



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia



Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL:
INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO E DO INCREMENTO VERTICAL DA FERRAMENTA
NA ESTAMPABILIDADE DO ALUMÍNIO AA1200-H14**

Dionatan de Souza Britto

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre
2023

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

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL:
INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO DA FERRAMENTA E DO INCREMENTO VERTICAL
NA ESTAMPABILIDADE DO ALUMÍNIO**

Dionatan de Souza Britto
Engenheiro Mecânico

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

Área de concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2023

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

Orientador: Prof. Dr. Lirio Schaeffer
PPGE3M/UFRGS

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Daniel Fritzen - UNISATC

Prof. Dr. Pedro Carlos Hernandez Junior - IF SUL-RIO-GRANDENSE

Prof. Dr. Rafael Gustavo Schreiber - IFSC Lages

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni
Coordenador do PPGE3M

Ao meu pai Iraçu Britto

*(in memoriam) por todo o seu
apoio e incentivo, infelizmente
não poderemos dividir essa
conquista, mas onde estiver, sei
que está orgulhoso.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Lirio Schaeffer, orientador desta dissertação, por sua dedicação em todo período do desenvolvimento deste trabalho, por suas sugestões, correções e seu apoio.

À minha esposa, Danniella Britto e meu filho Arthur Britto, pela compreensão, companhia e incentivo em todos os dias e noites de estudo.

Aos senhores Antonio Pires e Francioni Pinheiro da empresa Maxiforja Componentes Automotivos Ltda, pela ajuda e contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

Ao colega Rafael Gustavo Schreiber, por contribuir ativamente com sua experiência e orientação desde a etapa inicial do trabalho.

Ao colega Andrison Rodrigues Teixeira, proprietário da empresa G1 Equipamentos, por gentilmente disponibilizar seu centro de usinagem CNC para o desenvolvimento dos experimentos referentes a este trabalho.

Ao coordenador Diego Quoos do SENAI Ney Damasceno Ferreira por gentilmente disponibilizar o centro de usinagem CNC para o desenvolvimento dos experimentos referentes a este trabalho.

A empresa Gestamp por disponibilizar seus equipamentos para a realização de alguns dos ensaios.

"Se cheguei até aqui foi porque me apoiei no ombro de gigantes."

Sir Isaac Newton.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
SÍMBOLOS GREGOS	XIV
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 JUSTIFICATIVA.....	18
1.2 OBJETIVO GERAL.....	18
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO.....	19
2.1.1 Ensaios de material.....	21
2.1.2 Curva Limite de Conformação (CLC).....	25
2.2 PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	27
2.2.1 Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF).....	28
2.2.2 Estampagem Incremental por dois pontos (TPIF).....	29
2.2.3 Estampagem incremental de múltiplos passes.....	32
2.3 GEOMETRIA DE PEÇA PARA ESTAMPAGEM INCREMENTAL E SUAS LIMITAÇÕES.....	33
2.4 FERRAMENTA DE ESTAMPAGEM incremental.....	36
2.5 ROTAÇÃO DA FERRAMENTA (S).....	37
2.6 INCREMENTO VERTICAL DA FERRAMENTA (Δ_z).....	38
2.7 LUBRIFICAÇÃO NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	39
2.8 LIMITEs DE DEFORMAÇÃO NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	40
2.9 TENSÕES NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	42
2.10 PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS (DoE).....	45
3 MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS CHAPAS DE ALUMÍNIO AA1200-H14.....	47
3.2 DIMENSIONAMENTO DOS CORPOS DE PROVA PARA ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	50
3.3 LUBRIFICANTE UTILIZADO.....	51
3.4 FERRAMENTA UTILIZADA.....	52
3.5 DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO.....	52
3.6 DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	53
4 ANÁLISE EXPERIMENTAL	56
4.1 ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	56
4.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARAMETROS NA ESTAMPABILIDADE DO ALUMÍNIO AA1200-H14.....	61
4.3 ANÁLISE DE OTIMIZAÇÃO DE RESPOSTA.....	63
5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	65

6	CONCLUSÕES	67
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
8	REFERÊNCIAS.....	69
	ANEXOS	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de Estampagem Convencional.	17
Figura 2: Propriedades mecânicas em função do tipo de liga de alumínio.	20
Figura 3: Máquina de ensaio de tração.	21
Figura 4: Corpo de prova para ensaio de tração: (a) Antes do ensaio e (b) Após o ensaio.	21
Figura 5: Curva de Engenharia “Tensão x Deformação relativa”	22
Figura 6: Curva de engenharia, curva verdadeira e curva corrigida para ensaio de tração	24
Figura 7: Corpos de prova utilizados no ensaio Nakajima	25
Figura 8: Representação do círculo gravado na chapa e a elipse formada após a deformação.	25
Figura 9: CLC de Alumínio, Aço e Latão.	27
Figura 10: Máquina de Estampagem Incremental AMINO.	28
Figura 11: Representação Esquemática de SPIF.	29
Figura 12: TPIF com matriz positiva: (a) Situação inicial e (b) Situação final.	29
Figura 13: TPIF com matriz negativa: (a) Situação inicial e (b) Situação final. Fonte: Adaptado de CASTELAN, 2010.	30
Figura 14: TPIF com matriz parcial: (a) Situação inicial e (b) Situação final.	30
Figura 15: Equipamento F3T dedicado ao processo TPIF com apoio genérico móvel.	31
Figura 16: TPIF com apoio móvel: (a) Posicionamento dos robôs e (b) Posicionamento das ferramentas.	31
Figura 17: Processo MSPIF e o efeito de encruamento da chapa a cada passe.	32
Figura 18: Estampagem Incremental de Múltiplos Passes com TPIF: (a) Estágios do processo e (b) Pré-forma e forma final do componente estampado.	33
Figura 19: Redução da espessura de parede.	34
Figura 20: Principais parâmetros do processo de Estampagem Incremental por SPIF.	34
Figura 21: Estampagem incremental utilizando como lubrificante graxa convencional.	39
Figura 22: Comparação entre FLC e o FFLD, AI S, LONG H, 2019.	41
Figura 23: Estratégia 1: Estampagem Convencional - Estiramento do material na ponta livre (a), Estricção em um único local (b), Fratura no local de estricção (c); Estratégia 2: Estampagem Incremental - Estiramento localizado na seção AA (d), Estiramento em diferentes seções (e), Material conformado com maior comprimento sem fratura (f).	42
Figura 24: Área de contato entre ferramenta e peça no processo SPIF (a) e tensões principais em um elementos de volume na chapa (b), CHANG et al. 2019.	43
Figura 25: Curva de engenharia “Tensão x Deformação” para alumínio AA1200-H14 para ensaio de tração.	48
Figura 26: Curva de escoamento para alumínio AA1200-H14.	49
Figura 27: Topografia do corte das amostras (cotas em mm).	50
Figura 28: Posicionamento da amostra no dispositivo (a) Amostras cortadas a laser (b).	50
Figura 29: Diagrama de blocos com as etapas de desenvolvimento.	51
Figura 30: Ferramenta de ponta semiesférica de 10 mm de diâmetro.	52
Figura 31: Ferramentas para estampagem incremental.	52
Figura 32: Fixação da ferramenta para estampagem incremental e amostras.	53

Figura 33: Dimensões do hiperboloide (a) e Trajetória da ferramenta no experimento (b)	53
Figura 34: Trajetória da ferramenta nos experimentos de Estampagem Incremental	54
Figura 35: Estampagem Incremental das amostras de alumínio AA1200-H14 no centro de usinagem CNC	54
Figura 36: Perfil do hiperboloide estampado	55
Figura 37: Variação de espessura na chapa estampada	58
Figura 38: Início da trinca nos ensaios 1 a 9.....	58
Figura 39: Início da trinca nos ensaios 10 a 18.....	59
Figura 40: Relação de profundidade da trinca (h) e rotação (S) nos ensaios	60
Figura 41: Relação de profundidade da trinca (h) e incremento vertical (Δ_z).....	60
Figura 42: Reta Limite de Fratura (RLF) para os 18 experimentos com ferramenta de diâmetro $df = 10$ mm	61
Figura 43: Efeitos principais para altura em que ocorre a trinca (mm), do incremento vertical Δz (mm) e rotação da ferramenta N (rpm).	62
Figura 44: Gráfico de interação para altura em que ocorre a trinca (mm), incremento vertical Δz (mm) e rotação da ferramenta N (rpm).	63
Figura 45: Gráfico de otimização de resposta para altura h (mm), incremento vertical Δz (mm) e rotação da ferramenta N (rpm).	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Nomenclatura e simbologia das transformações estruturais das ligas de alumínio.	20
Tabela 2: Tensões principais e tensões médias no estado plano de deformações em SPIF, BHATTACHARYA, A. et al 2011.	43
Tabela 3: Propriedades do material.....	48
Tabela 4: Resultado da altura h (mm) dos experimentos de estampabilidade em SPIF.....	55
Tabela 5: Resultado dos experimentos de estampabilidade em SPIF (d)	57

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica;
ANOVA	Análise de Variância;
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais;
CLC	Curva Limite de Conformação;
CNC	Comando Numérico Computadorizado;
DoE	(<i>Design of Experiments</i>) Projeto e Análise de Experimentos;
F3T	Tecnologia Ford de Fabricação de Formas Livres (<i>Ford FreeformFabrication Technology</i>);
HRC	Dureza Rockwell C (<i>Hard Rockwell C</i>);
HSS	Aço Rápido (<i>High Speed Steel</i>);
ISO	Organização Internacional para Padronização (<i>International Organization for Standardization</i>);
MSPIF	Estampagem Incremental de Ponto Único por Múltiplos Passes (<i>MultiSingle Point Incremental Forming</i>);
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora;
PPGE3M	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada;
RLF	Reta Limite de Fratura;
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automotivos (<i>Society of AutomotiveEngineers</i>);
SPIF	Estampagem Incremental de Ponto Único (<i>Single Point IncrementalForming</i>);
TPIF	Estampagem Incremental por Dois Pontos (<i>Two Points IncrementalForming</i>);
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Velocidade de avanço da ferramenta	(mm/min)
A	Alongamento	(%)
A_0	Área inicial da seção transversal do corpo de prova para ensaio de tração	(mm ²)
A_i	Área instantânea da seção transversal do corpo de prova para ensaio de tração	(mm ²)
b_0	Largura inicial do corpo de prova para o ensaio de tração	(mm)
d	Diâmetro do círculo gravado na chapa - para análise das deformações	(mm)
d_1	Comprimento da elipse - obtida pela deformação do círculo gravado na chapa para análise das deformações	(mm)
d_2	Largura da elipse - obtida pela deformação do círculo gravado na chapa para análise das deformações	(mm)
d_f	Diâmetro da ferramenta de Estampagem Incremental	(mm)
d_m	Distância de medição	(mm)
F	Força	(S)
h	Altura em que ocorre a trinca	(mm)
k_f	Tensão de Escoamento	(N/mm ²)
l_0	Comprimento inicial do corpo de prova para o ensaio de tração	(mm)
l_1	Comprimento final do corpo de prova para o ensaio de tração	(mm)
l_c	Comprimento paralelo do corpo de prova para o ensaio de tração	(mm)
S	Rotação da ferramenta	(rpm)
R_c	Raio crítico da ferramenta de Estampagem Incremental	(mm)
R_f	Raio da ferramenta	(mm)
s_0	Espessura inicial da chapa	(mm)
s	Espessura final da chapa	(mm)
v	Velocidade de avanço na máquina de ensaio de tração	(mm/s)
v_0	Volume inicial	(mm ³)
v_1	Volume final	(mm ³)

SÍMBOLOS GREGOS

α	Razão de tensão	(-)
β	Razão de deformação	(-)
ΔT	Variação de temperatura na superfície da chapa	(°C)
Δz	Deslocamento vertical da ferramenta	(mm)
ε	Deformação relativa	(%)
ε_s	Deformação relativa de espessura	(%)
φ	Deformação verdadeira	(-)
φ_1	Deformação verdadeira no comprimento	(-)
φ_2	Deformação verdadeira na largura	(-)
φ_3	Deformação verdadeira na espessura	(-)
φ_{eq}	Deformação verdadeira equivalente	(-)
Λ	Ângulo de parede de chapa com o eixo vertical	(°)
Ψ	Ângulo de parede de chapa com o eixo horizontal	(°)
Ψ'	Ângulo inicial de parede de chapa com o eixo horizontal	(°)
σ	Tensão de engenharia	(N/mm ²)
$\sigma_{0,2}$	Tensão de escoamento para $\varepsilon=0,2$	(N/mm ²)
σ_1	Tensão principal máxima	(N/mm ²)
σ_2	Tensão principal intermediária	(N/mm ²)
σ_3	Tensão principal mínima	(N/mm ²)
σ_{eq}	Tensão equivalente	(N/mm ²)
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima admissível	(N/mm ²)
σ_m	Tensão média	(N/mm ²)

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o processo de Estampagem Incremental, com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros, rotação (S) e incremento vertical (Δ_z) da ferramenta na estampabilidade do alumínio AA1200-H14, com espessura de 0,8 mm. A metodologia deste estudo consiste na execução e análise de duas séries de experimentos de Estampagem Incremental do material analisado, o procedimento foi realizado por meio da fabricação de peças com formato de hiperboloide, estampadas a partir de geratrizes com formato hexagonal. O processo foi realizado em um centro de usinagem CNC variando a rotação (S) e o incremento vertical (Δ_z) da ferramenta, totalizando 18 experimentos. Este estudo apresenta a relação entre a profundidade em que ocorre a trinca (h) na direção Z, incremento vertical (Δ_z) e rotação da ferramenta (S) em cada ensaio, onde é possível observar que utilizando o conjunto de parâmetros $\Delta_z = 0,5 \text{ mm}$ e $N = 800 \text{ rpm}$, se obteve as deformações mais acentuadas $\varphi_1 = 0,814$. Para a avaliação da influência dos parâmetros citados na estampabilidade do material foi utilizada a técnica de Projeto e Análise de Experimentos (DoE), aplicando a ferramenta estatística ANOVA, com auxílio do software Minitab.

