

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

LUCAS DIAS FAQUIM

**ANÁLISE DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM PLACAS DE AÇO
INOXIDÁVEL AISI 316L**

UBERLÂNDIA – MG

2020

LUCAS DIAS FAQUIM

ANÁLISE DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM PLACAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L

Trabalho de conclusão de curso apresentado na graduação em Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Orientador: Prof. Dr. Wisley Falco Sales

UBERLÂNDIA - MG

2020

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui os meus agradecimentos àqueles que, de maneira direta e indireta, apoiaram a conclusão deste trabalho, em especial à família, amigos, professores e colegas de trabalho.

Em principal o agradecimento ao professor Wisley Falco Sales, pela ótima orientação para resultados, profissionalismo, paciência e agilidade durante os trabalhos desenvolvidos.

RESUMO

FAQUIM, Lucas Dias. ANÁLISE DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM PLACAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L. Trabalho de Conclusão de Curso II – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2020.

O presente trabalho teve como principal objetivo o estudo de conformabilidade do aço AISI 316L através de ensaios de estampagem incremental de ponto único (SPIF – *Single Point Incremental Forming*). Para aplicação da técnica de estampagem foi utilizado um centro de usinagem CNC com uma ferramenta esférica de 8mm de diâmetro e um software CAD/CAM. Buscou-se entender o impacto das variações da rotação da ferramenta de trabalho e do fluido lubrificador na conformabilidade do aço. Aplicou-se fluido vegetal em mínima quantidade de lubrificante, à vazão de 5 mL/h, inicialmente puro e depois foi adicionado grafite de tamanho médio de grão de 200 nm, em 10% de peso. Foram feitos os ensaios de tração para conhecer as propriedades mecânicas do aço e verificado o acabamento superficial após os ensaios, mediante medição de rugosidade seguidos por microscopia eletrônica para a avaliação da conformabilidade do aço estudado. A temperatura durante os ensaios também foi avaliada por ser um fator potencialmente influenciado pelo aumento de cisalhamento da chapa e ferramenta que experimentado com as variações dos parâmetros de ensaio, sendo portanto, um possível indicador de alterações na conformabilidade e acabamento superficial para os dois parâmetros avaliados. Os valores de rugosidade aferidos permitem concluir uma piora de acabamento superficial com o aumento da rotação e melhora com a adição do grafite. Os resultados de temperatura diferem dos esperados.

Palavras-chave: Estampagem incremental. Estampagem Incremental de ponto único Aço AISI 316L.

ABSTRACT

FAQUIM, Lucas Dias. ANALYSIS OF AISI 316 STEEL PLATES UNDER INCREMENTAL SHEET FORMING. Graduation Paper – Federal University of Uberlandia, Uberlandia – MG, 2020.

The present paper studied the formability of steel AISI 316L steel through the single point incremental forming (SPIF) process. The forming process was set up with a CNC milling machine, a 8mm diameter spherical working tool and a CAD / CAM software. This project investigated the influence of variations in the rotational speed of the working tool and in the lubricating fluid on the formability of this particular steel. Vegetable oil was applied at a minimum amount of lubricant, initially pure, at a flow rate of 5 mL / h and then graphite with 200nm average grain size was added at 10% in total weight. Tensile tests were performed to know the mechanical properties of the steel and the surface finish verified by roughness measurement followed with an optical microscope, thus the formability of the steel could be analyzed. The temperature was also monitored during the tests for being potentially influenced by the raise in shear between the steel plates and tool during the forming process, which could help evidence the influence of both parameter evaluated during the tests. With the roughness measured it is noted a decrease in surface finish quality with the increase of rotation and an increase in quality with the addition of graphite. The temperature results are different from what we expected.

Keywords: Incremental Sheet Forming. Single point incremental forming. Steel AISI 316L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diferentes configurações de ISF – (a) SPIF - Ponto simples; (b) TPIF - ponto duplo; (c) TPIF com suporte negativo (simétrico); (d) TPIF com suporte positivo (assimétrico) (Fonte: Allwood, 2005).....	5
Figura 2: Representação esquemática do SPIF (Fonte: Martins, 2008)	6
Figura 3: Configuração básica do SPIF (Fonte: Skjoedt, 2008).....	6
Figura 4: Parâmetros da SPIF (Fonte: Martins, 2008).....	7
Figura 5: Influência do passo vertical, diâmetro da ferramenta e ângulo de estampagem no acabamento superficial da peça estampada. (Fonte: Hirt, 2005)	14
Figura 6: Suporte fixador de chapas.	18
Figura 7: Corpos de prova para os ensaios de tração. L: Longitudinal, D: Diagonal; T: Transversal aos sentidos de laminação de fabricação da chapa.	19
Figura 8: Equipamento utilizado nos ensaios de tração.....	20
Figura 9: Geometria da peça a ser fabricada.....	21
Figura 10: Trajetória da ferramenta na estampagem incremental proposta.....	22
Figura 11: Óleo vegetal (A) e grafite (B) utilizados nos ensaios de estampagem.	23
Figura 12: Termômetro FLIR ® 42570 (A) utilizado durante os ensaios.	23
Figura 13: Amostras cortadas para análise de rugosidade, em verde.	24
Figura 14: Organograma dos ensaios de estampagem.	24
Figura 15: Corpos de prova após os ensaios de tração. Escala 1:3.....	25
Figura 16: Gráfico tensão x deformação das três amostras ensaiadas.	26
Figura 17: Gráfico força x alongamento das amostras ensaiadas.	27
Figura 18: Curva de escoamento com tensões e deformações verdadeiras para as amostras ensaiadas da chapa de aço 316L.....	29
Figura 19: Curva de escoamento, 0° - grau de encruamento.	30
Figura 20: Ensaio SPIF em execução.....	33
Figura 21: Chapas de aço AISI 316L estampadas a diferentes rotações. Legenda: (a) 0 rpm; (b) 500 rpm; (c) 1000 rpm; (d) 2000 rpm.	34

Figura 22: Ferramentas de estampagem. Legenda: (a) Imagem de ferramenta antes do processo de estampagem; (b) Após o ensaio a 0 rpm; (c) Após o ensaio a 500 rpm; (d) Após o ensaio a 1000 rpm; (e) Após o ensaio a 2000 rpm.	35
Figura 23: Superfície da chapa AISI 316L estampada em diferentes rotações. Legenda: (a) Não conformada; (b) 0 rpm; (c) 500 rpm; (d) 1000 rpm; (e) 2000 rpm.	36
Figura 24: Gráfico de rugosidade por rotação de ensaio.	37
Figura 25: Gráfico de temperatura para os ensaios a 0, 500 e 1000 rpm.....	39
Figura 26: Peças estampadas, mesma rotação, lubrificação diferente. Legenda: (a) Óleo SAE 80W; (b) Óleo SAE 80W + 10% em peso de grafite 200nm.	41
Figura 27: Análise microscópica influência do lubrificante no acabamento da peça estampada. Legenda: (a) Óleo SAE 80W; (b) Óleo SAE 80W + 10% em peso de grafite 200nm.	41
Figura 28: Comparativo de rugosidade entre os dois métodos de lubrificação.	42
Figura 29: Medições de temperaturas nos ensaios com diferentes lubrificantes.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Influência dos principais parâmetros do SPIF sobre o máximo ângulo de estampagem. (Fonte: Adaptado de Skjoedt, 2008)	16
Tabela 2: Características técnicas principais do centro de usinagem CNC usado nos ensaios.	18
Tabela 3: Parâmetros dos ensaios de estampagem incremental.	21
Tabela 4: Dados da amostra a 0° após ensaio de tração.	27
Tabela 5: Propriedades mecânicas do aço AISI 316L, para os três sentidos de laminação.	30
Tabela 6: Valores de anisotropia para o aço AISI 316L.....	31
Tabela 7: Comparativo entre os valores encontrados para as propriedades mecânicas do aço e seus valores comerciais obtidos em sites de diferentes fornecedores.	32
Tabela 8: Dados aferidos de rugosidades para as amostras dos ensaios com variação de rotação.	38
Tabela 9: Valores de temperatura aferidos durante os ensaios.	39
Tabela 10: Valores de rugosidade para os ensaios considerando a adição de grafite ao lubrificante.....	42
Tabela 11: Valores médios de temperatura para os ensaios com diferentes lubrificantes.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS

3D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron Steel Institute
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAE	Computer Aided Engeneering
CNC	Comando Numérico Controlado
CLE	Curva Limite à Estricção
CLF	Curva Limite à falha
cos	Função cosseno
Cv	Cavalos (unidade de potência)
h	Hora (unidade de medida de tempo)
ISF	Incremental Sheet Forming
ISO	International Organization for Standardization
kg	Kilogramas (unidade de medida de massa)
KISF	Kinematic incremental sheetmetal forming
kN	KiloNewton (unidade de medida de força)
kVA	10 ³ Volt-Ampères (unidade de medida de potência aparente)
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
LMEst	Laboratório de Mecânica de Estruturas
ln	Função Logaritmo natural
m	Metros (unidade de medida de comprimento)
min	Minutos (unidade de medida de tempo)
ml	Mililitros (unidade de medida de comprimento)
mm	Milímetros (unidade de medida de comprimento)

mm ²	Milímetros Quadrados (unidade de medida de área)
mm ³	Milímetros Cúbicos (unidade de medida de volume)
MPa	Mega Pascal (unidade de medida de pressão/tensão)
N	Newtons (unidade de medida de força)
NBR	Norma Técnica
nm	Nanômetros (unidade de medida de comprimento)
N/mm ²	Newtons por milímetros quadrados (unidade de medida de pressão/tensão)
RPM	Rotações por minuto (unidade de medida de velocidade de rotação)
SAE	Society of Automotive Engineers
SPIF	Single Point Incremental Forming
sin	Função seno
TPIF	Two Point Incremental Forming
tan	Função tangente
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
%	Símbolo percentual
°	Graus (símbolo para ângulos)
°C	Graus Celsius (unidade de medida de temperatura)
µm	Micrometro (unidade de medida de comprimento)
π	Pi – constante de proporção numérica entre a circunferência e seu diâmetro
“	Polegadas (unidade de medida de comprimento)

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Unidade típica	Descrição
s_0	[mm]	Espessura inicial – chapa a conformar
s_f	[mm]	Espessura final – chapa a conformar
λ	[°]	Ângulo de inclinação da parede da chapa a conformar
ψ	[°]	Ângulo de estampagem
$\psi_{máx}$	[°]	Ângulo máximo de estampagem – limite de conformabilidade
n	-	Grau de encruamento
r_m	-	Anisotropia média
Δr	-	Anisotropia planar
σ_B	[MPa]	Tensão limite de ruptura
σ_e	[MPa]	Tensão limite de escoamento
σ	[MPa]	Tensão aplicada
E	[GPa]	Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young
ε	[%]	Deformação convencional do material
φ	[%]	Deformação verdadeira do material
k_f	[MPa]	Tensão de escoamento
V_0	[mm ³]	Volume inicial do material
V	[mm ³]	Volume final do material
A_0	[mm ²]	Área inicial do material
A	[mm ²]	Área final do material
l_0	[mm]	Comprimento inicial do material
l	[mm]	Comprimento final do material
C	[MPa]	Constante de escoamento do material
r	-	Índice de anisotropia
r_{0°	-	Índice de anisotropia amostra longitudinal
r_{45°	-	Índice de anisotropia amostra diagonal
r_{90°	-	Índice de anisotropia amostra transversal
φ_b	[%]	Deformação verdadeira no sentido de largura

φ_l	[%]	Deformação verdadeira no sentido de comprimento
φ_s	[%]	Deformação verdadeira no sentido de espessura
b_0	[mm]	Largura inicial do corpo de prova
b_f	[mm]	Largura final do corpo de prova
Ra	[μm]	Rugosidade média absoluta
Rz	[μm]	Rugosidade média aritmética
Rq	[μm]	Rugosidade média quadrática
V_{fh}	[mm/min]	Velocidade de avanço
Δz	[mm]	Passo de incremento vertical
r_{tool}	[mm]	Raio da ferramenta de estampagem
w	[rpm]	Rotação da ferramenta de trabalho
F	[N]	Força no ensaio de tração
$F_{m\acute{a}x}$	[N]	Força máxima no ensaio de tração

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS.....	2
OBJETIVOS GERAIS.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1. ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS.....	3
2.2. PARÂMETROS DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO ÚNICO	6
2.2.1 <i>Material e espessura da chapa</i>	7
2.2.2 <i>Velocidade de avanço</i>	12
2.2.3 <i>Passo vertical</i>	13
2.2.4 <i>Ferramenta de trabalho</i>	14
2.2.5 <i>Rotação da ferramenta</i>	15
2.2.6 <i>Lubrificação</i>	15
2.3. APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DA ISF	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1. MÁQUINAS E FERRAMENTAS UTILIZADAS	17
3.2. METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	19
3.2.1 <i>Ensaio de tração</i>	19
3.2.2 <i>Geometria da peça e trajetória da ferramenta</i>	20
3.3. COLETA E ANÁLISE DOS DADOS	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
4.1 <i>Determinação das propriedades do material</i>	25
4.2 <i>Análise Conformabilidade</i>	33
4.2.1 <i>Análise da influência da rotação</i>	33
4.2.2 <i>Análise da influência do lubrificante</i>	40
5. CONCLUSÕES	44
6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1. INTRODUÇÃO

É natural que novos métodos de fabricação se desenvolvam para atender exigências do mercado. Isso se aplica também para o processo de conformação mecânica. Enquanto algumas indústrias buscam a produção em massa de peças, outros setores impõem a baixa produção em série, prototipagem ou até produção de peças com geometria complexa, características difíceis ou até impossíveis de alcançar com métodos convencionais de fabricação, que empregam o uso de punções e matrizes.

Os processos de conformação por deformação plástica incremental reúnem as características acima citadas associadas a possibilidade de realização em máquinas CNC, que se apresentam como vantagem nos contextos de simplificação no setup e diminuição da necessidade de um investimento inicial significativo. Dessa forma, a conformação mecânica incremental vem registrando crescente desenvolvimento em diversos setores industriais como o da prototipagem rápida, automotiva, aeronáutica e biotecnologia.

A Estampagem incremental foi patenteada em 1967 por Leszak mas apenas na década de 90 foi demonstrada sua viabilidade tecnológica no Japão por Kitazawa, Iseki e Matsubara com o sucesso na fabricação de um componente simétrico em alumínio por revolução (torneamento). Posteriormente, com os estudos de Jeswiet (2001) e, subsequentemente, Hirt (2004), Allwood (2005) e Duflou (2008), foi confirmada a viabilidade tecnológica através da demonstração de que o processo podia ser realizado em uma máquina CNC.

O processo de estampagem incremental de ponto único ou SPIF – Single Point Incremental Forming - é apenas um dentro de um grupo de processos conhecidos como Estampagem Incremental de chapas (ISF – *Incremental Sheet Forming*). Os diferentes processos apresentam similaridades, contudo o SPIF se caracteriza como o único verdadeiro processo sem matriz/punção, pois a geometria completa é obtida unicamente através do caminho percorrido pela ferramenta durante o processo. São vários os parâmetros envolvidos no processo de estampagem e podemos citar: a espessura da chapa, o diâmetro da ferramenta de trabalho, o incremental vertical da ferramenta, a velocidade de rotação da ferramenta, a

velocidade de estampagem e lubrificação. Neste presente trabalho, busca-se entender as variações da rotação da ferramenta de trabalho e de um componente lubrificante na avaliação da capacidade de conformação do aço 316L.

