

VICTOR VON GLEHN MATEUS

**ESTUDO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM
INCREMENTAL EM CHAPAS DE AÇO AISI 430**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2018

VICTOR VON GLEHN MATEUS

**ESTUDO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM
INCREMENTAL EM CHAPAS DE AÇO AISI 430**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia (UFU) como
sendo um requisito parcial para a obtenção do título
de **BACHAREL EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Processos de Fabricação
Orientador: Prof. Dr. Wisley Falco Sales

UBERLÂNDIA - MG 2018

VICTOR VON GLEHN MATEUS

**ESTUDO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM
INCREMENTAL EM CHAPAS DE AÇO AISI 430**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) como
sendo um requisito parcial para a obtenção do título
de **BACHAREL EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wisley Falco Sales / (Orientador)

Prof. Dr. Éder Silva Costa

MSc. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Uberlândia, 29 de junho de 2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus pela minha vida.

Aos meus pais, Elcio e Valeria, por toda a educação que me proporcionaram, por todo o apoio e carinho que sempre demonstraram quando eu mais precisei.

Ao Professor Dr. Wisley Falco Sales, por toda a disposição, orientação e atenção.

A todos aqueles que estiveram comigo nessa caminhada acadêmica, principalmente meus queridos amigos: Lurian Vieira, Natália Ferreira, Andressa Storte e Luiggi Loureiro.

Ao doutorando Leonardo da Silva pela valiosa ajuda na execução de todos os ensaios e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e à Universidade Federal de Uberlândia (UFU), por todo o espaço físico e infraestrutura disponível para a realização do trabalho.

Ao técnico do LEPU, Cláudio , mais conhecido como Kapa, por toda a ajuda durante o trabalho.

A todos os professores e técnicos que tiveram participação direta e indireta na conclusão deste trabalho

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o comportamento físico e térmico de chapas de aço AISI 430 submetidas ao processo de Estampagem Incremental de Ponto Único (SPFI). Nos testes foram utilizados os seguintes recursos: centro de usinagem CNC de três eixos, ferramentas de conformação incremental, suporte para fixar as chapas, óleo lubrificante, termômetro infravermelho, sistema computacional CAD (Computer Aided Design) / CAM (Computer Aided Manufacturing). Durante os experimentos foram levados em consideração parâmetros como: rotação da ferramenta, velocidade de avanço da mesa do centro de usinagem, tipo de lubrificante utilizado e temperatura da chapa durante o processo. Visando obter um melhor entendimento do comportamento do aço AISI 430 no processo, foram realizados procedimentos como ensaio de tração e medição de parâmetros de rugosidade antes e depois de cada ensaio SPFI. Os ensaios mostraram que o aço apresenta uma boa conformabilidade para o processo de estampagem incremental.

Palavras-chave: aço AISI 430, Estampagem Incremental, lubrificação.

ABSTRACT

This paper presents a study about physical and thermal behavior of AISI 430 steel sheets submitted to the Single Point Incremental Forming process (SPFI). In the tests were used the following resources: CNC machine center with three axes, incremental forming tools, a blank holder, lubricant oil, infrared thermometer, software CAD (Computer Aided Design) /CAM (Computer Aided Manufacturing). During the experiments, parameters such as: tool rotation, type of lubricant and temperature of the sheet during the process, were taken into account. In order to obtain a better understanding of the behavior of the AISI 430 steel in the process, procedures such as tensile testing, metallographic analysis and measurement of roughness parameters were performed before and after each SPFI test. The tests showed that the steel presents a good formability for the incremental sheet forming process.

Keywords: steel AISI 340, Incremental Sheet Forming, lubrication.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Esquema do processo de estampagem incremental (STRANO,2003	6
Figura 2-2 - Parâmetros do processo de estampagem incremental (SILVA et al., 2008)	7
Figura 2-3 - Aplicações da estampagem incremental a) Implante craniano (BAZAN,2004) b)Protótipo de coletor de admissão (JESWIET,2004)	8
Figura 2-4 - Tipos de estampagem incremental. Adaptado de (FRITZEN, 2012).....	9
Figura 2-5 - Processo de Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF) a) Adaptado de (JESWIET et. al 2005) b) (SY,2009)	10
Figura 2-6 - Estampagem Incremental por dois pontos - TPIF (JESWIET, 2005).	11
Figura 2-7 - TPIF com matriz total assimétrica de configuração positiva a) e negativa b)(CASTELAN, 2010).....	11
Figura 2-8 - Aumento da rugosidade em função da velocidade de avanço (CASTELAN, 2007)	12
Figura 2-9 - Influência no valor do passo vertical na qualidade superficial da peça (Hirt et al. 2005)	13
Figura 2-10 - a) Passo (ΔZ) constante; b) Passo (ΔZ) variável, mantendo a mesma distância entre os pontos de contato (ΔX) com a chapa (ATTANASIO et al. 2006).	14
Figura 2-11 - Processo de EI acontecendo com óleo SAE 80W como lubrificante.....	15
Figura 2-12 - Máquina CNC MAZAK VTC-300C três eixos utilizada na estampagem incremental de chapas de metal. (SY, 2009).....	16
Figura 2-13 - Máquina própria para o processo de estampagem incremental (JACKSON et al. 2008)	17
Figura 2-14 - Braço robótico usado na ISF (LAMINEM, TUOMINEM e KIVIVUORI, 2005) 18	
Figura 2-15 - Exemplo de ferramentas de ponta semiesférica utilizadas no processo de EI	19
Figura 2-16 - Ferramenta antes de ser utilizada no processo	19
Figura 2-17 - Comparativo do custo entre processos de fabricação.....	20
Figura 2-18 - Defeitos que podem ocorrer no processo de ISF (Micari et. al 2007).....	21
Figura 2-19 - Microestrutura do aço inoxidável ferrítico AISI 430 (SATYNARAYANA; MADHUSUDHAN REDDY; MOHANDAS,2005).....	23
Figura 2-20 - Ilustração do parâmetro Ra	24
Figura 2-21 - Ilustração de Rz.....	25
Figura 2-22 - Geometria do corpo de prova no ensaio de tração (CARDOSO, 2017).....	27
Figura 2-23 - Diagrama tensão em função da deformação obtido em um ensaio de tração (DIETER,1981).....	28
Figura 2-24 - Diferentes angulações das direções de laminações dos corpos de prova para o ensaio de tração.	30
Figura 2-25 - Variação da temperatura durante o processo de ISF com a chapa já aquecida AL- OBAIDI, AMAR & KRÄUSEL, VERENA & LANDGREBE, DIRK. (2018).....	31

Figura 3-1 - Máquina CNC utilizada para os ensaios de estampagem incremental.....	32
Figura 3-2 - Ferramenta de AISI 52100 utilizada nos testes de EI	34
Figura 3-3 - Dispositivo prensa-chapas.....	34
Figura 3-4 - Dispositivo prensa-chapas fixando uma chapa durante o processo de EI.....	35
Figura 3-5 - Chapa de aço INOX AISI 430.....	35
Figura 3-6 - Tesoura elétrica Bosch GSC 2.8	35
Figura 3-7 - Termômetro de infravermelho utilizado na medição de temperatura do processo .	36
Figura 3-8 - Óleo 80W e grafite em pó utilizado para a lubrificação nos ensaios	37
Figura 3-9 - Tronco de cone gerado através do software CAD/CAM	37
Figura 3-10 - Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração.....	38
Figura 3-11 - Corpos de prova utilizados no ensaio.....	39
Figura 3-12 - Máquina utilizada no ensaio de tração	39
Figura 3-13 - Amostra retirada do tronco de cone para análise da rugosidade	40
Figura 3-14 - Rugosímetro utilizado para a medição da rugosidade nas chapas.....	40
Figura 3-15 - Medição da profundidade da peça após o processo de estampagem incremental .	41
Figura 4-1 - Comparativo do tempo de estampagem de cada teste.....	42
Figura 4-2 - Comparativo entre as temperaturas do teste adicional	44
Figura 4-3 - Chapas após a estampagem incremental a) Teste 1 b) Teste 2 c) Teste 3 d) Teste 4 e) Teste 5	45
Figura 4-4 - Desgaste Ferramental a) Antes do Teste 2 b) Depois do Teste 2 c) Antes do Teste 5 d) Depois do Teste 5	46
Figura 4-5 - Parâmetro Ra nos testes realizados	48
Figura 4-6 - Parâmetro Rz nos testes realizados	48
Figura 4-7 - Parâmetro Rq calculado nos ensaios realizados.....	49
Figura 4-9 - Curva de tensão em função da deformação obtida a partir de um corpo de prova diagonal à direção de laminação (45°)	50
Figura 4-8 - Curva de tensão em função da deformação obtida a partir de um corpo de prova transversal à direção de laminação (90°).....	50
Figura 4-10 - Curva de tensão em função da deformação obtida a partir de um corpo de prova longitudinal à direção de laminação (0°).....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - % Composição química do Aço Inoxidável AISI 430. Adaptado de (ASM,2005)	22
Tabela 2-2 - Propriedades mecânicas a temperatura ambiente do AISI 430. Adaptado de (ASM,2005)	23
Tabela 3-1 – Especificações Técnicas Centro de Usinagem Discovery 760.....	33
Tabela 3-2 - Diferentes condições de lubrificação ensaiadas.....	38
Tabela 4-2 - Temperaturas medidas nas chapas e na ferramenta	43
Tabela 4-3 - Comparativo entre as mesmas condições de lubrificação, mas rotações diferentes	44
Tabela 4-4 - Profundidade teórica e real do produto final.....	47
Tabela 4-5 - Parâmetros de rugosidade das chapas após o processo.....	48
Tabela 4-6 - Módulo de elasticidade obtido para os corpos de prova	52
Tabela 4-7 - Dimensões iniciais e finais dos corpos de prova	52
Tabela 4-8 - Valores do índice de anisotropia para as diferentes direções de laminação	52
Tabela 4-9 - Valores de anisotropia média e planar	53

LISTA DE SÍMBOLOS

E	= Módulo de Elasticidade [GPa]
S_0	= Espessura inicial da chapa [mm]
V_{fh}	= Velocidade de avanço da mesa [mm/min]
α	= Ângulo de parede [°]
σ_e	= Tensão de Escoamento Convencional [MPa]
σ_B	= Limite de Resistência ou Tensão Máxima [MPa]
σ_R	= Limite de Ruptura [MPa]
δ	= Alongamento [%]
ε	= Deformação relativa
n	= Grau de encruamento
r	= Índice de anisotropia
l_0	= Largura inicial do corpo de prova utilizado no ensaio de tração [mm]
l_f	= Largura final do corpo de prova utilizado no ensaio de tração [mm]
c_0	= Comprimento inicial do corpo de prova [mm]
c_f	= Comprimento final do corpo de prova [mm]
e_0	= Espessura inicial do corpo de prova [mm]
F	= Força aplicada no ensaio de tração [N]
A_0	= Área inicial do corpo de prova utilizado no ensaio de tração [mm ²]
dz	= Passo no eixo Z [mm]
$r_{0^\circ}, r_{45^\circ}, r_{90^\circ}$	= Índice de Anisotropia nas direções de laminação de 0°, 45° e 90°
Δr	= Anisotropia plana
R_m	= Índice de Anisotropia médio [-]
R_a, R_q, R_z	= Rugosidade aritmética média, quadrática média e singular [μm]
R_p	= Distância do pico até o eixo da medição de R_z
R_v	= Distância do vale até o eixo da medição de R_z
Q	= Comprimento de amostra de rugosidade

SUMÁRIO

1.1. Objetivo Geral.....	4
1.2. Objetivos Específicos	4
2.1. Definição do Processo de Estampagem Incremental	5
2.2. Aplicações da Estampagem Incremental	7
2.3. Tipos de Estampagem Incremental.....	8
2.3.1. Estampagem Incremental de Ponto Simples – SPIF.....	9
2.3.2. Estampagem Incremental de Ponto Duplo - TPIF.....	10
2.4. Parâmetros da Estampagem Incremental.....	11
2.4.1. Velocidade de avanço	12
2.4.2. Rotação da ferramenta.....	13
2.4.3. Passo vertical.....	13
2.4.4. Lubrificação	14
2.5. Máquinas para a estampagem incremental	15
2.5.1. Fresadoras CNC	16
2.5.2. Máquinas especializadas em estampagem incremental.....	17
2.5.3. Robôs.....	18
2.6. Ferramentas para a estampagem incremental	18
2.7. Vantagens e desvantagens do processo ISF.....	20
2.8. Caracterização do material.....	22
2.8.1. Chapa de aço inoxidável AISI 430.....	22
2.8.2. Rugosidade.....	23
2.8.2.1. Ra	24
2.8.2.2. Rz	25
2.8.2.3. Rq	25

2.8.3. Ensaio de tração	26
2.8.4. Índice de Anisotropia	28
2.8.5. Temperatura de trabalho no processo de estampagem incremental	30
3.1. Estampagem Incremental.....	32
3.1.1. Máquina utilizada no processo	32
3.1.2. Ferramenta de Estampagem	34
3.1.3. Suporte prensa-chapas.....	34
3.1.4. Corpos de prova utilizados	35
3.1.5. Medição de temperatura no processo.....	36
3.1.6. Lubrificação durante o processo	36
3.1.7. Procedimento experimental	37
3.2. Ensaio de tração	38
3.3. Rugosidade.....	40
3.4. Estudo do retorno elástico.....	41
4.1. Ensaios de estampagem incremental	42
4.2 Retorno elástico	47
4.3 Rugosidade.....	47
4.4 Testes de tração.....	50
4.4.1 Índice de anisotropia.....	52
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	55

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

Dentre todos os processos de fabricação, a conformação mecânica tem um papel de grande importância, já que é uma forma de produzir peças com excelentes propriedades mecânicas com uma perda mínima de material (SCHAEFFER,1995). Este processo consiste em alterar a geometria de um material por meio de forças aplicadas através de máquinas e ferramentas específicas, forças tais que deformam plasticamente o material que está sendo conformado. Há inúmeros processos de conformação mecânica, desenvolvidos para aplicações diversas. Estes processos variam de acordo com o regime de operação de conformação, o tipo de esforço que provoca a deformação do material, a variação relativa da espessura da peça e o propósito da deformação.

Visando à alta taxa de produção, baixo custo por peça e um bom acabamento superficial, o processo de conformação mecânica denominado estampagem, se destaca na conformação de chapas metálicas. Entretanto, todas essas vantagens são obtidas quando se tem a produção de grandes e médios lotes de peças. Para casos em que um produto está sendo desenvolvido e a quantidade a ser produzida é em pequenos lotes, ou se faz necessário a fabricação apenas de um protótipo, o custo do ferramental de fabricação por estampagem convencional ocasiona em um alto custo do produto (TIBURI, 2007)

O processo de estampagem incremental (ISF- Incremental Sheet Forming) é uma excelente alternativa para a fabricação de pequenos lotes ou de protótipos, tendo sua principal vantagem o baixo custo do ferramental quando comparado aos processos de estampagem convencionais. Em um processo de estampagem incremental, uma ferramenta de geometria simples executa através de sucessivas deformações a conformação de uma chapa metálica (PARK e KIN, 2002).

O objeto de estudo deste presente trabalho é o processo de Estampagem Incremental de Ponto Simples, também conhecida como Estampagem Incremental Negativa. Neste processo, ao mesmo tempo que a ferramenta percorre a trajetória da geometria definida, a mesma provoca sucessivos incrementos na direção paralela ao eixo da ferramenta, ocasionando uma deformação plástica e conseqüentemente a conformação do material.

1.1. Objetivo Geral

Estudar o processo de estampagem incremental de chapas de aço inoxidável AISI 430.

1.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a influência do fluido lubrificante na qualidade do acabamento superficial da chapa durante os ensaios de estampagem incremental.
- Investigar a variação de temperatura da chapa de aço AISI 430 que está sendo ensaiada.
- Avaliar o comportamento do aço AISI 430 quando submetido ao ensaio de tração.