Palavras chave: Estampagem Incremental, Influência da rotação (S), incremento vertical (Δ_z), Alumínio AA1200-H14, DoE, ANOVA.

ABSTRACT

This work presents a study on the Incremental Sheet Forming process, with the objective of evaluating the influence of the parameters, rotation speed (S) and Step Down (Δz) of the tool on the formability of AA1200-H14 aluminum with a thickness of 0.8 mm. The methodology of this study consists of the execution and analysis of two series of experiments of Incremental Forming of the analyzed material, the procedure is carried out through the manufacture of pieces with the shape of hyperboloids, formed from generatrices with hexagonal shape. The process is carried out in a CNC machine varying the rotation (S) and the vertical increment (Δz) of the tool, totaling 18 experiments. The study presents the relationship between the depth at which the crack occurs (h) in the Z direction, vertical increment (Δz) and tool rotation (S) in each test, where it is possible to observe that using the set of parameters $\Delta z = 0, 5$ mm and $N = 800$ rpm, the most pronounced deformations were obtained $\varphi_1 = 0.814$. For the evaluation of the influence of the mentioned parameters on the formability of the material, the Design and Analysis of Experiments (DOE) technique was used, applying the ANOVA statistical tool with the help of the Minitab software.

Keywords: Incremental stamping, Influence of parameters, Aluminum AA1200-H14, DoE, ANOVA.

1 INTRODUÇÃO

Os processos de conformação mecânica são amplamente utilizados na indústria, devido à sua versatilidade, capacidade produtiva e baixo custo de operação. A estampabilidade dos materiais em forma de chapas e o volume de produção são fatores primordiais para viabilizar o processo. Para a fabricação em série de grandes lotes de peças, utiliza-se a estampagem convencional, em situações com menores quantidades de peças, como prototipagem, amostras iniciais de validação, modelos padrão e próteses médicas a Estampagem Incremental é o processo utilizado.

O processo de estampagem convencional consiste no embutimento e estiramento de uma chapa entre um punção e uma matriz. A matéria prima para a estampagem é proveniente de um processo de laminação que pode ser realizado a frio ou o quente na siderúrgica e posteriormente condicionada em forma de bobina que em seguida passa pelo processo de corte dando forma a geratriz que será estampada. A chapa cortada é posicionada sobre a matriz de estampagem e levemente fixada pelo prensa chapas, com o intuito de evitar defeitos por trincas ou rugas na peça após a conformação conforme ilustrado na Figura 1.

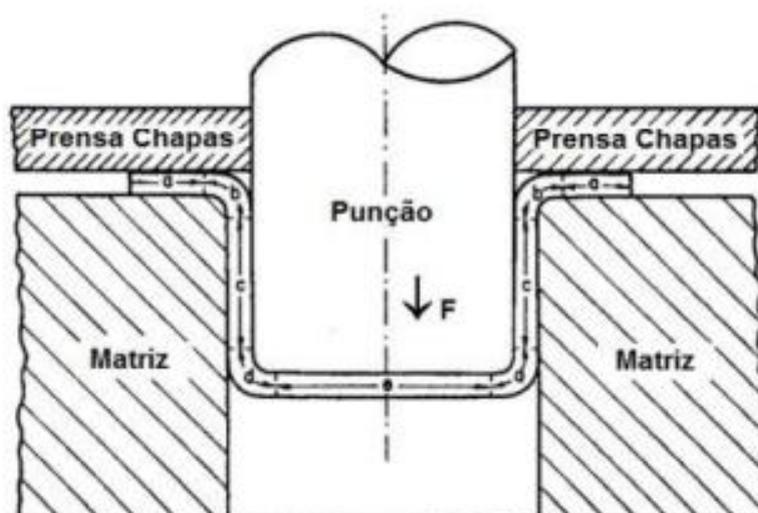


Figura 1: Processo de Estampagem Convencional.
Fonte: Galdino, 2010.

Diversos estudos a cerca da influência dos parâmetros de processo na estampabilidade dos materiais durante a Estampagem Incremental foram desenvolvidos nos últimos anos, como o trabalho de TEIXEIRA A. R. 2019, que analisou a influência da velocidade de avanço e velocidade de rotação da ferramenta na estampabilidade do alumínio AA1200-H14 e concluiu que com baixos valores de avanço combinados com rotações mais altas, se obtém maiores deformações do material, assim como nos estudos de ARRUDA 2010 e XU et Al.2013.

1.1 JUSTIFICATIVA

A estampagem incremental é uma alternativa viável do ponto de vista econômico e operacional para prototipagem rápida em diversos segmentos, como indústria automotiva, biomédica, máquinas e equipamentos, entre outros, processo versátil que pode ser executado por meio de máquinas CNC (comando numérico computadorizado) dispensando a necessidade do uso de prensas e matrizes.

O estudo realizado neste trabalho de pesquisa apresenta uma análise da influência da rotação e do incremento vertical da ferramenta na estampabilidade do alumínio puro AA1200-H14, mensurada por meio da medição direta das peças estampadas e também pelo cálculo das deformações. Para a avaliação da influência dos parâmetros na estampabilidade do material foi utilizada a técnica de Projeto e Análise de Experimentos (DoE), aplicando a ferramenta estatística ANOVA com auxílio do software Minitab.

1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise da influência dos parâmetros, incremento vertical (Δz) e rotação da ferramenta (S) na estampabilidade do alumínio puro AA1200-H14, conformando mecanicamente o material por Estampagem Incremental em máquina CNC, com ferramenta de ponta semiesférica e diâmetro de 10 mm, verificando qual parâmetro exerce maior influência na estampabilidade do material, utilizando a técnica de Projeto e Análise de Experimentos (DoE), aplicando a ferramenta de Análise de Variâncias (ANOVA) para a análise da influência dos parâmetros.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho, aplicados na Estampagem Incremental de chapas de alumínio AA1200-H14, estão relacionados a seguir:

- Identificar os parâmetros (incremento vertical Δz e rotação da ferramenta N), de Estampagem Incremental previamente definidos para conformação das amostras;
- Mensurar, por meio de cálculos o parâmetro de maior influência na estampabilidade do material estudado;
- Analisar a influência dos parâmetros (incremento vertical Δz e rotação da ferramenta N) na deformação do material estampado, com auxílio da técnica de Projeto e Análise de Experimentos (DoE), aplicando a ferramenta (ANOVA).

2 REVISÃO DE LITERATURA

Para o desenvolvimento dos experimentos de Estampagem Incremental com o Alumínio puro AA1200-H14 foi necessário realizar revisão de literatura sobre os estudos a cerca da conformação mecânica deste tipo de material, assim como os processos de Estampagem Incremental existentes, relacionando os tipos de ferramentas, principais aplicações, lubrificante utilizados no processo, de forma mais específica, verificar a forma como os parâmetros utilizados na Estampagem Incremental influenciam na estampabilidade do material utilizado no estudo, utilizando a técnica de Projeto e Análise de Experimentos (DoE), aplicando a ferramenta de Análise de Variâncias (ANOVA).

Também foram relacionados os conceitos e as características dos processos de Estampagem Incremental. Para a realização do processo de Estampagem Incremental a chapa a ser conformada deve ser fixada entre uma base e um prensa-chapas, em seguida uma ferramenta com ponta semiesférica realiza a conformação da chapa de acordo com a sua trajetória. Este processo pode ser executado com ou sem rotação da ferramenta.

A seguir será apresentado a caracterização da chapa de alumínio AA1200-H14 são apresentadas as variações do processo de Estampagem Incremental, bem como diversos exemplos de aplicações, máquinas utilizadas, parâmetros de influência, determinação dos limites de deformação e cálculo de tensões.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

Na nomenclatura das ligas de alumínio o primeiro dígito indica a porcentagem de pureza do material, o segundo dígito demonstra o controle de impurezas ou elementos de liga, já o terceiro e o quarto dígito correspondem a fração decimal após a vírgula (COBDEN, 1994), este estudo utiliza-se a liga de alumínio ASTM/ABNT 1200-H14, ou seja, uma liga com 99,00% de pureza, com quantidade de ferro e silício controlada.

Quanto ao “H14”, a letra “H” significa que a liga sofreu tratamento mecânico de encruamento, o primeiro dígito refere-se as operações sofridas e o último dígito apresenta o grau de encruamento. A tabela 1 apresenta o significado da nomenclatura final das ligas de alumínio encruadas.

Tabela 1: Nomenclatura e simbologia das transformações estruturais das ligas de alumínio (HANDBOOK OF ALUMINUM, 1996)

Sufixo de letra	1° Sufixo numérico	2° Sufixo numérico
H	1 - somente deformado a frio	2 - 1/4 duro
	2 - deformação a frio e parcialmente recozido	4 - 1/2 duro
	3 - deformado a frio e estabilizado	6 - 3/4 duro
	4 - deformado a frio e pintado ou envernizado	8 - duro
		9 - extra duro

Dentre as propriedades das ligas do grupo 1XXX, destacam-se o encruamento (deformação a frio), alta capacidade de conformação, alta resistência a corrosão e boa condutibilidade elétrica, utilização em áreas químicas e elétricas, possuindo como representantes as ligas 1100 e 1350.

A liga de alumínio ASTM/ABNT 1200, é considerada uma liga pura, já que o teor de alumínio está na faixa de 99,00%. O valor de resistência a tração oscila entre 68-186 MPa (THE ALUMINUM ASSOCIATION, 1998).

O ensaio uniaxial de tração em temperatura ambiente pode ser utilizado para construção da curva de escoamento de um determinado material metálico, parâmetros como o limite de resistência a tração, limite de escoamento, estrição e ductilidade podem ser obtidos por meio deste método de análise, um dos fatores que influenciam na variação das propriedades mecânicas dos materiais são os elementos de liga. A figura 3 apresenta a variação das propriedades mecânicas de algumas ligas de alumínio com diferentes elementos principais

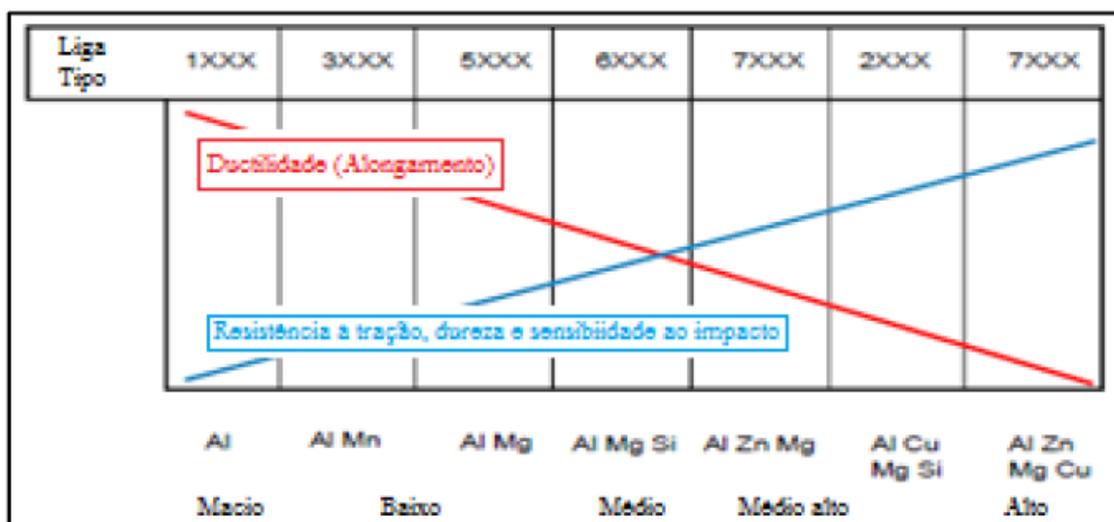


Figura 2: Propriedades mecânicas em função do tipo de liga de alumínio.
Fonte: COBDEN, 1994.

2.1.1 Ensaio de material

O ensaio de tração é o método mais utilizado para a determinação das propriedades mecânicas de chapas metálicas. No procedimento de ensaio, o corpo de prova é fixado em suas extremidades e tracionado por um travessão móvel até sua ruptura. A força aplicada no ensaio é medida por uma célula de carga, sendo o comprimento deslocado medido por um extensômetro. A Figura 3 apresenta os principais elementos da máquina de ensaio de tração.

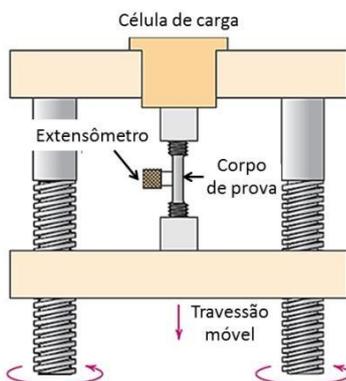


Figura 3: Máquina de ensaio de tração
Fonte: CALLISTER; RETHWISH, 2016

As dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração são determinadas pela norma ABNT NBR ISO 6892-1, variando de acordo com o formato do material a ser ensaiado. A Figura 4(a) e a Figura 4(b) apresentam o formato típico dos corpos de prova de seção retangular antes e após o ensaio de tração, respectivamente.