1.1. OBJETIVOS

OBJETIVOS GERAIS

O trabalho busca avaliar o aço 316L e sua capacidade de conformação quando submetido ao processo SPIF.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar a influência das variações da velocidade de rotação da ferramenta de trabalho e da adição de um lubrificante sólido ao fluido lubrificador utilizado no processo SPIF, sendo mensurados durante os ensaios de estampagem a temperatura e aferidos após terminada a estampagem nas placas de aço os parâmetros de rugosidade para avaliação do acabamento superficial.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será detalhada a fundamentação teórica que foi utilizada como base para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1. ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS

O processo de Estampagem Incremental de chapas se classifica como um entre os diversos processos de conformação mecânica, que, de forma generalizada, compreende os processos de fabricação por deformação plástica do material de trabalho, caracterizada pelo escoamento em regime plástico do material quando submetido a um carregamento externo. Isso acontece quando o material passa do estado elástico para o estado plástico de deformação, que, de acordo com Schaeffer (2004), depende do estado de tensões que o corpo experimenta. Quando em estado uniaxial, a máxima tensão de cisalhamento determina o início do escoamento, já quando múltiplas tensões atuam, pode-se determinar a máxima tensão de escoamento pelos métodos de Tresca (critério da máxima tensão de cisalhamento) ou Von Mises (critério da máxima energia armazenada num corpo).

Ainda de acordo com Shaeffer (2004), uma conformação só é possível até uma determinada grandeza de deformação ou o Limite máximo de deformação, que seja o ponto máximo de deformação sem que haja ruptura do material.

Dentre os processos de conformação mecânica, destaca-se a estampagem nas indústrias de autopeças, aeronáutica, naval, biotecnologia, entre outros, que usam comumente matéria prima de espessura fina (Shaeffer, 2004). Convencionalmente a estampagem é realizada por meio de uma punção e matriz com o formato negativo da peça que se deseja obter e geometria precisa, método o qual apresenta altos custos com investimento na confecção do conjunto matriz, justificável quando se deseja produzir peças de relativa simplicidade geométrica em larga escala.

Conforme já descrito neste trabalho, diversos setores industriais vêm aumentando as exigências de produção seja no âmbito da complexidade geométrica,

seja na produção de um pequeno lote de componentes específicos, seja na busca incessante pela diminuição dos custos de produção e tempos de fabricação, o que possibilita o desenvolvimento constante de novas tecnologias para a fabricação de peças, como dos processos de estampagem incremental, objeto de estudo deste trabalho, ainda inovador e pouco aplicado mas com grande potencial no mercado devido sua flexibilidade na execução de peças com qualquer geometria e pela velocidade de fabricação de lotes pequenos de peças.

De forma diferente da convencional, o método incremental de estampagem conforma o componente em múltiplos passos, utilizando uma ferramenta de geometria simples (Sena, 2009). Assim, torna-se possível a sua adaptação a uma máquina CNC ao se montar uma chapa num suporte móvel de fácil fixação e acoplar uma ferramenta ao eixo árvore da CNC para realizar deslocamentos X e Y sob a superfície da chapa e o contínuo incremento vertical negativo em Z para realizar a conformação podendo ou não adotar uma velocidade de rotação da ferramenta durante o processo (Hirt, 2005). A trajetória da ferramenta pode ser gerada a partir de um sistema CAM, que pode ser feito diretamente de um modelo de CAD de produto acabado, sem qualquer tipo matriz, confirmando sua viabilidade tecnológica e simplicidade na concepção de várias geometrias de diferentes complexidades.

Os processos de estampagem incremental são sobretudo agrupados em dois grupos – de ponto simples (SPIF) e de ponto duplo (TPIF). As modalidades variam na quantidade de pontos de contato entre ferramenta, chapa e matriz, que pode ser simétrica ou assimétrica, positiva ou negativa (quando presente). A Figura 1, abaixo, mostra as possíveis diferentes configurações de estampagem incremental.

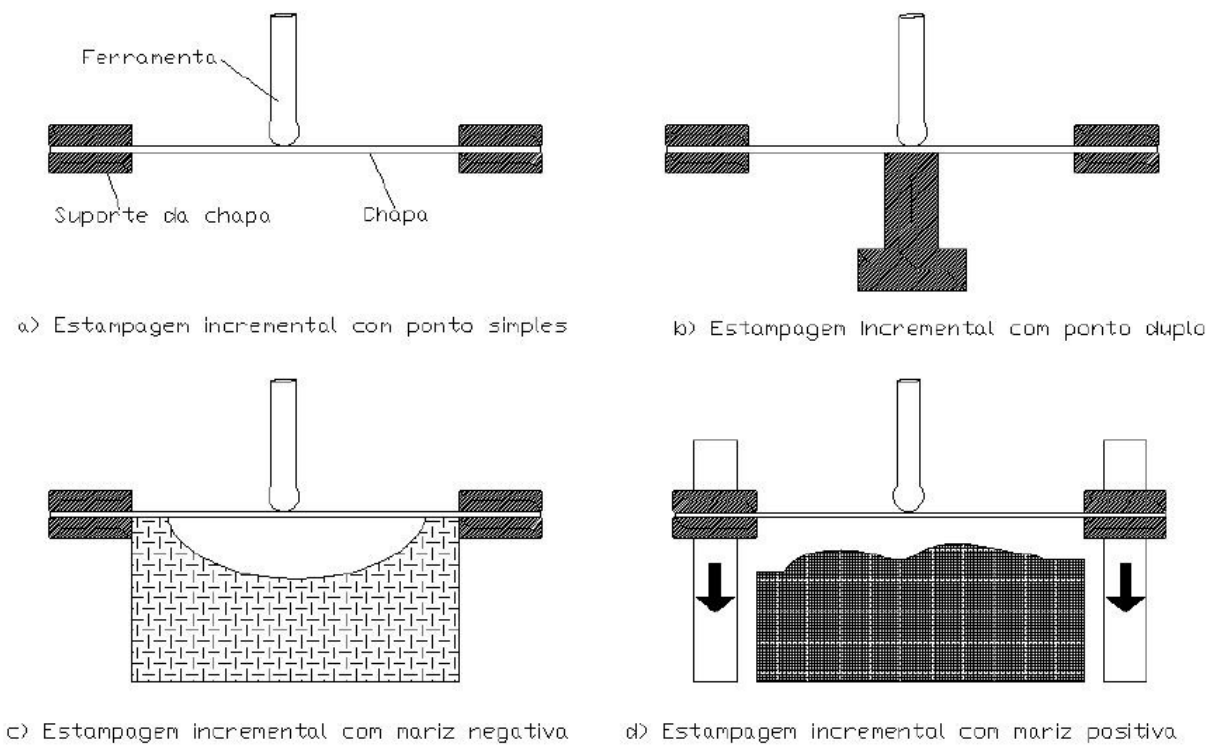


Figura 1: Diferentes configurações de ISF – (a) SPIF - Ponto simples; (b) TPIF - ponto duplo; (c) TPIF com suporte negativo (simétrico); (d) TPIF com suporte positivo (assimétrico) (Fonte: Allwood, 2005)

Nota-se, dentre os diversos modelos apresentados, o único genuinamente “*die-less*”, ausente de qualquer forma de matriz, é o SPIF. Nesse processo, a geometria da peça é exclusivamente formada pela trajetória da ferramenta, diferentemente do TPIF. Há também a variante KISF (Kinematic supporting tool) para a estampagem de ponto único na qual uma ferramenta de apoio é posicionada no lado oposto da chapa e segue a mesma trajetória da ferramenta de trabalho.

Pelo fato de ser o único modelo “*die-less*”, o SPIF se apresenta como a variante mais simples do método de estampagem incremental e portanto menos oneroso. Conforme citado acima, a trajetória da ferramenta pode ser gerada por um sistema CAM a partir da criação da geometria desejada em um sistema CAD, sendo um método também flexível. Assim, para a fabricação de uma única peça ou um pequeno lote (o tamanho da peça só é limitado pelo tamanho da máquina dedicado para o processo) mostra-se vantajoso o uso do SPIF nos cenários de custos (redução significativa pela ausência de qualquer matriz), tempo de setup da máquina e tempo

total de fabricação de uma peça, pois embora o processo de fabricação em si seja lento (deformação plástica incremental), anula-se a necessidade de fabricação de um conjunto matriz e punção. Uma representação esquemática do SPIF pode ser visualizado na Figura 2, já a Figura 3 mostra a configuração básica para o processo.

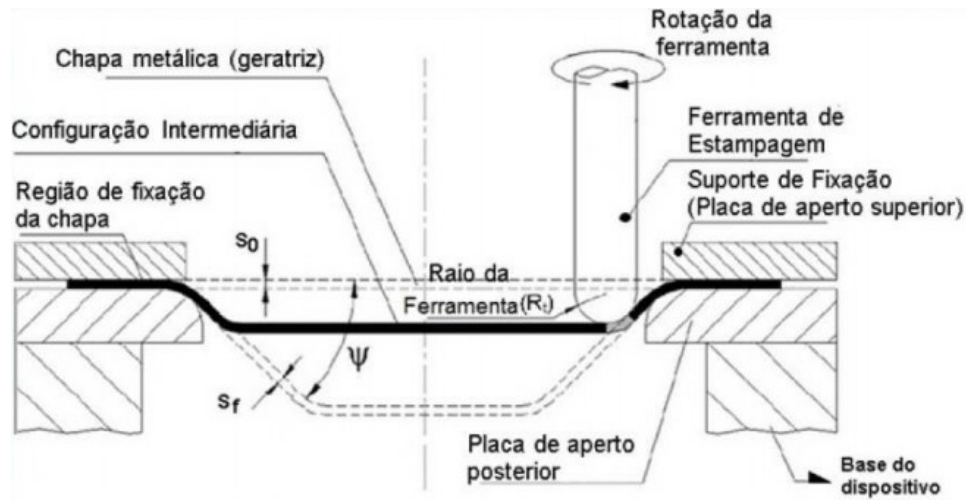


Figura 2: Representação esquemática do SPIF (Fonte: Martins, 2008)

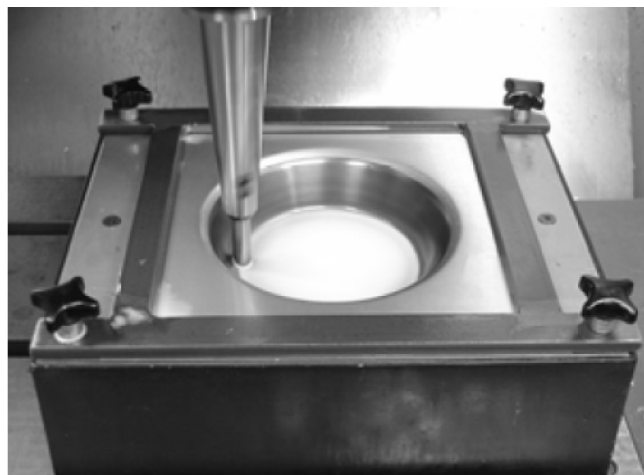


Figura 3: Configuração básica do SPIF (Fonte: Skjoedt, 2008)

2.2. PARÂMETROS DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO ÚNICO

Definem-se como os parâmetros da estampagem incremental aqueles que podem exercer influência na conformabilidade da peça resultante do processo. Destacam-se os seguintes:

2.2.1 Material e espessura da chapa

É possível quantificar a conformabilidade de um material com os parâmetros de ângulo máximo de estampagem ($\psi_{máx}$) e suas curvas limite à estrição e falha, referidas na literatura como CLE e CLF, respectivamente.

O ângulo máximo de estampagem é, por sua vez, uma relação entre a espessura da chapa e o seu ângulo de deformação, sendo modelada pela lei dos senos conforme Equação (2.1) abaixo:

$$s_f = s_0 * \sin(\lambda) \quad (2.1)$$

onde,

s_0 [mm] é a espessura inicial da chapa;

s_f [mm] a espessura medida em um determinado estágio de conformação e;

λ [°] o ângulo de inclinação da parede da chapa, complementar ao ângulo de estampagem ($\psi = \frac{\pi}{2} - \lambda$).

A Figura 4, abaixo, resume os principais parâmetros da SPIF.

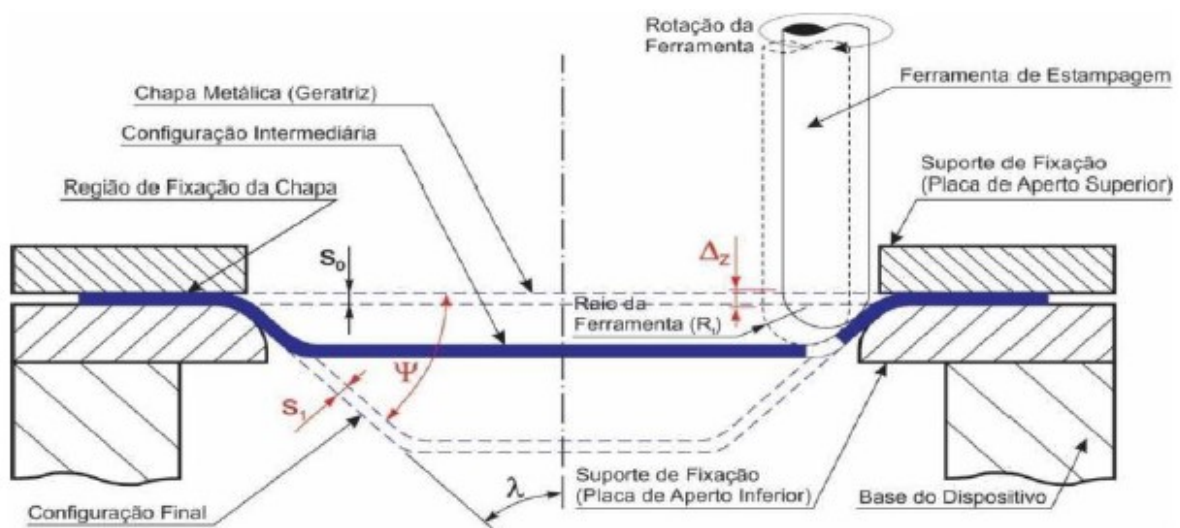


Figura 4: Parâmetros da SPIF (Fonte: Martins, 2008)

Segundo a Equação (2.1) enumera, quanto maior o ângulo de inclinação, menor será a espessura da chapa conformada para o intervalo $0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$. Isto é, a

espessura da chapa, com o processo de estampagem, diminui de seu tamanho original e quanto maior o ângulo de inclinação, maior será a diminuição de espessura experimentada, tendo-se o risco de ruptura. Maiores espessuras permitem, conseqüentemente, um ângulo maior de estampagem, portanto uma melhor conformabilidade, pois existe maior quantidade de material para deformar (Jeswiet, 2005). O $\psi_{m\acute{a}x}$ típico para processo de estampagem incremental varia de 60°- 80° (Skjoedt, 2008).

