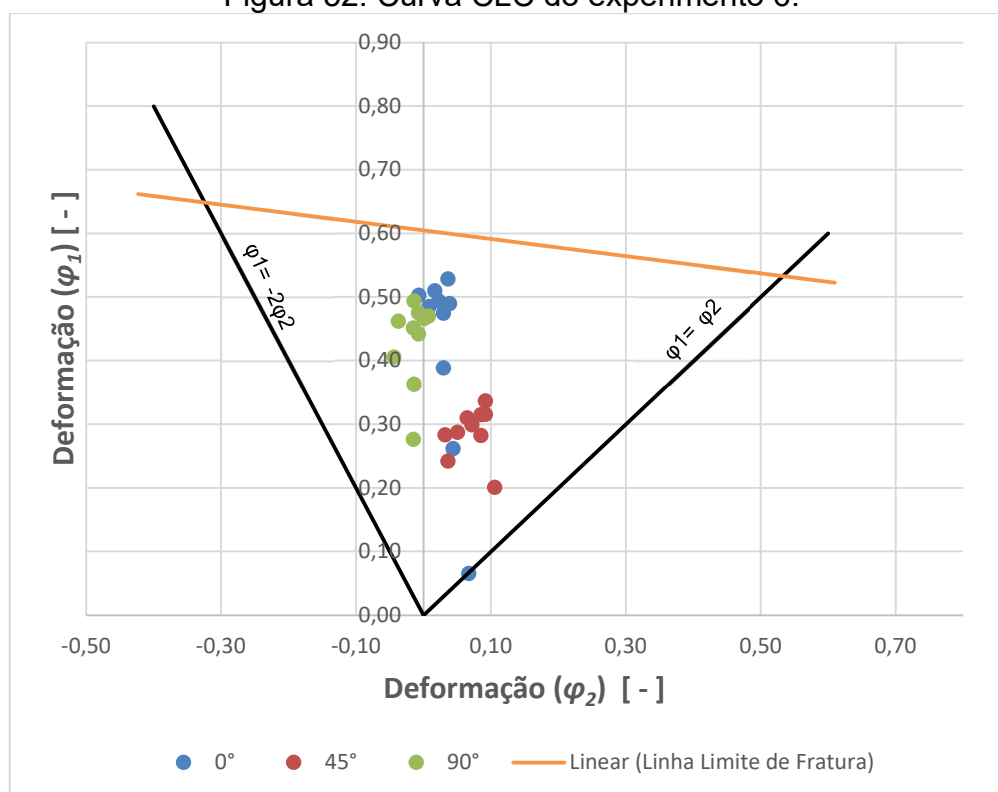
Figura 51: Deformação φ x ponto medido a 90° em relação ao sentido de laminação no experimento número 8.



Fonte: Do Autor

Com os valores de deformação foi possível plotar a curva CLC da estampagem realizada. A Figura 52 apresenta a curva CLC do experimento 6.

Figura 52: Curva CLC do experimento 6.

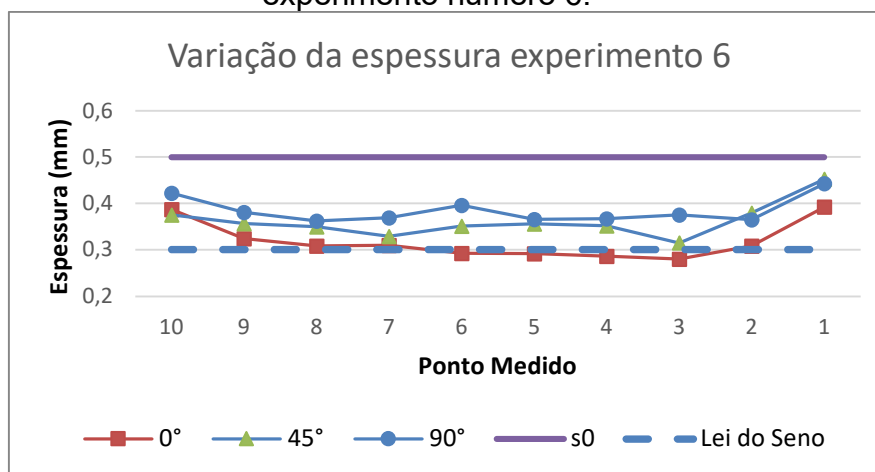


Fonte: Do Autor

Com a curva CLC é possível verificar que as deformações encontradas, independente da direção em relação ao sentido de laminação, no experimento 6 ficaram abaixo da Linha Limite de Fratura encontrada para o titânio puro ASTM F67 grau 2 utilizado nos estudos. Isso indica que o rompimento das peças é pouco influenciado pela direção de laminação, mas sim pelo raio de canto das peças e pelo ângulo de parede.