Capítulo 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado o estudo da arte sobre o processo de estampagem incremental, assim como todos os parâmetros necessários para a caracterização do material utilizado neste trabalho.

2.1. Definição do Processo de Estampagem Incremental

O processo denominado 'estampagem' engloba inúmeras operações de manufatura realizadas em chapas de metal onde ocorrem alterações em sua forma geométrica, resultando assim em cunhas, dobras, furos, saliências e cavidades. Todas essas deformações são resultantes do escoamento em regime plástico do metal, que se encontra no estado sólido. Na estampagem, há um grande aproveitamento da matéria-prima, reduzindo o desperdício e a geração de sobras de material, diferentemente de outros processos como, por exemplo, a usinagem (RODRIGUES e MARTINS, 2005).

A estampagem incremental de chapas metálicas, conhecida como Incremental Sheet Forming (ISF), é um processo onde a conformação é realizada progressivamente, mediante a ação de uma ferramenta que produz deformações plásticas localizadas em regiões específicas da chapa. Estas regiões mudam de acordo com a movimentação da ferramenta sobre o metal (EMMENS e VAN DEN BOOGAARD, 2009). As deformações são ocasionadas pelas pressões pontuais realizadas por um punção com geometria menor que a chapa metálica. Durante o processo, a conformabilidade da chapa vai aumentando. Para realizar a estampagem, podem-se utilizar maquinários específicos para o processo ou adaptar máquinas-ferramenta de usinagem.

Para a execução do processo de estampagem incremental, a chapa a ser conformada deve ser fixada em um dispositivo ou suporte que utilize um ou mais pontos de fixação. O material da chapa metálica deve ter propriedades mecânicas adequadas, tais como tenacidade e ductilidade, suficientes para que o material possa ser deformado plasticamente durante o processo. Segundo (STRANO, 2003) ao ser conformada, a chapa original, que está fixa, tem sua espessura reduzida na região onde acontece a conformação, dando assim o formato desejado à chapa. Como ilustrado na Fig. 2.1, a chapa é fixada em sua região externa e é deformada por uma ferramenta semiesférica, na extremidade de contato com a chapa.

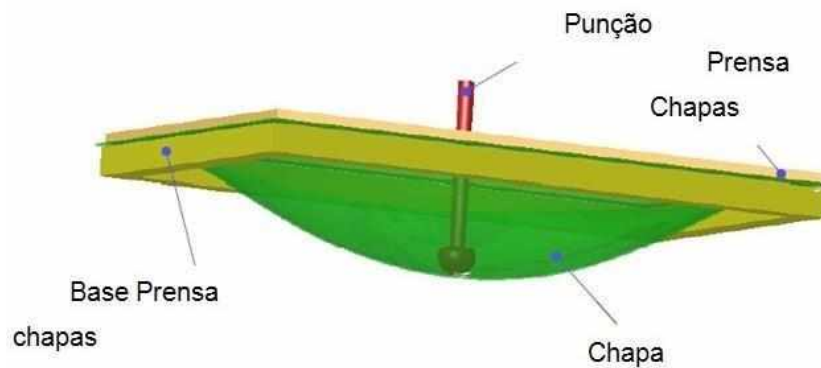


Fig. 2-1 – Esquema do processo de estampagem incremental (STRANO, 2003)

O processo de ISF pode ser realizado em um Comando Numérico Computadorizado (CNC). Neste sistema, a chapa a ser conformada deverá ter espessura variando entre 0,5 e 1,5 mm, dependendo do tipo de material e suas características mecânicas. A chapa é fixada em um dispositivo móvel,

deslizando paralelamente ao eixo Z (eixo vertical) do sistema da CNC. Elementos de fixação, como porcas e parafusos, evitam que a chapa se movimente durante o processo, possibilitando assim a deformação plástica da chapa. A deformação é gerada por uma ferramenta rotativa, acoplada ao eixo árvore do dispositivo CNC, que inicia o processo de ISF deslizando sobre a superfície da chapa gradativamente, conformando a mesma através de incrementos verticais negativos. A Fig. 2.2 ilustra o processo de ISF.

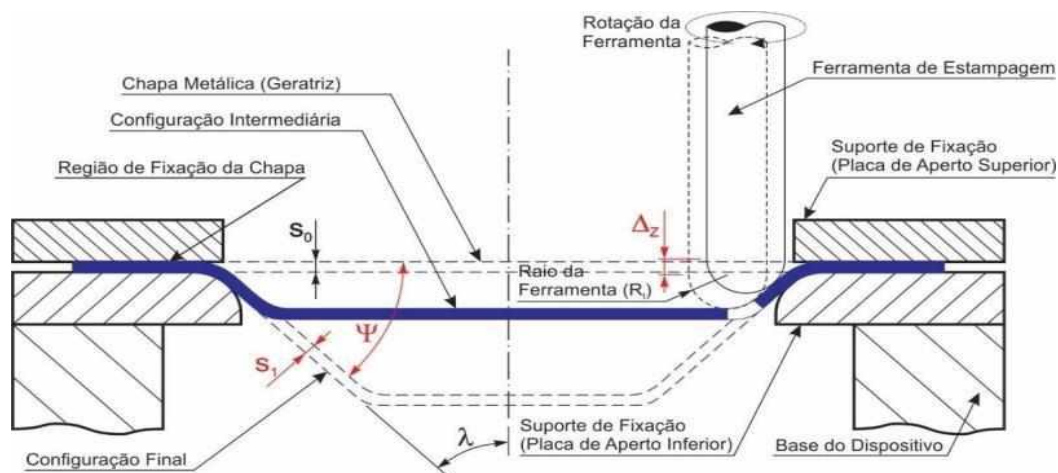


Figura 2-2 - Parâmetros do processo de estampagem incremental (SILVA et al., 2008)

2.2. Aplicações da Estampagem Incremental

O Toyotismo é o modelo de produção de mercadorias com vista na flexibilização e na fabricação de produtos. Este sistema, que nasceu no Japão, trouxe um grande dinamismo ao industrialismo moderno. Considerando essa busca constante da indústria por novos produtos e novas formas, a Estampagem Incremental vem para atender estes mercados de uma maneira rápida e eficiente.

A estampagem incremental é um processo que utiliza ferramentas genéricas de baixo custo e que possibilita a manufatura de peças de diversas geometrias (CASTELAN, 2010). Estas características são muito vantajosas em relação aos processos de estampagem convencionais.

Algumas das principais aplicações do processo de Estampagem Incremental são:

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

- Peças para embarcações (chapas para o casco)

Além dessas aplicações, o processo de ISF é muito utilizado na área médica, onde são produzidas próteses, órteses e implantes cranianos. As Fig. 2.3a e 2.3b mostram exemplos deste processo.

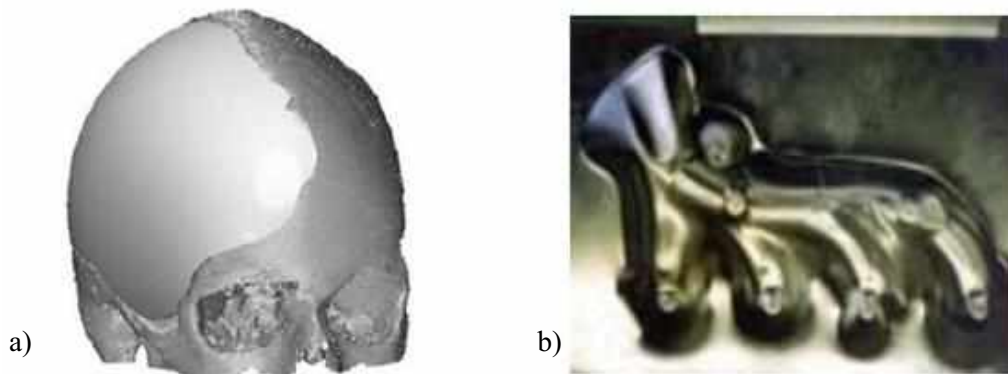


Figura 2-3 - Aplicações da estampagem incremental
 a) Implante craniano (BAZAN,2004) b) Protótipo de coletor de admissão (JESWIET,2004)

2.3. Tipos de Estampagem Incremental

Segundo Attanasio et. al (2006) em função do número de pontos de contato entre ferramenta, chapa e matriz, é possível classificar a estampagem incremental em duas famílias:

- Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF – Single Point Incremental Forming);
- Estampagem Incremental de Ponto Duplo (TPIF – Two Points Incremental Forming);

A Fig 2.4 ilustra os dois processos citados acima, tendo como principal diferença entre eles a utilização de uma contra ferramenta na TPIF.

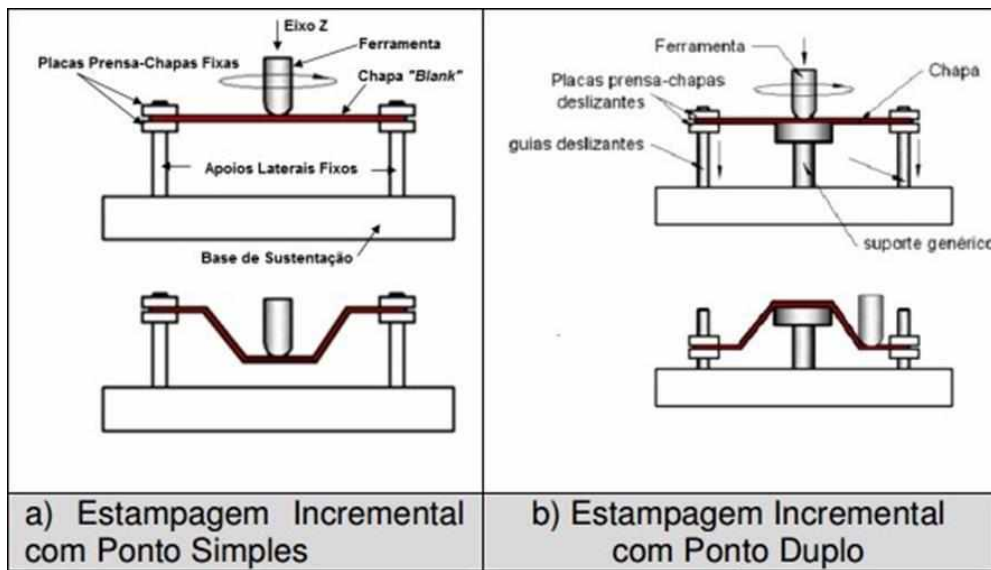


Figura 2-4 - Tipos de estampagem incremental. Adaptado de (FRITZEN, 2012)

2.3.1. Estampagem Incremental de Ponto Simples – SPIF

A estampagem incremental de ponto simples, definida pela sigla em inglês SPIF – Single-point Incremental Forming, é o processo de estampagem incremental mais utilizado e sobre o qual se tem o maior conhecimento do estado da arte, das aplicações e principalmente de seus fundamentos (MARTINS et al., 2008).

O SPIF é realizado com uma ferramenta de ponta esférica ou semiesférica, controlada normalmente por centros de usinagem. Através deste processo são produzidos pequenos lotes de peças, que possuem simetria radial, utilizando ferramentas de perfil simples. Porém, para a fabricação de peças mais complexas este processo não fornece precisão necessária. (KOPAC e KAMPUS, 2005).

Este processo, também conhecido como estampagem incremental negativa, possui apenas um ponto de contato entre ferramenta e a chapa metálica a ser conformada. Ao mesmo tempo em que a ferramenta percorre a trajetória do perfil da geometria definida, ela deforma o material na direção vertical (direção Z), como mostrado na Fig. 2.5.

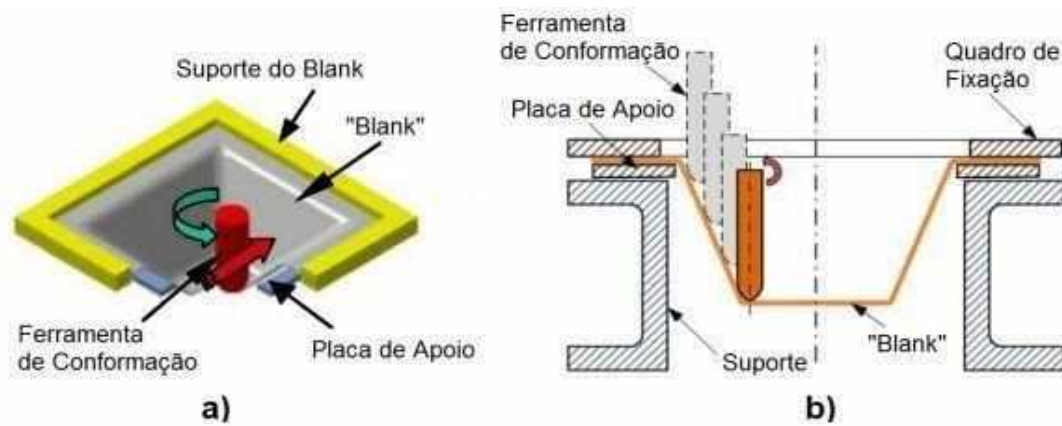


Figura 2-5 - Processo de Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF)
 a) Adaptado de (JESWIET et. al 2005) b) (SY,2009)

2.3.2. Estampagem Incremental de Ponto Duplo - TPIF

Na estampagem incremental de ponto duplo, TPIF – Two Points Incremental Forming, além da ferramenta de conformação também se usa um suporte inferior rígido, colocado sob a chapa metálica. Este suporte é utilizado para aumentar as configurações geométricas e também melhorar a precisão das peças, ou seja, a correspondência entre peça virtual e peça real (ATTANASIO, CERETTI e GIARDINI, 2006).

Conforme Arruda (2010), o TPIF segue o mesmo princípio de conformação do SPIF, porém são utilizados suportes inferiores contra a chapa. Esses podem ser desde pinos até matrizes completas. Os suportes restringem o número de graus de liberdade do processo, além de possibilitar uma variedade de formas geométricas em função da geometria dos mesmos. O local onde a chapa é fixada pode deslocar ao longo do eixo Z, para acompanhar a ferramenta a cada incremento (Fig. 2.6). Em função do tipo de matriz a TPIF pode ser considerada como negativa ou positiva (Fig. 2.7). Em comparação com o processo SPIF, a estampagem incremental de ponto duplo produz peças com melhor precisão dimensional, e com ângulos de paredes menores.

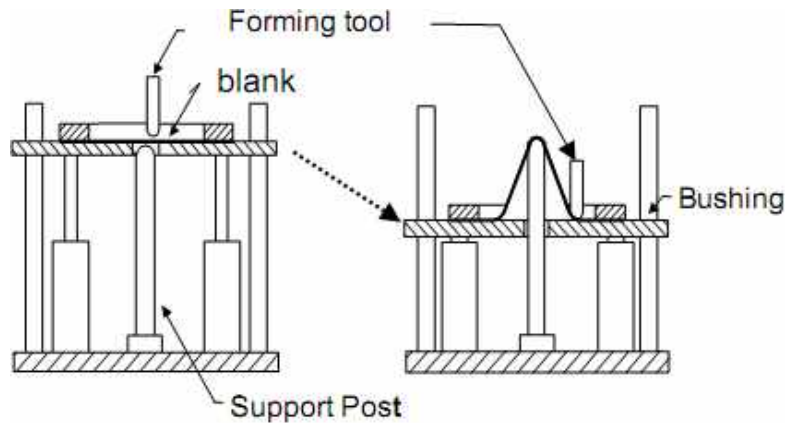


Figura 2-6 - Estampagem Incremental por dois pontos - TPIF (JESWIET, 2005).