Para assegurar a fabricação por conformação, o indicado é obter as curvas de limite à fratura e estrição o material a ser conformado através dos ensaios de Nakajima. A CLE define a deformação limite admissível até que o material experimente estrição, já a CLF define a deformação plástica limite admissível a partir da qual se dá a fratura da chapa. Em termos práticos, o limite de deformação plástica é condicionado pelo aparecimento de estricções, sendo suficiente a análise da CLE. No caso da conformação incremental, no entanto, não são desenvolvidas estricções antes da fatura, assim o estudo da CLF é fundamental. Isso explica também que os processos de conformação incrementais permitem alcançar limites maiores de conformabilidade.

Outras duas propriedades mecânicas que podem influenciar a conformabilidade do aço submetido à estampagem incremental são o grau de encruamento n e as anisotropias média e planar do material, respectivamente r_m e Δr . Essas propriedades podem ser definidas a partir de um simples ensaio de tração, que também permite a determinação de outras propriedades mecânicas do material, como a tensão limite de escoamento (σ_E), tensão limite de ruptura (σ_B), alongamento (ε) e o módulo de elasticidade ou módulo Young (E).

Conforme já mencionado anteriormente, para a estampagem ocorrer o material precisa entrar numa fase de deformação plástica, e o início do escoamento se dá quando se aplica uma carga tal qual as tensões superem o limite de escoamento característico do material trabalho. Durante essa fase, o material experimenta deformações plásticas nas três direções principais, cuja soma algébrica é nula, caracterizando a Lei da Constância de Volume, Equação 2.2 abaixo (Schaeffer, 2004).

$$V_0 = V \rightarrow A = \frac{A_0 * l_0}{l} [mm^2] \quad (2.2)$$

onde,

$l [mm]$: Comprimento Instantâneo;

$l_0 [mm]$: Comprimento inicial do corpo de prova;

$A [mm^2]$: Área Final;

$A_0 [mm^2]$: Área Inicial;

$V [mm^3]$: Volume Final;

$V_0 [mm^3]$: Volume Inicial;

Em um estado uniaxial de tensões, caso dos ensaios de tração, o alongamento em uma direção implica num estreitamento da área normal à essa tensão, a estricção. Ao se tomar a seção deformada da peça, pode-se calcular sua deformação verdadeira (φ) e tensão de escoamento (k_f) em cada instante. A equação de Holomon (2.5) relaciona os valores verdadeiros de tensão e deformação na obtenção da curva de escoamento das chapas (Schaeffer, 2004). Quando se transfere esses dados para uma escala logarítmica, obtém-se um segmento de reta cuja a inclinação equivale ao índice de encruamento (n), um importante indicador da encruabilidade do material, que é sua capacidade de aumentar seu limite elástico através da deformação plástica, característico do trabalho a frio (deformação plástica abaixo da temperatura de recristalização). As Equações 2.3 à 2.5, abaixo, modelam as curvas de escoamento de chapas em deformação plástica.

$$\varphi = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.3)$$

$$k_f = \frac{F}{A} = \sigma(1 + \varepsilon) [MPa] \quad (2.4)$$

$$k_f = C * \varphi^n [MPa] \quad (2.5)$$

onde,

$C [MPa]$: Propriedade do material, depende da temperatura e taxa de deformação;

$\varepsilon [\%]$: Deformação relativa do material;

Portanto, quanto maior o coeficiente n , maior a encruabilidade do material, maiores sua tensão de escoamento e tensão máxima de ruptura, no entanto menor sua ductilidade e portanto, sua conformabilidade (Schaeffer, 2004). O aumento da temperatura durante o processo pode gerar recristalização de grãos e portanto recuperar as propriedades do material durante o processo, mantendo-se assim a capacidade do material ser conformado. Para que isso ocorra, no entanto, duas coisas são necessárias, altas temperaturas e tempo. Para o processo de estampagem incremental a recristalização de grão dificilmente está presente.

Por outro lado, a anisotropia é o fenômeno definido pela razão das deformações verdadeiras (φ) nas duas direções normais à força aplicada. No caso de um ensaio de tração, seriam as deformações de espessura e largura, pois o carregamento uniaxial é no sentido do comprimento. Já foi visto, pela lei da constância dos volumes (Equação 2.2), que a soma algébrica das deformações é nula e que o alongamento na direção do comprimento equivale à estricção da área normal a essa direção, mas nem sempre as deformações nas outras duas direções são iguais, assim algumas chapas diminuem mais rápido a espessura do que a largura promovendo rupturas precoces (Schaeffer, 2004).

Este fenômeno depende da direção da laminação da chapa e por isso, a sua obtenção experimental é feita com ensaios de tração para três amostras em três diferentes sentidos àquele de laminação da chapa (0° , 45° e 90°).

Pode-se obter o índice de anisotropia média e planar utilizando as equações 2.6 à 2.8.

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\varphi_b}{-(\varphi_l + \varphi_b)} = \frac{\ln \frac{b_f}{b_0}}{\ln \frac{b_0 * l_0}{b_f * l_f}} \quad (2.6)$$

$$r_m = \frac{1}{4}(r_{0^\circ} + 2 * r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (2.7)$$

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} \quad (2.8)$$

onde,

r_m é a anisotropia média;

Δr a anisotropia planar;

φ_b [mm] a deformação real no sentido da largura do corpo de prova;

φ_s [mm] a deformação real no sentido da espessura do corpo de prova;

φ_l [mm] a deformação real no sentido do comprimento do corpo de prova;

b_0 [mm]: largura inicial do corpo de prova;

b_f [mm]: largura final do corpo de prova;

l_0 [mm]: comprimento inicial do corpo de prova;

l_f [mm]: comprimento final do corpo de prova;

r_{0° a anisotropia no sentido de laminação da chapa;

r_{45° a anisotropia a 45° do sentido de laminação da chapa;

r_{90° a anisotropia a 90° do sentido de laminação da chapa.

Nota-se que a anisotropia mede então a resistência à deformação na espessura, sendo assim um indicador da conformabilidade do aço. Uma anisotropia média $r_m = 1$ indica que o material experimenta deformação igual na largura e espessura, e quanto maior for esse índice maior a resistência à deformação na espessura e portanto melhor a conformabilidade. A anisotropia planar mede a variação entre os índices de anisotropia nas direções longitudinal e transversal, ou seja, dentro do plano da chapa. Quanto mais próximo de zero for esse valor, menos o sentido de laminação afeta o comportamento anisotrópico. A Equação 2.6 é adaptada

para o cálculo da anisotropia sem a medição da espessura final experimental, por ser difícil de medir na prática (Schaeffer, 2004).

Por fim, o processo de estampagem incremental e atuação da ferramenta provocam pequenas irregularidades sobre a superfície da peça. O conjunto dessas irregularidades deixadas pela ferramenta em sua trajetória sobre a peça tende a formar um padrão que é conhecido como rugosidade, índice principal para o acabamento da superfície (Machado, 2009).

São definidos três parâmetros usuais de rugosidade que permitem caracterizar as variações de relevo da superfície com picos e vales característicos. O primeiro deles é a rugosidade média aritmética (Ra), definida pela média aritmética absoluta de todos os vales e picos dentro de um intervalo ou percurso de medição, o segundo sendo outro valor de rugosidade média (Rz), esse sendo a média aritmética de cinco valores parciais de rugosidade. O último parâmetro é o Rq definido como a raiz quadrada da média quadrática das ordenadas dos picos e vales dentro do percurso de medição. Os três valores podem ser facilmente avaliados com aparelhos eletrônicos, como o rugosímetro digital, e por isso foram escolhidos.

2.2.2 Velocidade de avanço

A velocidade de avanço (V_{fh}) se caracteriza como a velocidade de translação da ferramenta no plano de estampagem da chapa, ou seja, o quão rápido a ferramenta percorre a trajetória prescrita para formação da peça. Quanto maior a velocidade de avanço, naturalmente menor será o tempo do ensaio e menor o tempo de contato entre a ferramenta e o ponto de estampagem, o que pode exercer influência negativa sobre sua conformabilidade, pois, segundo Jeswiet (2005), maior a facilidade do aço em continuar sendo conformado quanto menor a velocidade de avanço ao longo do processo sem que sua integridade física seja prejudicada.

Portanto a velocidade de avanço pode exercer influência sobre o tempo de estampagem contra a qualidade final da peça, ou seja, baixos valores de velocidade de avanço devem promover a conformabilidade e qualidade final da peça enquanto maiores velocidades de avanço conseguem produzir as peças em menor tempo. Como já visto, o processo de estampagem incremental não tem foco em produção em

larga escala, portanto é mais sensato o uso de baixas velocidades de avanço para promover a conformabilidade. Valores convencionais desse parâmetro variam entre 500-2000 [mm/min].

2.2.3 Passo vertical

Segundo Castelan (2010), o passo vertical (Δz) impacta significativamente a moldabilidade da chapa. Esse parâmetro se refere à profundidade entre cada incremento realizado pela ferramenta no eixo vertical da máquina. Conforme observado por Rauch (2008), com o aumento do Δz a chapa sofre condições mais elevadas de deformação portanto resultando em menor conformabilidade. Isso se explica pois grandes passos requerem a aplicação de maior força entre chapa e ferramenta para lidar com as maiores condições de deformação impostas (Duflou, 2007). Contudo, se o passo for muito baixo (menor que 0,01mm), o material é estampado diversas vezes no mesmo lugar, aumentando a possibilidade de cisalhamento (Attanasio, 2006). É importante ressaltar que, analogamente à velocidade de avanço, o aumento no passo vertical causa uma diminuição no tempo de fabricação da peça.

Em estudo realizado por Hirt (2005) foi analisada a influência do acréscimo no passo vertical em conjunto com o raio da ferramenta e o ângulo de estampagem que verifica a melhora no acabamento superficial para um incremento de profundidade menor, já que a distância no plano da chapa entre dois pontos de estampagem consecutivos no eixo vertical aumenta com o aumento do ângulo e do passo vertical, impondo maiores condições de deformação. A Figura 2.5 ilustra esse comportamento.

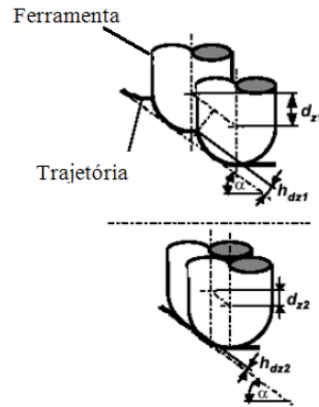


Figura 5: Influência do passo vertical, diâmetro da ferramenta e ângulo de estampagem no acabamento superficial da peça estampada. (Fonte: Hirt, 2005)

Alternativamente, é possível adotar uma estratégia de variação do incremento vertical, conhecido por *Constant Cusp Finishing*, no qual o passo é continuamente calculado para compensar a inclinação da geometria e manter a rugosidade uniforme e promovendo melhor acabamento superficial (Castelan, 2010).

2.2.4 Ferramenta de trabalho

São quatro as principais características que devem ser observadas com relação à ferramenta de trabalho: seu material, geometria, diâmetro e seu revestimento. As ferramentas devem preferencialmente ser feitas de um metal duro ou ter revestimento em sua superfície de contato com a chapa, para se adquirir elevada dureza mantendo-se o núcleo relativamente mais tenaz. Assim, a superfície de contato possui alta resistência ao desgaste, baixo coeficiente de atrito e alta resistência a esforços de compressão e alta resistência à fadiga (Cavaler, 2010). As ferramentas de conformação por estampagem incremental têm pontas semiesféricas, assegurando-se assim um ponto de contato contínuo entre a chapa e ferramenta de estampagem (Jeswiet, 2005).

Segundo estudo de Hirt (2005), o aumento do raio da ponta (r_{tool}) da ferramenta promove melhoria de acabamento superficial. Maiores raios também tornam a ferramenta mais resistente aos esforços triaxiais que ocorrem na conformação. (Castelan, 2010). No entanto, maiores diâmetros na ponta resultam em uma distribuição de tensões em uma maior área de superfície da chapa, sendo assim,

as tensões menores podem prejudicar o processo de conformação e limitar sua estampagem.

2.2.5 Rotação da ferramenta

Existem três modalidades conhecidas de rotação da ferramenta (w) de estampagem envolvidos na estampagem incremental. Segundo Jeswiet (2005), a maneira como a ferramenta se move durante o processo impacta significativamente na deformação da chapa. A ferramenta pode se deslocar sem rotação, com a rotação do eixo da árvore ou pode mover com uma rotação gerada pelo rolamento da ferramenta sobre a superfície enquanto a chapa é deformada. O aumento da rotação da ferramenta pode influenciar o acabamento superficial da peça resultante bem como sua conformabilidade. Quanto maior a rotação, pior deve ser o acabamento superficial da peça resultante, já que a ferramenta percorre num mesmo ponto de estampagem uma maior circunferência, podendo ser o caso até de múltiplas voltas, dependendo de sua velocidade de avanço.

Uma alternativa estudada por Jeswiet (2005) é a utilização de suportes com rolamentos para o eixo árvore e permitir que a ferramenta role sobre a chapa durante a conformação, promovendo o melhor acabamento superficial possível pois elimina o atrito entre chapa e ferramenta, aumentando-se assim também a vida útil da ferramenta. Este comportamento pode ser modelado em função da velocidade de avanço, o raio da ferramenta e o ângulo de parede (Jeswiet, 2005) segundo a Equação 2.9 abaixo.

$$w = \frac{V_{fh}}{\pi r_{tool} \sqrt{\frac{1}{2}(1 - \cos 2\psi)}} \quad (2.9)$$

2.2.6 Lubrificação

A lubrificação busca reduzir o cisalhamento que ocorre devido ao contato entre ferramenta de trabalho e chapa. Com isso, pode exercer importante papel na vida útil da ferramenta, no acabamento superficial da peça e na diminuição do aquecimento da chapa durante o processo de estampagem. A grande variação de lubrificação,

como sendo o seu uso considerado ou não, é preponderante na conformabilidade do material (Skjoedt, 2008).

Em resumo, vários são os parâmetros já investigados no comportamento da estampagem incremental e, de acordo com Skjoedt (2008), conclusões não são consistentes para a maioria dos parâmetros, exceto o tamanho da ferramenta de trabalho, mas os resultados se relacionam da seguinte maneira: aumentando-se a espessura da chapa, diminuindo-se o diâmetro da ferramenta e diminuindo-se também o incremento vertical tendem a aumentar a conformabilidade. A Tabela 1 fornece uma breve visão sobre a influência dos diversos parâmetros na conformabilidade da chapa no SPIF, quantificada através do ângulo máximo de estampagem ($\psi_{m\acute{a}x}$), ângulo atingível na estampagem sem que ocorra estrição ou fratura.