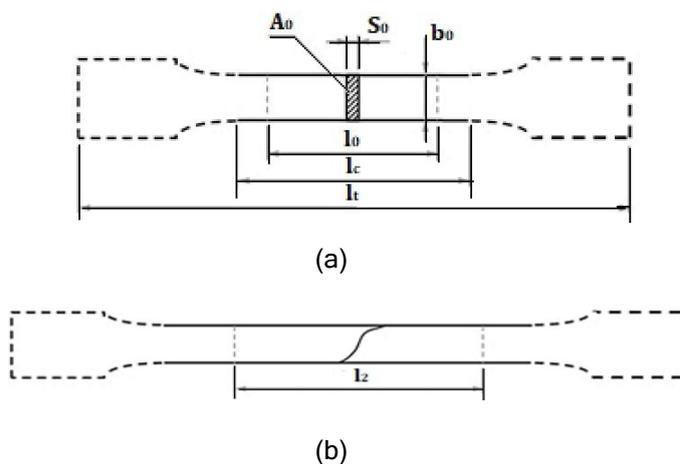


Figura 4: Corpo de prova para ensaio de tração: (a) Antes do ensaio e (b) Após o ensaio

A Figura 4(a) apresenta as dimensões principais dos corpos de prova para ensaio de tração, onde s_0 corresponde à espessura inicial, b_0 à largura inicial, l_0 ao comprimento inicial e A_0 à área inicial da seção transversal do corpo de prova, enquanto que l_c corresponde ao comprimento paralelo do corpo de prova e l_t ao comprimento total.

Após a realização do ensaio de tração o valor do comprimento final l_1 , indicado na Figura 4(b), é utilizado para determinar a deformação relativa ε , conforme Equação 1.

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad \text{Eq.(1)}$$

Onde:

ε = Deformação relativa (%);

l_0 = Comprimento de medida inicial (mm);

l_1 = Comprimento de medida final (mm).

A tensão (σ) no ensaio de tração é calculada pela razão entre a força medida pela célula de carga e a área inicial da seção transversal do corpo de prova, conforme Equação 2.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{Eq.(2)}$$

Onde:

σ = Tensão (N/mm²)

F = Força (N)

A_0 = Área inicial do corpo de prova (mm²)

A partir dos valores de tensão e deformação desde o início do ensaio até o momento da ruptura do corpo de prova é possível determinar a curva de engenharia “Tensão x Deformação” conforme Figura 5.

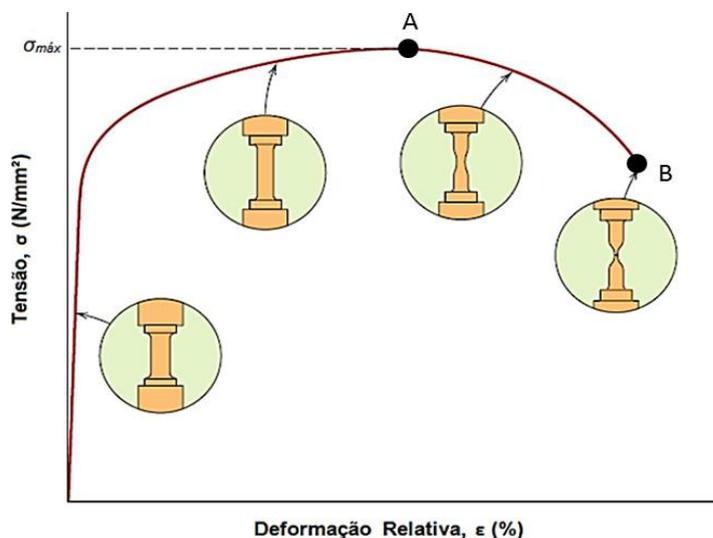


Figura 5: Curva de Engenharia “Tensão x Deformação relativa”
Fonte: CALLISTER; RETHWISH, 2016

Na figura 5 verifica-se que a região inicial do ensaio (representada por uma linha reta) refere-se a deformação elástica do material. Nesta região, se o ensaio for interrompido ocorre recuperação geométrica do corpo de prova. A segunda região (a partir do final da linha reta e início da curvatura) indica o regime plástico caracterizado por deformações permanentes no material. No ponto *A* ocorre a aplicação da tensão máxima admissível $\sigma_{m\acute{a}x}$ e após esse ponto ocorre o fenômeno da estrição, ou seja, a formação de um pescoço no corpo de prova, que diminui sua seção até a fratura no ponto *B*.

No entanto, a tensão baseada na área inicial do corpo de prova não indica com precisão a deformação do material no regime plástico, pois à medida que o material é tracionado sua área diminui. Sendo assim, principalmente para aplicação nos processos de conformação mecânica é mais utilizada a tensão de escoamento verdadeira, considerando a área instantânea, conforme Equação 3.

$$k_f = \frac{F}{A_1} \quad \text{Eq.(3)}$$

Onde:

k_f = Tensão verdadeira (N/mm²)

A_i = Área instantânea da seção transversal do corpo de prova (mm²)

A área do corpo de prova em cada instante durante o ensaio pode ser obtida pela lei da constância de volume, que estabelece que na conformação o volume inicial (V_0) é igual ao volume final (V_1), ou seja, $V_0 = V_1$, a partir desta definição é possível deduzir a Equação 4.

$$A_1 = \frac{A_0 \cdot s_0}{l_1} \quad \text{Eq.(4)}$$

Principalmente para cálculos na área de conformação mecânica também é usual utilizar a deformação verdadeira (φ), calculada a partir da Equação 5, ao invés da utilização da deformação relativa.

$$\varphi = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \quad \text{Eq.(5)}$$

Onde:

φ = Deformação verdadeira (-)

A Figura 6 indica uma comparação entre a curvas de engenharia, a curva verdadeira e a curva corrigida. Na curva de engenharia o ponto A indica a tensão máxima, onde ocorre a estricção no corpo de prova, enquanto que na curva verdadeira esse mesmo instante é indicado pelo ponto A'. Após o início da estricção, a deformação não é mais uniforme e o estado de tensões nesta região não é uniaxial, mas triaxial. Existem várias abordagens para calcular a tensão corrigida, depois deste ponto. Uma delas (para corpos de prova cilíndricos) é a de Bridgman, que faz algumas hipóteses simplificadoras:

- o contorno do pescoço é circular e permanece circular durante a deformação;
- as deformações permanecem constantes ao longo de cada secção;
- o critério de escoamento de von Mises é válido na região de pescoço.

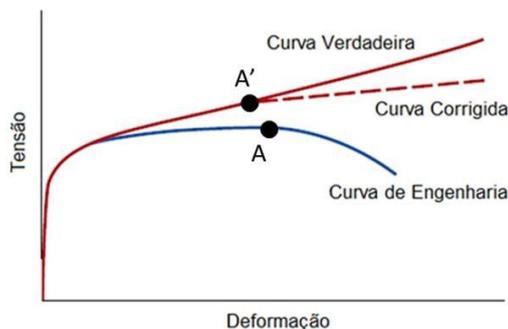


Figura 6: Curva de engenharia, curva verdadeira e curva corrigida para ensaio de tração

Fonte: CALLISTER; RETHWISH, 2016

A partir da curva verdadeira é possível obter os valores de tensão necessários para cada deformação aplicada no material. Em casos de deformações múltiplas (várias etapas de conformação) é possível determinar a tensão necessária em cada estágio considerando o encruamento do material de acordo com a Equação 6 (Equação de Hollomon).

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad \text{Eq.(6)}$$

Onde:

C = Coeficiente de resistência ($\frac{N}{mm^2}$)

n = Coeficiente de encruamento (-).

2.1.2 Curva Limite de Conformação (CLC)

Para determinação da Curva Limite de Conformação (CLC) o Ensaio Nakajima é utilizado, ele estabelece o limite máximo de deformação para a chapa metálica ensaiada. Sendo esta informação utilizada como referência nos processos de Estampagem Convencional. Para realização do ensaio são preparados corpos de prova de chapas na espessura desejada com dimensões padronizadas, conforme indicado na Figura 7.

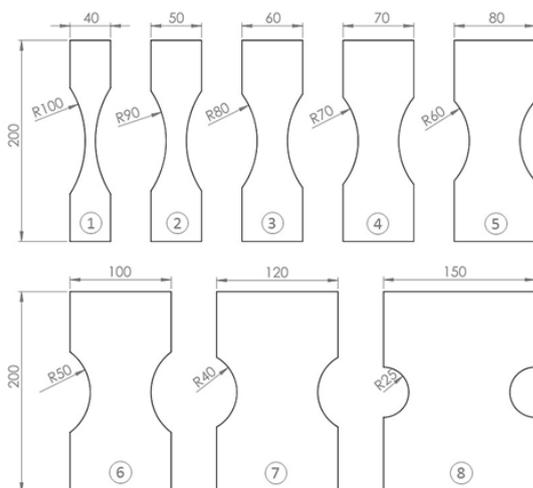


Figura 7: Corpos de prova utilizados no ensaio Nakajima

Os corpos de prova para ensaio Nakajima são cortados com diferentes tamanhos a fim de apresentar diferentes estados de tensão ao serem conformados (FRITZEN, 2012). Estes corpos são marcados por gravação eletroquímica com uma grade de círculos.

Cada corpo de prova é deformado em uma prensa por um punção semiesférico até que ocorra o início da trinca no material. Devido à deformação da chapa, os círculos gravados transformam-se em elipses, e a partir da medição destas, logo ao lado de cada trinca, é possível obter a maior deformação ϕ_1 e a menor deformação ϕ_2 (SCHAEFFER, L., 2004). A Figura 8 apresenta o diâmetro do círculo gravado na chapa d , assim como o comprimento da elipse d_1 e a largura da elipse d_2 .

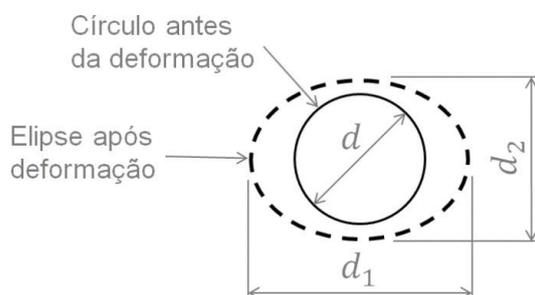


Figura 8: Representação do círculo gravado na chapa e a elipse formada após a deformação

A maior deformação φ_1 (deformação verdadeira no comprimento) é determinada pelo logaritmo natural da razão do comprimento da elipse pelo diâmetro do círculo gravado na chapa, conforme apresentado na Equação 7.

$$\varphi_1 = \ln \frac{d_1}{d} \quad \text{Eq.(7)}$$

Onde:

φ_1 = deformação verdadeira no comprimento (-);

d_1 = comprimento da elipse - obtida pela deformação do círculo gravado na chapa para análise das deformações (mm);

d = diâmetro do círculo gravado na chapa - para análise das deformações (mm).

Enquanto que a menor deformação φ_2 (deformação verdadeira na largura) é determinada pelo logaritmo natural da razão da largura da elipse pelo diâmetro do círculo gravado na chapa, conforme Equação 8.

$$\varphi_2 = \ln \frac{d_2}{d} \quad \text{Eq.(8)}$$

Onde:

φ_2 = deformação verdadeira na largura (-);

d_2 = largura da elipse - obtida pela deformação do círculo gravado na chapa para análise das deformações (mm).

Pela determinação das deformações φ_1 e φ_2 em cada corpo de prova é gerada a CLC, apresentando os limites de deformação para cada estado de tensão no material. Qualquer deformação da chapa localizada abaixo da CLC pode ser suportada pelo material sem que ocorram trincas, enquanto que qualquer deformação acima não poderá ser suportada pelo material. A Figura 9 apresenta Curvas Limite de Conformação para diferentes materiais (alumínio, aço e latão) obtidas nos experimentos de Ali e Edrees (2007).

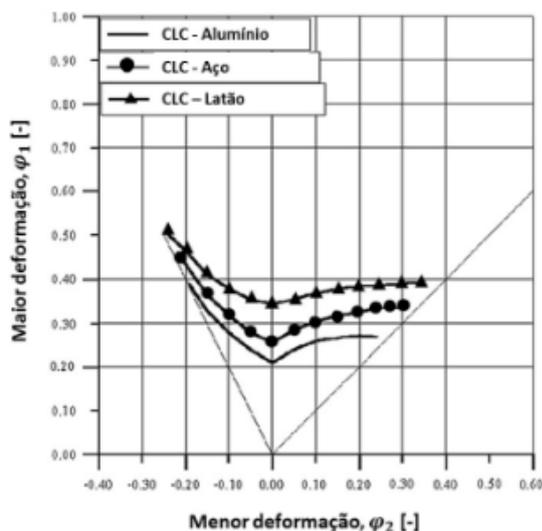


Figura 9: CLC de Alumínio, Aço e Latão
Fonte: ALI; EDREES, 2007

2.2 PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

A Estampagem Incremental tem como objetivo a fabricação de pequenos lotes de peças ou a prototipagem de produtos estampados com elevada flexibilidade e baixos custos de fabricação (LORA, 2014).