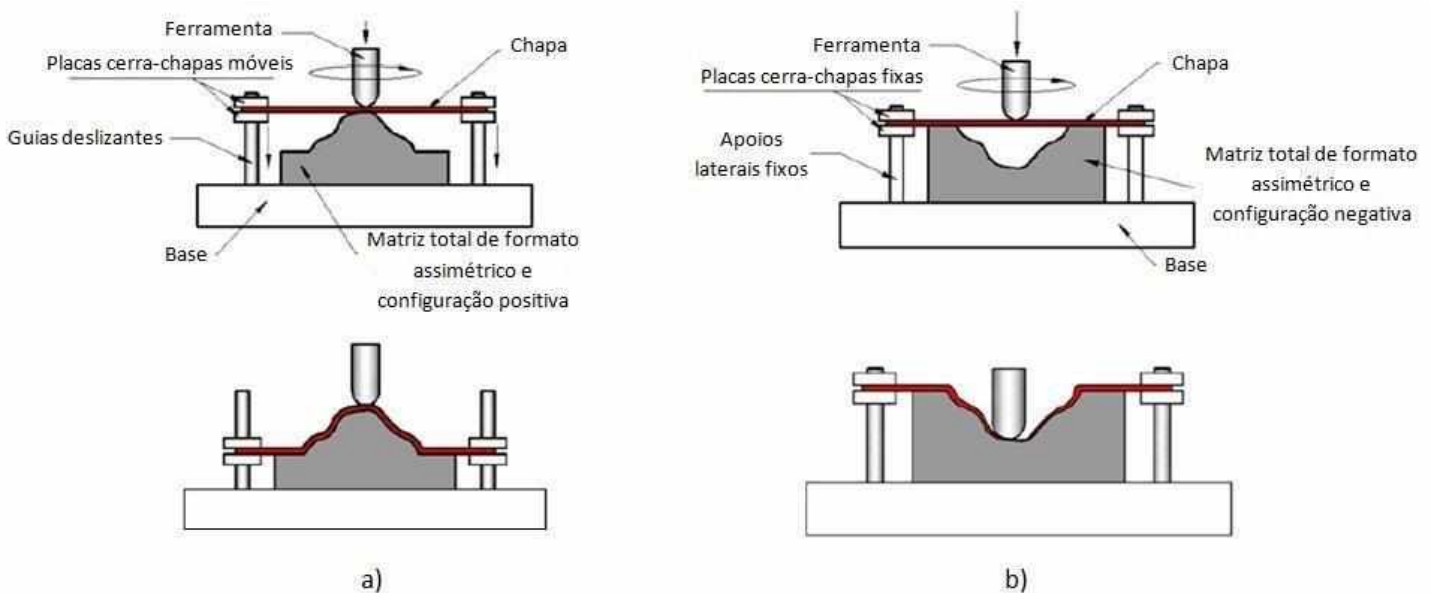


Figura 2-7 - TPIF com matriz total assimétrica de configuração positiva a) e negativa b)(CASTELAN, 2010).

2.4. Parâmetros da Estampagem Incremental

Há uma série de parâmetros envolvidos no processo de estampagem incremental que influenciam na conformabilidade do aço utilizado. Dentre eles: material e espessura da chapa; velocidade de avanço; temperatura; tipo e tamanho da ferramenta; profundidade do passo vertical; rotação da ferramenta; lubrificação; ângulo de parede da chapa e estratégias de conformação. De todos estes parâmetros, no presente trabalho são abordados principalmente os seguintes dados: velocidade de avanço, rotação da ferramenta, passo vertical e lubrificação.

2.4.1. Velocidade de avanço

A velocidade de avanço determina o tempo em que uma peça leva para ser fabricada. Segundo Jeswiet et al (2005), quanto menor a velocidade de avanço ao longo do processo maior a facilidade do aço em continuar sendo conformado sem que haja prejuízo à sua integridade física. Isto ocorre, pois à medida que a velocidade de avanço aumenta, o aquecimento localizado diminui levando conseqüentemente à diminuição da conformabilidade (Ham, et al., 2006).

Quanto maior a velocidade de avanço, maior será o erro de profundidade (retorno elástico) da chapa conformada, em relação ao modelo CAD correspondente (RAUCH et al. 2009). Na literatura, os valores de velocidade de avanço da ferramenta (V_{fn}) variam de 500 a 2000 mm/min (DUFLOU, VERBERT, et al., 2008), (ATTANASIO, CERETTI e GIARDINI, 2006), (HUSSAIN, GAO, et al., 2009) e (INGARAO, AMBROGIO et al., 2012).

Por outro lado, CASTELAN (2007) demonstrou que quanto maior for o avanço, maior a rugosidade da chapa. O experimento consistiu em seis testes utilizando uma chapa de alumínio 1050, com 0,5 mm de espessura. A ferramenta era de aço rápido com 10 mm de diâmetro. A geometria da peça era em formato de tronco de cone, com diâmetro de inicial de 250 mm, profundidade de 40 mm e ângulo de parede de 45°. A Fig. 2.8 mostra o resultado do experimento.

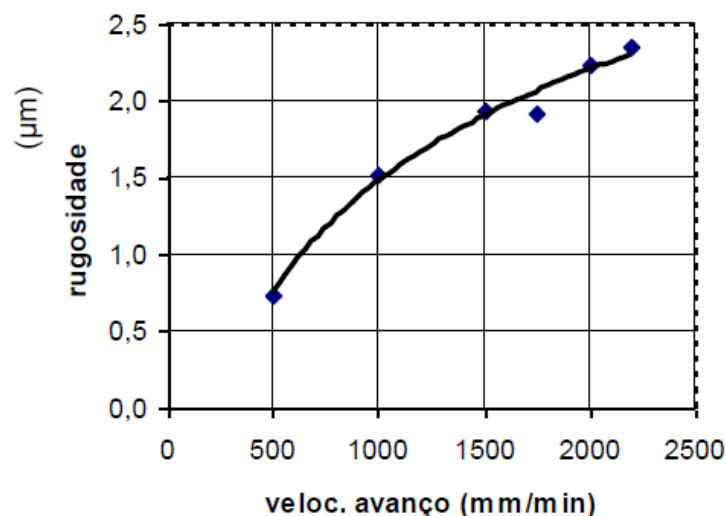


Figura 2-8 - Aumento da rugosidade em função da velocidade de avanço (CASTELAN, 2007)

2.4.2. Rotação da ferramenta

Aumentando-se a rotação da ferramenta, pode-se aumentar a conformabilidade em detrimento da rugosidade da superfície (MICARI, 2004). Com o aumento da rotação, há um aumento da temperatura local da chapa, com isso há uma redução positiva do efeito do atrito na interface ferramenta-chapa, porém há um aumento considerável no desgaste da ferramenta.

Segundo Jeswiet (2005), controlando a velocidade de rotação, o aquecimento da chapa durante a deformação também é controlado. Com o aumento da temperatura da chapa, devido ao atrito entre a ferramenta e a chapa, se consegue aumentar a conformabilidade da chapa. Contudo, o aumento da rotação da ferramenta resulta em um desgaste maior das superfícies, interferindo na rugosidade da chapa, além de queimar o lubrificante utilizado, ocasionando problemas ambientais.

2.4.3. Passo vertical

O passo vertical influencia diretamente dois fatores da estampagem: o tempo de conformação e o acabamento superficial da peça.

Um estudo foi realizado por Hirt et al. (2005) para avaliar a influência do incremento vertical no processo. Nesta pesquisa, o passo vertical e o diâmetro das ferramentas foram variados. Foi verificado que o aumento do passo vertical, levava a um aumento do valor da rugosidade R_z da peça, e que outros parâmetros como o raio da ferramenta e os ângulos do processo, eram também influenciados. Os resultados dos testes estão representados na Fig. 2.9.

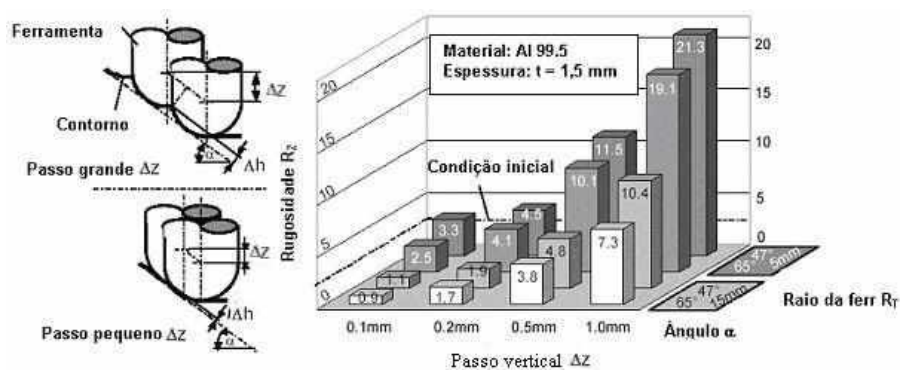


Figura 2-9 - Influência no valor do passo vertical na qualidade superficial da peça (Hirt et al. 2005)

Ainda em relação ao passo vertical, Attanasio et al. (2006) realizou um estudo comparativo entre a utilização de um passo (ΔZ) constante e um passo (ΔZ) variável em uma mesma peça com perfil de calota. O resultado foi que no passo constante houve uma maior rugosidade superficial e menor conformidade geométrica quando comparado com o passo variável.

O controle do passo (ΔZ) variável é chamado de *Constant Cusp Finishing*, o qual é continuamente calculado para compensar a inclinação da geometria e manter a rugosidade (altura da crista) constante. Tal controle produz um acabamento uniforme em toda a superfície estampada (CASTELAN, 2010). A Fig. 2.10 mostra o comparativo feito entre os passos.

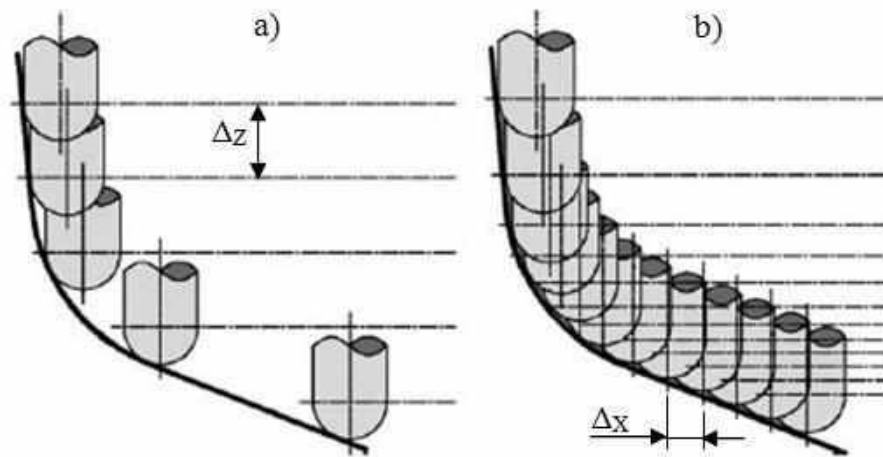


Figura 2-10 - a) Passo (ΔZ) constante; b) Passo (ΔZ) variável, mantendo a mesma distância entre os pontos de contato (ΔX) com a chapa (ATTANASIO et al. 2006).

2.4.4. Lubrificação

A conformabilidade do material, o desgaste das ferramentas e o acabamento superficial sofrem grande influência da lubrificação durante o processo. As funções dos lubrificantes utilizados no processo de estampagem incremental são (Daleffe, 2008):

- Absorção do calor causado pela deformação da chapa na zona de contato;
- Melhoria do acabamento superficial da peça;
- Minimização da força de trabalho exercida pela ferramenta;

- Redução do atrito entre a ferramenta e a chapa a conformar;
- Redução do desgaste da ferramenta de estampagem;

A estampagem incremental requer lubrificação na superfície da chapa, pois reduz a fricção entre a ferramenta e a chapa, além de absorver o calor causado pela deformação. A quantidade de lubrificante utilizado no processo depende do material e da espessura da chapa. (CAVALER, 2010). A Fig. 2.11 mostra o processo ocorrendo com óleo SAE 80 W sendo utilizado como lubrificante.



Figura 2-11 - Processo de EI acontecendo com óleo SAE 80W como lubrificante

2.5. Máquinas para a estampagem incremental

Os tipos de máquinas disponíveis para o processo de estampagem incremental são:

- Fresadoras CNC;
- Máquinas especializadas em estampagem incremental;
- Robôs.

2.5.1. Fresadoras CNC

Em grande maioria dos processos da estampagem incremental, as máquinas com controle CNC de três eixos podem ser utilizadas. Os fatores levados em consideração para tal aplicação são: velocidades elevadas, grande capacidade volumétrica de trabalho e rigidez. A máquina de comando numérico que atende todas estes fatores são as fresadoras CNC. A Fig. 2-12 ilustra uma fresadora CNC que é utilizada para o processo de estampagem incremental.



Figura 2-12 - Máquina CNC MAZAK VTC-300C três eixos utilizada na estampagem incremental de chapas de metal. (SY, 2009)

Apesar da popularidade da adaptação das fresadoras CNC para o ISF devido à programação facilitada pelo CAD/CAM e pelo baixo custo adicional de operação, as máquinas CNC não são projetadas para grandes carregamentos no eixo árvore. Portanto a máquina pode ser danificada durante o processo de estampagem incremental. Além disso, observa-se que estes equipamentos geralmente não são munidos de instrumentação para medir as forças nos três eixos na ponta da ferramenta e, a mesa de trabalho da máquina CNC é geralmente sólida, então há um limitado acesso ao lado reverso da peça de trabalho (Allwood et al. 2005).

2.5.2. Máquinas especializadas em estampagem incremental

Com o objetivo de superar algumas limitações da CNC para o processo, as máquinas especializadas para o ISF foram desenvolvidas pela indústria e por grupos de pesquisa. O modelo mais antigo destas máquinas foi feita sob medida por Hideo Iseki em 1992 no Japão. Após este primeiro protótipo, outras máquinas foram sendo desenvolvidas para atender a estampagem incremental de ponto simples e a de ponto duplo.

Em 2004 nos EUA, Julian Allwood desenvolveu uma máquina que é capaz de registrar simultaneamente a força e a posição da ferramenta durante o processo, como mostrada na Fig. 2-13. A força é medida por seis células de carga que suportam a estrutura da peça. O lado de baixo da peça de trabalho é acessível para permitir uma segunda ferramenta ou até mesmo uma câmera térmica para analisar termicamente o processo (JACKSON, K. P. e ALLWOOD, J. M., 2008).



Figura 2-13 - Máquina própria para o processo de estampagem incremental (JACKSON et al. 2008)

2.5.3. Robôs

Quando se compara a estampagem incremental executada por meio de robôs e máquinas de usinagem ou até mesmo máquinas dedicadas a ISF as diferenças são consideráveis. Isto ocorre devido à flexibilidade no processo de fabricação proporcionada pelo robô, pois o mesmo possibilita a combinação de várias fases da cadeia de produção para a mesma célula de fabricação. Na mesma célula de fabricação, um único robô industrial pode apanhar a chapa e posicioná-la, efetuar o corte com laser e tratamento de superfície (LAMMINEN, TUOMINEN e KIVIVUORI, 2005). A Fig. 2-14 ilustra um braço robótico utilizado no processo de estampagem incremental.

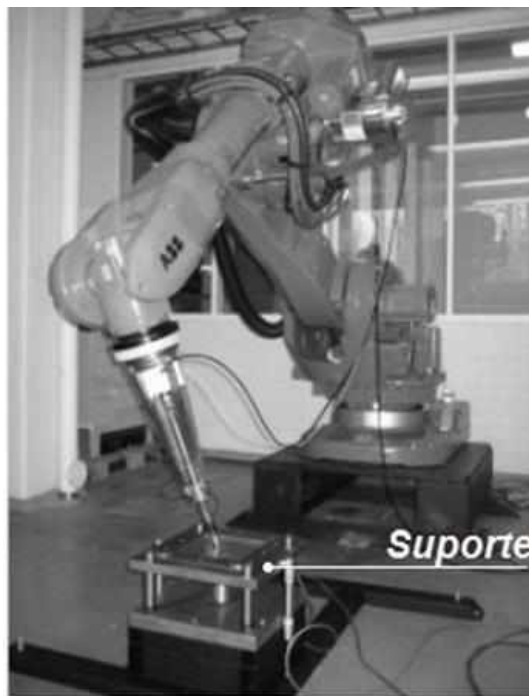


Figura 2-14 - Braço robótico usado na ISF (LAMMINEN, TUOMINEN e KIVIVUORI, 2005)

2.6. Ferramentas para a estampagem incremental

As ferramentas utilizadas no processo de estampagem incremental normalmente são fabricadas em aço-ferramenta e possuem a ponta semiesférica, como representada na Fig. 2-15.