Tabela 1: Influência dos principais parâmetros do SPIF sobre o máximo ângulo de estampagem. (Fonte: Adaptado de Skjoedt, 2008)

$\uparrow s_o$ (espessura inicial)	$\rightarrow$	$\uparrow \psi_{m\acute{a}x}$
$\downarrow r_{tool}$ (raio da ferramenta)	$\rightarrow$	$\uparrow \psi_{m\acute{a}x}$
$\downarrow \Delta z$ (passo vertical)	$\rightarrow$	$\uparrow \psi_{m\acute{a}x}$
$\downarrow V_{fh}$ (Velocidade de avanço)	$\rightarrow$	$\uparrow \psi_{m\acute{a}x}$
$\uparrow w$ (rotação da ferramenta)	$\rightarrow$	$\uparrow \psi_{m\acute{a}x}$
$\downarrow$ atrito	$\rightarrow$	$\uparrow \psi_{m\acute{a}x}$

2.3. APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DA ISF

As características do processo de estampagem incremental de adaptam muito bem à produção de pequenos lotes de peças, com relativa complexidade geométrica. O SPIF em particular evita qualquer necessidade de criação de matrizes para o processo, sendo o único método genuinamente “*die-less*”, assim reduzindo custos no processo. Para pequenos lotes ou prototipagem, essas características atendem bem

às exigências. De modo geral, suas características permitem a criação de protótipos que auxiliam a análise funcional do produto em seu estágio de concepção/projeto, a fabricação de peças de reposição antigas que não se encontram mais no mercado ou que apresentam custo elevados de fabricação por métodos convencionais, obter próteses com características exclusivas para cada paciente, entre outros.

Dessa forma, vários pesquisadores citam sua aplicabilidade em prototipagem para o setor industrial, seja para indústrias automotivas, aeronáuticas, medicina e biotecnologia. Castelan (2010) aborda o uso da estampagem incremental na confecção de próteses cranianas (cranioplastia).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão especificados os detalhes da metodologia, os equipamentos, ferramenta e materiais utilizados para a avaliação do aço inox AISI 316L no processo de estampagem incremental de ponto único.

3.1. MÁQUINAS E FERRAMENTAS UTILIZADAS

Os testes de estampagem incremental foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) na Universidade Federal de Uberlândia (UFU), que disponibilizou todas as ferramentas necessárias para a realização dos ensaios.

Uma chapa metálica de aço inoxidável AISI 316L também foi disponibilizada, nas dimensões 900x530 mm, de 1/40" de espessura. Esse aço pertence à família dos aços austeníticos e, portanto apresenta facilidade de conformação. Possui cromo, níquel e molibdênio em sua composição química, e assim esse aço é destinado à fabricação de peças que exigem alta resistência à corrosão, comum necessidade nas indústrias farmacêutica, química, alimentícias ou em equipamentos hospitalares. O seu estudo de conformação pelo processo de estampagem incremental é particularmente conveniente para a biotecnologia e as próteses cranianas.

O LEPU conta com um centro de usinagem *CNC Romi Bridgeport Discovery 760*. Também foram disponibilizados uma ferramenta de ponta semiesférica e um

suporte fixador desenvolvidos pelo laboratório para permitir a adaptação da CNC para os testes de estampagem incremental. A Tabela 2 reúne as principais características do centro de usinagem utilizado nos ensaios.

Tabela 2: Características técnicas principais do centro de usinagem CNC usado nos ensaios.

Potência total instalada:	20 kVA
Motor principal:	15 cv
Comando:	Siemens
Sede cônica:	ISO40
Faixa de velocidades:	7.500 rpm
Avanço rápido dos eixos X e Y:	30 m/min
Avanço rápido do eixo Z:	20 m/min
Avanço de corte programável:	1 a 15 m/min
Curso da mesa superior (eixo X):	762 mm
Curso da mesa inferior (eixo Y):	406 mm
Curso do cabeçote (eixo Z):	508 mm
Superfície da mesa:	915 x 360 mm

O suporte fixador das chapas foi desenvolvido com o intuito de fixar a chapa durante os ensaios de maneira que ela não se mova com os esforços e tensões, garantindo-se assim a conformação. A Figura 6 ilustra o suporte utilizado nos ensaios.

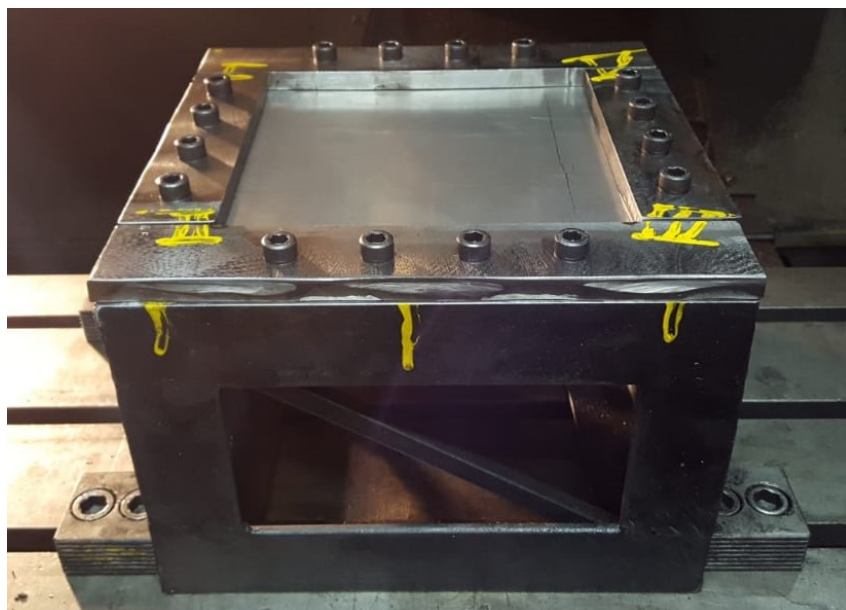


Figura 6: Suporte fixador de chapas.

3.2. METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.2.1 Ensaios de tração

A chapa de aço 316L disponibilizada foi cortada em seis partes iguais de 240x240mm, cinco das quais foram destinadas aos ensaios de estampagem enquanto a última parte foi usada para determinar as propriedades mecânicas do material através de ensaios de tração.

Foram fabricados três corpos de prova para o ensaio de tração, retirados da chapa em diferentes orientações, uma longitudinalmente ao sentido de laminação de fabricação da chapa, outra diagonalmente e uma última transversalmente, ou, respectivamente, a 0°, 45° e 90° com relação ao sentido de laminação da chapa, conforme ilustrado na Figura 7, para poder aferir suas propriedades de anisotropia também. O formato e características dos corpos de prova são normatizados pela ABNT NBR ISO 6892-1 de 2018.

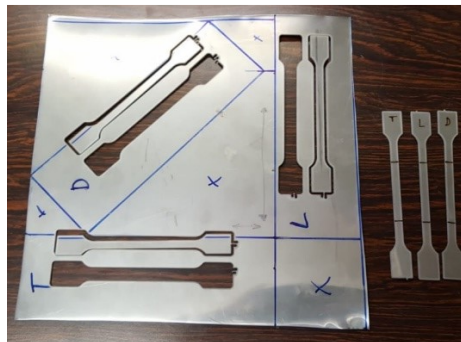


Figura 7: Corpos de prova para os ensaios de tração. L: Longitudinal, D: Diagonal; T: Transversal aos sentidos de laminação de fabricação da chapa.

Os ensaios de tração são conduzidos no Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEst) da UFU, em um equipamento MTS Landmark®, com capacidade de 500 KN, ilustrada na Figura 8, abaixo.



Figura 8: Equipamento utilizado nos ensaios de tração

Os parâmetros iniciais de ensaio são inseridos no comando da máquina, que monitora a força de tração e o alongamento das amostras, assim o ensaio deve fornecer as curvas tensão x deformação características para o aço nas três orientações trabalhadas, e portanto seus limites de escoamento, ruptura e módulo de elasticidade. Os ensaios terminam no rompimento das amostras e, quando isso acontece, anota-se os parâmetros finais de ensaio para, a partir das Equações 2.2 – 2.9, determinar as demais propriedades mecânicas do aço, como o grau de encruamento e suas anisotropias média e planar.

3.2.2 Geometria da peça e trajetória da ferramenta

A geometria da peça conformada nos ensaios é a de um tronco de cone com um ângulo de estampagem ψ definido em $53,7^\circ$. A geometria da peça foi desenvolvida no *software* Fusion 360®, uma plataforma CAD/CAM que permite gerar a trajetória que a ferramenta deve percorrer para os ensaios de estampagem. O código pode ser importado no comando da máquina CNC para a execução dos testes. Uma ilustração da geometria a ser fabricada pode ser visualizada na Figura 9.

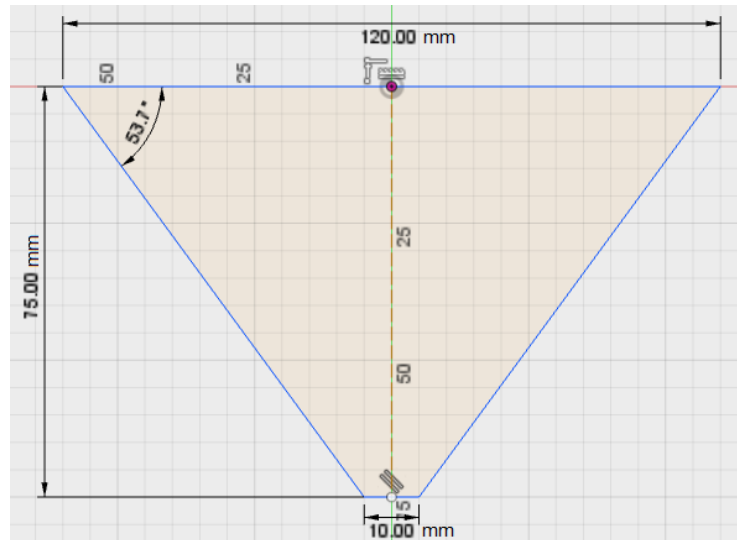


Figura 9: Geometria da peça a ser fabricada.

3.3. COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

Definem-se os parâmetros da estampagem incremental conforme Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros dos ensaios de estampagem incremental.

Material	Aço AISI 316L
ψ (ângulo de estampagem)	53,7°
s_o (espessura inicial)	0,63 mm ou 1/40"
Geometria da peça	Tronco de cone
Tipo de ferramenta	De ponta semiesférica
r_{tool} (raio da ferramenta)	4 mm
Material da ferramenta	Aço AISI 52100
Δz (passo vertical)	0,5 mm
V_{fh} (Velocidade de avanço)	250 mm/min
w (rotação da ferramenta)	Variável
Lubrificante	Variável

Nota-se que a estratégia de conformação definida para os ensaios foi a convencional de contorno, em que a movimentação da ferramenta é feita de fora para dentro, ou seja, do maior para o menor diâmetro, descrevendo círculos paralelos decrescentes. Após a conformação do primeiro círculo, a ferramenta inicia o segundo com o incremento vertical e assim sucessivamente. A Figura 10 abaixo ilustra a trajetória da peça para a conformação dos troncos de cone no ensaio.

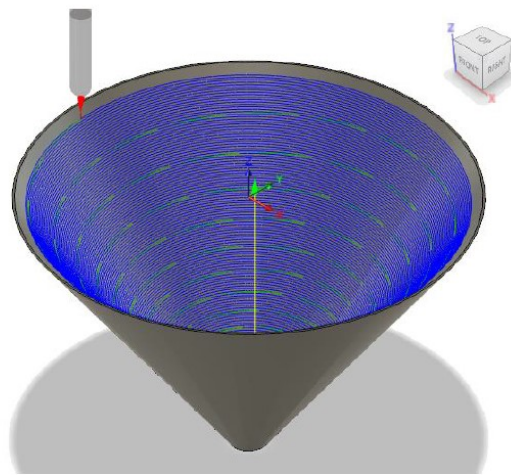


Figura 10: Trajetória da ferramenta na estampagem incremental proposta.

Dois dos parâmetros serão avaliados durante os ensaios, a rotação da ferramenta (w) e o fluido lubrificante. Estrategicamente serão desenvolvidos cinco ensaios, dentre os quais quatro são destinados para a avaliação da influência da rotação da ferramenta sobre o acabamento superficial e conformabilidade da peça e em um último ensaio fixa-se uma das quatro rotações estabelecidas e altera-se o fluido lubrificante para analisar os resultados. A rotação da ferramenta será variada entre os valores de 0, 500, 1000 e 2000 rotações por minuto (rpm).

Todos os testes serão realizados com óleo vegetal SAE 80W da Texaco®, disponibilizado pelo LEPU, puro. Para a avaliação da influência da lubrificação, mistura-se grafite com um tamanho médio de grão de 200nm em proporção de 10% de peso ao lubrificante. O ensaio com adição de grafite é realizado com rotação de 500 rpm. A Figura 11 mostra o lubrificante e grafite utilizados durante os ensaios.



Figura 11: Óleo vegetal (A) e grafite (B) utilizados nos ensaios de estampagem.

Durante os ensaios, usa-se também um termômetro infravermelho para medição de temperatura. O equipamento utilizado também foi disponibilizado pelo LEPU, modelo 42570 da marca FLIR®, ilustrado na Figura 12. A medição das temperaturas é feita de cinco em cinco minutos, apontando-se o raio em proximidade ao ponto de conformação na superfície da chapa. A emissividade do aparelho deve ser configurada conforme propriedades do material e os valores típicos encontrados para chapas polidas é de 0,07, usado durante os ensaios. O parâmetro de emissividade pode ser influenciado pelo acabamento da superfície e também sua coloração.



Figura 12: Termômetro FLIR® 42570 (A) utilizado durante os ensaios.

Definidos os parâmetros e estratégia de ensaios, são retirados dos troncos de cone amostras com tamanho padrão para análise de rugosidade e acabamento superficial e conformabilidade. Uma amostrada é cortada de cada tronco de cone radialmente, a 10 mm do ponto de início do processo, conforme pode ser visualizado na Figura 13 abaixo.

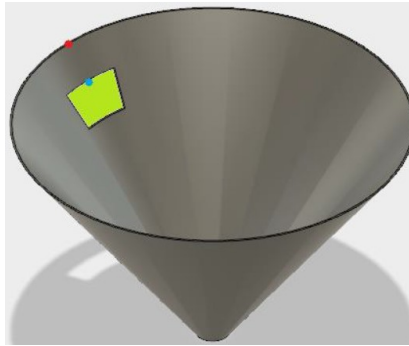


Figura 13: Amostras cortadas para análise de rugosidade, em verde.

Para aferir a rugosidade, são mensurados os parâmetros Ra , Rz e Rq com auxílio de um rugosímetro eletrônico portátil, Surtronic S128, Taylor Hobson ®. Foram configuradas um cut-off de 0,8 mm e um percurso de medição de 4 mm, para se ter um total de medição para 5 cut-offs (Norma ABNT 6405/1988). As amostras cortadas são aproximadamente retangulares de 10x15mm de largura.

Em seguida, são levadas as cinco amostras ao microscópio óptico binocular da Olympus ®, disponibilizado pelo LEPU, para verificar a textura da superfície nas peças conformadas. O diagrama mostrado na Figura 14 resume a metodologia de ensaios.