Desde a patente do processo em 1967 (LESZAK, 1967), muitos estudos têm sido realizados em todo o mundo para o desenvolvimento do processo de Estampagem Incremental em diversas aplicações, como no desenvolvimento de prótese de crânio em titânio (CASTELAN, 2010), aletas de coletor solar em alumínio (ARRUDA, 2010), peças de material polimérico (MARTINS *et al.*, 2009), peças em aço para a indústria automobilística (PONTICEL, P., 2016), entre outros.

A primeira máquina específica para Estampagem Incremental foi desenvolvida em 1996 no Japão pela *AMINO Corporation*, que depois passou a fornecer equipamentos para a indústria neste seguimento com abrangência mundial (AMINO *et al.*, 2014). Na Figura 10 é apresentada a máquina de Estampagem Incremental desenvolvida pela *AMINO Corporation*.



Figura 10: Máquina de Estampagem Incremental AMINO
Fonte: AMINO *et al.*, 2014

O processo de Estampagem Incremental também pode ser realizado com adaptação de braços robóticos (MEIER; MAGNUS; SMUKALA, 2011) ou de um centro de usinagem CNC (MAXIMILIANO, 2016).

2.2.1 Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF)

A Estampagem Incremental de Ponto Único, também designada pela sigla SPIF (*Single Point Incremental Forming*), conforme indicado na Figura 12, consiste na estampagem progressiva de uma chapa plana de espessura inicial s_0 , pela penetração vertical de uma ferramenta de conformação com ponta esférica e diâmetro d_f . A chapa é apoiada entre o prensa chapas e a placa de apoio. A abertura da placa de apoio determina a área de trabalho da ferramenta de conformação sem haver nenhuma matriz na parte inferior do dispositivo. À medida que a ferramenta de conformação, com velocidade de rotação (S), penetra verticalmente sobre a chapa é realizado um incremento de estampagem na peça (Δz). Durante o processo são realizados diversos incrementos até que a chapa obtenha o formato desejado, sendo as trajetórias da ferramenta normalmente realizadas em um centro de usinagem com Comando Numérico Computadorizado (CNC) (MARTINS *et al.*, 2008).

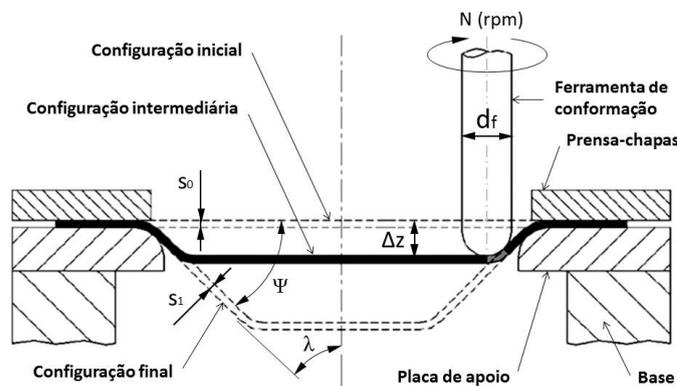


Figura 11: Representação Esquemática de SPIF
Fonte: Adaptado de MARTINS, 2008.

2.2.2 Estampagem Incremental por dois pontos (TPIF)

A Estampagem Incremental por Dois Pontos, designada pela sigla TPIF (*Two Points Incremental Forming*), utiliza além da ferramenta de conformação um apoio na parte inferior da chapa, a fim de conferir melhor precisão dimensional à peça estampada. O processo TPIF pode ser realizado com matriz dedicada (positiva ou negativa) ou ainda com matriz parcial (fixa ou móvel).

No processo TPIF com matriz dedicada positiva, à medida que a chapa é conformada pela ferramenta ocorre o deslocamento do prensa chapas através das guias deslizantes do dispositivo de fixação. A matriz possui o perfil da peça que se deseja conformar e gera uma força de apoio à medida que a ferramenta executa a conformação (CASTELAN, 2010), conforme indicado na Figura 13(a) que indica a situação inicial do processo e na Figura 13(b) que indica a situação final do processo.

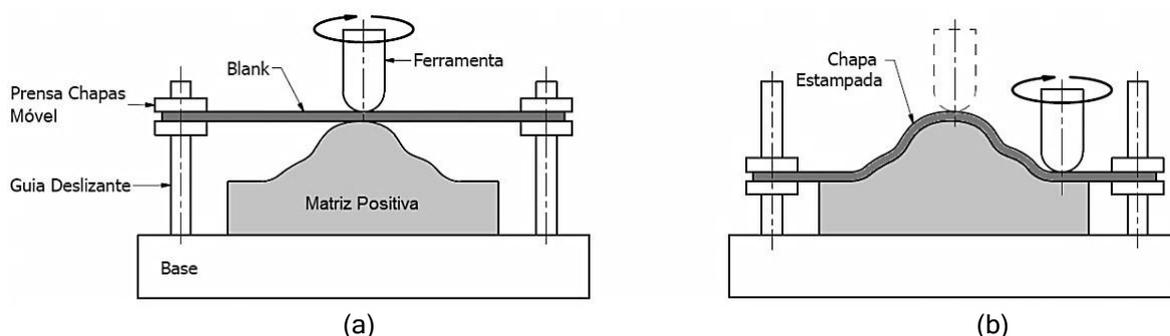


Figura 12: TPIF com matriz positiva: (a) Situação inicial e (b) Situação final
Fonte: Adaptado de CASTELAN, 2010

O processo TPIF com matriz dedicada negativa também possui uma matriz como perfil da peça, no entanto, como a matriz negativa possui perfil não há necessidade de utilizar guias deslizantes, podendo ser utilizado apoio e prensa chapas fixos, conforme indicado na Figura 13(a) que indica a situação inicial do processo e na Figura 13(b) que indica a situação final do processo (CASTELAN, 2010).

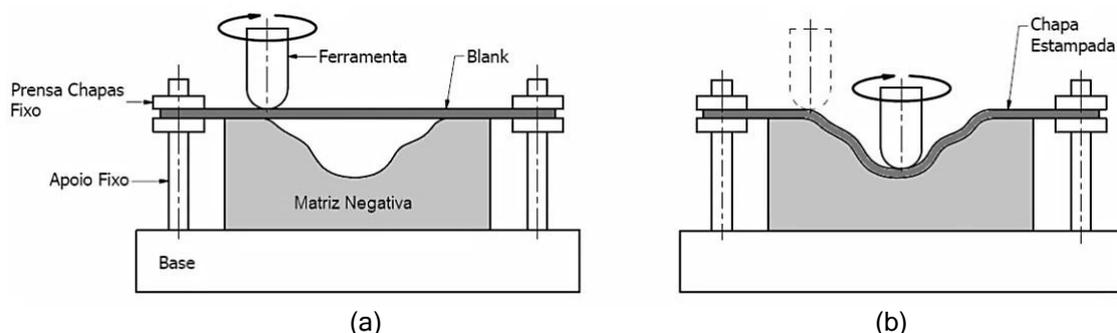


Figura 13: TPIF com matriz negativa: (a) Situação inicial e (b) Situação final. Fonte: Adaptado de CASTELAN, 2010

Apesar do processo TPIF com matriz positiva exigir ferramental de maior complexidade (com partes móveis) quando comparado com o processo com matriz negativa, esse processo necessita de menor força para realizar a estampagem, o que gera menores tensões residuais na chapa e conseqüentemente menor retorno elástico (ARAGHI *et al.*, 2009).

No processo TPIF com matriz parcial fixa à medida que a chapa é conformada pela ferramenta ocorre o deslocamento do prensa chapas através das guias deslizantes do dispositivo de fixação, semelhante ao processo com matriz dedicada positiva. A matriz parcial fixa (com perfil genérico) gera uma força de apoio à medida que a ferramenta executa a conformação e também auxilia na determinação do perfil geométrico final da chapa estampada (MAXIMILIANO, 2016), conforme indicado na Figura 14(a) que apresenta a situação inicial do processo e a Figura 14(b) que apresenta a situação final. Como nesse processo a matriz não possui exatamente o perfil da peça que se deseja conformar, em comparação com o processo de matriz dedicada positiva, este apresenta um apoio de menor complexidade, no entanto com menor precisão dimensional, já que o apoio não se estende por toda região de conformação.

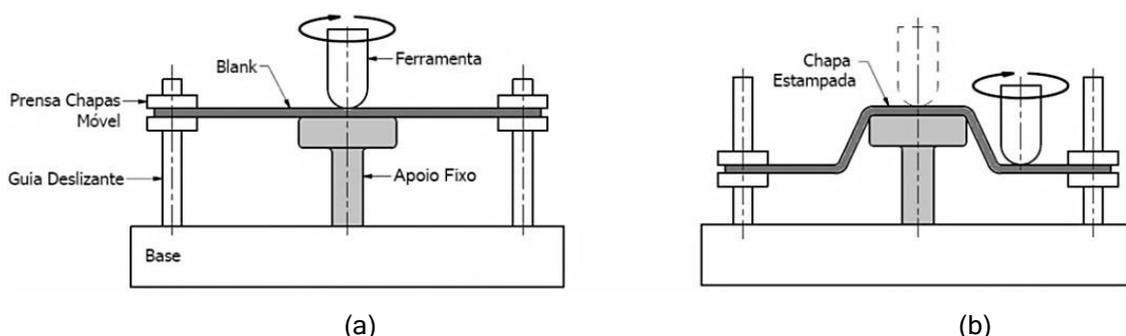


Figura 14: TPIF com matriz parcial: (a) Situação inicial e (b) Situação final. Fonte: Adaptado de MAXIMILIANO, 2016

O processo TPIF também pode ser realizado com um apoio móvel, que se desloca por toda a área de conformação, a fim de conferir maior precisão ao produto estampado, quando comparado ao processo TPIF com matriz parcial. No entanto, há a necessidade de um equipamento dedicado à essa aplicação, diferente dos processos

apresentados anteriormente que podem ser realizados em centros de usinagem CNC. Um exemplo de equipamento utilizado para aplicação deste processo é o F3T (Tecnologia Ford de Fabricação de Formas Livres - *Ford Freeform Fabrication Technology*), conforme indicado na Figura 15. O F3T trata-se de um equipamento com um cabeçote superior movimentando a ferramenta de conformação sobre a chapa metálica e um cabeçote inferior posicionando um apoio móvel (PONTICEL, 2016).

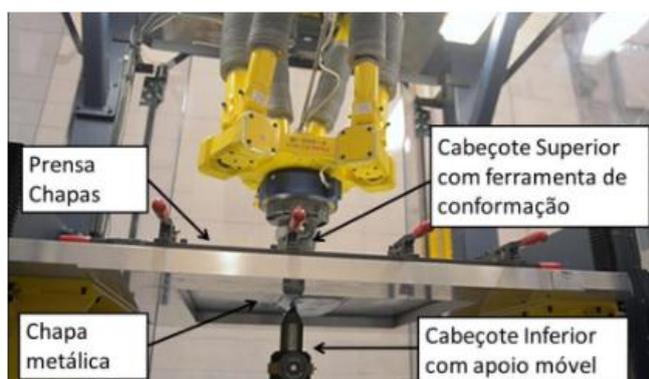


Figura 15: Equipamento F3T dedicado ao processo TPIF com apoio genérico móvel
Fonte: PONTICEL, 2016

Outro exemplo de aplicação de TPIF com apoio móvel envolve utilização de braços robóticos industriais, conforme indicado na Figura 16(a). Neste processo enquanto um braço robótico conduz um punção, o outro braço conduz o apoio móvel de forma sincronizada, conforme indicado na Figura 16(b) (MEIER; MAGNUS; SMUKALA, 2011).

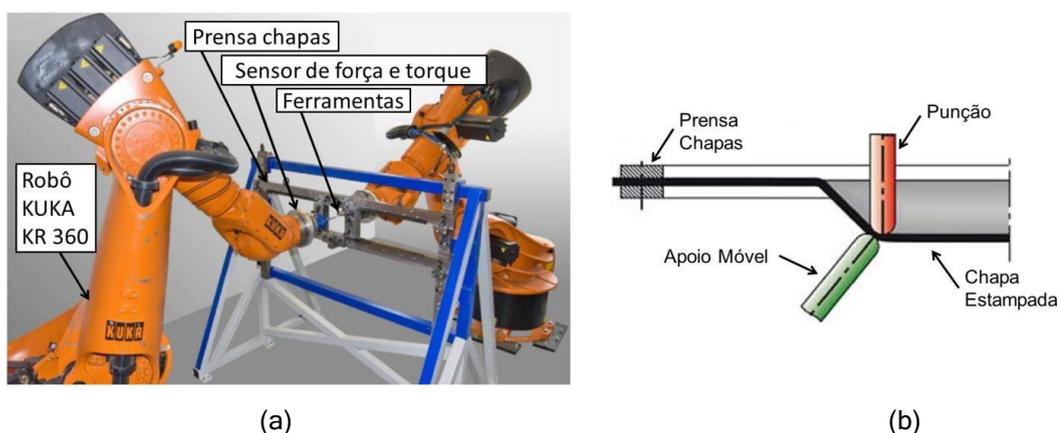


Figura 16: TPIF com apoio móvel: (a) Posicionamento dos robôs e (b) Posicionamento das ferramentas
Fonte: Adaptado de MEIER, MAGNUS, SMUKALA, 2011

Pelo fato dos braços robóticos industriais permitirem movimentos da ferramenta de conformação em seis eixos de movimento, neste processo há grande flexibilidade na conformação de chapas, permitindo a estampagem de perfis complexos.