Figura 2-15 - Exemplo de ferramentas de ponta semiesférica utilizadas no processo de EI

A ferramenta é responsável por causar o estiramento e o dobramento da chapa, deslizando sobre a superfície da mesma (CAVALER, 2010) e (JESWIET et al., 2005).

Visando aumentar a vida útil da ferramenta, melhorar o acabamento superficial da chapa e reduzir o atrito durante o processo, a ferramenta pode ser revestida na superfície em contato com a chapa ou então ser fabricada de metal duro. A Fig.2-16 mostra a ferramenta antes do processo.

O raio da ponta da ferramenta influencia diretamente no acabamento superficial da peça fabricada. A utilização de raios pequenos provoca concentrações de tensão na zona de deformação da chapa, localizadas abaixo da ferramenta. Raios maiores tendem a distribuir a tensão para uma área maior, tornando a superfície da chapa mais lisa e com menos marcas causadas pela ferramenta. Diminuir o raio da ponta da ferramenta aumentará o limite de estampagem da chapa, entretanto, tornará a mesma mais frágil aos esforços triaxiais que ocorrem na conformação (CASTELAN, 2010).



Figura 2-16 - Ferramenta antes de ser utilizada no processo

2.7. Vantagens e desvantagens do processo ISF

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

- a) Redução do tempo de preparação da máquina;
- b) Dispensa o uso de ferramentas especializadas;
- c) Flexibilidade com a parametrização do sistema (CAD/CAM);
- d) Aumento da característica de conformabilidade;
- e) Máquinas CNC convencionais (centro de usinagem 3 eixos);
- f) Possibilidade de estampagem de peças de dimensões variadas;
- g) Operação é livre de ruídos intensos;
- h) Acabamento pode ser melhorado com o uso de lubrificantes;
- i) Manufatura de peças com formas irregulares e assimétricas;
- j) Menor custo quando comparado a outros processos.

Um comparativo dos custos de implantes para cranioplastia foi realizado por Lajarin (2008) entre o processo de usinagem, estampagem incremental e convencional (Fig. 2-17). O processo de estampagem incremental tem um baixo custo, principalmente quando comparado com implantes feitos por processo de fresamento.

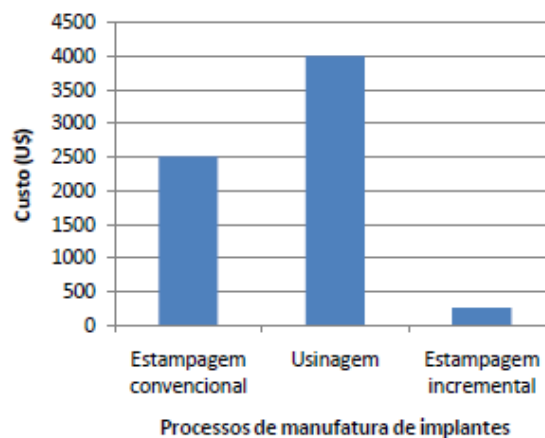


Figura 2-17 - Comparativo do custo entre processos de fabricação

Por outro lado, o processo apresenta as seguintes desvantagens (Micari et al. 2007):

- a) Baixa conformidade dimensional e geométrica entre a peça estampada e o modelo CAD devido ao retorno elástico;
- b) Ângulos de parede próximo a 90° necessitam de várias etapas intermediárias de estampagem;
- c) Dependendo da geometria produzidas, as regiões externas da chapa que não sofrem a ação da ferramenta se deformam após o relaxamento dos fixadores, causando discrepâncias dimensionais;
- d) Tempo muito alto para estampar a peça, limitando sua viabilidade comercial a pequenos lotes;

Com relação aos tipos de erros no produto final, podem ocorrer defeitos como dobragem relevante na chapa perto da base principal, o retorno elástico natural do material da chapa e o efeito “almofada” na base menor do produto. A Fig. 2-18 apresenta todos estes defeitos citados.

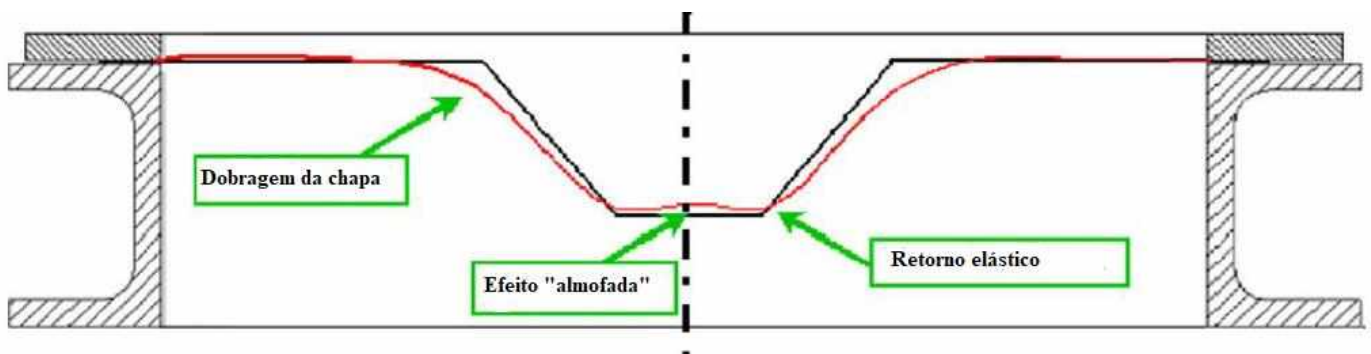


Figura 2-18 - Defeitos que podem ocorrer no processo de ISF (Micari et. al 2007)

2.8. Caracterização do material

2.8.1. Chapa de aço inoxidável AISI 430

O aço inoxidável AISI 430 é uma liga ferro-carbono com elementos de liga. Estes elementos são adicionados visando assegurar as propriedades de resistência e tenacidade, que ocorrem por mudanças micro estruturais que acarretam em mudanças nas propriedades físicas e mecânicas do aço.

A série 400 é a dos aços inoxidáveis ferríticos, aços magnéticos com estrutura cúbica de corpo centrado, basicamente ligas Fe-Cr. Este aço inoxidável possui muitas utilizações como: adornos de automóveis; calhas; máquinas de lavar roupa; revestimento da câmara de combustão para motores diesel; equipamentos para a fabricação de ácido nítrico; fixadores; porta para cofres; moedas; entre outras aplicações.

O AISI 430 apresenta um baixo coeficiente de expansão térmica e uma boa resistência à corrosão e oxidação, inclusive em temperaturas mais elevadas. No estado recozido, com granulação fina, sua ductilidade e tenacidade ambiente podem ser consideradas satisfatórias. Mas quando comparados com os aços inoxidáveis austeníticos apresentam tenacidade e resistência a altas temperaturas relativamente menores. A Tab. 2-1 traz à composição química do AISI 430 e a Tab. 2-2 as propriedades mecânicas à temperatura ambiente.

Tabela 2-1 - % Composição química do Aço Inoxidável AISI 430. Adaptado de (ASM,2005)

Classificação AISI	C	Mn	Si	Cr	P	S
430	0,12	1,00	1,00	16,0-18,0	0,04	0,03

Tabela 2-2 - Propriedades mecânicas a temperatura ambiente do AISI 430. Adaptado de (ASM,2005)

Classificação AISI	Condição	Resistência à Tração [Mpa]	Resis. ao Escoamento 0.2 % [Mpa]	Módulo de Young [GPa]	Alongamento %
430	Recozido	415	205	200	20

A Fig. 2-19 mostra a microestrutura característica do aço inoxidável AISI 450.

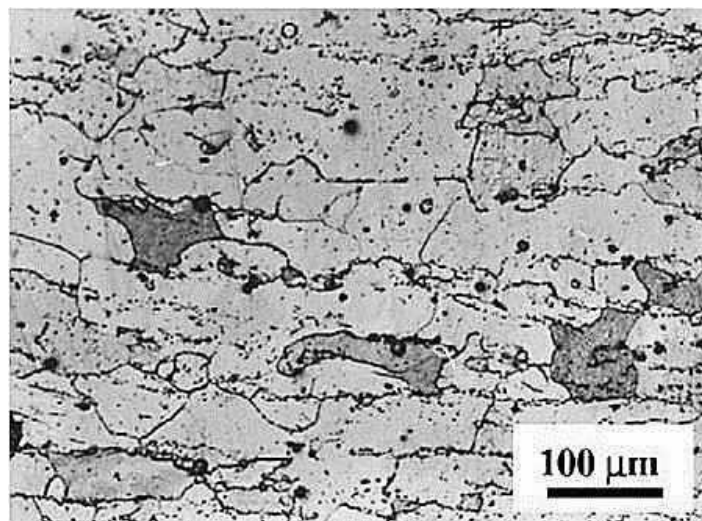


Figura 2-19 - Microestrutura do aço inoxidável ferrítico AISI 430 (SATYNARAYANA; MADHUSUDHAN REDDY; MOHANDAS,2005)

2.8.2. Rugosidade

Segundo Machado (2009) et al. o acabamento de superfície, representado principalmente pela rugosidade, consiste em um conjunto de irregularidades que tendem a criar um padrão, ou seja, uma textura na superfície.

Durante o processo de estampagem incremental, não é possível produzir superfícies ideais. A superfície de uma peça é dotada de regiões com maior ou menor planicidade se observada microscopicamente. Esta medida é definida como sendo a rugosidade da peça. Muitas vezes em um aspecto macroscópico, a peça produzida pelo processo aparenta ter uma superfície lisa.

A rugosidade pode ser medida de maneira mecânica ou ótica. A medição consiste em dividir a região medida (Q) em sub-regiões, com isto, pode-se calcular uma linha média para o perfil, o qual a área dos picos acima e abaixo da linha é igual. Com essas medidas, é possível calcular diversos parâmetros para representar a rugosidade superficial, sendo os principais:

2.8.2.1. Ra

É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição como representado na Fig. 2-20. Esta grandeza pode ser representada como sendo a altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas entre o perfil de rugosidade e a linha média, tendo por comprimento, o percurso de medição. “Rugosidade Média.” (DUMONT TREINAMENTOS, 2018). A equação 2.1 expressa a fórmula matemática para se calcular este parâmetro.

$$Ra = \frac{1}{Q} \int_0^Q |f(x)| dx \quad (2.1)$$

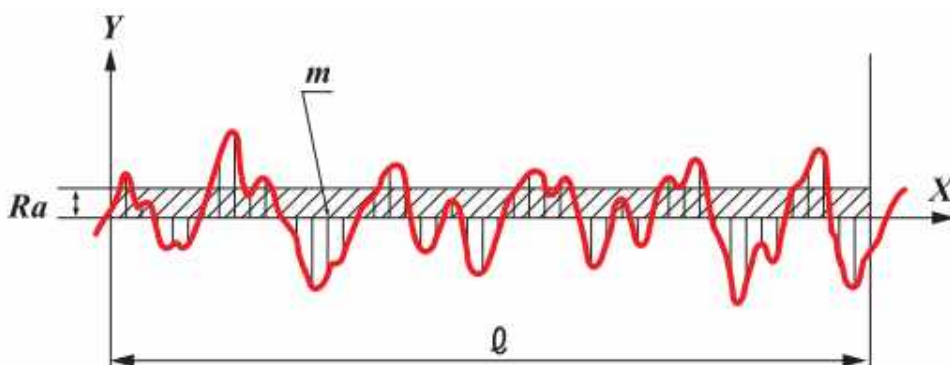


Figura 2-20 - Ilustração do parâmetro Ra

Fonte: http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/4914/8185/3773/tec_surface_roughness_pt-br.pdf

Acesso em 29/05/2018

2.8.2.2. Rz

De acordo com a norma ISSO 4287, o parâmetro Rz é a distância média entre os cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos, dentro de um comprimento medido. Quando encontrar o Rz, uma relação sem um pico excepcional ou um baixo valor, os quais podem ser considerados como uma falha, é selecionado como o comprimento da amostra. A equação 2.2 expressa como se calcula este parâmetro. A Fig. 2-21 representa o parâmetro Rz.

$$Rz = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 p_i + \sum_{i=1}^5 v_i \right) \quad (2.2)$$

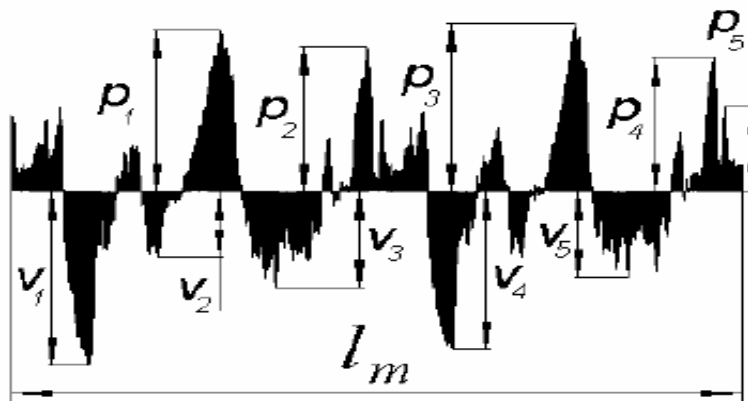


Figura 2-20 - Ilustração de Rz

Fonte: http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/4914/8185/3773/tec_surface_roughness_pt-br.pdf

Acesso em 29/05/2018

2.8.2.3. Rq

Também conhecido como RMS (Root Mean Square), está definido como a raiz da média dos quadrados das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média dentro do percurso de medição (Q). Fazendo-se analogia com o parâmetro Ra, pode-se dizer que é similares, aos valores y das ordenadas, elevadas ao quadrado e depois extraídas a raiz quadrada da média. A equação 2.3 expressa a formula matemática para se calcular este parâmetro.

$$Rq = \sqrt{\int_0^Q [f(x)]^2 dx} \cdot \frac{1}{Q} \quad (2.3)$$

2.8.3. Ensaio de tração

O teste de tração de engenharia é muito utilizado para se obter as propriedades mecânicas dos materiais e também como um teste de controle de especificações (DIETER, 1981). Segundo Schaeffer (1999) é o ensaio mais utilizado para obtenção das seguintes propriedades mecânicas:

- Módulo de Elasticidade (E) [GPa]
- Tensão de Escoamento Convencional (σ_e) ou ($\sigma_{0,2}$) [Mpa];
- Limite de Resistência ou Tensão Máxima (σ_B) [Mpa];
- Limite de Ruptura (σ_R) [Mpa];
- Alongamento (δ) [%];
- Grau de encruamento (n);
- Índice de anisotropia (r).

Fatores como temperatura, velocidade de deformação, índice de anisotropia, tamanho de grão e porcentagem de impurezas, influenciam nos resultados no ensaio de tração (GARCIA et al. 2008).

A norma NBRISO6892-1 (2013) estabelece que o ensaio de tração consiste em deformar um corpo de prova por força de tração, geralmente até a fratura do mesmo, visando a determinação das propriedades mecânicas. O teste deve ser realizado em temperatura ambiente e com corpos de prova padronizados. A máquina utilizada possui duas garras, uma fixa e outra móvel, e é equipada com sensores que permitem medir a força F [N] e a variação do comprimento [$l - l_0$] como dados.

A Fig. 2-22 apresenta o desenho esquemático do corpo de prova utilizado no ensaio de tração.

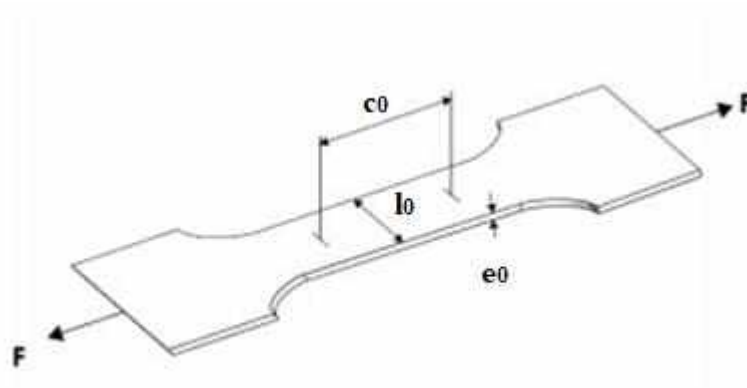


Figura 2- 21 - Geometria do corpo de prova no ensaio de tração (CARDOSO, 2017).