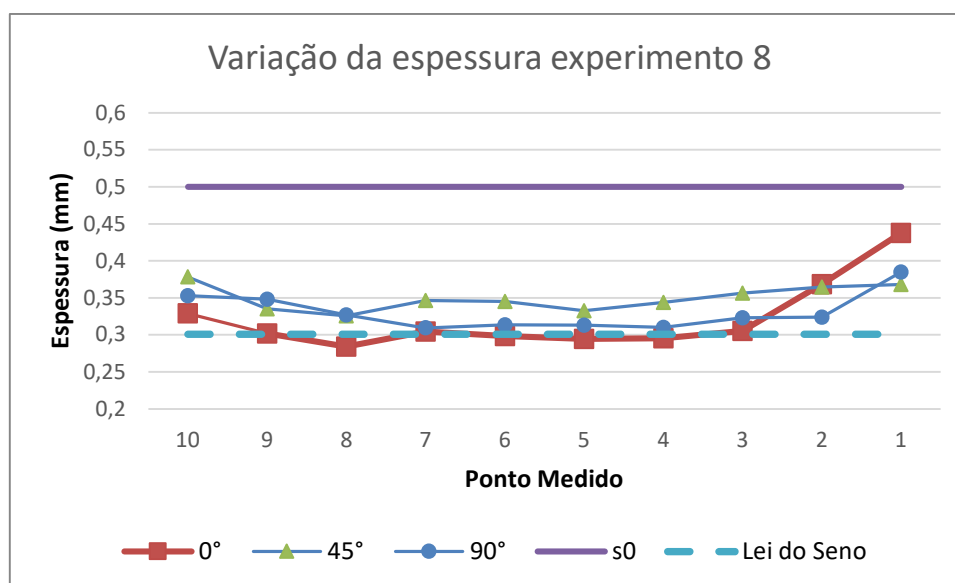
Considerando a lei de constância de volume foi determinada a espessura da chapa estampada em cada ponto de deformação medido. Considerando a Lei do Seno, conforme a Equação (1), para o ângulo máximo obtido, 53° , o valor limite da espessura da chapa é de 0,30 mm. Nos experimentos 6 e 8 observou-se que se atingiu espessura de 0,28 mm no sentido longitudinal de laminação da chapa, menor do que o estimado através da Lei do Seno, em seus estudos Fritzen [5] também observou um alcance maior do que o estabelecido pela lei do Seno na estampagem incremental de latão. Nas Figuras 53 e 54 estão plotadas as relações de espessura para os sentidos 0° , 45° e 90° em relação ao sentido de laminação da chapa para os experimentos 6 e 8.

Figura 53: Variação da espessura nos pontos de deformação medidos no experimento número 6.



Fonte: Do Autor

Figura 54: Variação da espessura nos pontos de deformação medidos no experimento número 8.



Fonte: Do Autor

4.7 MEV/EDS

As amostras retiradas das peças resultantes dos experimentos 6 e 8 foram analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura equipado com EDS afim de avaliar a morfologia resultante na superfície da peça estampada bem como realizar a análise química pontual.