2.2.3 Estampagem incremental de múltiplos passes

A Estampagem Incremental de Ponto Único por Múltiplos Passes, também designada pela sigla MSPIF (*Multi Single Point Incremental Forming*) é realizada pela estampagem de perfis e ângulos intermediários, a fim de se obter maior estampabilidade do produto final com maior ângulo de parede (DUFLOU *et al.*, 2008).

A Figura 20 apresenta de forma esquemática o processo MSPIF, onde no primeiro estágio é aplicado um incremento na ferramenta com ângulo de parede inicial (ψ') a fim de se obter um perfil intermediário diferente do perfil final. Em seguida são aplicados novos incrementos a fim de se obter no quarto estágio o perfil desejado e o ângulo final de parede (ψ). No final do processo a espessura final (s_1) é menor que a espessura inicial (s_0). Conseqüentemente o encruamento da chapa aumenta a cada passe, bem como a força necessária para realização da estampagem, conforme indicado no detalhe A da Figura 17 (CASTELAN, 2010).

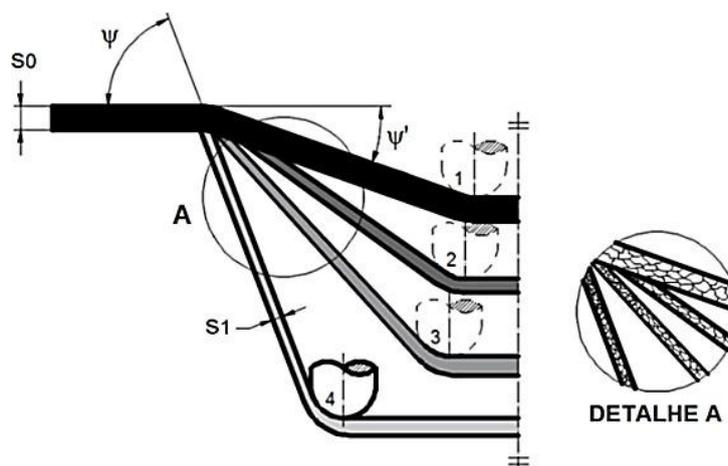


Figura 17: Processo MSPIF e o efeito de encruamento da chapa a cada passe
Fonte: Adaptado de CASTELAN, 2010

A estampabilidade de peças obtidas pelo processo de Estampagem Incremental pode ser ainda maior, com ângulos de parede maiores se forem realizados passes múltiplos definidos por perfis intermediários, alternando a trajetória da ferramenta em movimentos descendentes e ascendentes (HIRT *et al.*, 2004).

A Figura 18(a) mostra a aplicação de múltiplos passes em um processo com TPIF (utilizando prensa chapas móvel e matriz parcial), em que no primeiro estágio foi realizada a obtenção de uma pré-forma com ângulo inicial ψ' e trajetória descendente da ferramenta. No segundo estágio é realizada uma trajetória ascendente e na terceira etapa uma nova trajetória descendente obtendo a forma final com o ângulo final desejado. Na Figura 18(b) é apresentado o desenho da pré-forma e da forma final da peça estampada neste experimento (pirâmide com quatro lados e ângulo de parede $\psi = 81^\circ$).

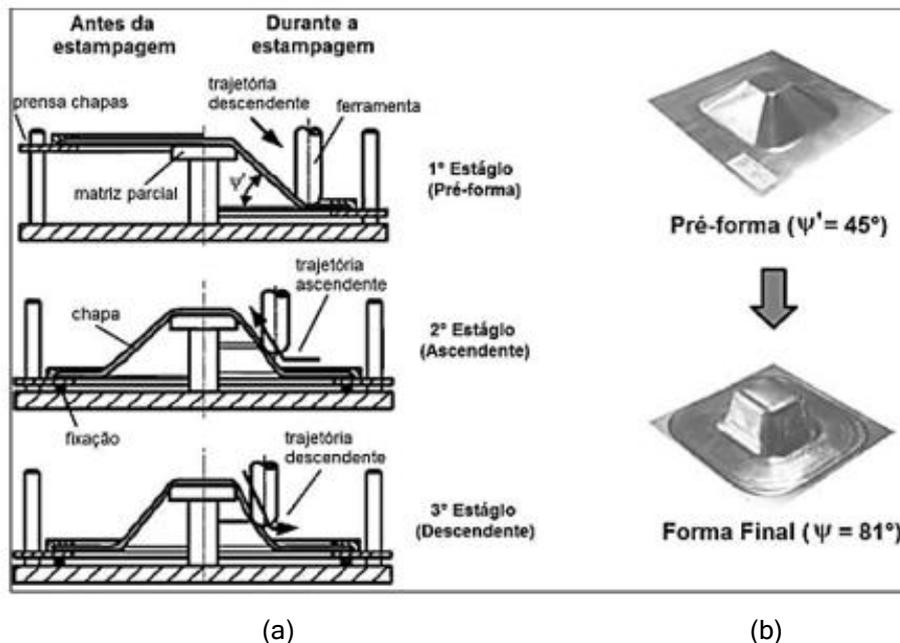


Figura 18: Estampagem Incremental de Múltiplos Passes com TPIF: (a) Estágios do processo e (b) Pré-forma e forma final do componente estampado

Fonte: Adaptado de HIRT, 2004

2.3 GEOMETRIA DE PEÇA PARA ESTAMPAGEM INCREMENTAL E SUAS LIMITAÇÕES

Nos processos de conformação como forjamento e estampagem convencional, existem valores máximos de ângulos que definem certas regiões da peça a fim de que seja possível a sua manufatura, conforme os trabalhos de Kopac e Kampus (2005) e Apud Silva (2011). No caso da Estampagem Incremental estudos recentes apontam para um ângulo máximo de parede de chapa de 65° , a partir deste valor, torna-se muito frequente a ruptura ou a diminuição drástica da espessura da chapa, ocasionando uma baixa resistência mecânica localizada.

O ângulo da superfície da chapa deformada é também importante na conformação incremental assimétrica. Ao projetar uma peça no software CAD um dos pontos que se deve ter atenção é a obrigatoriedade do ângulo de parede da peça desenhada ser inferior ao ângulo de deformação (JESWIET, 2005M apud SENA, 2009). A constância de volume conduz a uma relação direta entre a espessura e o ângulo da parede conforme indicado na Figura 19.

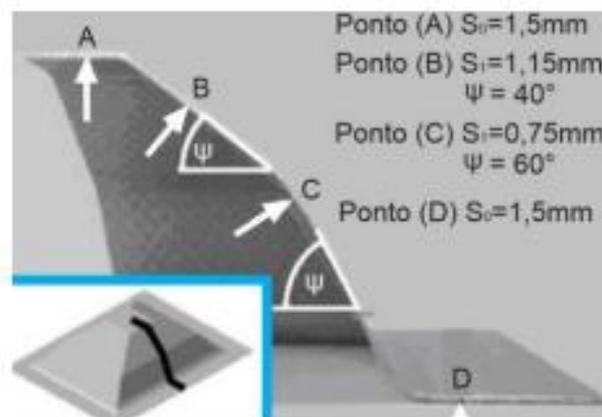


Figura 19: Redução da espessura de parede

Fonte: JUNK et al., 2003, apud SILVA, 2011

Diversos parâmetros do processo de Estampagem Incremental, como a velocidade de avanço (a), a velocidade de rotação (N), o incremento vertical (Δz) e o raio da ferramenta (R_f), bem como o lubrificante utilizado e a temperatura do processo, influenciam na força necessária para realização do processo, na estampabilidade do material, no acabamento superficial e nos desvios geométricos do produto final. A Figura 20 apresenta os principais parâmetros do processo de Estampagem Incremental por SPIF.

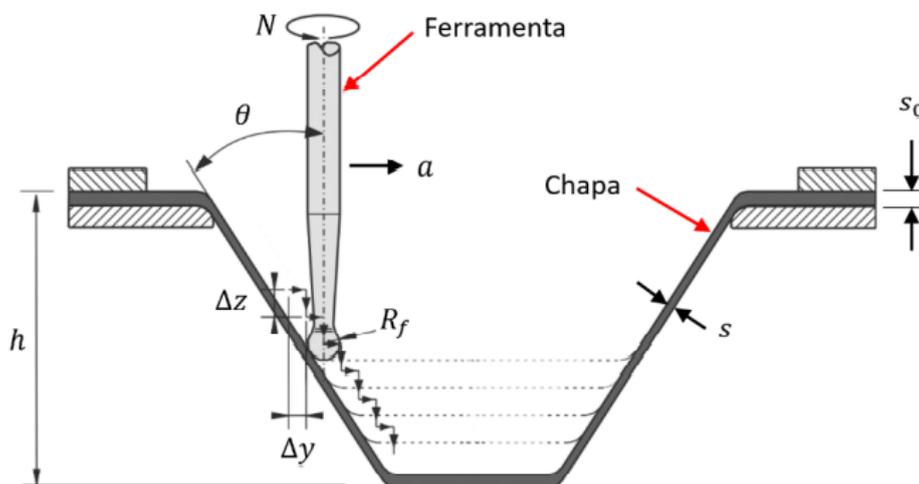


Figura 20: Principais parâmetros do processo de Estampagem Incremental por SPIF

Fonte: TISZA M, 2012

Conforme indicado na Figura 20, a trajetória executada pela ferramenta determina o formato final da chapa estampada, sendo que a espessura inicial da chapa (s_0) sofre redução até a espessura final (s), de acordo com ângulo de parede utilizado (θ), que é determinado pelo valor do incremento lateral (Δy). A máxima profundidade estampada (h), assim como o máximo ângulo de parede são parâmetros de referência para comparar a estampabilidade de diferentes materiais de acordo com os estudos de Schreiber RG,

2018 e Al-Ghandi KA, Hussain G, 2015.

É possível estabelecer a relação entre o ângulo de parede (θ) e a espessura final da chapa estampada (s), que é denominada “lei do cosseno” e está apresentada na Equação 9 (Duflou JR, Verbert J, Belkassem B, Gu J, Sol H, Henrard C, 2008).

$$s = s_0 \cdot \cos (\theta) \quad \text{Eq.(9)}$$

Onde:

s = espessura final da chapa (mm);

s_0 = espessura inicial da chapa (mm);

θ = ângulo de parede de chapa.

Para obter um ângulo de parede maior, deve-se aumentar a espessura inicial da chapa (Duflou JR, Verbert J, Belkassem B, Gu J, Sol H, Henrard C, 2008), sendo que o diâmetro da ferramenta e o incremento vertical apresentam pouca influência no ângulo máximo de parede (Ham M, Jeswiet J, 2007). Também há uma relação entre a deformação verdadeira na espessura (φ_3) e o ângulo de parede (θ) obtido em radianos, conforme Equação 10 (Martins PAF, Bay N, Skjoedt M, Silva MB, 2008).

$$\theta = \frac{\pi}{2} - e^{\varphi_3} \quad \text{Eq.(10)}$$

Onde:

θ = ângulo de parede (rad);

φ_3 = Deformação verdadeira na espessura (mm);

Isolando a deformação em espessura (φ_3) na Equação 10 obtêm-se a Equação 11, em função do ângulo de parede em radianos.

$$\varphi_3 = \ln \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \quad \text{Eq.(11)}$$

Além do ângulo de parede, outros parâmetros têm influência sobre a qualidade do produto obtido por Estampagem Incremental, como a rotação (S), o incremento vertical (Δz), o avanço (a) e o diâmetro da ferramenta (d_f), bem como o lubrificante utilizado.

De acordo com o estudo de Hamilton e Jeswiet (2010) a Estampagem

Incremental utilizando valores altos de avanço combinados com altas rotações (S) influencia pouco no acabamento superficial das peças estampadas.

O trabalho de CENTENO et al., 2014, combinou diferentes incrementos verticais e diâmetros de ferramentas no processo de Estampagem Incremental e verificou que aumentando-se o valor dos incrementos verticais e diminuindo-se o diâmetro da ponta da ferramenta é possível reduzir a força de estampagem necessária no processo.

Todavia, quanto menor o incremento vertical (Δz) (penetração da ferramenta a cada passe de estampagem) menor será a rugosidade e também irá se obter uma maior estampabilidade da chapa.

Segundo Xu *et al.* (2013), a Estampagem Incremental com rotações mais elevadas como 800 rpm combinada com baixos valores de incremento vertical, há um aumento da deformação máxima, e utilizando o mesmo incremental vertical e faixa de avanço próxima a 200 mm/min, a estampabilidade aumenta conforme a rotação da ferramenta vai aumentando, ou seja, com avanço de 200 mm/min, há aumento na profundidade estampada com 800 rpm.

O trabalho de TEIXIERA (2019), verificou que no processo de Estampagem Incremental em ligas de alumínio, é possível obter maiores deformações com uma combinação de maiores rotações da ferramenta com menores velocidades de avanço e que pode-se determinar diferentes Relas Limites de Fratura para o mesmo material, variando parâmetros de processo como, rotação da ferramenta.

2.4 FERRAMENTA DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Conforme Palumbo e Brandizzi (2012) valores altos de rotação da ferramenta geram maiores temperaturas da chapa durante o processo e ocasionam maior estampabilidade.