O resultado do ensaio de tração é representado por um gráfico tensão x deformação (Fig. 2-23) que mostra a relação entre a tensão aplicada e a deformação no corpo de prova.

Para se calcular o valor da tensão σ , deve-se utilizar a equação (2.4) e consequentemente a equação (2.5):

$$A_0 = l_0 * e_0 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2.4)$$

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ [MPa]} \quad (2.5)$$

Sendo l_0 e e_0 são as medidas iniciais do corpo de prova em [mm], A_0 a área inicial em [mm²] e F a força aplicada durante o ensaio de tração em [N].

A deformação relativa (ε) que o corpo de prova sofre durante o ensaio de tração é calculada pela equação (2.6):

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} . 100 \text{ [%]} \quad (2.6)$$

Onde l e l_0 são, respectivamente, as deformações final e inicial do corpo de prova submetido ao ensaio de tração.



Figura 2-22 - Diagrama tensão em função da deformação obtido em um ensaio de tração (DIETER,1981)

A região linear da curva apresentada na curva tensão x deformação, é chamada de regime elástico. Através dela, pode-se estabelecer uma relação de proporção entre a tensão aplicada e a deformação resultante. A constante de proporcionalidade entre essas duas grandezas é definida com Módulo de Elasticidade (E) [GPa]. Este módulo é calculado através da Lei de Hooke através da equação (2.7):

$$\sigma = E * \varepsilon \text{ [GPa]} \quad (2.7)$$

2.8.4. Índice de Anisotropia

Durante os processos de conformação de chapas, grãos cristalinos individuais são alongados na direção da maior deformação de tração. O alongamento é consequência do processo de escorregamento do material durante a deformação. Nos materiais policristalinos os grãos tendem a girar para alguma orientação limite devido a um confinamento mútuo entre grãos. Este mecanismo faz com que os planos atômicos e direções cristalinas dos

materiais com orientação aleatória (materiais isotrópicos) adquiram uma orientação preferencial. Os materiais conformados se tornam anisotrópicos.

As orientações preferenciais dos planos atômicos e direções cristalinas dos materiais ocasionam em variações das propriedades mecânicas com a direção, chamadas anisotropia. O grau de anisotropia das chapas quando deformadas plasticamente pode ser calculado através do índice de anisotropia.

Por definição, o índice de anisotropia ou coeficiente de Lankford (r) é a razão entre a deformação verdadeira na largura e na espessura de um corpo de prova de tração, podendo ser calculado através da equação (2.8):

$$r = \frac{l \ln \frac{l_0}{l_f}}{l \ln \frac{l_f \cdot c_f}{l_0 \cdot c_0}} \quad (2.8)$$

Onde l_0 é a largura inicial do corpo de prova submetido ao ensaio de tração [mm], o l_f é a largura final do corpo de prova [mm], c_0 é o comprimento inicial do corpo de prova [mm] e c_f é o comprimento final do corpo de prova no momento do ensaio [mm].

Os corpos de prova são fabricados em diferentes angulações em relação à direção de laminação da chapa. Usualmente os ângulos são 0° , 45° e 90° (Fig. 2-24), obtendo assim os seguintes índices de anisotropia nas direções de laminação: r_{0° , r_{45° , r_{90° . Considerando as direções de laminação da chapa, pode-se a partir das três razões de deformação calcular a anisotropia média (r_m) e a anisotropia planar (Δr) respectivamente pelas equações (2.9) e (2.10) (SCHAEFFER, 1999):

$$r_m = \frac{1}{4} \cdot (r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (2.9)$$

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} \quad (2.10)$$

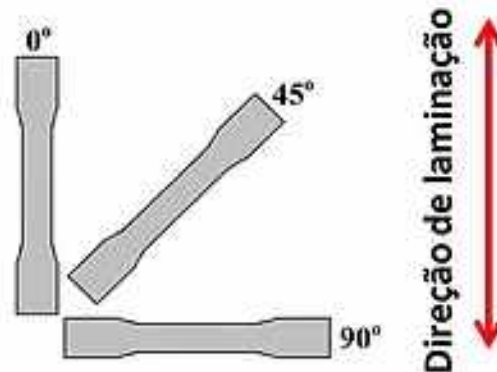


Figura 2-23 - Diferentes angulações das direções de laminações dos corpos de prova para o ensaio de tração.

Fonte: <http://frefranco2.wixsite.com/info/rmb-e-anisotropia-mec-nica>

Acesso em 29/05/2018

Para um material ser considerado isotrópico ele deve possuir $r_m = 1$ e $\Delta r = 0$. Para a fabricação por estampagem incremental é desejável que o material possua um alto valor de anisotropia média, significando assim uma maior resistência à afinção da chapa durante o processo.

2.8.5. Temperatura de trabalho no processo de estampagem incremental

Nos processos de conformação, tanto a deformação plástica quanto o atrito contribuem para a geração de calor. Da energia empregada na deformação plástica de um metal, apenas 5 a 10% ficam acumulados na rede cristalina, sob a forma de energia interna, sendo os restantes 90 a 95% convertidos em calor. Uma parte do calor gerado é dissipado (transmitido às ferramentas ou perdido para a atmosfera), mas o restante permanece na peça, elevando-lhe a temperatura.

A temperatura durante o processo de estampagem incremental está fortemente associada com a rotação da ferramenta. Quanto maior o número de giros por um determinado intervalo de tempo do punção, mais atrito há entre a

chapa e a ferramenta, levando assim a um aquecimento considerável da peça durante o processo. Com o aumento da temperatura da chapa, consegue-se aumentar a conformabilidade da chapa. Contudo, o aquecimento da ferramenta resulta em um maior desgaste da chapa e da ferramenta, interferindo na rugosidade da peça, além de queimar o lubrificante utilizado, ocasionando problemas ambientais.

AL-OBAIDI, AMAR & KRÄUSEL e VERENA & LANDGREBE (2018) realizaram uma simulação e experimentação da variação da influência do aquecimento da chapa antes da mesma passar pelo processo de estampagem incremental. A conformabilidade da chapa foi melhorada com o aumento da temperatura. A Fig. 2-25 apresenta as altas temperaturas alcançadas durante o processo de ISF com a chapa aquecida no experimento descrito acima.

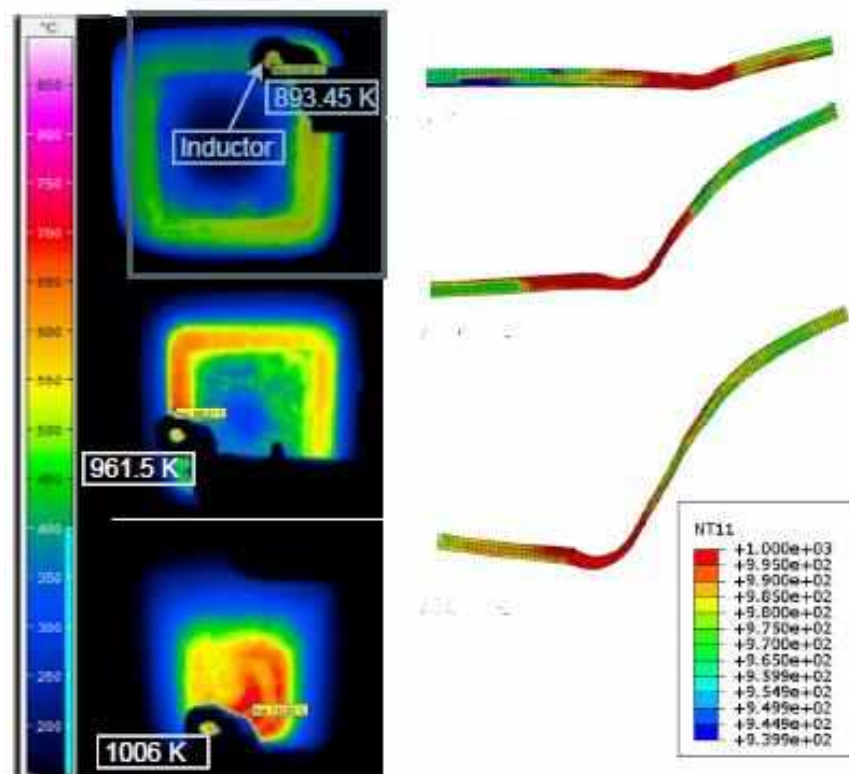


Figura 2-24 - Variação da temperatura durante o processo de ISF com a chapa já aquecida AL-OBAIDI, AMAR & KRÄUSEL, VERENA & LANDGREBE, DIRK. (2018).

Capítulo 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta todos os equipamentos, ferramentas e materiais, bem como a metodologia de trabalho utilizada nos testes de estampagem incremental do aço AISI 430.

3.1. Estampagem Incremental

Os testes de estampagem incremental deste trabalho foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). A Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF) foi feita nos ensaios devido a sua maior simplicidade em relação aos outros métodos.

3.1.1. Máquina utilizada no processo

Para a realização dos ensaios de estampagem incremental, foi utilizado um Centro de Usinagem Vertical Discovery 760 da marca ROMI, como ilustrado na Fig. 3-1. A Tab. 3-1 apresenta as principais especificações técnicas da máquina.



Figura 3-1 - Máquina CNC utilizada para os ensaios de estampagem incremental

Tabela Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.-3 – **Especificações Técnicas**
Centro de Usinagem Discovery 760

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	DISCOVERY
Cabeçote vertical	
Cone da árvore	ISO 40
Faixa de velocidade (standart)	7 - 10.000 rpm
Avanços	
Avanço rápido (eixos X/Y)	30 m/min
Avanço rápido (eixo Z)	20 m /min
Avanço de corte programável	1 a 15 m/min
Cursos	
Curso da mesa superior (eixo X)	762 mm
Curso da mesa inferior (eixo Y)	406 mm
Curso do cabeçote	508 mm
Distância entre o nariz da árvore e a mesa	125 a 633 mm
Mesa	
Superfície da mesa	915 x 360 mm
Peso admissível sobre a mesa (uniformemente distribuído)	900 kg
Trocador automático de ferramentas (standard)	
Capacidade do magazine de ferramentas	22 ferramentas
Diâmetro máximo da ferramenta	80 mm
Diâmetro máximo da ferramenta quando os alojamentos adjacentes estão vazios	160 mm
Comprimento máximo da ferramenta	254 mm
Peso máximo da ferramenta	6 kg
Potência instalada	
CNC Siemens	
Motor principal CA (30 min)	12,5 cv/ 9KW
Potência total instalada	15 KVA
Dimensões e Pesos (aproximados)	
Altura	2,80 m
Área ocupada (frente x lateral)	2,49 x 2,39 m
Peso líquido	3.500 kg

Fonte: Manual Fornecido pelo fabricante ROMI

3.1.2. Ferramenta de Estampagem

Utilizou-se uma ferramenta usinada em torno convencional para a realização dos testes de estampagem incremental. O material da ferramenta é aço-ferramenta (AISI 52100), com comprimento de 85,19 mm e possuem uma ponta semiesférica com diâmetro de 11,91 mm. A Fig.3-2 mostra a ferramenta utilizada nos testes.



Figura 3-2 - Ferramenta de AISI 52100 utilizada nos testes de EI

3.1.3. Suporte prensa-chapas

O suporte para a fixação das chapas foi fabricado em aço e possui dimensões de 300 mm de largura, 300 mm de comprimento e 210 mm de profundidade. Este suporte possui 16 furos em concordância com os furos de quatro peças metálicas, que são colocadas em cima do suporte visando fixar a chapa ensaiada ao suporte. A Fig. 3-2 ilustra o dispositivo prensa-chapas utilizado e a Fig. 3-3 mostra a chapa já fixada no suporte com a ajuda de 16 parafusos encaixados nos furos.



Figura 3-3 - Dispositivo prensa-chapas



Figura 3-4 - Dispositivo prensa-chapas fixando uma chapa durante o processo de EI

3.1.4. Corpos de prova utilizados

Os corpos de prova utilizados nos testes de estampagem incremental foram chapas com as seguintes dimensões: 240 mm de comprimento, 240 mm de largura e 0.6 mm de espessura. O material das chapas é aço inoxidável AISI 430. Estes corpos de prova foram obtidos de uma placa (Fig. 3-5), que foi cortada com a ajuda de uma tesoura elétrica da marca Bosch modelo GSC 2.8 (Fig. 3-6).



Figura 3-5 - Chapa de aço INOX AISI 430



Figura 3-6 - Tesoura elétrica Bosch GSC 2.8

3.1.5. Medição de temperatura no processo

Durante os ensaios de estampagem incremental as temperaturas das chapas e da ferramenta eram aferidas de 5 em 5 minutos até a finalização do teste. Este parâmetro foi medido utilizando um termômetro de infravermelho modelo 42570 da marca Flir® como mostrado na Fig. 3-7 abaixo.



Figura 3-7 - Termômetro de infravermelho utilizado na medição de temperatura do processo

Antes da medição de temperatura, o termômetro foi configurado com uma emissividade (ϵ) de 0,35 que é o valor da razão entre a energia radiada pelos aços inoxidáveis e a energia irradiada por um corpo negro.

A temperatura era medida sempre em um determinado ponto da chapa. Portanto, toda vez que a ferramenta passava por aquele local o parâmetro era medido na haste da ferramenta e na superfície da chapa próximo ao local onde o punção deformava o metal.

3.1.6. Lubrificação durante o processo

A lubrificação no processo de estampagem incremental foi feita utilizando óleo para transmissão 80W SAE da Texaco® e grafite mesh (40 μm) misturado com o lubrificante em uma proporção de 10% em peso. A Fig. 3-8

apresenta o óleo e o grafite em pó utilizados nos testes.



Figura 3-8 - Óleo 80W e grafite em pó utilizado para a lubrificação nos ensaios

3.1.7. Procedimento experimental

Primeiramente foi gerada uma superfície de um tronco de cone (Fig. 3-9) através do software Fusion 360® CAD/CAM. Esta forma geométrica possui um ângulo de parede de 45° , profundidade de 60 mm e diâmetro da base de 130 mm. A estratégia de conformação para a obtenção dessa geometria foi a helicoidal cônica, na qual a ferramenta executa uma trajetória helicoidal cônica, estando sempre em contato com a superfície da chapa a ser estampada.

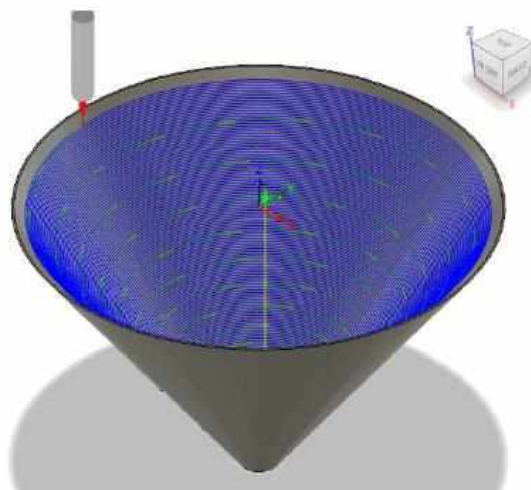


Figura 3-9 - Tronco de cone gerado através do software CAD/CAM

Realizou-se um total de cinco testes fixando variáveis como rotação da ferramenta, tipo da ferramenta, velocidade de avanço da mesa da máquina, passo vertical do eixo z e ângulo de parede do tronco de cone. Entre os testes, a ponta da ferramenta era lixada com lixas de granulometria de 600 e 1200 para reduzir o desgaste sofrido pela ferramenta. O parâmetro variado durante os testes foi a condição de lubrificação como mostra a Tab. 3-2.