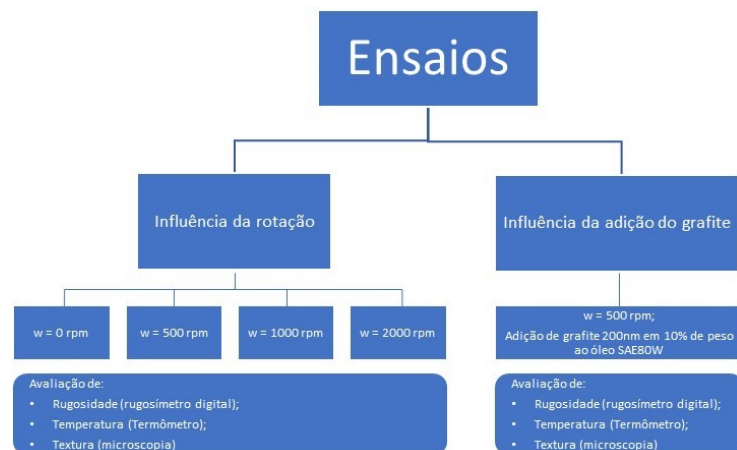


Figura 14: Organograma dos ensaios de estampagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos testes de estampagem incremental.

4.1 Determinação das propriedades do material

Para avaliação das propriedades mecânicas do material, foram conduzidos os ensaios de tração no LMEst e anotados os parâmetros antes e após da realização dos testes, para avaliação das curvas de tensão por alongamento e posterior curva de escoamento para o cálculo do índice de encruabilidade do material.

As amostras, conforme já enunciado, são retiradas em diferentes orientações àquela de laminação da chapa para avaliar o comportamento anisotrópico do material também. Os dados dos ensaios são organizados em tabelas, a partir das quais são gerados as curvas de tensão por deformação e de encruamento para as três orientações estudadas, para avaliação das propriedades mecânicas do material.

A Figura 15 ilustra os corpos de prova após finalizados os ensaios de tração.



Figura 15: Corpos de prova após os ensaios de tração. Escala 1:3.

Observando-se o tipo de fratura na Figura 15 acima, constatou-se que o aço AISI 316L apresentou uma fratura tipo dútil, com estricção visível.

Com o ensaio de tração foi possível a obtenção dos valores de deformação relativa (ε), alongamento ($l_f - l_0$), tensão máxima ou de ruptura (σ_B), tensão limite de escoamento (σ_E) e módulo de elasticidade (E).

Além disso, foi possível a medição da estricção que os corpos de prova experimentaram em sua largura. Com essas informações e utilizando as equações 2.2 – 2.9, determina-se as curvas de escoamento em regime plástico e demais propriedades mecânicas do material.

As Figuras 16 e 17 ilustram o comportamento das três amostras nos ensaios de tração, mostrando, respectivamente, os diagramas tensão x deformação e força x alongamento, a partir dos dados obtidos do equipamento de ensaio de tração, organizados no *software Microsoft Excel 2013*®.

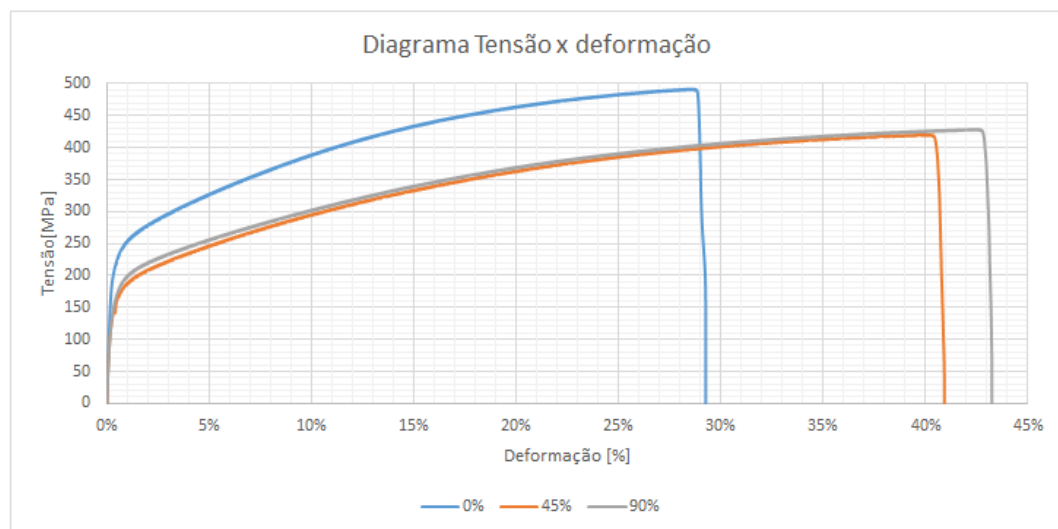


Figura 16: Gráfico tensão x deformação das três amostras ensaiadas.

O diagrama tensão por deformação ilustrado na Figura 16 mostra comportamento dútil do aço 316L, característico de aços austenísticos.

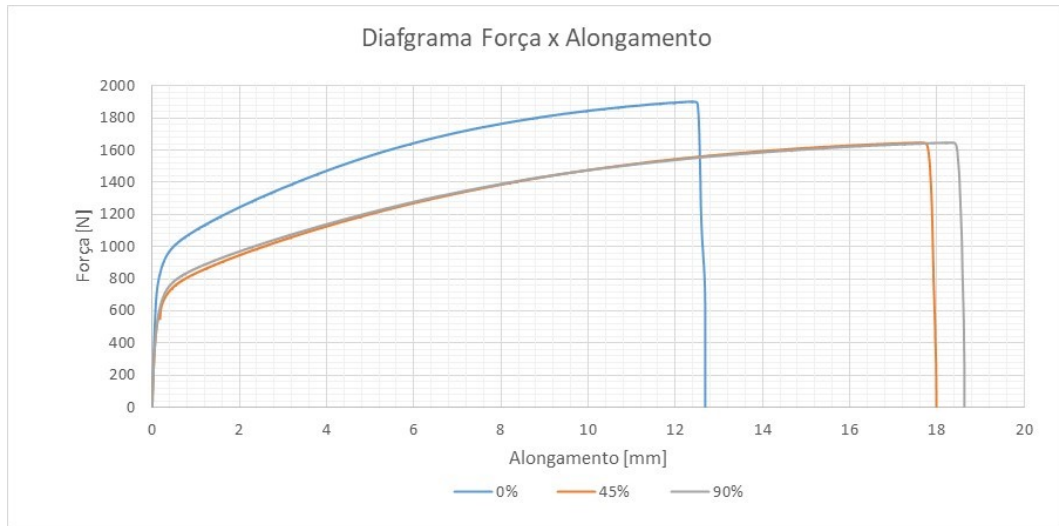


Figura 17: Gráfico força x alongamento das amostras ensaiadas.

Abaixo, descreve-se o procedimento para o cálculo do primeiro corpo de prova, retirado na direção longitudinal (0°) àquela de laminação da chapa origem, utilizando-se os dados dispostos na Tabela 4 e as equações 2.2 à 2.5. Para os demais corpos de prova, o mesmo procedimento foi utilizado. Dos gráficos das Figuras 16 e 17, e por medições dos corpos de prova antes e depois dos ensaios, pode-se aferir, para a amostra retirada longitudinalmente:

Tabela 4: Dados da amostra a 0° após ensaio de tração.

ε	29,39%
$l_f - l_0$	12,75 mm
$F_{m\acute{a}x}$	1902,78 N
l_0	43,36 mm
b_0	6,14 mm
s_0	0,63 mm
A_0	3,8682 mm ²

Cabe ressaltar que, para a Tabela 4, os valores de comprimento dispostos não se referem ao comprimento total do corpo de prova, apenas da seção efetiva de medição, entre as garras do equipamento usado. Assim, pode-se calcular a tensão máxima de ruptura convencional, utilizando-se os valores de área inicial:

$$\sigma_B = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_0} = \frac{1902,78 \text{ N}}{3,8682 \text{ mm}^2} = 491,90 \text{ [N/mm}^2 \text{ ou MPa]} \quad (4.1)$$

Agora, obtém-se a curva de escoamento do material para essa amostra longitudinal que está sendo considerada neste exemplo de cálculo. Esta curva, na deformação a frio, tem forma conforme enunciado na Equação 2.5, que se repete abaixo:

$$k_f = C * \varphi^n \quad (4.2)$$

Esta equação caracteriza a fase de deformação plástica do material, relacionando as tensões verdadeiras de escoamento k_f com os valores de deformação verdadeiros no mesmo estágio através do índice de encruamento n e uma constante do material, C . Deve-se então determinar primeiramente esta constante para obter a curva. Para isso, toma-se um estado conhecido de deformação dado pelo ensaio de tração, relativo ao instante de tensão máxima. A deformação verdadeira correspondente neste ponto é calculado a partir do seu valor de tensão relativa no mesmo ponto, conforme Equação 2.3:

$$\varphi = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon) \quad (4.3)$$

Portanto,

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) = \ln(1 + 0,2939) = 0,2577$$

Para o instante de deformação máxima, a deformação total é igual ao índice de encruamento, ou seja:

$$n = \varphi \quad (4.4)$$

Portanto:

$$n = 0,2577$$

Pode-se determinar o valor de tensão verdadeira associada a este estado, usando a Equação 2.4:

$$k_f = \sigma_B(1 + \varepsilon) = 491,90 * 1,2939 = 636,47 \text{ MPa}$$

Com a determinação desses valores, pode-se encontrar o valor da constante C do material, com a Equação 4.2:

$$k_f = C * \varphi^n \rightarrow 636,47 = C * 0,2577^{0,2577}$$

$$\therefore C = 902,68 \text{ MPa}$$

Assim, a curva de escoamento para o aço AISI 316L é modelada matematicamente a partir da seguinte equação:

$$k_f = 902,68 * \varphi^{0,2577}$$

Observando-se que a deformação verdadeira pode ser aferida pelos ensaios de tração juntamente com a Equação 4.3. Essa curva está representada na Figura 18, abaixo, que também apresenta os comportamentos das duas outras amostras, a 45 e 90° ao sentido de laminação da chapa, para o regime plástico de escoamento.

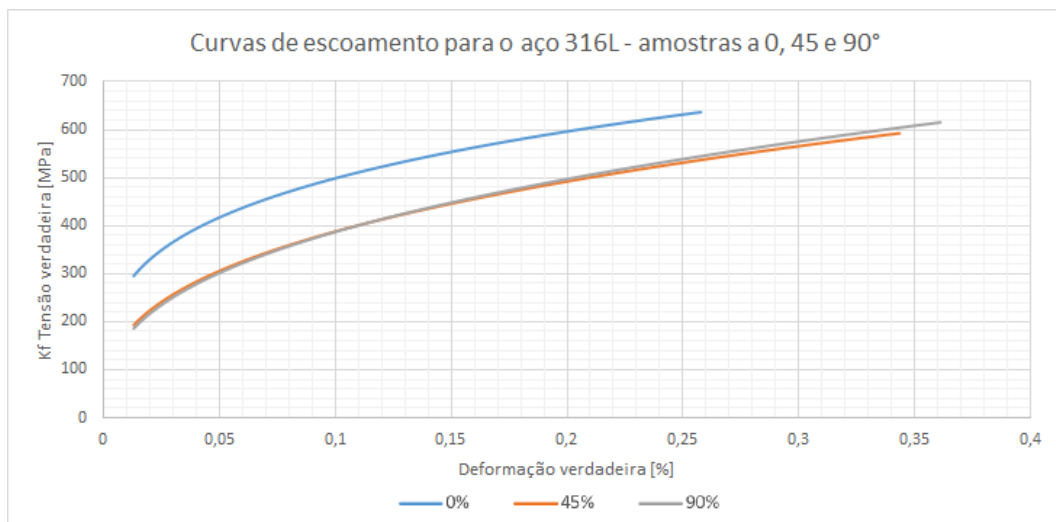


Figura 18: Curva de escoamento com tensões e deformações verdadeiras para as amostras ensaiadas da chapa de aço 316L.

A curva acima mostra a capacidade do aço AISI 316L, em três diferentes orientações àquela de laminação da chapa de origem, em escoar. Seu escoamento,

como exemplo para a amostra retirada no sentido longitudinal ao de laminação, conforme Figura 18, inicia-se a uma tensão de 232 MPa e sua ruptura ocorre a uma tensão de 636 MPa. Dentro dessa faixa de tensões, o aço é conformável.

Transformando as escalas do gráfico acima em logarítmica, obtém-se o grau de encruamento n , sendo este a inclinação da curva de escoamento verdadeira, conforme pode ser mostra a Figura 19:

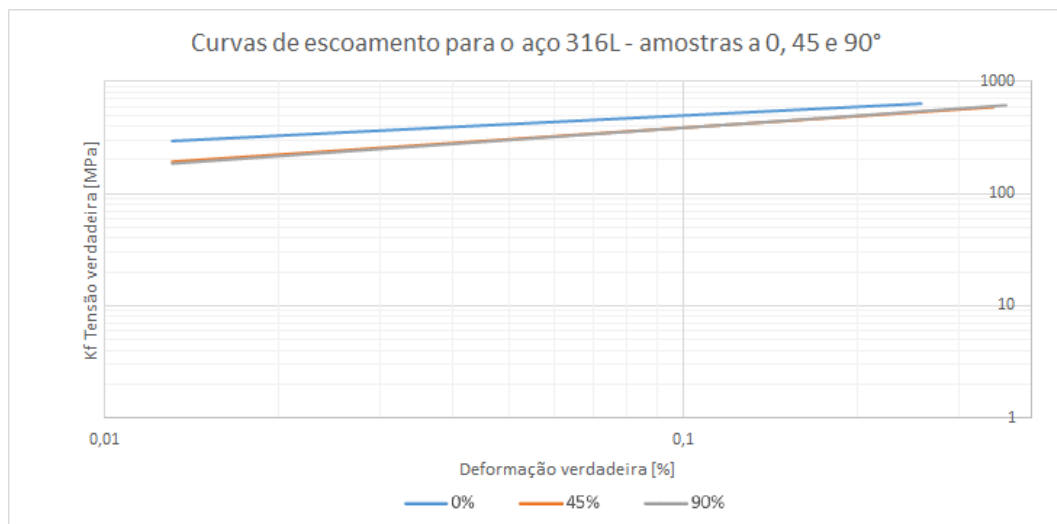


Figura 19: Curva de escoamento, 0° - grau de encruamento.

Cabe ressaltar que o grau de encruamento calculado como a inclinação da curva de escoamento em escala logarítmica não é o mesmo daquele da Equação 2.5 ou 4.2, e portanto após sua determinação, não se deve ajustar a curva que modela o escoamento em sua conformidade. Os dados dos três ensaios estão resumidos na Tabela 5.

Tabela 5: Propriedades mecânicas do aço AISI 316L, para os três sentidos de laminação.