Em relação ao diâmetro da ferramenta, quanto maior seu valor, menor será a rugosidade da peça estampada (BHATTACHARYA *et al.*, 2011). No estudo de Al-Ghamdi e Hussain foi determinado um raio limite para ferramenta de Estampagem Incremental. Neste estudo foi verificado que o valor do raio da ferramenta influencia na estampabilidade da chapa no processo de Estampagem Incremental e que seu valor não depende do tipo de material ou propriedades mecânicas da chapa, mas sim da espessura inicial da chapa, de forma que o raio crítico para estampagem com ângulo máximo de parede, com melhor estampabilidade pode ser obtido conforme a equação 12. À medida que o valor do raio da ferramenta se distancia desta relação se torna mais iminente a ruptura da chapa (AL-GHAMDI; HUSSAIN, 2015).

$$R_c \approx 2,2 \cdot S_0$$

Eq.(12)

Onde:

R_c = raio crítico da ferramenta;

s_0 = espessura inicial da chapa

Nos estudos de GATEA et al. (2019), ao compararem duas ligas de titânio, obtiveram a conclusão de que o parâmetro mais influente na estampabilidade foi o raio da ferramenta, seguido pelo incremento vertical e pelo avanço da ferramenta.

O movimento relativo da ferramenta sobre a chapa é inversamente proporcional ao calor gerado pela fricção resultante do escorregamento.

Se o movimento relativo entre a ferramenta e a superfície de trabalho durante a conformação for elevado, o calor gerado é inversamente proporcional a velocidade da ferramenta JESWIET et al. (2005).

Quando utilizado uma ferramenta de ponta esférica para conformar o material por estampagem incremental, o contato da ferramenta com a peça ocorre por rolamento e não por escorregamento, diminuindo significativamente o atrito de trabalho, dessa forma o calor gerado na interface diminui.

Nos estudos de HUSSAIN et al. (2008), realizados para titânio comercialmente puro, também constatou-se o efeito da diminuição do raio da ferramenta resulta no aumento da estampabilidade. PRADELLA et al. (2016) analisaram a influência do raio da ferramenta na estampagem incremental de chapas de PVC, verificando também que diminuir a dimensão da ferramenta resulta em aumento da deformação máxima obtida no processo. No trabalho de MARTINS et al. (2008) a razão de triaxialidade (σ_m/σ_{eq}) foi utilizada para explicar o motivo de o limite de deformação ser maior na estampagem incremental que na estampagem convencional. Já que a diminuição do raio na estampagem incremental diminui a razão de triaxialidade, permitindo maiores deformações, enquanto que com raios maiores essa razão aumenta e o processo se assemelha à estampagem convencional, na qual menores deformações podem ser obtidas.

2.5 ROTAÇÃO DA FERRAMENTA (S)

Na Estampagem Incremental a velocidade de rotação da ferramenta exerce influência na estampabilidade, no acabamento superficial e na força necessária para a realização do processo. O movimento de rotação da ferramenta gera atrito e provoca aquecimento na interface peça-ferramenta, Xu et al (2013). De forma que, com o aumento da velocidade de rotação da ferramenta, é conferida maior estampabilidade à peça, conforme verificado pelos autores: Schreiber et al (2019), Jeswiet et al (2005) e

Ham et al (2006), no entanto exigindo menor força para realização do processo, Teixeira et al (2018). O aumento da velocidade de rotação também pode aumentar a rugosidade da peça estampada.

Na pesquisa realizada por Durante et al (2009) para Estampagem Incremental de AA7075-T0, com rotação variando de 0 e 800 rpm, verificou-se que com o aumento da rotação da ferramenta há uma tendência de aumento na temperatura, bem como a diminuição nas forças necessárias para a estampagem. Neste estudo a variação de rugosidade superficial nas peças se mostrou insignificante.

No trabalho realizado por Schreiber et al (2019) para Estampagem Incremental de AA1200-H14, com velocidades de rotação variando de 50 a 800 rpm foi verificado que o aumento da rotação da ferramenta gera aumento da estampabilidade do material. Esse estudo também indica que quanto se utiliza grandes valores de incremento vertical (entre 1 e 2 mm) a rotação não apresenta influência na estampabilidade.

Xu et al (2013) desenvolveram estudos para Estampagem Incremental de alumínio AA5052-H32 com velocidades de rotação variando de 0 a 7000 rpm. Nestes estudos foi verificado que o aumento da estampabilidade do material em baixas rotações (até 1000 rpm) ocorre devido à variação das condições de atrito. Enquanto que em rotações mais elevadas o efeito do aumento de temperatura é o responsável pela maior estampabilidade.

2.6 INCREMENTO VERTICAL DA FERRAMENTA (Δz)

O incremento vertical da ferramenta na Estampagem Incremental influencia no tempo de processo, na estampabilidade, no acabamento superficial, nos desvios geométricos e na força necessária para realizar o processo.

Quanto maior for o valor de incremento vertical utilizado, menor será o tempo de processo, de acordo com os estudos de Schreiber et al (2019), Centeno et al (2014), Kim et al. (2002) e Rauch et al. (2009), no entanto a estampabilidade será menor já que valores altos de incremento aumentam as tensões no processo, fazendo com que a falha ocorra mais cedo Ham et al (2006).

Além disso, de acordo com o estudo de Bhattacharya et al. (2011) o aumento do incremento vertical ocasiona maior rugosidade da peça estampada, aumenta os desvios geométricos, Fan et al. (2008) e exige maiores forças para realização da conformação da peça.

No trabalho de Jeswiet et al. (2005) foi concluído que a utilização de grandes valores de incremento vertical, além de aumentar as forças necessárias para realização do processo e aumentar a rugosidade, também podem causar o efeito “casca de laranja” que se resulta em uma rugosidade superficial extremamente elevada.

No trabalho de Schreiber e Schaeffer (2018) foi verificado que quando se utiliza alta rotação da ferramenta associada com baixo incremento vertical, é obtida alta estampabilidade. No entanto, essa combinação de parâmetros pode ocasionar remoção de material da chapa na forma de pó.

2.7 LUBRIFICAÇÃO NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Quanto ao lubrificante utilizado no processo, conforme o estudo de Azevedo *et al.* (2015) que comparou a qualidade superficial das peças de alumínio AA1050 e aço DP780 obtidas pelo processo SPIF, concluiu que se pode estabelecer uma relação entre a dureza do material estampado e a viscosidade do lubrificante recomendado, de forma que quanto maior a dureza do material a ser conformado, menor a viscosidade necessária do lubrificante. O autor ainda verificou que a menor rugosidade alcançada nas chapas de aço DP780 foi proporcionada pelo óleo Finarol B5746 e pela graxa AS-40, enquanto que para alumínio AA1050, pelo óleo SAE 30 e pela graxa AL-M.

Segundo Tiburi (2007), para a redução do aquecimento entre a chapa e a ferramenta de estampagem, o principal motivo era a redução do atrito com a utilização de lubrificante a base de lítio utilizando uma graxa para rolamentos.

A lubrificação no processo de estampagem incremental exerce uma função de extrema importância, contribuindo nos seguintes fatores:

- a) Diminuir o aquecimento da ferramenta e da peça;
- b) Minimização do esforço de trabalho da ferramenta em relação a peça;
- c) Baixar o coeficiente de atrito entre ferramenta e a peça;
- d) Apresentar um melhor acabamento superficial no produto;
- e) Reduzir nível de desgaste da ferramenta durante o processo de estampagem



Figura 21: Estampagem incremental utilizando como lubrificante graxa convencional.
Fonte: JACKSON; ALLWOOD, 2009

No processo de Estampagem Incremental há diversas maneiras para aplicar a lubrificação, mas todas relacionadas ao tipo de material e à temperatura em que o processo está inserido.

A lubrificação diminui o trabalho para estampagem, e o potencial para a superfície tornar-se danificada pela fricção, Hagan, et al., 2003. Reagan et al., 1991, discutem diferentes maneiras para a lubrificação, o qual dependem do tipo de material e a temperatura do ambiente. Os três lubrificantes tradicionais são: sebo, utilizado na fabricação de velas, sebo misturado com óleo e sabão misturado com óleo. O sebo de velas é aplicado diretamente no material, enquanto as outras duas misturas devem ser preparadas antes, de forma manual. Um bom lubrificante permanece na superfície do blank e é aplicado frequentemente em pequenas quantidades.

O óleo mineral Hidramax VG 100 é recomendado para uso em sistemas hidráulicos de alta rotação, redutores, mancais de deslizamento, compressores de ar, caixas de engrenagens, mancais de rolamento, máquinas operatrizes, prensas, injetoras, máquinas têxteis, etc. O lubrificante é formulado com óleos parafínicos e contém aditivos antioxidantes, anticorrosivos, antidesgaste e antiespumantes. Possui boas características de resistência a cargas e ao desgaste, protegendo as partes móveis da bomba e outros componentes do sistema, conforme Anexo 2.

O estudo de Nawi e Mahdavian (1994) apresenta que a lubrificação é importante para manter as características técnicas no produto final mantendo seu dimensional, assim respeitando a tolerância e além disso mantendo um bom acabamento visual e superficial, melhorando a rugosidade do produto e minimizando as forças na estampagem. A análise do lubrificante parte do princípio de sua aplicação em todas as faces das chapas que acontecerá a estampagem, analisando as diferentes hipóteses da viscosidade dos três tipos de lubrificantes, assim percebendo que conforme aumenta a viscosidade do lubrificante, existe a diminuição da força de estampagem durante o processo de estampagem.

2.8 LIMITES DE DEFORMAÇÃO NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL

No processo de Estampagem Incremental os limites de deformação são diferentes dos expressos na Curva Limite de Conformação (*Forming Limit Curve - FLC*), que geralmente é usada para delimitar os limites de estampabilidade no processo de Estampagem Convencional. A estampabilidade de um material na Estampagem Incremental é melhor descrita pelo Diagrama Limite de (*Fracture Forming Limit Diagram - FFLD*).

A Figura 16, de forma esquemática, apresenta uma comparação entre a FLC e o FFLD para um mesmo material, onde é possível identificar que a estampabilidade (caracterizada pelas deformações principais φ_1 e φ_2) é maior na Estampagem Incremental do que na Estampagem Convencional.

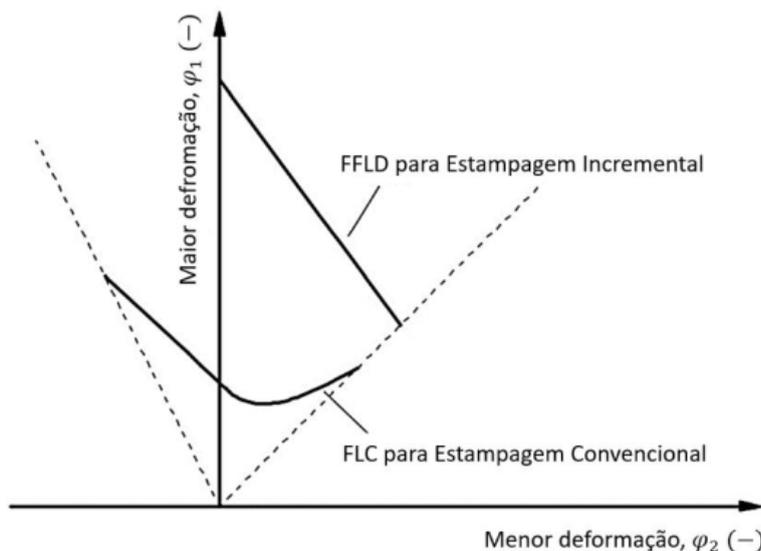


Figura 22: Comparação entre FLC e o FFLD, AI S, LONG H, 2019.

Conforme indicado na Figura 22, verifica-se que diferente da FLC com formato em “V”, o FFLD é definido por uma linha reta no primeiro quadrante do gráfico do tipo $\varphi_1 = a \varphi_2 + b$, Kim Y-S, 2017, sendo que o coeficiente angular dessa reta em vários estudos é considerado igual a “-1”, resultando em uma inclinação negativa. No estado plano de deformação (quando $\varphi_2 = 0$), a estampabilidade é extremamente elevada, enquanto que em expansão biaxial ($\varphi_1 = \varphi_2$) ocorre o ponto mais baixo da reta, e que em todos os casos os limites de deformação do FFLD para Estampagem Convencional, PARK, J, KIM, Y. H 2003.

No trabalho de Malhotra *et al.* 2012, é proposta a “teoria do macarrão”, que tem o propósito de explicar o motivo pelo qual a Estampagem Incremental apresenta maior limite de deformação que a Estampagem Convencional. Conforme indicado na Figura 23(a), (b) e (c), na Estampagem Convencional o material é estirado, gerando estrição localizada e conseqüente fratura; enquanto que, conforme Figura 23(d), (e) e (f), na Estampagem Incremental ocorre estiramento localizado, seguido de mais estiramento em diferentes locais, dessa forma a deformação aumenta de modo gradual, possibilitando maiores limites de deformação.