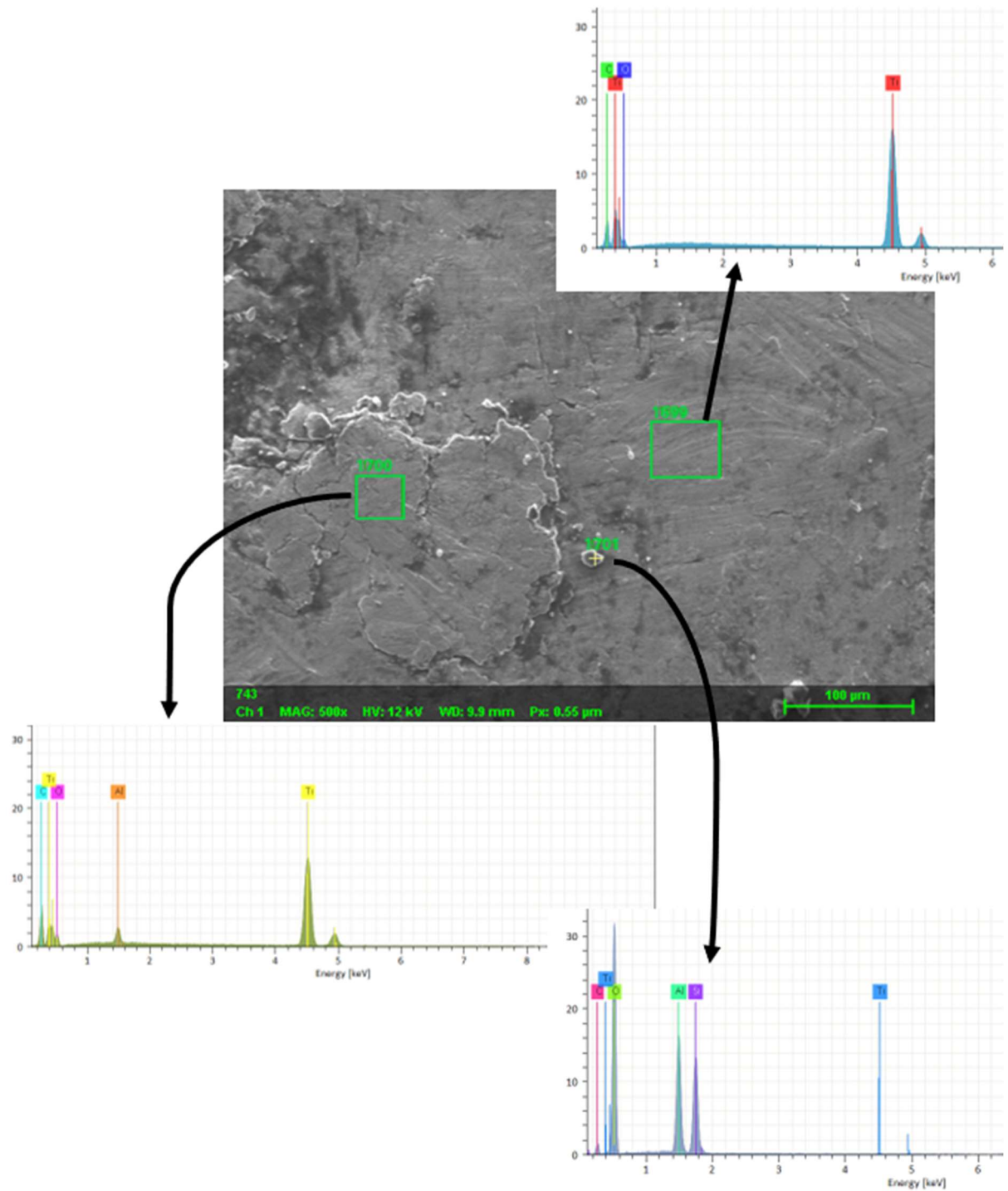
É possível visualizar através da imagem gerada no MEV a ocorrência do arraste de material provocado pela ação da ferramenta, mesmo tendo sido executado os experimentos com rotação zero no intuito de que ocorresse a rolagem da ferramenta sobre a região a ser estampada, é visível que em alguns pontos existem marcas que representam que a ferramenta arrasta sobre a superfície e não ocorre a rolagem em todo o trajeto, fato este que justifica o desgaste da ponta da ferramenta após o processo de estampagem de cada peça e que indica que o material da peça pode ser arrastado de um ponto para outro através de arraste.

Na Figura 54 pode-se observar que foi identificado através da análise química pontual a presença dos elementos Alumínio e Vanádio, que são elementos presentes apenas na composição da matéria-prima utilizada na fabricação do inserto da ferramenta, sendo assim indica que o desgaste da ferramenta é provocado pelo

desprendimento e adesão do material da ferramenta na peça estampada. Foi encontrado ainda em pontos específicos os componentes Silício e Carbono que são elementos utilizados na fabricação de abrasivos, presume-se que estes componentes aderiram na ferramenta ao realizar o acabamento com lixa após o processo de usinagem, de modo que com o atrito da ferramenta com a peça estes elementos acabam contaminando a peça estampada. A imagem da Figura 55 possui uma ampliação de 500 vezes.