Tabela 3-1 - Diferentes condições de lubrificação ensaiadas

Teste n°	Ferramenta	Ângulo de parede α [°]	Passo vertical do eixo Z [mm]	Velocidade de avanço V_{fn} [mm/min]	Rotação [rpm]	Lubrificante
1	AISI 52100	45	0,5	1000	10	40 ml de óleo 80w
2	AISI 52100					20 ml de óleo 80w em solução com 10% de grafite
3	AISI 52100					40 ml de óleo 80w em solução com 10% de grafite
4	AISI 52100					20 ml de óleo 80W
5	AISI 52100					Sem lubrificação

3.2. Ensaio de tração

Para a realização dos ensaios de tração, primeiramente foram fabricados corpos de prova específicos (Fig. 3-10). Para a produção dos corpos de prova foi utilizada uma das chapas quadradas de aço AISI 430, a qual foi cortada com jato d'água. Os corpos de prova possuíam diferentes angulações em relação ao sentido de laminação da placa (0° , 45° e 90°). As dimensões do corpo de prova se encontram na Fig. 3-11.



Figura 3-10 - Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração

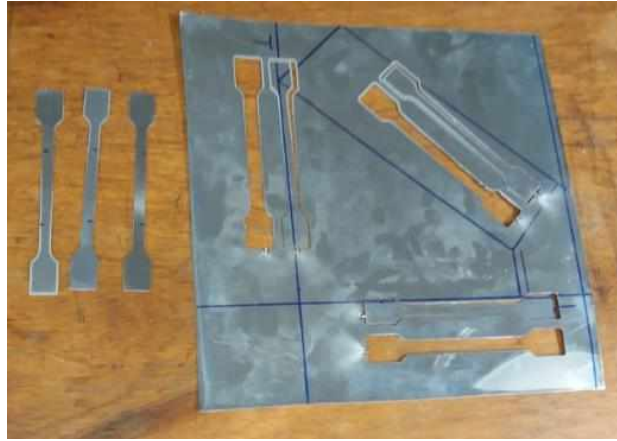


Figura 3-11 - Corpos de prova utilizados no ensaio

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEst) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em uma máquina MTS Landmark® com célula de carga com capacidade de 500 kN ilustrada na Fig. 3-12.



Figura 3-12 - Máquina utilizada no ensaio de tração

Para se calcular o índice de anisotropia do material, fez-se necessário a medição do comprimento e da largura do corpo de prova antes e depois do ensaio de tração. Foram avaliadas essas medidas para os três ensaios nas diferentes direções de laminação (0° , 45° , 90°).

3.3. Rugosidade

Para avaliar a influência dos parâmetros relacionados com a qualidade do acabamento superficial, foi realizada a medição de rugosidade da região estampada de cada ensaio, assim como da chapa antes de passar pelo processo de conformação. Para isso foram retirados de cada teste uma amostra de formato retangular de 15 mm x 10 mm para a avaliação dos parâmetros Ra, Rz e Rq (Fig. 3-13).

Foi utilizado um rugosímetro eletrônico portátil Surtronic S-100 da marca Taylor Hobson® (Fig. 3-14). As configurações para as medições de rugosidade foram um cut-off de 2,5 μm e comprimento de medição de 5 mm. Foram realizadas cinco medições de cada amostra, calculando depois a média e o desvio padrão dos valores.

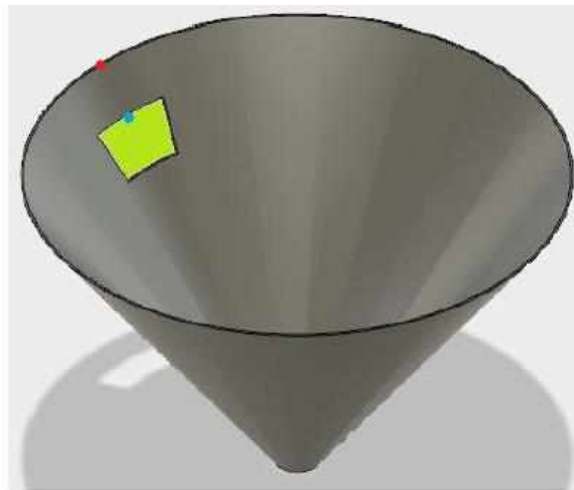


Figura 3-13 - Amostra retirada do tronco de cone para análise da rugosidade



Figura 3-14 - Rugosímetro utilizado para a medição da rugosidade nas chapas

3.4. Estudo do retorno elástico

Para o estudo do retorno elástico do material utilizado no processo, mediu-se a altura final de todas as chapas que passaram pela estampagem incremental. Utilizando um traçador de altura digital Mitutoyo® 570-310 foram medidas as profundidades estampadas, como pode ser visto na Fig. 3-15.



Figura 3-15 - Medição da profundidade da peça após o processo de estampagem incremental

Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta todos os resultados obtidos nos experimentos, assim como discussões e análises.

4.1. Ensaio de estampagem incremental

Os resultados obtidos nos ensaios de estampagem incremental podem ser divididos em duas análises: a primeira em relação a necessidade da utilização de lubrificantes e a segunda em relação a temperatura envolvida durante o processo.

Como já apresentado anteriormente pela Tab. 4, os testes foram realizados com um punção fabricado por aço-ferramenta (AISI 52100), com comprimento de 85,19 mm e diâmetro da ponta semiesférica de 11,91 mm. Os parâmetros fixados durante os experimentos foram: ângulo de parede de 45°, passo vertical do eixo Z de 0,5 mm, velocidade de avanço de 1000 mm/min e rotação de 10 rpm.

A média de tempo dos ensaios realizados foi de 80 minutos, com exceção do teste 5 que não foi concluído pois a ferramenta utilizada começou a vibrar intensamente, causando um elevado nível de ruído. Para evitar uma possível fratura da ferramenta por flexão o teste foi parado com 19 minutos de duração e profundidade no eixo Z em 6,53 mm. Tudo isso foi causado pela falta de lubrificação que eleva o atrito entre a ferramenta e a peça.

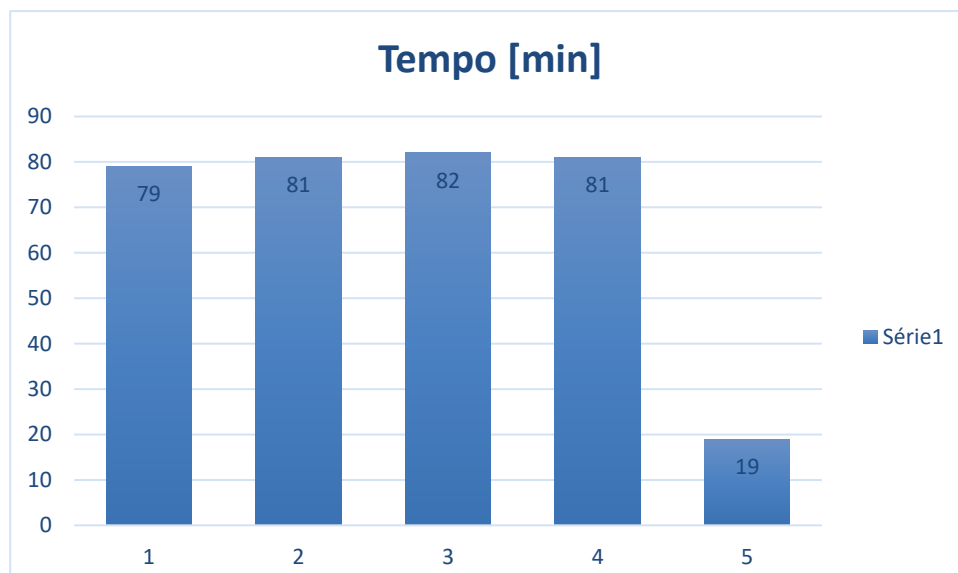


Figura 4-1 - Comparativo do tempo de estampagem de cada teste

Os outros testes decorreram normalmente. Nota-se que a duração dos quatro primeiros testes foi bem semelhante. Isso ocorre, pois, o intervalo de tempo gasto está atrelado diretamente com a velocidade de avanço da mesa (V_{fh}) que foi de 1000 mm/min em todos os ensaios.

A média das temperaturas aferidas nas chapas e na ferramenta, encontram-se na Tab. 4-2.

Tabela 4-1 - Temperaturas medidas nas chapas e na ferramenta

Teste nº	Temperatura na chapa [°C]	Temperatura na ferramenta [°C]
1	39,62	43,00
2	23,52	34,83
3	32,08	37,09
4	35,43	39,15
5	42,14	53,67

A única diferença entre os Testes 1 e 3 é a presença de 10 % em peso de grafite no terceiro teste, para mesma proporção de óleo que o primeiro teste. Comparando então as temperaturas envolvidas em ambos experimentos, o Teste 3 possui menores médias. Isso ocorre, pois, a presença de grafite em pó contribui para uma otimização da transferência de calor entre os componentes do experimento. Da mesma forma, ocorre também com os Testes 2 e 4, sendo que o Teste 2 possui temperaturas menores devido a presença do lubrificante sólido.

No Teste 5, verifica-se um maior aquecimento da ferramenta e da chapa quando comparado aos outros experimentos devido à falta de lubrificação, a qual ajuda no resfriamento do processo.

Um teste adicional foi realizado utilizando os seguintes parâmetros fixos: ângulo de parede, passo vertical do eixo Z e velocidade de avanço. A diferença deste teste foi o aumento da rotação da ferramenta de 10 rpm para 1000 rpm, com o intuito de verificar se houve alteração na temperatura. O resultado deste experimento, comparado com os outros testes já realizados à mesma condição de lubrificação, se encontram na Tab. 7. A Fig. 4-2 mostra o comparativo das temperaturas entre os Teste 2, Teste 4 e o Teste Adicional.

Tabela 4-2- Comparativo entre as mesmas condições de lubrificação, mas rotações diferentes

Teste n°	Rotação [rpm]	Condição de lubrificação	Temperatura na chapa [°C]	Temperatura na ferramenta [°C]
2	10	20 ml de óleo 80W + 10% grafite	23,52	34,83
4	10	20 ml de óleo 80W	35,43	39,15
Adicional	1000	20 ml de óleo 80W	171,00	193,00

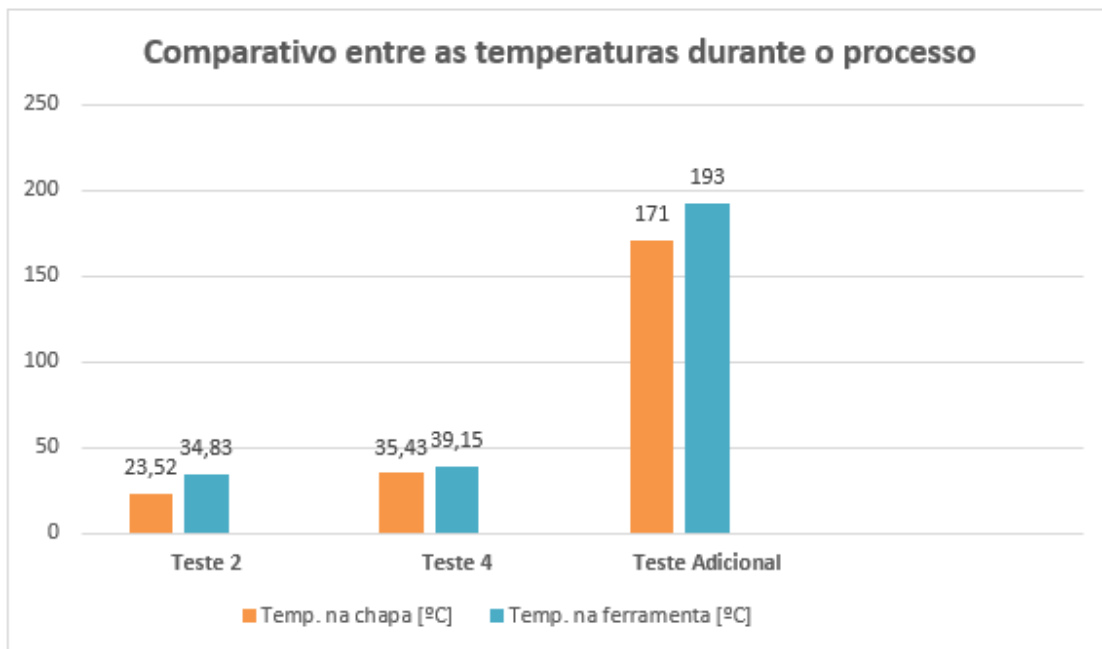


Figura 4-2 - Comparativo entre as temperaturas do teste adicional

Nota-se uma variação de mais de 482 % da temperatura para uma elevação de 100 vezes na rotação, concluindo-se que a rotação da ferramenta é diretamente proporcional à temperatura durante o processo de estampagem incremental. Isso se deve ao fato de que a ferramenta girando mais, há uma maior energia envolvida no processo e parte desta energia é dissipada em forma de energia térmica.

A Fig. 4-3 apresenta as chapas já conformadas pelo processo de estampagem incremental.

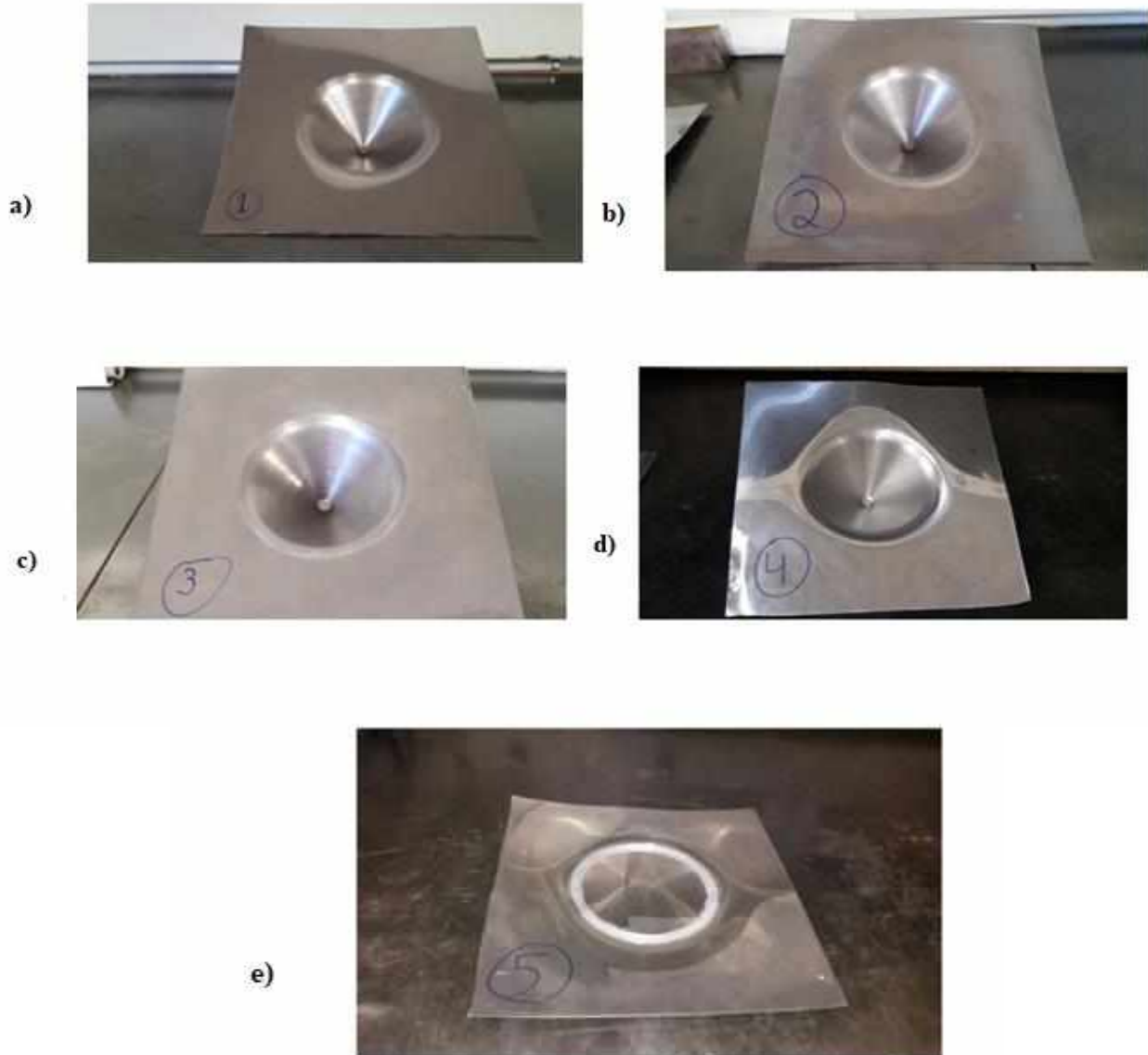


Figura 4-3 - Chapas após a estampagem incremental

- a) Teste 1
- b) Teste 2
- c) Teste 3
- d) Teste 4
- e) Teste 5

Durante o processo, a ponta da ferramenta é desgastada. A Fig. 4-4 apresenta este desgaste ferramental.