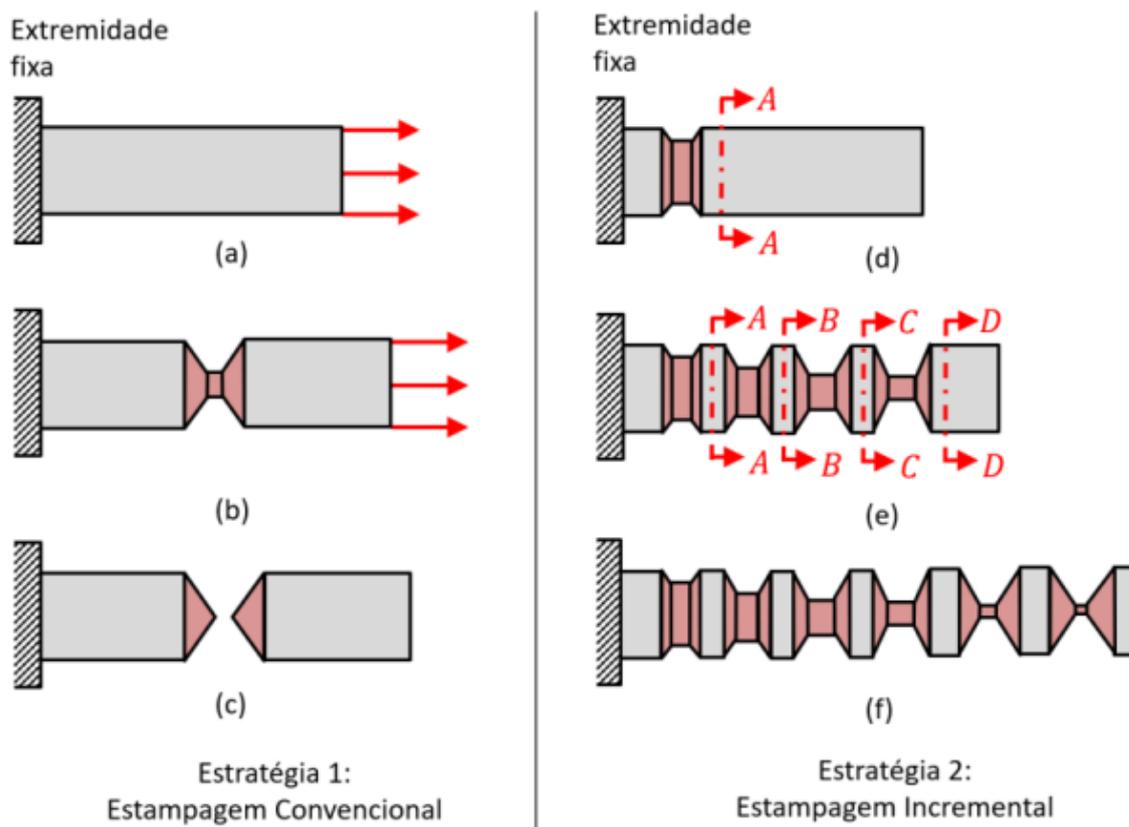


Figura 23: Estratégia 1: Estampagem Convencional – Estiramento do material na ponta livre (a), Estricção em um único local (b), Fratura no local de estricção (c); Estratégia 2: Estampagem Incremental - Estiramento localizado na seção AA (d), Estiramento em diferentes seções (e), Material conformado com maior comprimento sem fratura (f)

Fonte: Malhotra et. Al. 2012.

2.9 TENSÕES NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Para o estado plano de deformações ($\varphi_2 = 0$) é possível considerar que no processo de Estampagem Incremental por SPIF a região na área de contato entre chapa e ferramenta esteja submetida às tensões principais em três direções, sendo elas a tensão principal máxima (σ_1), a tensão principal intermediária (σ_2) e a tensão principal mínima (σ_3), MARTINS et al 2008. Neste caso a flexão próxima à região de fixação da chapa é desconsiderada, bem como o atrito na interface chapa-ferramenta, BHATTACHARYA et al. 2011.

A Figura 24(a) destaca a área de contato entre chapa e ferramenta no processo de SPIF, enquanto que na Figura 24(b) são indicados os vetores correspondentes às tensões principais atuantes em um elemento de volume da chapa no processo.

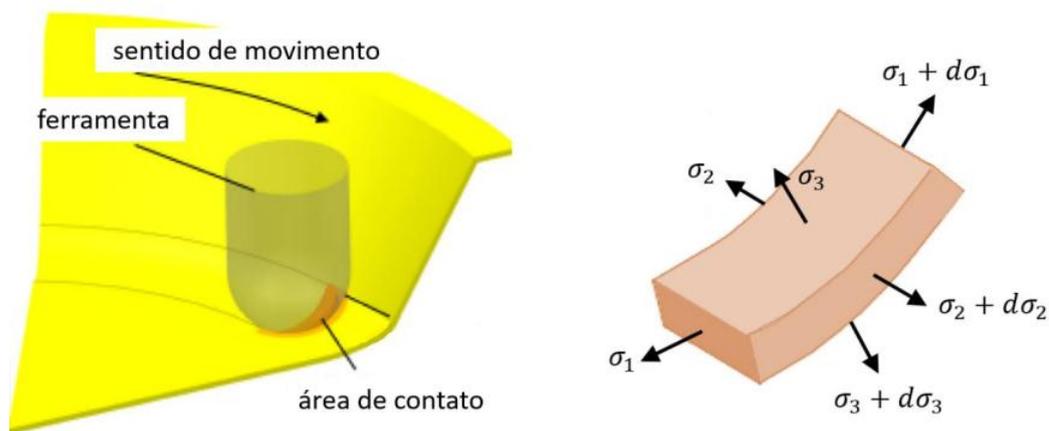


Figura 24: Área de contato entre ferramenta e peça no processo SPIF (a) e tensões principais em um elemento de volume na chapa (b), CHANG et al. 2019.

A tabela 1 apresenta as equações para determinar as tensões principais no processo de Estampagem Incremental por SPIF, para a condição de estado plano de deformações.

Tabela 2: Tensões principais e tensões médias no estado plano de deformações em SPIF, Adaptado de BHATTACHARYA, A. et al 2011.

Estado de Deformações	Tensões Principais	Tensão Média
Plano 	$\sigma_1 = \frac{2\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_f}{R_f + s} \right)$ $\sigma_2 = \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_f - s}{R_f + s} \right)$ $\sigma_3 = -\frac{2\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{s}{R_f + s} \right)$	$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ $\sigma_m = \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_f - s}{R_f + s} \right)$

As equações indicadas na Tabela 1 seguem as simplificações impostas pelas condições de equilíbrio da membrana, ou seja, desconsideram os momentos fletores, bem com os efeitos do encruamento e da anisotropia do material. Além disso, assumem simetria axial e que o atrito é pequeno, sendo a tensão de atrito constituída por dois componentes no plano, SILVA et al. 2008.

Na condição de deformação plana, verifica-se que a menor deformação verdadeira no plano é nula ($\varphi_2 = 0$) e as demais deformações principais são iguais em intensidade, mas com sinais opostos ($\varphi_1 = -\varphi_3$) pela constância de volume.

As equações 12, 13 e 14 apresentam a forma de calcular as tensões principais, sendo $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

$$\sigma_1 = \frac{2\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_f}{R_f + s} \right) \quad \text{Eq.(12)}$$

Onde:

σ_1 = Tensão principal máxima [MPa];

σ_{eq} = Tensão equivalente [MPa];

s = Espessura final;

R_f = Raio da ferramenta [mm].

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_f - s}{R_f + s} \right) \quad \text{Eq.(13)}$$

$\sigma_1 =$

Onde:

σ_2 = Tensão principal intermediária [MPa].

$$\sigma_3 = -\frac{2\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{s}{R_f + s} \right) \quad \text{Eq. (14)}$$

Onde:

σ_3 = Tensão principal mínima [MPa].

A tensão média para o estado plano de deformações pode ser obtida por meio da equação 15.

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{2\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_f - s}{R_f + s} \right) \quad \text{Eq. (15)}$$

Onde:

σ_m = Tensão média [MPa].

A relação entre tensões principais ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) é obtida pela tensão equivalente de Von Mises, conforme expresso na equação 16.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad \text{Eq. (16)}$$

A tensão equivalente também pode ser determinada em função das propriedades do material e da deformação equivalente, conforme expresso na Equação 17 (equação de Ludwick-Hollomon). Essa tensão equivalente é igual à resistência ao escoamento (k_f) do material, que aumenta à medida que este sofre deformação plástica.

$$\sigma_{eq} = C \sigma_{eq}^n = k_f \quad \text{Eq. (17)}$$

Onde:

C = Coeficiente de resistência [MPa];

ϕ_{eq} = Deformação verdadeira equivalente [-];

n = Coeficiente de encruamento [-];

k_f = Resistência ao escoamento [MPa].

A deformação verdadeira equivalente, por sua vez, é determinada também pelo critério de Von Mises pela equação 18.

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad \text{Eq. (18)}$$

Onde:

ϕ_1 = Maior deformação verdadeira no plano [-];

ϕ_2 = Menor deformação verdadeira no plano [-].

ϕ_3 = Deformação verdadeira na espessura [-].

2.10 PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS (DOE)

O DoE é uma sequência seriada de testes aplicados para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletadas durante um determinado experimento, buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a acurácia estatística possível na resposta e o menor custo, induzindo com isso

mudanças deliberadas nas variáveis de entrada do processo ou sistema, de maneira que seja possível observar e identificar as causas das mudanças nas respostas ou variáveis de saída, MENDELSKI J. 2017.

Segundo BONDUELLE, 1994, a utilização do planejamento de experimentos pode contribuir decisivamente com o desenvolvimento industrial pela otimização das grandezas de interesse, pela determinação dos fatores influentes sobre essas grandezas e eventualmente, pelas suas interações e minimização dos efeitos da variabilidade sobre o desempenho de um processo ou produto.

A escolha do DoE tem por finalidade definir informações sobre o relacionamento dos diferentes fatores, demonstrando assim quais são os impactos de cada fator na resposta analisada e como eles se relacionam em nível de interação entre fatores. Uma das técnicas mais utilizadas no DoE é a análise de variância (ANOVA). Análise de variância, testa a hipótese de que as médias de dois ou mais conjunto de dados são iguais. As ANOVAs avaliam a importância de um ou mais fatores, comparando as médias de variáveis de resposta nos diferentes níveis de fator. A hipótese nula afirma que todas as médias de conjunto de dados (médias de nível de fator) são iguais, enquanto a hipótese alternativa afirma que pelo menos uma é diferente.

Durante um processo de Estampagem Incremental, um modelo de ANOVA pode ser criado para comparar diferentes parâmetros envolvidos no processo e analisar se há efeitos principais relacionados e se tais parâmetros podem influenciar na tensão crítica do processo. Conforme o trabalho de SCHREIBER, 2022, que utilizou um modelo de ANOVA de três vias, relacionando material estampado, raio da ferramenta de estampagem e espessura inicial da chapa, para verificar que a fratura do material ocorreu com valores de tensão crítica que não dependeram da espessura inicial da chapa.

A ANOVA utiliza ferramentas como Gráfico de Efeitos principais e Gráficos de Interações para demonstrar como a relação entre um fator categórico e uma resposta contínua depende do valor do segundo fator categórico. Este gráfico exibe as médias para os níveis de um fator no eixo x e uma linha separada para cada nível de outro fator.

Com auxílio do programa comercial Minitab®, este trabalho utiliza de métodos estatístico para determinar qual parâmetro exerce maior influência na deformação do alumínio AA1200-H14, sendo dois parâmetros analisados, o incremento vertical (Δz) e a velocidade de rotação (S) da ferramenta de estampagem, através da utilização do método DoE o qual permite por meio da análise de variância, considerar adequadamente a estrutura de correlação existente nas respostas de interesse obtidas experimentalmente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, corpos de prova de alumínio AA1200-H14 foram submetidos a experimentos de estampabilidade para Estampagem Incremental, variando os parâmetros de rotação e incremento vertical da ferramenta. O raio da ponta da ferramenta utilizada foi de 5 mm, a espessura da chapa de alumínio AA1200-H14 foi de 0,80 mm.

Para realização dos experimentos foi utilizado um centro de usinagem CNC ROMI e modelo Discovery 4022. O lubrificante usado foi um óleo mineral HIDRAMAX VG100, largamente utilizado em sistemas com alta fricção e rotação. A ferramenta de conformação foi fabricada em aço SAE 1045, temperado e revenido, com dureza de 47 HRC e uma ponta semiesférica e raio de 5 mm, sendo sua superfície polida para maior controle da fricção e melhor acabamento superficial nos experimentos.

Para fixação dos corpos de prova de alumínio utilizados nos experimentos, foi desenvolvido um dispositivo em aço SAE 1045 constituído por uma base maciça e um prensa-chapas. O objetivo do dispositivo foi garantir a rigidez e estabilidade no processo, evitando vibrações excessivas e quaisquer outras influências nos resultados.

Após a conclusão dos experimentos de Estampagem Incremental das peças de alumínio AA1200-H14, as deformações foram verificadas através das equações apresentadas no capítulo 2.8, a variação da espessura ao longo do perfil estampado foi medida com o auxílio de instrumentos de medição como micrometro e altímetro digital. A peça estampada obteve o formato de um hiperboloide, por ser uma geometria que permite a conformação do material em um ângulo variável.

Para a avaliação da influência dos parâmetros citados na estampabilidade do material foi utilizada a técnica de Projeto e Análise de Experimentos (DoE), aplicando a ferramenta estatística ANOVA com auxílio do software Minitab.