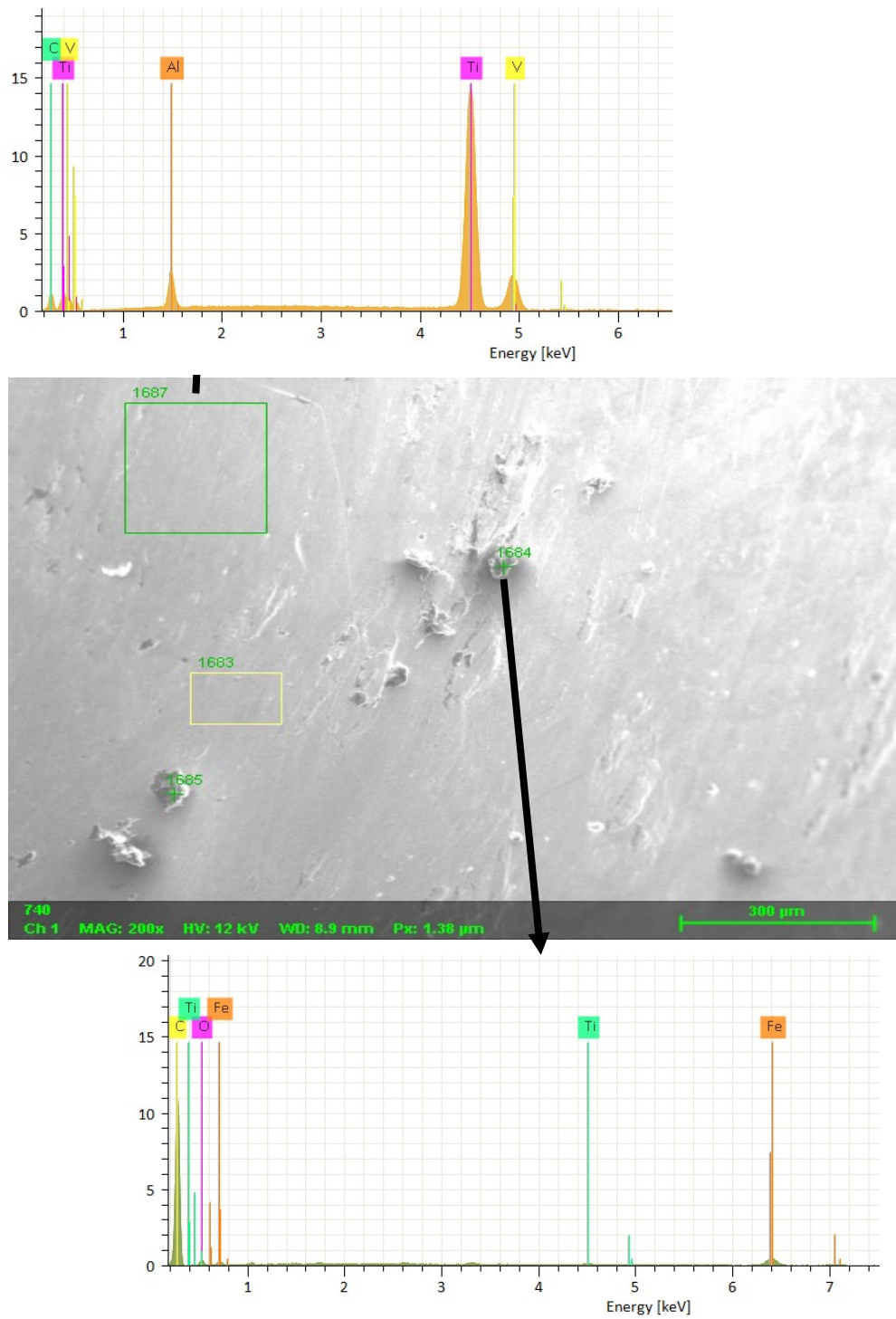
Também foi realizada a análise morfológica do inserto da ferramenta, onde pode-se perceber além dos elementos de composição da matéria-prima, a contaminação com ferro, que pode ter ocorrido durante o processo de usinagem, visto que o equipamento e ferramenta de corte utilizados para tal processo são utilizados para usinagem de materiais ferrosos. Na Figura 56 verifica-se a imagem gerada com o MEV em uma ampliação de 200 vezes.

Figura 55: Mev e EDS da amostra da peça 6 no sentido longitudinal ao sentido de laminação.



Fonte: Do Autor

Figura 56: Mev e EDS da amostra do inserto da ferramenta.



Fonte: Do Autor

CONCLUSÕES

De acordo com os experimentos realizados, ficou evidente a possibilidade da adaptação de recursos de usinagem, tais como centros de usinagem, softwares CAD e CAM, ferramentas e sistemas de fixação para a execução do processo de estampagem incremental em chapas de titânio puro ASTM F-67 grau 2. A utilização destes recursos traz consigo a possibilidade de redução de custos na fabricação de peças estampadas em pequenas quantidades e que exigem customização, como é o caso das próteses fabricadas em titânio.

De acordo com os experimentos realizados, utilizando uma ferramenta de estampar com raio de 5 mm, os experimentos mostraram que o ângulo máximo (Ψ) de estampagem através do processo de estampagem incremental do titânio puro ASTM F-67 grau 2 com 0,5 mm de espessura varia conforme o raio de canto aplicado no modelo. Verificou-se que os melhores resultados relacionados ao ângulo de parede (Ψ) foram nas peças com raio de canto com 15 mm e 20 mm, sendo o melhor resultado de 53°. Verificando ainda que dentre as duas peças a que tinha raio de 15 mm apresentou menor discrepância geométrica com relação ao modelo CAD, 1,31 mm contra 1,48 mm na peça com raio de 20 mm. Raios maiores que 20 mm e menores que 15 mm provocaram o rompimento na peça estampada com ângulo de parede de 53°.

De acordo com a análise de discrepância geométrica dos experimentos realizados, é possível afirmar que existe a possibilidade da fabricação de produtos através do processo estudado, desde que estes aceitem os índices de discrepâncias encontrados, ou que o valor de discrepância seja compensado no projeto, visto que o valor discrepante é variável conforme o ângulo de parede, mas encontrado em seu valor máximo no experimento número 6 com 1,48 mm de discrepância com relação ao modelo CAD.

Os valores de rugosidade R_a encontrados após a estampagem indicam vantagem da estratégia helicoidal com relação à estratégia paralela vistos nos estudos referenciados, chegando a valores que estão dentro da faixa indicada para a melhor proliferação celular que é entre 0,08 e 1 μm sem a necessidade de processos de acabamento. O cuidado com o acabamento da ferramenta utilizada para a estampagem é fundamental para garantir um melhor acabamento, estimando que

melhores resultados com relação ao acabamento da superfície serão encontrados caso a ferramenta seja polida.