SENTIDO DE LAMINAÇÃO	ε [%]	$l_f - l_0$ [mm]	σ_e [MPa]	σ_B [MPa]	φ [%]	C [MPa]	n
0°	29,39	12,75	232	636	0,2577	902,68	0,188
45°	40,97	18,01	191	592	0,3434	855,28	0,107
90°	43,46	18,73	189	615	0,3609	888,56	0,112

Agora, calcula-se o índice de anisotropia do material. Utiliza-se as Equações 2.6 a 2.8 para o cálculo. Observa-se que, a medição de espessura do corpo de prova

é muito difícil, e portanto, incerta, e por isso, é feita a adaptação da fórmula através do conceito de constância dos volumes, que diz que a soma algébrica das deformações reais durante a fase plástica de deformações é nula. Essa equação adaptada está indicada em 2.6. As Equações 2.7 e 2.8 são usadas nos cálculos das anisotropias média e planar, respectivamente. Os parâmetros para cálculo e os valores de anisotropia encontrados para os três sentidos de laminação foram reunidos na Tabela 6.

Tabela 6: Valores de anisotropia para o aço AISI 316L.

SENTIDO DE LAMINAÇÃO	b_0 [mm]	b [mm]	l_0 [mm]	l [mm]	r	r_m	Δr
0°	6,14	5,41	43,36	56,11	0,9647	1,1474	-0,4466
45°	6,22	5,10	43,96	61,97	1,3707		
90°	6,10	5,15	43,09	61,82	0,8834		

Portanto, os valores de anisotropia se aproximam de 1, condição que caracteriza a isotropia, na qual o material apresenta propriedades mecânicas idênticas independentemente da orientação de laminação da chapa, que seria o caso ideal. O valor de anisotropia média encontrada foi de 1,1474, valor que se aproxima da isotropia, no entanto, nota-se que a anisotropia planar é de -0,4466, indicando que apesar da anisotropia média estar próxima de 1, o valor varia muito entre as orientações.

Os valores das duas Tabelas acima, 5 e 6, confirmam que o material tem propriedades mecânicas distintas por orientação, devido ao fenômeno de alongamento de grãos na direção de laminação. Isto fica visível através dos diagramas tensão por deformação e curvas de escoamento para as três amostras, respectivamente Figuras 16 e 18.

Pelo que pode se observar nas Tabelas 5 e 6, a direção de 0° tem o índice de anisotropia mais próximo de um e foi a amostra que apresentou os maiores valores σ_e e σ_B (tensões limite de escoamento e ruptura, respectivamente). Além disso, o valor da constante C do material também é a maior entre as amostras. Nota-se que esse valor indica uma proporcionalidade entre as tensões verdadeiras para o escoamento e as deformações reais experimentadas, assim, para um determinado estado de

deformação, maiores poderão ser as tensões associadas nessa orientação, permitindo-se assim maiores ângulos de parede, que quantifica a conformabilidade.

Por outro lado, as amostras a 45° e 90°, que tiveram seus índices de anisotropia média mais distante de um, apresentaram piores valores de tensões limite de escoamento e ruptura e menores constantes C do material. Analogamente à amostra a 0°, isso é um possível indício de piora em conformabilidade, pois para se atingir maiores níveis de tensão são necessários maiores estados de deformação, o que pode colocar em perigo o processo de conformação por estrição ou fratura. A amostra a 45° teve o maior índice de anisotropia, que indica a resistência à deformação na espessura da chapa, e dentre as amostras, é aquela que teve consequentemente a menor tensão limite à ruptura. Para se confirmar a correlação entre a anisotropia e o limite à ruptura, no entanto, sugere-se replicar os ensaios de tração a um maior número de amostras.

Os valores das propriedades mecânicas do aço AISI 316L foram buscados para se ter um comparativo com os valores encontrados pelos testes de tração. Os valores “teóricos” encontrados comercialmente variam em intervalos relativamente grandes. A Tabela 7 permite uma breve análise para se ter esse comparativo.

Tabela 7: Comparativo entre os valores encontrados para as propriedades mecânicas do aço e seus valores comerciais obtidos em sites de diferentes fornecedores.

Propriedade Mecânica do material	Valor mínimo	Valor máximo	Faixa de intervalo valores comerciais
ε [%]	29,39	43,46	40-65
σ_e [MPa]	189	232	170-350
σ_B [MPa]	592	636	485-700

Excetuando-se o valor mínimo obtido de deformação convencional, ε , todos os outros parâmetros se encontram dentro das faixas. Um possível motivo que explica os largos intervalos é a incerteza quanto às alterações nas propriedades mecânicas dos materiais devido aos processos de fabricação à que elas se submetem. Os processos de fabricação podem alterar a resistência à deformação devido ao efeito de encruamento.

4.2 Análise Conformabilidade

Os cinco ensaios de SPIF foram realizados e nesta seção, os resultados serão apresentados e discutidos, buscando-se evidenciar as influências dos parâmetros de rotação da ferramenta e fluido lubrificante na conformabilidade e acabamento superficial da peça acabada. A Figura 20 ilustra a execução de um ensaio SPIF.

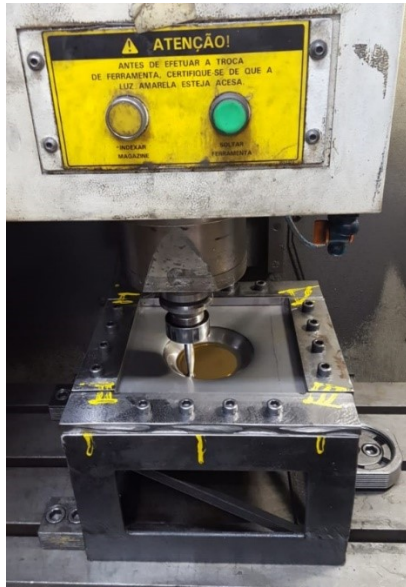


Figura 20: Ensaio SPIF em execução.

4.2.1 Análise da influência da rotação

Quatro ensaios são realizados para análise da influência do parâmetro de velocidade de rotação na conformabilidade do aço e acabamento superficial da peça. Realiza-se um teste com a ferramenta livre de qualquer rotação, ou seja, 0 rpm, e a partir daí, incrementa-se sua rotação a cada teste para os valores de 500, 1000 e 2000 rpm. Jeswiet (2005) propõe que a melhor condição de teste para o parâmetro de rotação é obtida quando a ferramenta rola sobre a chapa que está sendo estampada. A Equação 2.9 pode ser usada para se calcular qual a rotação em que a ferramenta trabalharia nesse caso.

$$w = \frac{V_{fh}}{\pi r_{tool} \sqrt{\frac{1}{2}(1 - \cos 2\psi)}} = \frac{250 \left[\frac{mm}{min} \right]}{3,14 * 4[mm] \sqrt{\frac{1}{2}(1 - \cos 2 * 53,7^\circ)}} = 24,69 [rpm]$$

Assim, trabalhando a uma rotação de aproximadamente 25 rpm, o atrito entre ferramenta e chapa seria o menor possível. Nesse caso, obter-se-ia o melhor acabamento superficial para a peça conformada. Fica como sugestão para futuras análises fazer um ensaio a essa rotação para comprovar o resultado. A Figura 21 mostra o resultado atingido após finalizados os quatros ensaios com a variação da rotação da ferramenta, com valores fixados em 0, 500, 1000 e 2000 rpm.

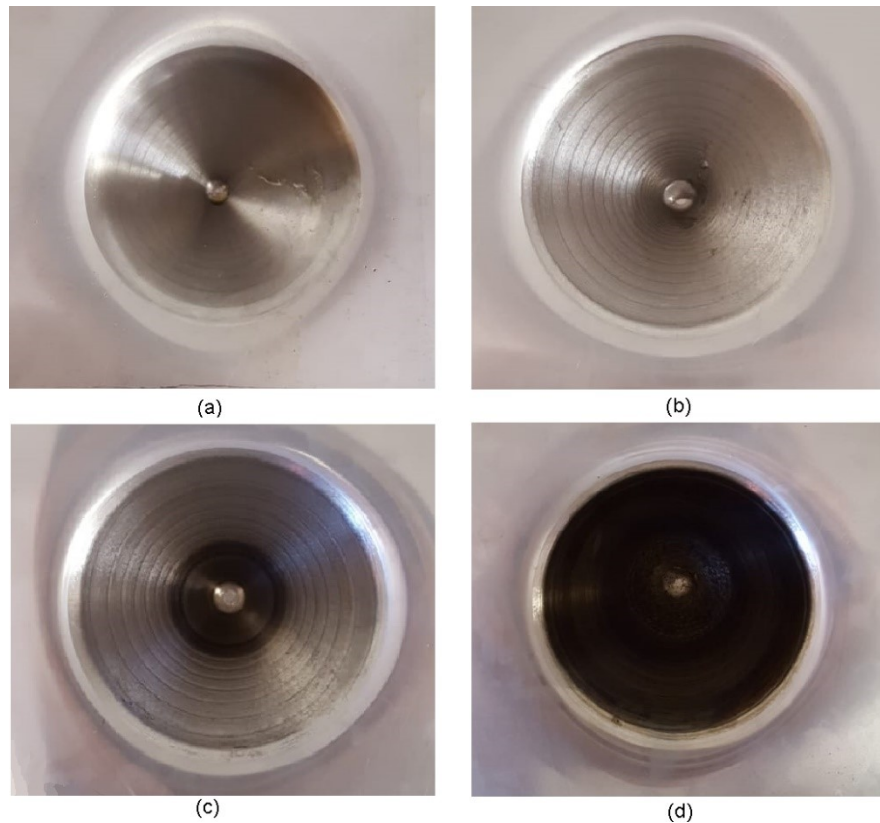


Figura 21: Chapas de aço AISI 316L estampadas a diferentes rotações. Legenda: (a) 0 rpm; (b) 500 rpm; (c) 1000 rpm; (d) 2000 rpm.

Em uma primeira análise visual de acabamento, nota-se claramente que o aumento de rpm impacta negativamente a qualidade da peça final. As peças estampadas a maiores velocidades apresentam visivelmente as marcas da trajetória da ferramenta, quanto maior a velocidade, mais visíveis as marcas deixadas pela ferramenta, consequência do maior cisalhamento entre ferramenta e chapa.

Naturalmente, a ferramenta também sofre maior desgaste à medida que se aumenta as rotações, porque essa está em contato contínuo com a chapa. Para

evidenciar isso, foram levadas as ferramentas a um microscópio óptico binocular. Foram tiradas fotos da ferramenta após o ensaio, e como comparativo, foi tirada uma foto da ferramenta sem qualquer desgaste, antes da realização do primeiro ensaio. As fotos das ferramentas foram agrupadas na Figura 22.

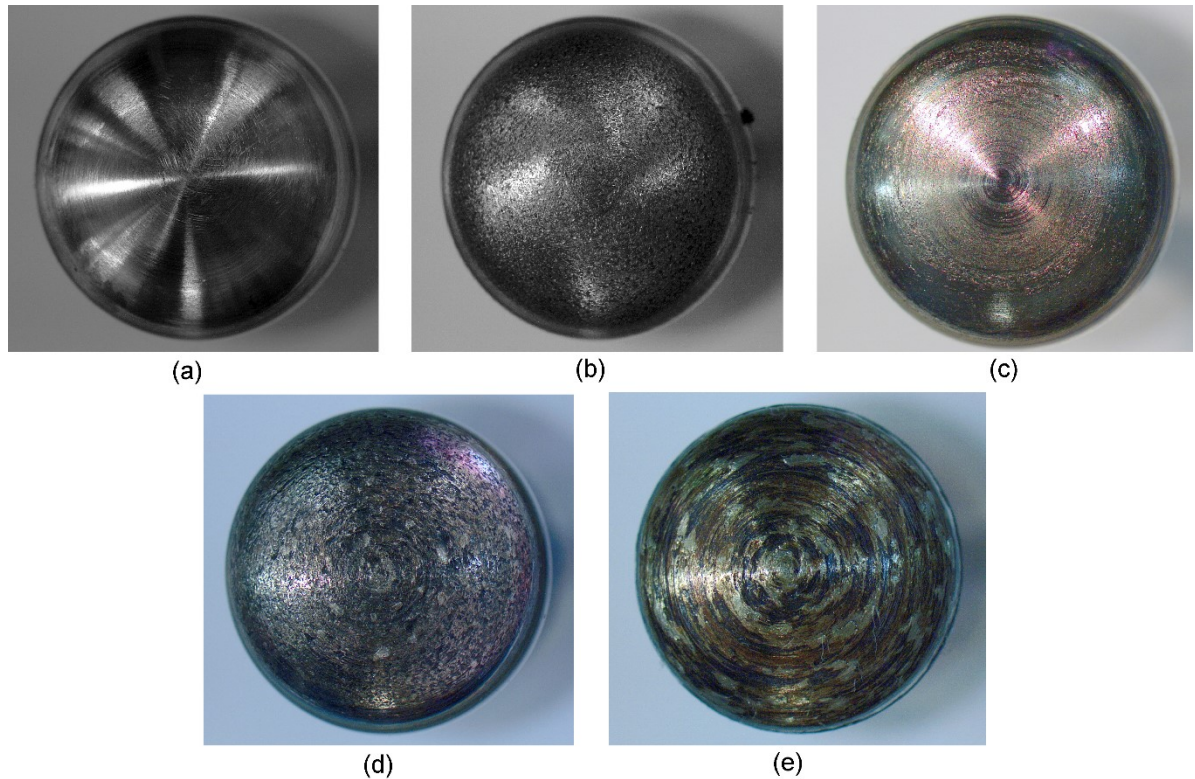


Figura 22: Ferramentas de estampagem. Legenda: (a) Imagem de ferramenta antes do processo de estampagem; (b) Após o ensaio a 0 rpm; (c) Após o ensaio a 500 rpm; (d) Após o ensaio a 1000 rpm; (e) Após o ensaio a 2000 rpm.

As imagens das Figuras 21 e 22 indicam um aumento visível de desgaste da ferramenta e também das marcas de conformação radiais, deixadas pela ferramenta na peça ao percorrer sua trajetória, que pode ser um indicativo de maiores forças no processo. Observa-se, dentre todas as peças conformadas, o melhor acabamento naquela feita a 0 rpm, valor de rotação mais próximo do ideal proposto por Jeswiet (2005), calculado para os parâmetros de ensaio em 25 rpm. É importante ressaltar que houve a troca da ferramenta para cada ensaio.

Além disso, não foram observados rompimento em nenhuma das chapas conformadas. Isso indica a boa conformabilidade do aço AISI 316L dentro dos

parâmetros fixados nos ensaios e do intervalo de variação proposto para a variação da rotação da ferramenta.

Amostras de cada tronco de cone estampado foram levados para o microscópio óptico. As imagens das superfícies da chapa não conformada e após a execução dos quatro ensaios com variação da rotação foram reunidas para melhor comparativo e são mostradas na Figura 23, conforme segue.