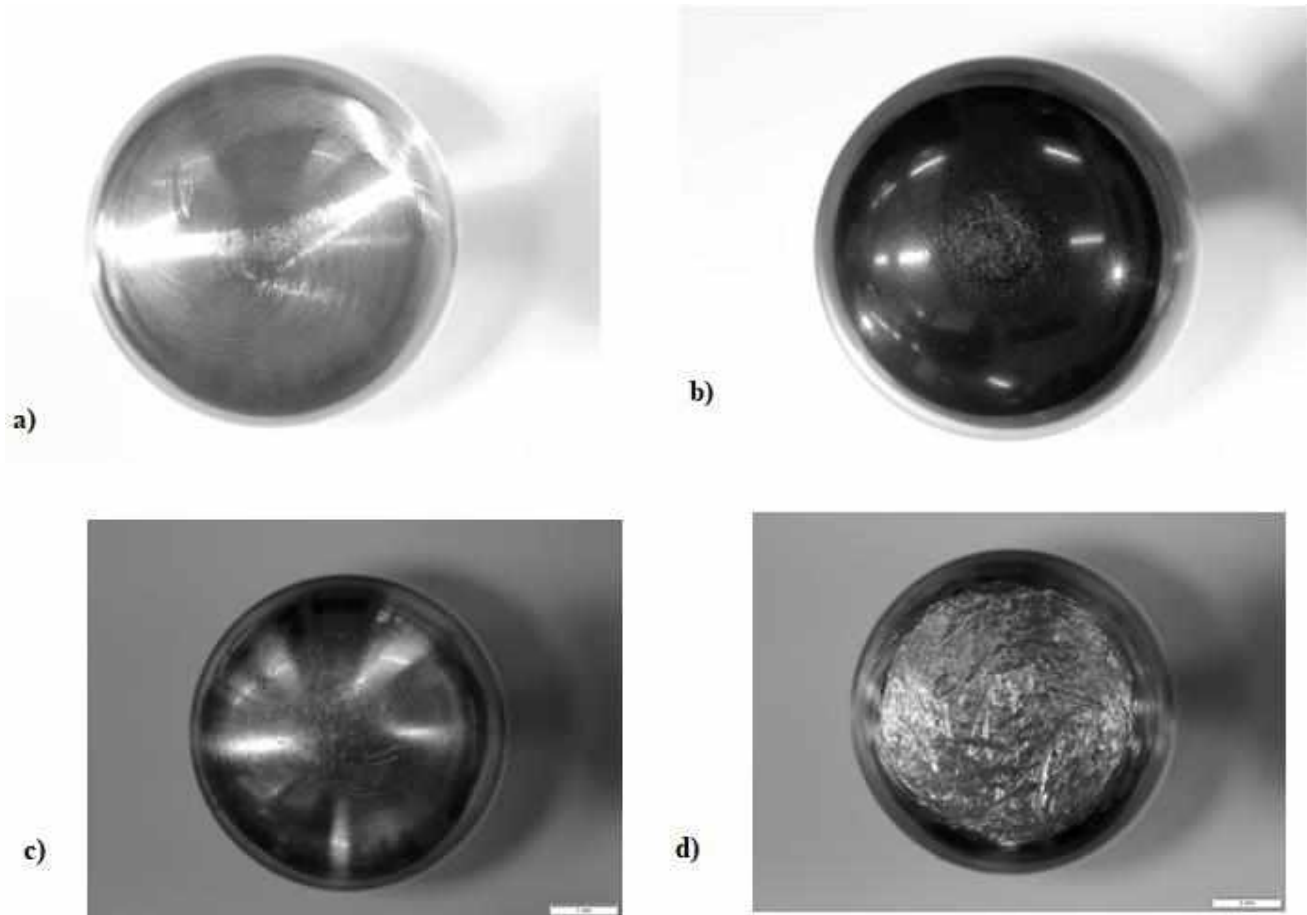


Figura 4-4- Desgaste Ferramental
a) Antes do Teste 2 b) Depois do Teste 2
c) Antes do Teste 5 d) Depois do Teste 5

O desgaste da ferramenta acontece pois há atrito entre a ferramenta e a peça que está sendo conformada. Entre os quatro primeiros testes, visualmente, o desgaste da ferramenta foi semelhante. Já no Teste 5, houve um desgaste muito maior pois este ensaio foi realizado sem um lubrificante, o qual reduz o atrito entre a ferramenta e a peça.

4.2 Retorno elástico

Para a identificação do problema do retorno elástico, mediu-se a profundidade dos cones e as médias dos resultados encontram-se na Tab. 4-4.

Tabela 4-3 - Profundidade teórica e real do produto final

Teste n°	Profundidade teórica [mm]	Profundidade real [mm]
1	60	58,07
2		58,11
3		58,36
4		58,68
5		-
Adicional		56,24

Como no Teste 5 o teste não foi executado completamente, não houve como medir a profundidade real do cone. O Teste Adicional é o mesmo ensaio que foi realizado com rotação da ferramenta de 1000 rpm, apresentado anteriormente no estudo de temperatura.

Nota-se que nos testes de 1 a 4, o parâmetro da profundidade real não variou muito. Isso ocorreu pois o material da chapa e a rotação da ferramenta foram os mesmos para estes quatro primeiros testes. Já no teste adicional, houve uma maior diferença entre as profundidades teórica e real. Esse fato pode ser explicado pela maior rotação desenvolvida no teste adicional, parâmetro este que influencia diretamente no retorno elástico do material da chapa.

4.3 Rugosidade

Foram medidos os valores dos parâmetros de rugosidade Ra, Rz e Rq das chapas dos cinco testes, assim como da chapa sem sofrer conformação, a fim de se observar a influência dos parâmetros de rotação, ferramenta e lubrificação na qualidade do acabamento superficial da peça. A Tab. 4-5 apresenta os valores médios obtidos em cada teste, assim como os valores do

desvio padrão. As Fig. 4-4, 4-5 e 4-6 apresentam, respectivamente, a comparação dos valores dos parâmetros Rz, Ra e Rq.

Tabela 4-4 - Parâmetros de rugosidade das chapas após o processo

	Ra (μm)		Rz (μm)		Rq (μm)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Sem Teste	1,82	0,776	7,4	2,724	2,3	0,903
Teste 1	2,86	0,445	10,6	1,673	3,35	0,483
Teste 2	6,34	0,773	23,5	1,837	7,32	0,509
Teste 3	7,48	1,724	27,6	8,659	8,95	2,219
Teste 4	4,88	1,404	21,5	5,037	5,79	1,312
Teste 5	9,84	1,589	66,4	8,898	12,724	1,833

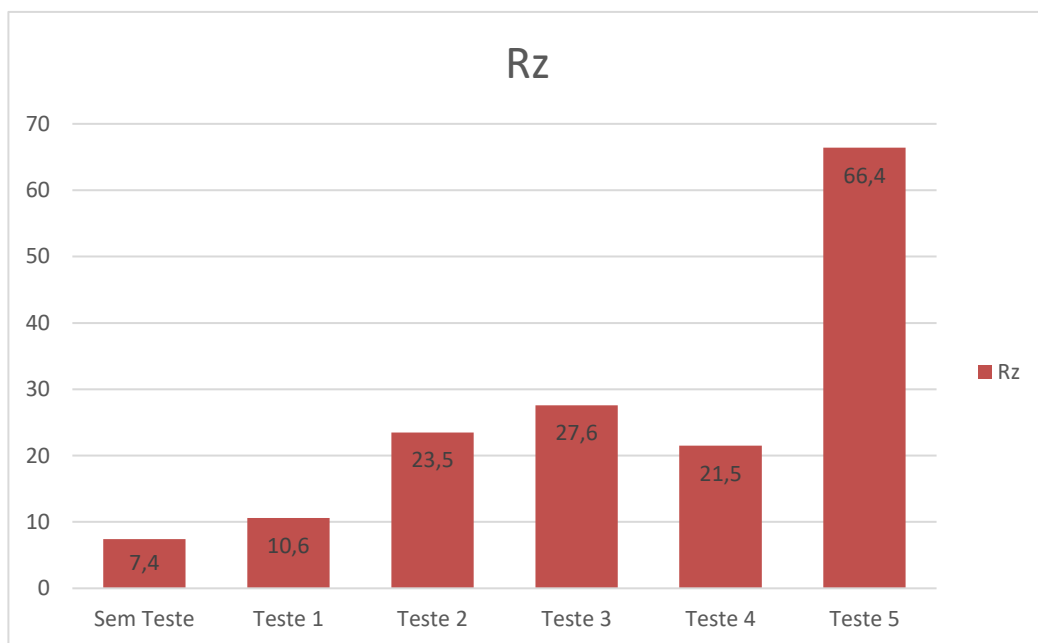


Figura 4-5 - Parâmetro Rz nos testes realizados

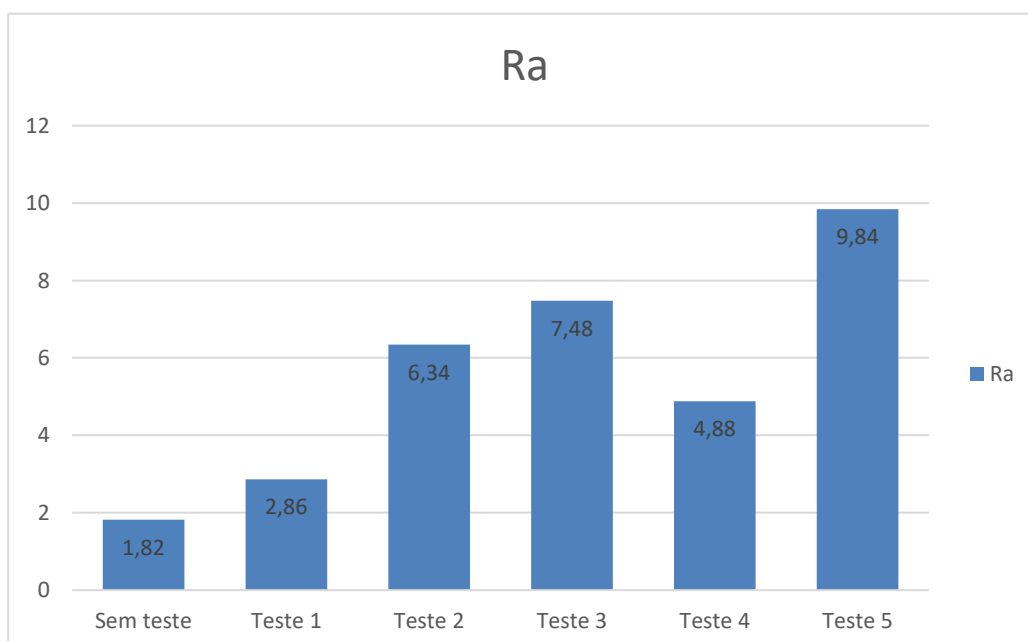


Figura 4-6 - Parâmetro Ra nos testes realizados

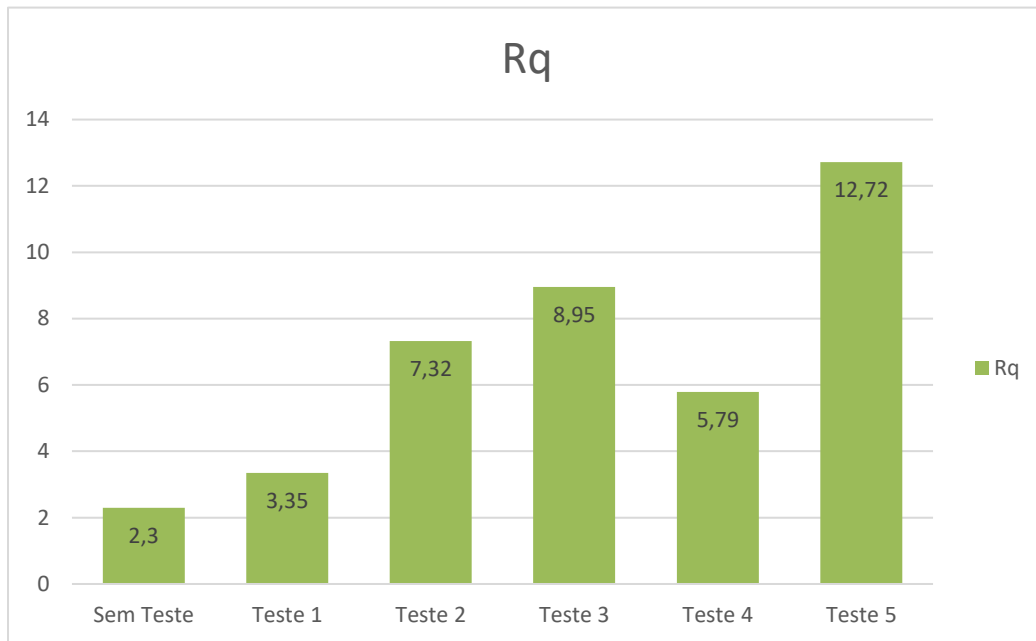


Figura 4-7 - Parâmetro Rq calculado nos ensaios realizados

Primeiramente nota-se que, como o esperado, a chapa que não foi estampada possui menores valores de rugosidade média quando comparada com aquelas que passaram pelo processo de estampagem incremental. Isso se deve ao fato de que quando a ferramenta executa o procedimento, a superfície vai sendo transformada e conseqüentemente a rugosidade do material vai sendo alterada.

Comparando o Teste 1 e o Teste 3, para uma mesma rotação de 10 rpm os valores de rugosidade foram bastante distintos. A explicação deste fato é que como o Teste 3 utilizou-se uma quantidade de 10 % em peso de grafite misturado ao óleo lubrificante 80W. O grafite em pó misturado com o óleo pode ter aderido na ferramenta durante o giro da mesma, causando um maior desgaste superficial na chapa onde foi executado o Teste 3. Da mesma forma ocorreu também quando compara-se o Teste 2 e o Teste 4, ou seja, o ensaio onde houve o uso de grafite, possui valores maiores de rugosidade.

Os testes que usaram apenas óleo para a lubrificação (Teste 2 e Teste 4) possuem os menores valores de rugosidade. Fazendo um comparativo entre ambos os testes, o primeiro ensaio onde se utilizou 40 ml de óleo, o resultado foi melhor. Isso pode ser explicado pelo fato de que a maior quantidade de óleo, ajudou na diminuição do atrito que ocorre entre a ferramenta e a chapa.

Como não foi utilizado nenhum tipo de lubrificação no Teste 5, o atrito entre a ferramenta e a chapa foi muito grande, causando assim, uma superfície com qualidade inferior quando comparada com as outras chapas que passaram pelo processo de estampagem incremental.