A análise das deformações indica que no sentido longitudinal da laminação da chapa, o titânio puro ASTM F-67 grau 2 apresenta maiores deformações se aproximando da deformação plana ($\varphi_2 = 0$) apresentando ainda menores espessuras neste sentido, corroborando com os ensaios de tração realizados.

A avaliação da massa mostrou que as peças estampadas sem apresentar nenhum tipo de fratura ganharam pequenos índices de massa, em média 0,2 gramas, oriundos do material da ferramenta. Através da análise utilizando o MEV e EDS ficou comprovado que o material da ferramenta se adere à peça durante o processo, sendo assim é de suma importância, principalmente na fabricação de próteses, que a ferramenta seja biocompatível com o material da peça, a fim de evitar contaminações. O efeito de desgaste observado na ferramenta mostra a necessidade de troca ou retrabalho da ferramenta a cada peça estampada.

As análises no MEV e EDS ainda mostraram que a amostra estava contaminada com Silício e Ferro, que na análise, se originaram da lixa utilizada para dar acabamento na ferramenta após a usinagem do inserto, mostrando que todo o processo de fabricação das ferramentas deve ser alinhado com materiais biocompatíveis com a peça, pois poderão acarretar, se caso contrário, na contaminação da peça durante o processo.

Com relação à espessura encontrada nas peças com melhores resultados, verificou-se que os valores encontrados no sentido longitudinal de laminação são menores do que os indicados com limite pela Lei do Seno.

O lubrificante, a base de gordura animal, utilizado na estampagem incremental se mostrou ineficiente com relação ao atrito, de modo que gerou desgaste na ferramenta, apesar de ter possibilitado um bom acabamento da superfície e eliminando uma possível contaminação com a utilização de lubrificantes sintéticos.

PESQUISAS FUTURAS

Todos os experimentos foram realizados utilizando ferramenta com raio de 5 mm, sendo importante a avaliação de ferramentas com diferentes dimensões para avaliar se o raio de canto terá a mesma influência no processo.

Foram aplicados nos experimentos valores de incremento de 1 mm por volta no sistema helicoidal de descida. Porém, é interessante que sejam avaliados valores menores de incremento visto que esta variável pode aumentar o valor de ângulo de parede (Ψ) encontrado.

A cada peça estampada foi realizada uma nova usinagem do inserto da ferramenta para compensar o desgaste ocasionado pelo processo. Para o acabamento foi utilizada lixa a base de carbetto de silício, o que gerou contaminação da peça estampada. A utilização de outros métodos para o processamento da ferramenta se faz necessário e é indicado que seja realizado o controle de rugosidade da ferramenta após a nova usinagem, se possível com valores obtidos pelo processo de polimento.

Os experimentos foram realizados com a chapa nas condições de laminação, foram apenas cortadas e efetuadas as gravações. É possível realizar os testes fazendo o processo de polimento tanto na ferramenta quanto na chapa a ser estampada, tentando assim reduzir o atrito entre os corpos.

Durante o processo foi utilizado rotação zero na máquina, fazendo com que a ferramenta girasse conforme a força de atrito aplicada sobre ela. Foi visível que em determinados pontos ocorreu o arraste da ferramenta, sendo viável avaliar outros métodos que facilitem a rolagem da ferramenta sobre a superfície estampada.

REFERÊNCIAS

- [1] S. B. M. Echrif and M. Hrairi, “Research and progress in incremental sheet forming processes,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 26, no. 11, pp. 1404–1414, 2011, doi: 10.1080/10426914.2010.544817.
- [2] J. Castelan, “Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano,” *Tese de Doutorado*, 2010.
- [3] A. Daleffe, “Fabricação de Próteses Cranianas Personalizadas em Chapas de Titânio Através da Estampagem Incremental,” *Tese de Doutorado*, pp. 1–119, 2014.
- [4] I. Cerro, E. Maidagan, J. Arana, A. Rivero, and P. P. Rodríguez, “Theoretical and experimental analysis of the dieless incremental sheet forming process,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177, no. 1–3, pp. 404–408, 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.078.
- [5] D. Fritzen, “Estudo Do Processo De Estampagem Incremental Em Chapa De Latão 70/30,” *Dissertação de Mestrado*, vol. 1, p. 124, 2012, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [6] J. Kopac and Z. Kampus, “Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 162–163, no. SPEC. ISS., pp. 622–628, 2005, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.160.
- [7] J. M. Allwood, D. Braun, and O. Music, “The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 11, pp. 1501–1510, 2010, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.04.008.
- [8] J. I. v. Sena, “José Ilídio Velosa de Estampagem incremental : Um novo conceito de produção José Ilídio Velosa de Sena Estampagem incremental : um novo conceito de produção,” 2009, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10773/2487>
- [9] I. Peter, E. Fracchia, I. Canale, and R. Maiorano, “Incremental sheet forming for prototyping automotive modules,” *Procedia Manufacturing*, vol. 32, pp. 50–58, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.182.
- [10] A. Pohlak, M.; Küttner, R.; Majak, J.; Karjust, K. & Sutt, “EXPERIMENTAL STUDY OF INCREMENTAL FORMING OF SHEET METAL PRODUCTS,” in *4th International DAAAM Conference “INDUSTRIAL ENGINEERING –*