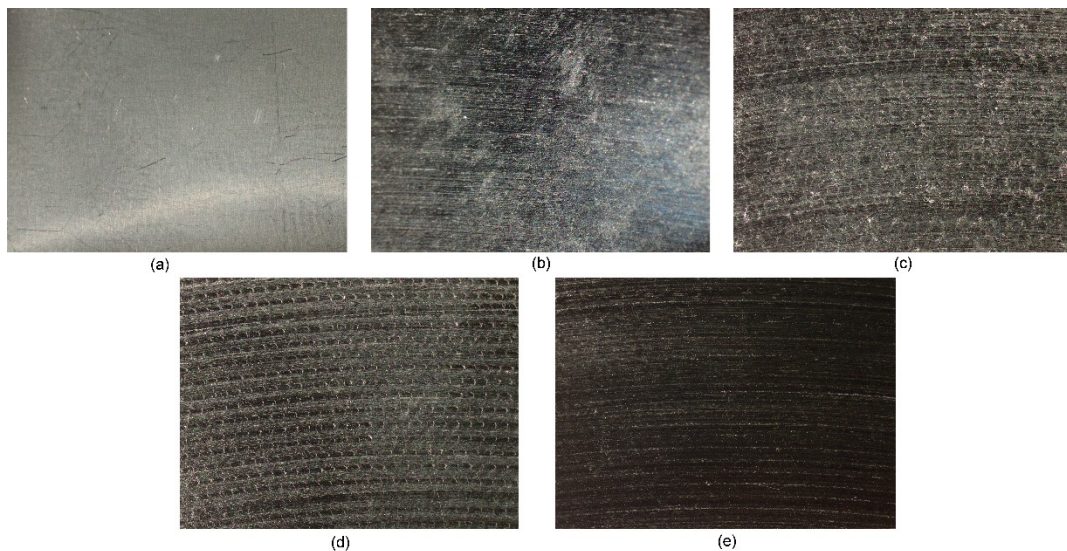


Figura 23: Superfície da chapa AISI 316L estampada em diferentes rotações.
Legenda: (a) Não conformada; (b) 0 rpm; (c) 500 rpm; (d) 1000 rpm; (e) 2000 rpm.

As imagens mostradas na Figura 23 mostram com mais detalhe o impacto que o aumento da rotação tem no acabamento superficial da peça. Nota-se na imagem a chapa não conformada e seu aspecto liso e quanto maior a rotação do ensaio, mais a superfície estampada ressalta os riscos da trajetória percorrida pela ferramenta, e para altos valores de rotação manifestam-se pontos de alta deformação plástica localizada.

A velocidade de avanço fixada nos ensaios foi de 250 mm/min, abaixo do convencional para esse método de estampagem, que varia no intervalo de 500-2000 mm/min. Quando se combina uma velocidade de avanço baixa com uma alta rotação, a ferramenta gira várias múltiplas vezes em um único ponto antes de avançar para o próximo, gerando reprocesso, aumentando-se o risco de uma ruptura precoce, pois as tensões associadas são maiores a cada giro que a ferramenta executa no mesmo ponto por conta da diminuição da espessura local através da conformação. Caso

fossem usadas ferramentas de diâmetros menores do que o fixado, presumivelmente a chapa teria experimentado rupturas localizadas, com pequenas cavidades na superfície, adquirindo uma textura similar a uma casca de laranja conforme os estudos de Esposte (2018).

Foram aferidos, para confirmar a influência da rotação na textura da chapa, valores de rugosidade para cada uma das situações, e comparadas com os valores nominais do aço antes da conformação. Cinco amostras para cada caso são tomadas e no gráfico ilustrado na Figura 24 são mostrados os valores médios obtidos. A Tabela 8 resume os valores encontrados.

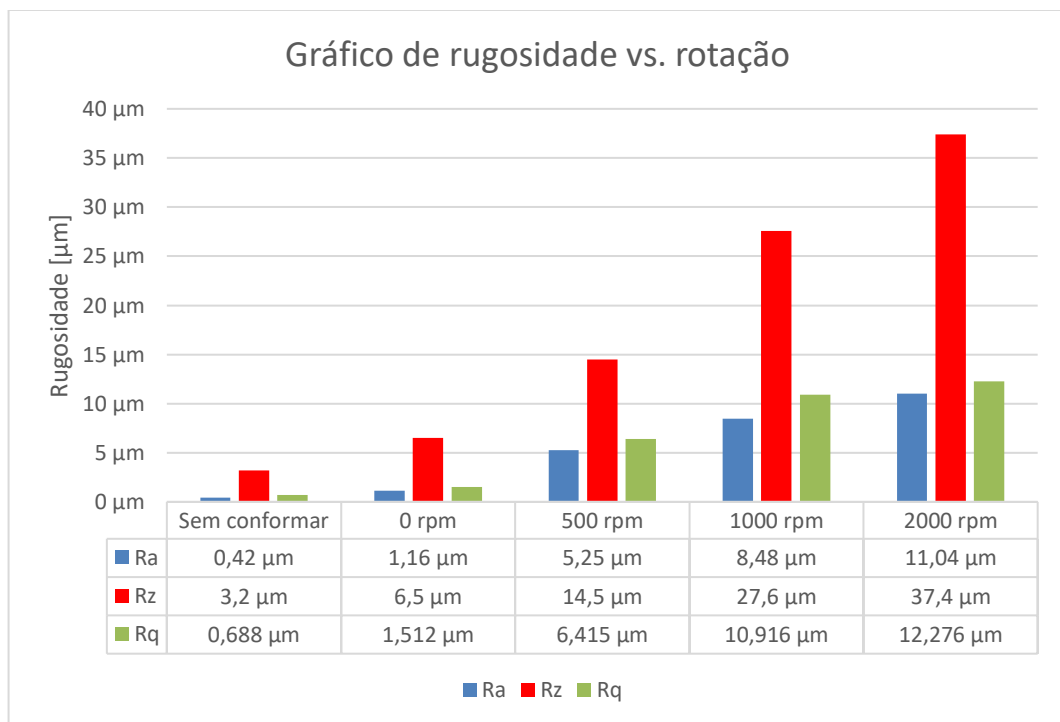


Figura 24: Gráfico de rugosidade por rotação de ensaio.

Tabela 8: Dados aferidos de rugosidades para as amostras dos ensaios com variação de rotação.

		R_a	R_z	R_q
Sem conformar	1	0,7 μm	5,5 μm	1,17 μm
	2	0,3 μm	3 μm	0,53 μm
	3	0,2 μm	1,5 μm	0,35 μm
	4	0,4 μm	3 μm	0,65 μm
	5	0,5 μm	3 μm	0,74 μm
	Média	0,42 μm	3,2 μm	0,688 μm
	Desvio padrão	0,192 μm	1,44 μm	0,306 μm
0 rpm	1	0,9 μm	4 μm	1,17 μm
	2	0,9 μm	5 μm	1,22 μm
	3	1,3 μm	10 μm	1,77 μm
	4	1,3 μm	7 μm	1,63 μm
	5	1,4 μm	6,5 μm	1,77 μm
	Média	1,16 μm	6,5 μm	1,512 μm
	Desvio padrão	0,241 μm	2,291 μm	0,295 μm
500 rpm	1	5,2 μm	18 μm	7,33 μm
	2	4,8 μm	14,5 μm	5,73 μm
	3	5,7 μm	14,5 μm	7,1 μm
	4	5,25 μm	14,5 μm	6,415 μm
	5	5,25 μm	14,5 μm	6,415 μm
	Média	5,25 μm	14,5 μm	6,415 μm
	Desvio padrão	0,319 μm	1,565 μm	0,634 μm
1000 rpm	1	8,8 μm	29 μm	10,58 μm
	2	9,5 μm	31 μm	13,38 μm
	3	8,7 μm	28 μm	10,56 μm
	4	7,3 μm	23 μm	10,24 μm
	5	8,1 μm	27 μm	9,82 μm
	Média	8,48 μm	27,6 μm	10,92 μm
	Desvio padrão	0,826 μm	2,966 μm	1,411 μm
2000 rpm	1	10,7 μm	35,5 μm	11,92 μm
	2	10,9 μm	36 μm	12,1 μm
	3	10,9 μm	37 μm	11,95 μm
	4	11,3 μm	37 μm	12,41 μm
	5	11,4 μm	41,5 μm	13 μm
	Média	11,04 μm	37,4 μm	12,28 μm
	Desvio padrão	0,297 μm	2,382 μm	0,449 μm

Percebe-se um comportamento de aumento de rugosidade com o aumento de rotação. O melhor resultado alcançado é aquele em que a ferramenta executa a

estampagem sem qualquer rotação. Assim sendo, pode ser confirmada a relação da rotação com o acabamento superficial da peça, de maneira inversa, isto é, com o aumento da rotação, tem-se uma piora do acabamento superficial, evidenciado pelo aumento dos parâmetros de rugosidade média da superfície estampada.

A temperatura durante os ensaios foi medida, e pode ser analisada com o gráfico disposto na Figura 25 e valores organizados na Tabela 9.

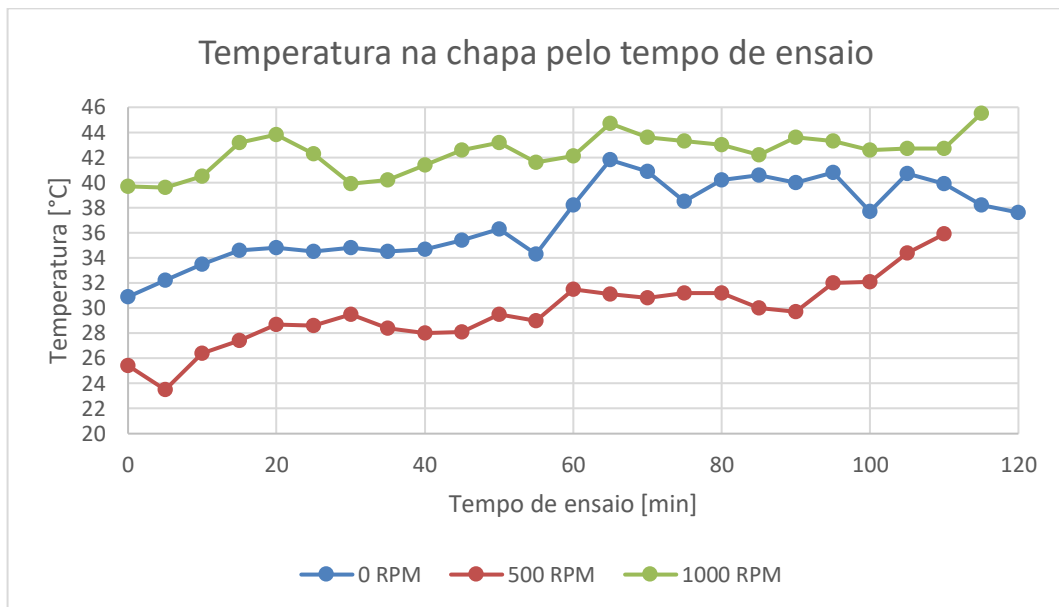


Figura 25: Gráfico de temperatura para os ensaios a 0, 500 e 1000 rpm.

Tabela 9: Valores de temperatura aferidos durante os ensaios.

	0 RPM	500 RPM	1000 RPM
Média	37,024 °C	29,670 °C	42,388 °C
Desvio padrão	3,089 °C	2,743 °C	1,545 °C

Pelo gráfico da Figura 25, é possível notar pouco aumento de temperatura na chapa durante os ensaios, atingindo-se temperaturas levemente superiores à ambiental. Além disso, não se conclui um aumento proporcional de temperatura relativo ao aumento de rotação e a Tabela 9 confirma isso, já que o valor médio obtido no ensaio a 500 RPM foi menor que aquele realizado a 0 RPM.

À medida que a rotação cresce, no entanto, pior fica o acabamento da peça, evidente com as medições de rugosidade de amostras retiradas da superfície conformada. Para o ensaio realizado a 0 RPM, o aumento percentual do parâmetro

Ra, por exemplo, é de 176,19% em relação a superfície não estampada. O mesmo parâmetro aumenta em 352,59% para o ensaio a 500 RPM em comparação com aquele realizado a 0 RPM, aumenta em mais 61,52% para o ensaio a 1000 RPM e 30,19% para o ensaio a 2000 RPM. Assim, pode-se afirmar que a rugosidade aumenta diretamente com o aumento de rotação, mas não de forma proporcional.

Quanto maior a rotação do ensaio, maior também a quantidade de energia cinética associada ao processo, e se essa energia não está sendo proporcionalmente transformada em alterações no acabamento superficial ou energia de deformação, então ela deveria estar sendo transformada de outra maneira, possivelmente em calor. Por isso são aferidas as temperaturas durante o ensaio, utilizando a metodologia já descrita neste trabalho, que infelizmente não evidenciam essa teoria.

É notado uma redução de temperatura média nos ensaios a 500 RPM comparado aos feitos sem rotação, em 19,26%, e um aumento de 42,86% para o de 1000 RPM. Era esperado, no entanto, um aumento na geração de calor do processo gerado pelo aumento de rotação, devido ao maior nível de energia cinética associada. Portanto, o comportamento medido foi diferente daquele esperado.

É importante observar que, apesar de não se medir um aumento significativo de temperatura durante os ensaios, houve maior esfumaçamento do óleo lubrificador usado com o aumento da rotação. Inclusive, no ensaio a 2000 RPM, a fumaça era densa e portanto foi decidido não aferir as medições por motivos de segurança. Com isso, entende-se que o óleo pôde absorver grande parte do calor gerado no processo por convecção, assim controlando o aumento de temperatura na chapa a níveis mais próximos do ambiente.

4.2.2 Análise da influência do lubrificante

Repete-se o ensaio a 500 rpm adicionando-se ao lubrificante 10% em peso de grafite com granulometria 200 nm, para verificar a influência que a variação do lubrificante tem na conformabilidade da peça e seu acabamento superficial. A imagem da Figura 26 compara as duas peças estampadas, à mesma rotação, com a diferenciação do fluido lubrificante utilizado. De forma análoga, amostras das duas peças conformadas foram levadas à microscopia óptica para verificar a influência da

alteração do fluido lubrificante no acabamento da peça, que pode ser notado na Figura 27.

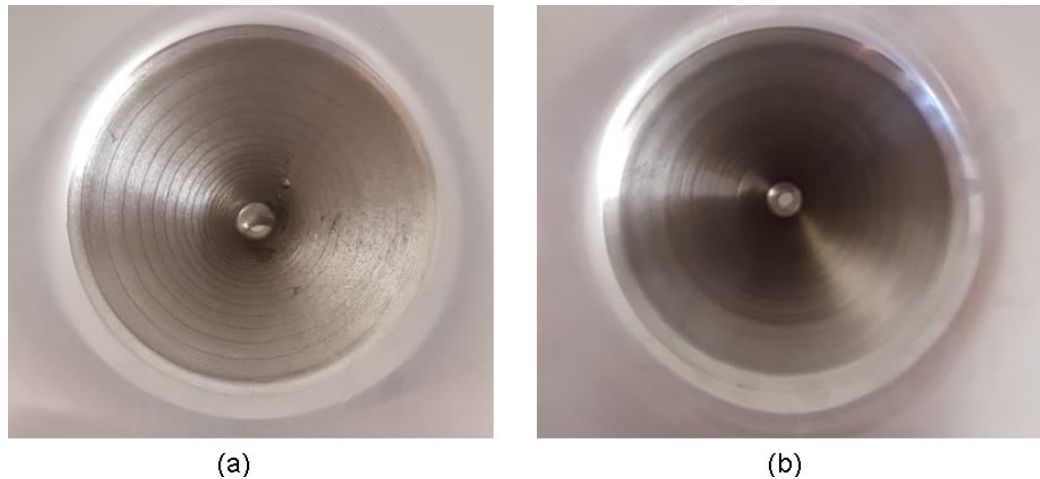


Figura 26: Peças estampadas, mesma rotação, lubrificação diferente. Legenda: (a) Óleo SAE 80W; (b) Óleo SAE 80W + 10% em peso de grafite 200nm.