4.4 Testes de tração

Foram obtidos pelos ensaios de tração os valores da força de tração (kN) e da variação do comprimento do corpo de prova (mm). Com esses dados, através do software Excel (2016), foram calculados os valores de Tensão (MPa) e Deformação Relativa (ϵ), e então gerado os gráficos Tensão x Deformação Relativa, para os corpos de provas nas direções de laminação de 0° , 45° e 90° . Os gráficos obtidos são mostrados na Fig. 4-6, 4-7 e 4-8.

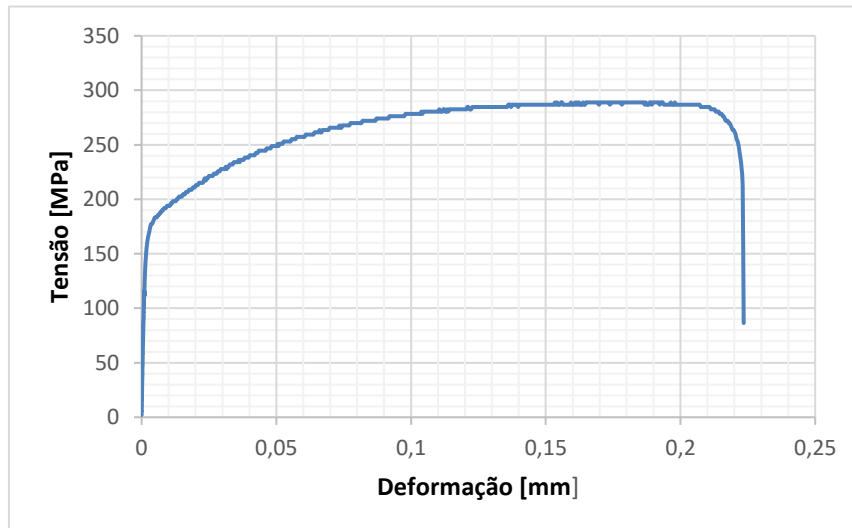


Figura 4-8 - Curva de tensão em função da deformação obtida a partir de um corpo de prova transversal à direção de laminação (90°)

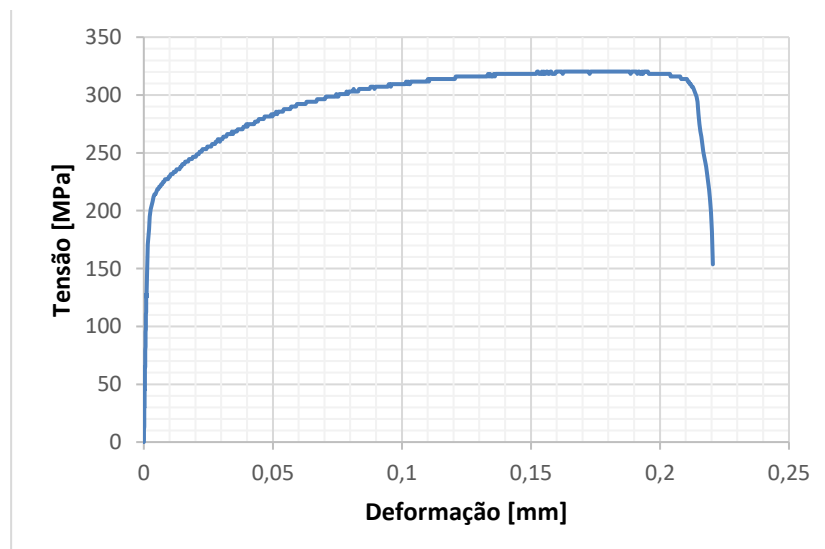


Figura 4-9 - Curva de tensão em função da deformação obtida a partir de um corpo de prova diagonal à direção de laminação (45°)

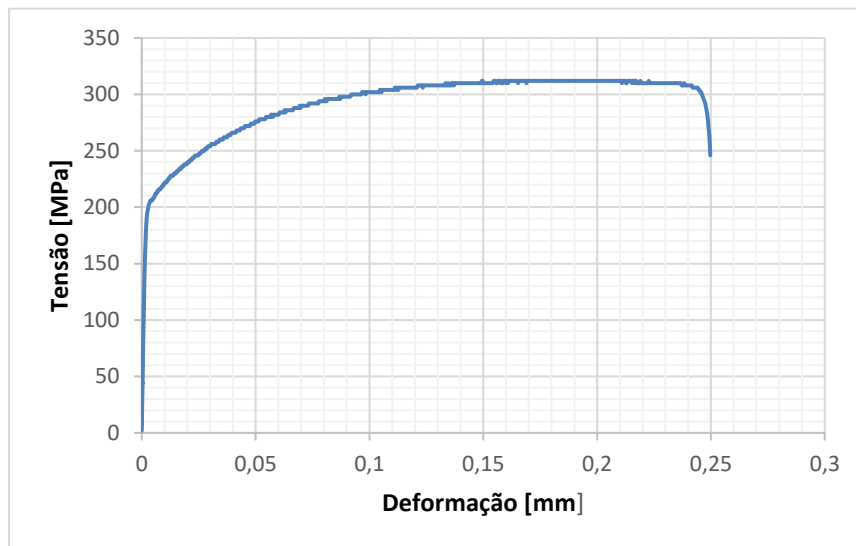


Figura 4-10 - Curva de tensão em função da deformação obtida a partir de um corpo de prova longitudinal à direção de laminação (0°)

As três curvas apresentam comportamento semelhante, pode-se perceber que todas apresentam uma região elástica até a tensão próxima de 175 MPa, e a partir desse valor o material entra em seu regime plástico. Outra observação que se pode fazer é que o material tem a transição da fase elástica para a fase plástica sem apresentar uma região de escoamento nítida.

A tensão de ruptura do corpo de prova longitudinal à direção de laminação da chapa (0°) vale em torno de 250 MPa, enquanto do corpo de prova transversal (90°) é em torno de 86 MPa e o diagonal (45°) 150 MPa. A amostra longitudinal alonga menos antes de romper pois como a tensão está aplicada paralelamente ao eixo do corpo de prova, é mais fácil a propagação de trincas entre as microestruturas até a ruptura.

Pode-se notar que a deformação relativa na fase elástica é muito pequena, enquanto que na região plástica o material é deformado consideravelmente e o valor da tensão continua a aumentar até a sua ruptura. Esses fatores mostram o comportamento de um material dúctil.

Através de uma regressão linear na região elásticas das curvas Tensão x Deformação relativa, é possível estimar o valor Módulo de Elasticidade (GPa) do material. Esse valor corresponde ao coeficiente angular da reta obtida pelo método da regressão linear. A Tab. 4-6 apresenta os valores obtidos em cada direção de laminação.

Tabela 4-5 - Módulo de elasticidade obtido para os corpos de prova

Direção de laminação	Paralela (0°)	Diagonal (45°)	Perpendicular (90°)	Média
Módulo de Elasticidade (GPa)	193,62	205,35	196,24	198,40

O valor encontrado nos ensaios para o módulo de elasticidade que foi de 198,40 GPa, se aproxima daquele encontrado na literatura que é 200 GPa.

4.4.1 Índice de anisotropia

As dimensões iniciais e finais dos corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de tração se encontram na Tab. 4-7.

Tabela 4-6 - Dimensões iniciais e finais dos corpos de prova

Direção de laminação	Longitudinal (0°)	Diagonal (45°)	Transversal (90°)
Comprimento inicial [mm]	44,06	45,49	43,04
Comprimento final [mm]	55,30	53,23	50,44
Largura inicial [mm]	6,33	6,33	6,24
Largura final [mm]	5,62	5,42	5,53
Espessura inicial [mm]	0,79	0,73	0,76
Espessura final [mm]	0,68	0,72	0,66

Através da Equação (2.8), pode-se calcular os valores do índice de anisotropia (r) para cada ensaio nas diferentes direções de laminação. A Tab. 4-8 apresenta os valores calculados.

Tabela 4-7 - Valores do índice de anisotropia para as diferentes direções de laminação

Direção de laminação	Longitudinal (0°)	Diagonal (45°)	Transversal (90°)
Índice de anisotropia (r)	1,099	1,634	3,19

Utilizando-se das Equações (2.9) e (2.10) para o cálculo da anisotropia média (r_m) e da anisotropia planar (Δr), cujos valores são apresentados na Tab. 4-9.

Tabela 4-8 - Valores de anisotropia média e planar

	AÇO AISI 430
Anisotropia média (r_m)	1,89
Anisotropia planar (Δr)	0,51

Como o valor encontrado para a anisotropia média é maior do que 1, pode-se concluir que a chapa apresenta resistência a deformação plástica maior na direção da espessura da chapa, sendo deformada principalmente nas direções do comprimento e da largura (MELCONIAN, 2014).

Capítulo 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da realização deste trabalho foi possível verificar que o processo de estampagem incremental pode ser facilmente realizado em um centro de usinagem CNC, sendo necessário apenas pequenos ajustes, como por exemplo a construção do dispositivo para fixação das chapas metálicas e a fabricação de ferramentas dedicadas a conformação das chapas.

O aço inoxidável AISI 430 apresentou boa conformabilidade, e por consequência o material se mostrou apto para o processo de estampagem incremental. Além do mais, pelo cálculo do índice de anisotropia, conclui-se que este material apresenta resistência a deformação plástica maior na direção da espessura da chapa, sendo deformada principalmente nas direções do comprimento e da largura, fato este que reforça ainda mais o uso do aço AISI 430 na estampagem incremental.

A falta de lubrificação no processo pode não ser muito benéfica pois aumenta excessivamente o atrito entre a peça e a ferramenta, levando a um grande desgaste no punção. Podendo até mesmo quebrar o próprio.

A temperatura do processo de estampagem incremental não varia muito diante de diferentes condições de lubrificação e baixa rotação da ferramenta. O aquecimento está mais atrelado às altas taxas de rotação ferramental. Outra observação que pode ser feita devido o baixo valor de rotação é a falta de mudanças significativas nas microestruturas das amostras, mesmo diante da variação de lubrificantes durante os processos.

Em relação a rugosidade das peças, aquelas que foram ensaiadas com grafite em pó tiveram uma menor qualidade superficial quando comparadas com aquelas que foram ensaiadas utilizando óleo puro.

Para evitar problemas de acabamento, como o retorno elástico, deve-se utilizar estratégias de estampagem incremental pois este problema pode ser muito prejudicial se as peças fabricadas precisarem ter uma maior precisão dimensional.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para um melhor entendimento do comportamento do processo de estampagem incremental, os seguintes estudos são sugeridos:

- Verificar uma melhoria para o dispositivo prensa-chapas devido ao tempo elevado na inserção e remoção da chapa metálica;
- Realizar um estudo mais aprofundado dos gradientes de temperatura do processo, utilizando uma câmera termográfica;
- Analisar e estudar as cargas envolvidas no processo com o auxílio de um dinamômetro;
- Verificar as condições de vibração da ferramenta, da peça e da máquina.

Capítulo 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLWOOD, J.M.; HOUGHTON, N.E.; JACKSON, K.P. The design of an incremental sheet forming machine. **Advanced Materials Research**, v.6-8, p.471-478, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys**. 10 ed., v.1, 2005. 1618p.

AL-OBAIDI, AMAR & KRÄUSEL, VERENA & LANDGREBE, DIRK. (2018). **Experimental and Simulation Stress Strain Comparison of Hot Single Point Incremental Forming**. Conference: Conference: ICMFT 2018 : 20th International Conference on Metal Forming and Technology, At London, United Kingdom April 24 - 25, 2018

ASPECTOS DE TEMPERATURA NA CONFORMAÇÃO .CIMM. *Disponível em:* < https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6469-aspectos-de-temperatura-na-conformacao#.WxFedEgvzIU>. Acesso em: 01 jun. 2018.

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

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

CASTELAN, J.-**Estampagem Incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano**. 2010. 193 f. Dissertação Doutorado em Processo de Fabricação. Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

CASTELAN, Jovani. **-Estampagem incremental do alumínio série 1000**.| Dissertação de Mestrado. Laboratório de Transformação Mecânica, PPGE3M, UFRGS, 2007.

CAVALER, L.C. **Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço Inoxidável AISI 304L**. 2010. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, LdTM. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

DALEFFE, A. **Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de alumínio puro**. 2008. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

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

DUFLOU, J.R. et al. Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, p. 253-256, 2008.

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

ESTAMPABILIDADE DOS MATERIAIS METÁLICOS. CIMM. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6487-a-estampabilidade-dos-materiais-metalicos#.WxE8a0gvzIU>. Acesso em: 01 jun. 2018.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. D. **Ensaaios dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 247 p. Reimpressão.

HAM, M. and J. Jeswiet, **Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003**. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2006. 55(1): p. 241-244.

INGARAO, G. et al. A sustainability point of view on sheet metal forming operations: material wasting and energy consumption in incremental forming and stamping processes. **Journal of Cleaner Production**, Palermo, Itália, p. 28, 2012. Disponível em <<https://DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.01.012>>. Acesso em: 08 Mar. 2018.

JACKSON, K. P. and ALLWOOD, J. M., 2008. **The Mechanics of Incremental Sheet Forming**. *Journal of Materials Processing Technology*.

JESWIET, J. et al. **Asymmetric single point incremental forming of sheet metal**, *Annals of CIRP*, v.54, p.623-650, 2005.

JESWIET, J. -Recent results for SPIF. **-Seminar on Incremental Forming**.- Cambridge University, 2004.

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

42-46.

KOPAC, J.; KAMPUS, Z. Incremental sheet metal forming on CNC-milling machine tool. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 162-163, p. 622-628. University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, Slovenia, 2005.

LAMINEEM, T. Tuominen, S. Kivivuori, *Incremental Sheet Forming with an Industrial Robot*, Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Materials Processing (ICAMP-3), pp. 331.

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

M. STRANO. **Incremental Forming Processes: Current and Potential Applications**, SME Technical Paper No MF03-114. 2003.

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009.

MELCONIAN, M. V. **Modelagem numérica e computacional com similitude e elementos finites**: equação preditiva geral para o cálculo da força de retenção em freios de estampagem. São Paulo : Blucher, 2014.

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

MICARI, F., G. AMBROGLIO, e L. FILICE. — **Shape and dimensional accuracy in single point incremental forming: state of the art and future trends.** | 2007. *J. Materials Processing Technology* 191, 2007: 390-395.

PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE (ACABAMENTO SUPERFICIAL). Moldes Injeção Plásticos. *Disponível em*: <

<http://moldesinjecaoplasticos.com.br/parametros-de-avaliacao-da-rugosidade-acabamento-superficial/>>. Acesso em: 29 mai. 2018.

RAUCH, M. et al. Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications. **Computer-Aided Design**, v.41, i.12, p.877-885, Saint Nazaire, France, Dec. 2009.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica**. [S.I.]: Escolar, 2005.

RUGOSIDADE MÉDIA (Ra). Dummont Treinamentos. *Disponível em*: <

http://www.dummonttreinamentos.com.br/parametros_de_rugosidade>. Acesso em: 29

mai. 2018.

SATYNARAYANA, V.V.; MADHUSUDHAN REDDY, G., MOHANDAS, T.

Dissimilar metal friction welding of austenitic-ferritic stainless steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v.160, p. 128-137, 2005.

SHAEFFER, L. **Conformação dos Materiais – Metalurgia e Mecânica**. Porto Alegre: Editora Rigel, 1995.

SCHAEFFER, L. **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre : Imprensa Livre, 1999. 267p. Bibliografia: p 122.

SILVA, M. et al. Single point incremental forming of metals sheets: experimentation and theoretical interpretation. **Anais da 11ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas**, 8 a 10 de Outubro de 2008, Porto Alegre/RS, Brasil, ed. Schaeffer L., Gráfica Metrópole., pp. 11-28.

SY, L.V. **Modeling of Single Point Incremental Forming Process for Metal and Polymeric Sheet**. Università degli Studi di Padova. Padova, p. 205. 2009. Tese de Doutorado.

TIBURI, F.; SHAEFFER, L. **Aspectos técnicos e econômicos da estampagem incremental**. In: X Conferência Nacional de Conformação de Chapas (XVII SENAFOR), Bento Gonçalves, RS, p. 255-275, 2007.