- INNOVATION AS COMPETITIVE EDGE FOR SME* 29 - 30th April 2004, Tallinn, Estonia *EXPERIMENTAL*, 2004, vol. 2, no. April, pp. 139–142.
- [11] L. Lamminen, “Incremental sheet forming with an industrial robot - Forming limits and their effect on component design,” *Advanced Materials Research*, vol. 6–8, pp. 457–464, 2005, doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.6-8.457.
- [12] J. M. de C. Soeiro, “Enformabilidade Em Estampagem Incremental,” 2014.
- [13] L. M. Gómez-López, V. Miguel, A. Martínez, J. Coello, and A. Calatayud, “Simulation and modeling of single point incremental forming processes within a solidworks environment,” *Procedia Engineering*, vol. 63, no. 2005, pp. 632–641, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.253.
- [14] P. A. F. Martins, N. Bay, M. Skjoedt, and M. B. Silva, “Theory of single point incremental forming,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, no. 1, pp. 247–252, 2008, doi: 10.1016/j.cirp.2008.03.047.
- [15] J. M. Allwood, A. N. Bramley, T. W. Ridgman, and A. R. Mileham, “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*, vol. 220, no. 2, pp. 323–327, 2006, doi: 10.1243/09544054JEM478SC.
- [16] G. Maximiliano, “Estampagem Incremental de Múltiplos Passes em Chapa de Latão C268,” p. 104, 2016.
- [17] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, and J. Allwood, “Asymmetric single point incremental forming of sheet metal,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 54, no. 2, pp. 88–114, 2005, doi: 10.1016/s0007-8506(07)60021-3.
- [18] K. Jackson, “Incremental Sheet Forming University of Cambridge Department of Engineering,” no. February, 2008.
- [19] B. T. Araghi, G. L. Manco, M. Bambach, and G. Hirt, “Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 225–228, 2009, doi: 10.1016/j.cirp.2009.03.101.
- [20] R. Zong, J. Chen, and C. Wu, “A comparison of TIG-MIG hybrid welding with conventional MIG welding in the behaviors of arc, droplet and weld pool,”

- Journal of Materials Processing Technology*, vol. 270, pp. 345–355, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.03.003.
- [21] S. Scheffler, A. Pierer, P. Scholz, S. Melzer, D. Weise, and Z. Rambousek, “Incremental sheet metal forming on the example of car exterior skin parts,” *Procedia Manufacturing*, vol. 29, pp. 105–111, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.112.
- [22] G. Centeno *et al.*, “Recent Approaches for the Manufacturing of Polymeric Cranial Prostheses by Incremental Sheet Forming,” 2017. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.059.
- [23] R. Jagtap and S. Kumar, “An experimental investigation on thinning and formability in hybrid incremental sheet forming process,” *Procedia Manufacturing*, vol. 30, pp. 71–76, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.011.
- [24] F. A. Lora, “Avaliação das Deformações no Aço DC04 Quando Submetido ao Processo Híbrido de Estampagem Incremental Posterior ao Processo Convencional,” 2014.
- [25] M. Furlanetti, “Estudo do comportamento das deformações em flanges obtidos pelo processo de estampagem incremental através de elementos finitos e projeto de um suporte modular Estudo do comportamento das deformações em flanges obtidos pelo processo de estampagem incremen,” 2014.
- [26] C. Chiamulera Yamauchi, “Estudo da Influência do Tratamento Térmico Prévio na Estampagem Incremental de Chapas de Alumínio AA7475,” 2019.
- [27] A. E. Altan, Taylan;Tekkaya, *Sheet metal forming*. 2012. doi: 10.1007/978-2-287-72143-4_10.
- [28] U. Khare and M. Pandagale, “A Review of Fundamentals and Advancement in Incremental Sheet Metal forming,” *Iosrjournals.Org*, vol. 2014, pp. 42–46, 2014, [Online]. Available: <http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/ICAET-2014/me/volume-4/10.pdf>
- [29] H. Vanhove, Y. Carette, and J. R. Duflou, “An explorative study on, the influence of an elliptical tool on incremental forming,” *Procedia Manufacturing*, vol. 29, pp. 74–79, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.108.
- [30] B. B. L. Isidore, G. Hussain, S. P. Shamchi, and W. A. Khan, “Prediction and control of pillow defect in single point incremental forming using numerical