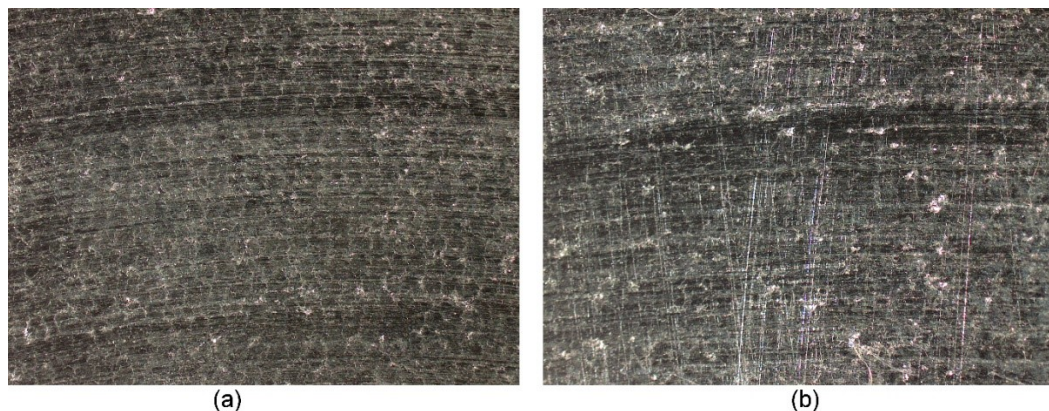


Figura 27: Análise microscópica influência do lubrificante no acabamento da peça estampada. Legenda: (a) Óleo SAE 80W; (b) Óleo SAE 80W + 10% em peso de grafite 200nm.

Ao analisar a Figura 26, é possível notar melhor acabamento resultante na peça (b). Ambas não experimentaram fratura, mas o ensaio realizado sem adição do grafite manifesta mais marcas de contato, causadas pelo atrito da ferramenta contra a chapa na execução da trajetória de fabricação. A Figura 27(a) evidencia esse comportamento, pois é possível reconhecer na vista ampliada as marcas radiais deixadas pela ferramenta no decorrer do ensaio. Além disso, em (b) é possível notar menos marcas circulares, deixadas pela rotação da ferramenta no mesmo ponto ou reprocesso.

Assim como nos ensaios de rotação, foram medidos os parâmetros de rugosidade superficial de ambas as amostras, bem como as temperaturas da chapa durante os ensaios. Os resultados estão dispostos nos gráficos das Figuras 28 e 29 e organizados nas Tabelas 10 e 11, que se encontram abaixo.

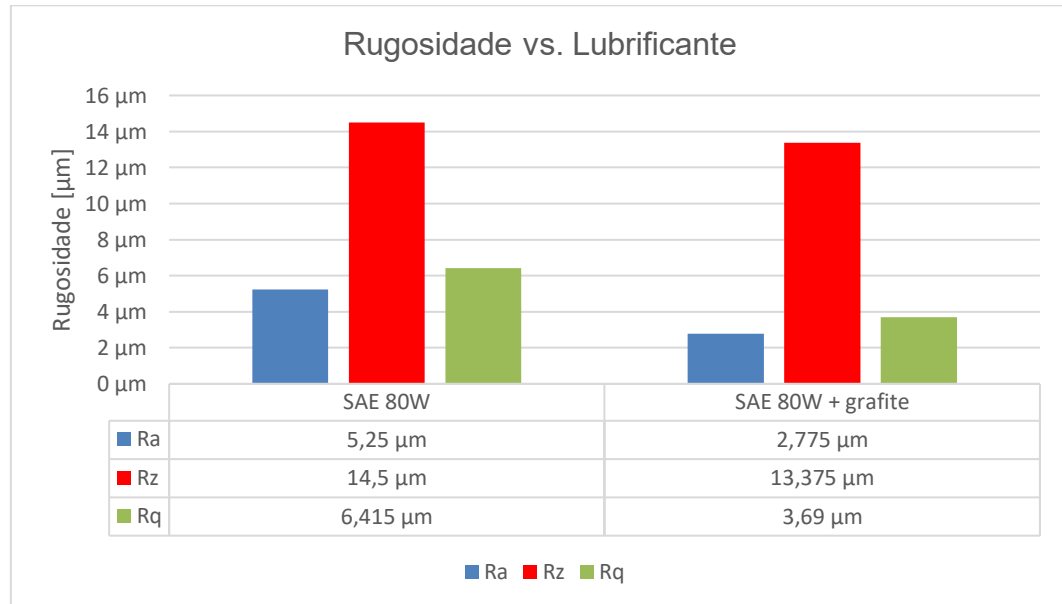


Figura 28: Comparativo de rugosidade entre os dois métodos de lubrificação.

Tabela 10: Valores de rugosidade para os ensaios considerando a adição de grafite ao lubrificante.

		R_a	R_z	R_q
SAE 80W	1	5,2 µm	18 µm	7,33 µm
	2	4,8 µm	14,5 µm	5,73 µm
	3	5,7 µm	14,5 µm	7,1 µm
	4	5,25 µm	14,5 µm	6,415 µm
	5	5,25 µm	14,5 µm	6,415 µm
	Média	5,25 µm	14,5 µm	6,415 µm
	Desvio padrão	0,319 µm	1,565 µm	0,634 µm
SAE 80W + grafite	1	2,6 µm	13,5 µm	3,4 µm
	2	3,8 µm	15 µm	5,23 µm
	3	2,5 µm	12 µm	3,22 µm
	4	2,775 µm	13,38 µm	3,69 µm
	5	2,2 µm	13 µm	2,91 µm
	Média	2,775 µm	13,38 µm	3,69 µm
	Desvio padrão	0,61 µm	1,083 µm	0,906 µm

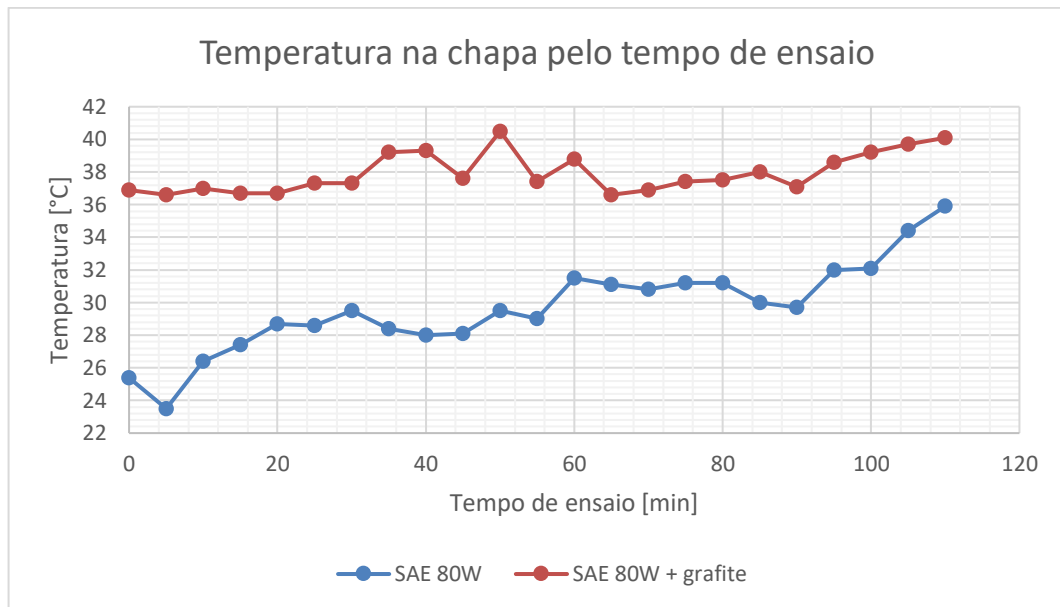


Figura 29: Medições de temperaturas nos ensaios com diferentes lubrificantes.

Tabela 11: Valores médios de temperatura para os ensaios com diferentes lubrificantes.

	SAE 80W	SAE 80W + grafite
Média	29,670 °C	37,930 °C
Desvio padrão	2,743 °C	1,218 °C

Primeiramente, os valores médios de rugosidade diminuem com a adição de rugosidade, confirmando o aspecto visual mais liso (textura) e melhor acabamento superficial. A título de exemplo, e de forma análoga, o parâmetro Ra foi reduzido em mais de 47%.

Observa-se também um aumento médio de 27,84% na temperatura com a adição de grafite. Isso pode ser explicado sob um ponto de vista de conservação de energia, isto é, como menos energia foi dispendida para alterar a superfície da peça durante estampagem com a adição do grafite, mais energia pode então ser transformada em calor. Novamente, os valores de temperatura se aproximam dos valores ambientes, igualmente aos testes com rotações diferentes.

5. CONCLUSÕES

A partir deste trabalho, pode-se concluir que o aço austenístico AISI 316L apresentou boa conformabilidade para os parâmetros testados, já que em nenhum ensaio foi experimentada a ruptura.

Além disso, o material também apresenta boa ductilidade mediante as suas curvas características de escoamento, característica dos aços austenísticos e essencial para fabricação por deformação plástica. No entanto, o material apresentou um leve comportamento anisotrópico médio, mas grande variação entre as diferentes orientações planares, comportamento indesejável.

À medida que a rotação cresce, maior a energia associada ao processo, portanto maiores devem ser os níveis de deformação, e conseqüentemente pior o acabamento da peça.

A rugosidade tem relação direta com a rotação, mas não proporcional. Ou seja, o aumento de deformação diminui com o aumento da rotação. Por consequência, a energia do processo que não está proporcionalmente se transformando em deformação, deveria estar se transformando em calor. As medições de temperatura não são consistentes e, portanto, não comprovam essa teoria.

A adição de grafite, por outro lado, promove uma melhora de acabamento, evidente com a redução dos parâmetros de rugosidade. Há um aumento nas temperaturas médias com a adição do grafite, que pode ser explicado pela teoria da conservação e transformação da energia.

Em ambos os casos de variação de parâmetros estudados, a piora do acabamento pode ser explicada pelo aumento de cisalhamento entre chapa e ferramenta, evidenciadas com o aumento da quantidade de marcas deixadas pela ferramenta na chapa ao percorrer sua trajetória bem como o aumento proporcional do desgaste da ferramenta de corte.

Os valores de temperatura medidos estão próximos de uma condição média ambiental. O aumento de temperatura esperado nas chapas era maior e portanto o método de medição de temperatura não se mostrou adequado. O equipamento deve

ser configurado de acordo com a emissividade do corpo ao qual pretende-se medir a temperatura e este parâmetro depende da própria temperatura, do acabamento da superfície, se tem ou não sujeira e até mesmo a cor pode influenciar. Assim, não é indicado este método.

Para o SPIF é, portanto, desejável que se use rotações baixas, já que seu aumento influencia negativamente a qualidade da peça final e pode comprometer sua conformabilidade. A adição de grafite também se mostrou positiva nos testes.

6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Depois de desenvolvido este trabalho, observou-se que novos estudos podem ser conduzidos. Sugere-se alguns projetos, como, para melhor avaliar as variações dos parâmetros de ensaios na conformabilidade e acabamento da peça estampada.

Adicionar a medição de cargas triaxiais durante os ensaios.

Fazer um estudo comparativo entre diferentes materiais.

Utilizar um scanner 3D para mapear a geometria resultante e verificar sua conformidade geométrica em relação ao modelo CAD projetado

Utilizar outras estratégias de estampagem incremental como a de ponto duplo com matriz, tanto positiva quanto negativa, para verificar influência no acabamento da peça.

Avaliar a influência de outros parâmetros como diâmetro da ferramenta de estampagem, diferentes ângulos de parede ou passo vertical.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 6892; **Materiais Metálicos – Ensaio de Tração Parte 1: Métodos de ensaio à temperatura ambiente.** Rio de Janeiro, 2018

ABNT NBR ISO 4287 2002; **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.** 2002

Allwood, J.; Jackson, K. **An introduction to incremental sheet forming in Cambridge.** In: CMI workshop on sandwich sheets, 21st June. 2005.

Attanasio A.; Ceretti E. Giardini C. **Optimization of tool path in two points incremental forming,** Journal of Materials Processing Technology, v. 135, 2006.

Castelan, Jovani. **Estampagem incremental do titânio comercialmente puro à aplicação em implante craniano.** 2010.

Castelan, Jovani. —**Estampagem incremental do alumínio série 1000.** II 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.

Duflou, J.R. et al. **Experimental study on force measurements for single point incremental forming.** Journal of Materials Processing Technology, p. 62 – 72, 2007.

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

Esposte, P.M.C. **Estampagem Incremental em chapa de aço inoxidável AISI 304 utilizando ferramentas esféricas com a peça submersa em lubrificante mineral integral com aditivos de extrema pressão,** 2018

Hirt, G. et al. **Forming strategies and process modelling for CNC incremental sheet forming.** CIRP Annals-Manufacturing Technology, v. 53, n. 1, 2004.

Hirt, G.; Junk, S.; Chouvalova, I. **Forming Strategies and Tools in Incremental Sheet Forming.** Proceedings of the 10th International Conference on Sheet Metal – SHEMET 2003, 14-16 April 2003, Jordanstown, UK.

- Hirt, G.; Ames, J.; Bambach, M. **Basic Investigation into the Characteristics of dies and support tools used in CNC-Incremental Sheet Forming**. Proceedings of the International Deep Drawing Research Group Conference (IDDRG), 2006: 341-348p
- Hirt, G. *et al.* **Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation**. Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP), Saarland University, Germany, p. 12, 2005.
- Jeswiet, J., Hagan, E. **Rapid Proto-typing of a Headlight with Sheet Metal**, Proceedings of Shemet, April 2001, pp 165-170.
- Jeswiet, J. *et al.* **Asymmetric single point incremental forming of sheet metal**. CIRP Annals-Manufacturing Technology, v. 54, n. 2, 2005.
- Jeswiet, J. *et al.* **Metal forming progress since 2000**. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 1, n. 1, 2008.
- MACHADO, Á. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009.
- Martins, P. A. F. *et al.* **Theory of single point incremental forming**, CIRP Annals-Manufacturing Technology, v. 57, n. 1, p. 247–252, 2008.
- Martins, P.A.F., Kwiatkowski, L., Franzen, V., *et al.*, **"Single point incremental forming of polymers"**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 58, p. 229-232, 2009.
- Rauch, M *et al.* **A new approach for toolpath programming in Incremental Sheet Forming**, Int J Mater Form , Supl 1, Springer/ESAFORM, 2008
- Rauch M, HASCOET J-Y, HAMANN J-C, PLENEL Y. **Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications**. Comput Aided Des 2009; 41(12):877–85.
- Scharffer, Lirio. **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
- Sena, José Ilídio Velosa de. **Estampagem incremental: Um novo conceito de produção**. 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.
- Skjødt, M., Bay, N., & Lenau, T. A. **Rapid Prototyping by Single Point Incremental Forming of Sheet Metal**, 2008