- simulations,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 30, no. 5, pp. 2151–2161, 2016, doi: 10.1007/s12206-016-0422-0.
- [31] X. Zhang *et al.*, “A new approach for analyzing the temperature rise and heat partition at the interface of coated tool tip-sheet incremental forming systems,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 129, pp. 1172–1183, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.056.
- [32] G. Grzanic, L. Hiegemann, and N. ben Khalifa, “Investigation of new tool design for incremental profile forming,” *Procedia Engineering*, vol. 207, pp. 1767–1772, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.936.
- [33] Y. Hu and W. Liu, “Tribological properties of alcohols as lubricating additives for aluminum-on-steel contact,” *Wear*, vol. 218, no. 2, pp. 244–249, 1998, doi: 10.1016/S0043-1648(98)00162-8.
- [34] Y. H. Kim and J. J. Park, “Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 130, no. 131, pp. 42–46, 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00788-4.
- [35] M. Geiger, U. Popp, and U. Engel, “Excimer laser micro texturing of cold forging tool surfaces - Influence on tool life,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 51, no. 1, pp. 231–234, 2002, doi: 10.1016/S0007-8506(07)61506-6.
- [36] A. E. Diniz, F. C. Marcondes, and N. L. Coppini, “Tecnologia da Usinagem dos Materiais.” 2010.
- [37] Q. Zhang *et al.*, “Warm negative incremental forming of magnesium alloy AZ31 Sheet: New lubricating method,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 2, pp. 323–329, 2010, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2009.09.018.
- [38] R. ben Hmida, S. Thibaud, A. Gilbin, and F. Richard, “Influence of the initial grain size in single point incremental forming process for thin sheets metal and microparts: Experimental investigations,” *Materials and Design*, vol. 45, pp. 155–165, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.08.077.
- [39] N. G. Azevedo, J. S. Farias, R. P. Bastos, P. Teixeira, J. P. Davim, and R. J. Alves de Sousa, “Lubrication aspects during Single Point Incremental Forming for steel and aluminum materials,” *International Journal of Precision*

- Engineering and Manufacturing*, vol. 16, no. 3, pp. 589–595, 2015, doi: 10.1007/s12541-015-0079-0.
- [40] S. Kobayashi and S. O. Altan, Taylan, *Metal Forming and The Finite-Element Method*, Oxford. New York, 1989.
- [41] N. V. Reddy, R. Lingam, and J. Cao, *Incremental Metal Forming Processes in Manufacturing*. 2015. doi: 10.1007/978-1-4471-4670-4.
- [42] Z. Cheng, Y. Li, C. Xu, Y. Liu, S. Ghafoor, and F. Li, “Incremental sheet forming towards biomedical implants: a review,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 7225–7251, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.04.096.
- [43] G. Ambrogio *et al.*, “Performances Analysis of Titanium Prostheses Manufactured by Superplastic Forming and Incremental Forming,” 2017. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.057.
- [44] S. G. Racz *et al.*, “Incremental forming of titanium Ti6Al4V alloy for cranioplasty plates—decision-making process and technological approaches,” *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 8, 2018, doi: 10.3390/met8080626.
- [45] G. Centeno *et al.*, “Recent Approaches for the Manufacturing of Polymeric Cranial Prostheses by Incremental Sheet Forming,” *Procedia Engineering*, vol. 183, pp. 180–187, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.059.
- [46] P. Akira, B. Kuroda, and M. Vieira, “Preparação e caracterização de uma liga de titânio com a adição de tântalo e zircônio para aplicações biomédicas Preparation and characterization of a titanium alloy with the addition of tantalum and zirconium for biomedical applications,” 2020.
- [47] A. AL-Obaidi, A. Graf, V. Kräusel, and M. Trautmann, “Heat supported single point incremental forming of hybrid laminates for orthopedic applications,” *Procedia Manufacturing*, vol. 29, pp. 21–27, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.101.
- [48] I. Peter, E. Fracchia, I. Canale, and R. Maiorano, “Incremental sheet forming for prototyping automotive modules,” *Procedia Manufacturing*, vol. 32, pp. 50–58, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.182.
- [49] N. Duc-Toan, Y. Seung-Han, J. Dong-Won, C. Tae-Hoon, and K. Young-Suk, “Incremental sheet metal forming: Numerical simulation and rapid prototyping

- process to make an automobile white-body,” *Steel Research International*, vol. 82, no. 7, pp. 795–805, 2011, doi: 10.1002/srin.201000284.
- [50] Z. An, Z. Li, T. Feng, and J. Qie, “Study on an automotive refill opening cap compound process based on punching and incremental forming,” *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, vol. 25, no. 3, pp. 250–256, 2018.
- [51] P. Gupta and J. Jeswiet, “Manufacture of an aerospace component by single point incremental forming,” *Procedia Manufacturing*, vol. 29, pp. 112–119, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.113.
- [52] G. Hussain, L. Gao, N. Hayat, and N. U. Dar, “The formability of annealed and pre-aged AA-2024 sheets in single-point incremental forming,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 46, no. 5–8, pp. 543–549, 2010, doi: 10.1007/s00170-009-2120-x.
- [53] A. R. Machado, A. M. Abrão, R. T. Coelho, and M. B. Silva, *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 2009.
- [54] V. CHIAVERINI, “- Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento - Volume II.” p. 315, 1986.
- [55] A. G. Pereira, “Desenvolvimento e Avaliação de um Editor Para Programação CN emCentros de Usinagem,” 2003.
- [56] D. D. Störkle, D. Möllensiep, L. Thyssen, and B. Kuhlenkötter, “Geometry-dependent parameterization of local support in robot-based incremental sheet forming,” *Procedia Manufacturing*, vol. 15, pp. 1164–1169, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.373.
- [57] J. Belchior, L. Leotoing, D. Guines, E. Courteille, and P. Maurine, “A Process/Machine coupling approach: Application to Robotized Incremental Sheet Forming,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, no. 8, pp. 1605–1616, 2014, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.03.005.
- [58] M. Linnemann, V. Psyk, E. Djakow, R. Springer, W. Homberg, and D. Landgrebe, “High-Speed Incremental Forming – New Technologies For Flexible Production Of Sheet Metal Parts,” *Procedia Manufacturing*, vol. 27, pp. 21–26, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2018.12.038.
- [59] R. J. Davis, *HANDBOOK OF MATERIALS FOR MEDICAL DEVICES*, vol. 49, no. 12. 2003.

- [60] R. R. Wang and A. Fenton, "Titanium for prosthodontic applications: a review of the literature.," *Quintessence Int*, vol. 27, no. 6, pp. 401–8, 1996, [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8941834>
- [61] G. Antônio Carvalho, J. Cláudio Lopes, and F. Bossoi Vicente, "Estudo da influência do tratamento térmico na microestrutura do Ti (Titânio) grau 2," pp. 67–74, 2017.
- [62] J. R. D. O. Bauer, "Propriedades mecânicas do titânio comercialmente puro e da liga Ti-6Al-4V fundidos em diferentes ambientes," p. 62, 2007, [Online]. Available: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/23/23140/tde-02012008-153128/>
- [63] C. R. Wolz, W. Jr, H. G. Oliveira, B. Pibic-em, and I. F. C. C. Luzerna, "Biomateriais de titânio: perspectivas de aplicação titanium biomaterials: application prospects," pp. 0–4, 2018.
- [64] L. Shaeffer, *Conformação Mecânica*. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
- [65] M. C. Landuci, "Mecânicas De Biomateriais Metálicos," 2016.
- [66] S. E. S. Netto, "Desenvolvimento do Processo de Construção de Curvas Limite de Conformação," 2004. [Online]. Available: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cbdv.200490137/abstract>
- [67] R. LAZZAROTTO, "DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO VIA ENSAIO NAKAJIMA," *UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL*, vol. 7, no. 2. p. 72, 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/309289477%0Ahttps://www.ecpat.org/wp-content/uploads/2016/10/Voluntourism-and-child-trafficking-into-orphanages.pdf%0Ahttp://www.soscvzambia.org.zm%0Aunesdoc.unesco.org/images/0021/002157/215738E.pdf%0Ahttps://thec>
- [68] L. Shaeffer, *Conformação Mecânica*, 1ª edição. Porto Alegre: Imprensa Livre, 1999.
- [69] H. Warlimont, *Titanium and titanium alloys*. 2018. doi: 10.1007/978-3-319-69743-7_7.
- [70] I. I. Harter, "Simulação Numérica do Processo de Estampagem Considerando Diferentes Modelos Tribológicos," 2019. [Online]. Available: <http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng->

- 8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbe
co.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SIST
EM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- [71] J. L. Ferreira, J. O. A. Tepedino, M. A. Wolff, and L. P. Moreira, “Curva Limite De Conformação Independente Da Trajetória De Deformação: Descrições Nos Espaços De Tensões E De Deformações,” *ABM*, pp. 1229–1238, 2016, doi: 10.5151/1516-392x-28010.
- [72] L. C. de C. Cavaler, “Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço Inoxidável AISI 304L,” Porto Alegre, 2010.
- [73] D. M. Brunette, P. Tengvall, M. Textor, and P. Thomsen, *Titanium in Medicine*. Berlin ; Heidelberg ; New York; Barcelona; Hongkong; London ; Mailand ; Paris ; Singapur ; Tokio, 2001. doi: 10.1007/978-3-642-56486-4.
- [74] P. J. da SILVA, “estampagem incremental utilizada para prototipagem de peças de aço ANBT 1008 e ABNT 304,” 2011.
- [75] L. Ponsonnet *et al.*, “Relationship between surface properties (roughness, wettability) of titanium and titanium alloys and cell behaviour,” *Materials Science and Engineering C*, vol. 23, no. 4, pp. 551–560, Jun. 2003, doi: 10.1016/S0928-4931(03)00033-X.
- [76] J. Verber, “Computer Aided Process Planning for Rapid Prototyping With Incremental Sheet Forming Techniques (Computer ondersteunde proces planning voor rapid prototyping met incrementele plaatvormtechnieken).” <https://lirias.kuleuven.be/1745996?limo=0> (accessed May 03, 2022).