Para realização do processo de Estampagem Incremental das amostras de alumínio foi necessário realizar a caracterização do material, definir as dimensões dos corpos de prova, o equipamento necessário para o processo, o tipo de lubrificante, além das ferramentas e do dispositivo de fixação da chapa.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS CHAPAS DE ALUMÍNIO AA1200-H14

Esta seção apresenta técnicas utilizadas para caracterização de chapas de alumínio AA1200-H14, como ensaio uniaxial de tração e o procedimento para determinação da Reta Limite de Fratura. As propriedades mecânicas do material estampado são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades do material

Material	Espessura inicial, S0 (mm)	Limite de escoamento, Re (Mpa)	Limite de resistência, Rm (Mpa)	Deformação percentual, ϵ (%)	Módulo de elasticidade, E (Gpa)	Coefficiente de resistência, C (Mpa)	Coefficiente de encruamento, n (-)
AA1200-H14	0,8	97	117	3,6	70	181,45	0,1080

As propriedades mecânicas do material indicadas na Tabela 3 foram obtidas, com base nos estudos de SCHREIBER et al. 2021 para alumínio AA1200-H14.

Para a caracterização das chapas de alumínio AA1200-H14, foi realizado primeiramente ensaio uniaxial de tração com corpos de prova cortados a 0°, 45° e 90° em relação ao sentido de laminação. O procedimento de ensaio foi realizado de acordo com norma NBR ISO 6892-1: Materiais metálicos - Ensaio de Tração - Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

O Ensaio de Tração foi realizado na Máquina de Ensaio marca KRATOS modelo TRCv61423B-USB, com capacidade de 600 kN, disponível no Laboratório da empresa Gestamp.

Através do ensaio de tração foi construída a curva de engenharia “Tensão x Deformação” para o alumínio AA1200-H14, com tensão de escoamento $\sigma_{0,2} = 94 \text{ N/mm}^2$, tensão máxima $\sigma_{\text{máx}} = 99 \text{ N/mm}^2$ e alongamento A de aproximadamente 1,82 %, conforme indicado na Figura 25.

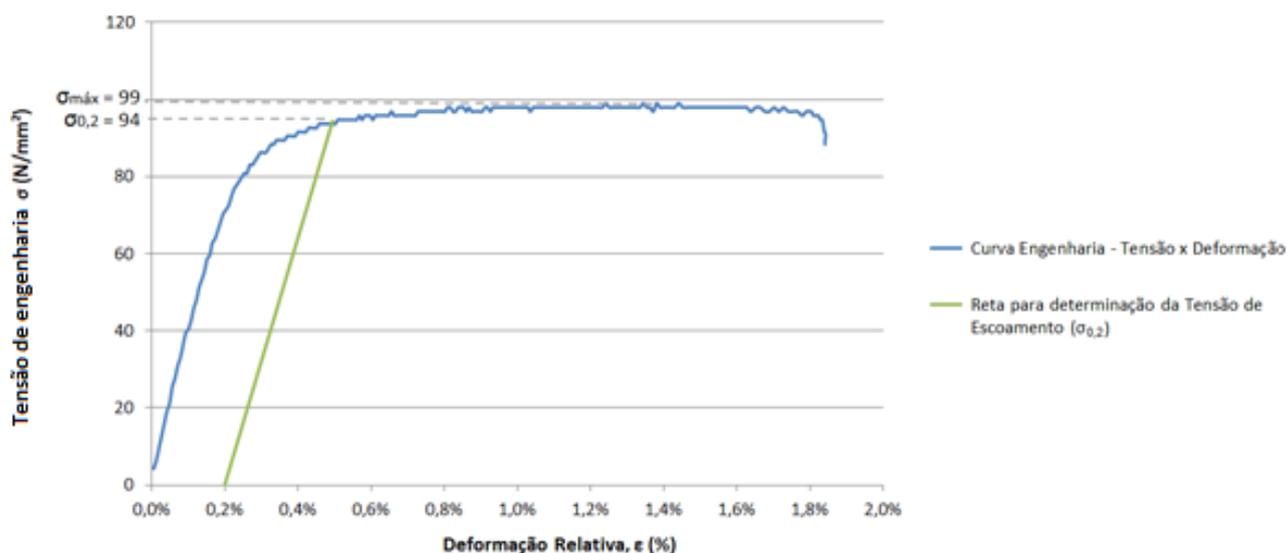


Figura 25: Curva de engenharia “Tensão x Deformação” para alumínio AA1200-H14 para ensaio de tração

Comparando os valores obtidos no ensaio de tração com os valores apresentados na especificação técnica do fabricante (conforme documento anexo 01), verifica-se que a deformação relativa apresentada no ensaio de tração $\varepsilon = 1,8 \%$ está dentro da faixa estabelecida pelo fornecedor ($\varepsilon = 1$ a 3%) e que a tensão de escoamento é praticamente a mesma ($\sigma_{0,2} = 95 \text{ N/mm}^2$). No entanto, a tensão máxima admissível obtida no ensaio ($\sigma_{\text{máx}} = 99 \text{ N/mm}^2$) é 10% menor que o limite inferior estabelecido pelo fornecedor ($\sigma_{\text{máx}} = 110 \text{ N/mm}^2$).

A partir dos resultados apresentados na tabela 2 foi determinada a curva de escoamento para o alumínio AA1200-H14 conforme indicado na Equação 19 e também na Figura 26.

$$kf = 181,45 \cdot \varphi^{0,1080} \quad \text{Eq. (19)}$$

Onde:

kf = tensão verdadeira (MPa);

φ = deformação verdadeira (-).

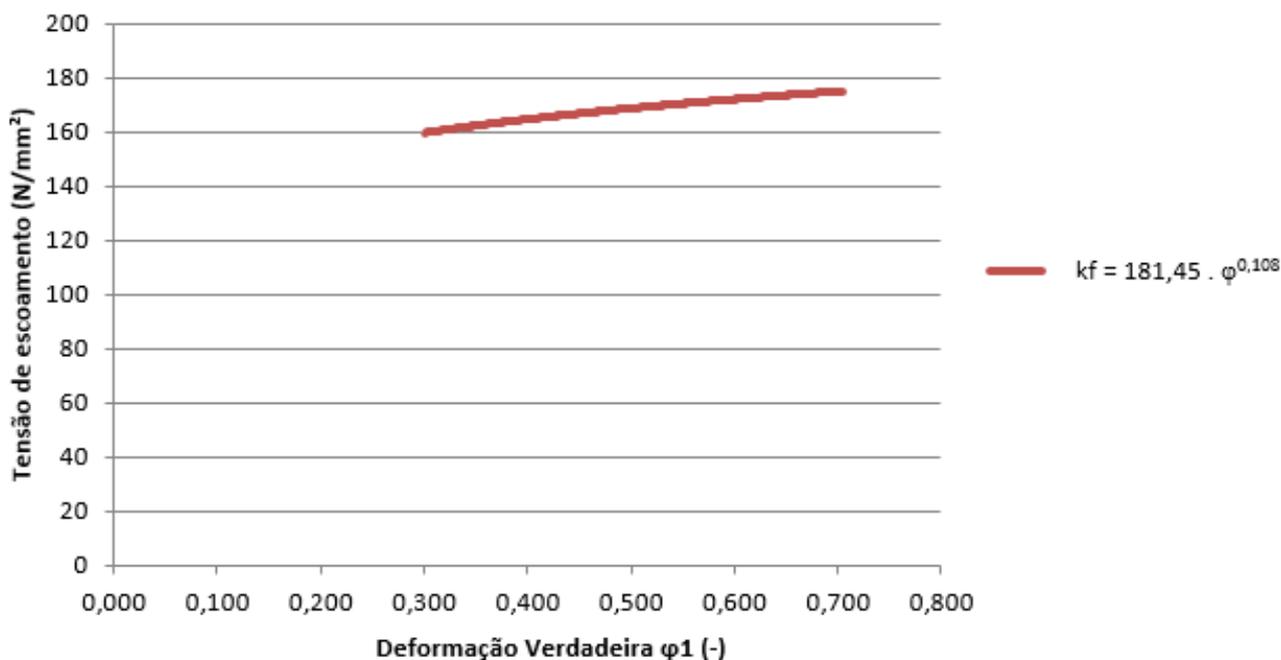


Figura 26: Curva de escoamento para alumínio AA1200-H14

3.2 DIMENSIONAMENTO DOS CORPOS DE PROVA PARA ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Neste estudo foram utilizados corpos de prova em alumínio AA1200-H14, em formato hexagonal (figura 27) para facilitar a fixação dos mesmos entre o dispositivo e o prensa chapa conforme indicado na figura 28 (a). Para fabricação dos corpos de prova utilizados na Estampagem Incremental, foram cortadas 18 amostras de uma chapa de alumínio AA1100-H14, com 0,8 mm de espessura.

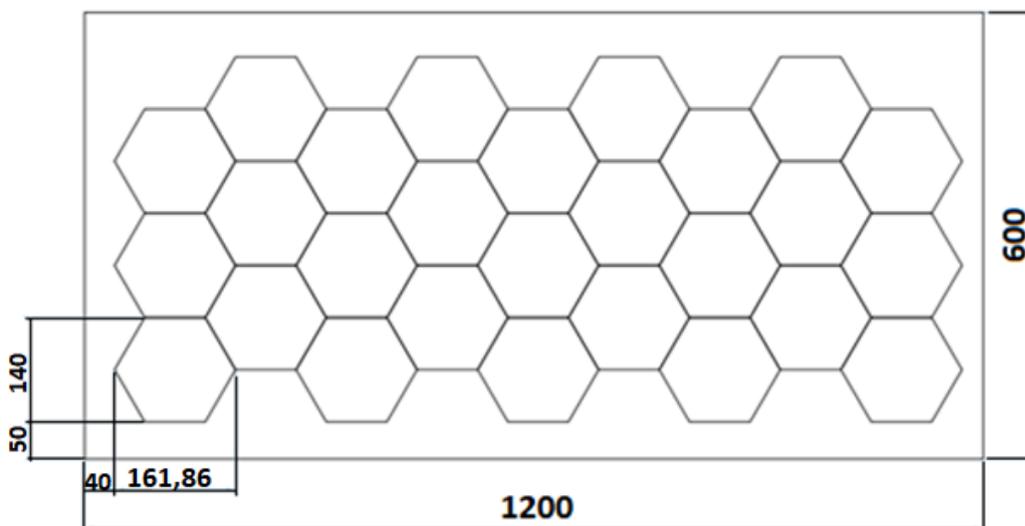
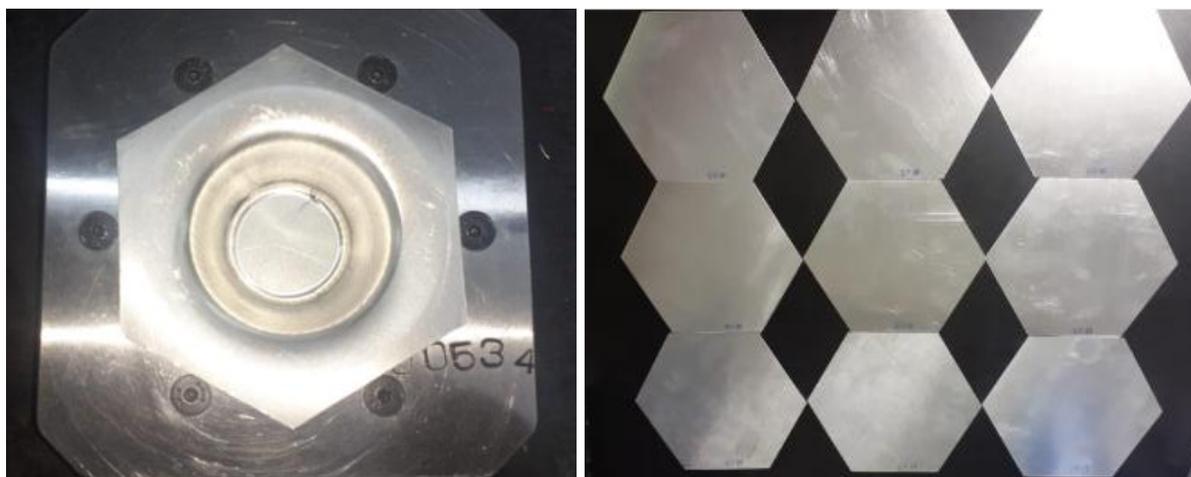


Figura 27: Topografia do corte das amostras (cotas em mm).

As amostras para utilização nos experimentos de Estampagem Incremental foram cortadas a laser, devido ao fato deste sistema cortar os materiais utilizando CO₂, o que possibilita alta potência no momento do contato com a peça, afetando somente a área delimitada de modo a alterar minimamente a estrutura do alumínio, além disso, o acabamento obtido por meio dessa técnica é bastante superior quando comparado com cortes mecânicos (guilhotina) e a perda de material também é a menor possível.



(b)

Figura 28: Posicionamento da amostra no dispositivo (a) Amostras cortadas a laser (b)

Após a preparação das amostras e definição dos parâmetros de cada processo foi realizada a Estampagem Incremental, em seguida as amostras foram cortadas ao meio pelo comprimento, com o objetivo de medir a espessura de cada peça estampada na região próxima a ruptura do alumínio AA1200-H14, o processo de corte foi realizado por meio de um equipamento de eletroerosão a fio CNC, modelo Euro FW1 da Eurostec, com velocidade média de corte de 45 mm²/min, diâmetro do fio de 0,18 mm e velocidade do fio de 1,9 m/s. A medição das espessuras foram realizadas por meio do micrometro mitutoyo de 0 a 25mm com resolução de 0,01 mm conforme indicado na Figura 29, que apresenta o diagrama de blocos com as etapas para o desenvolvimento dos experimentos.

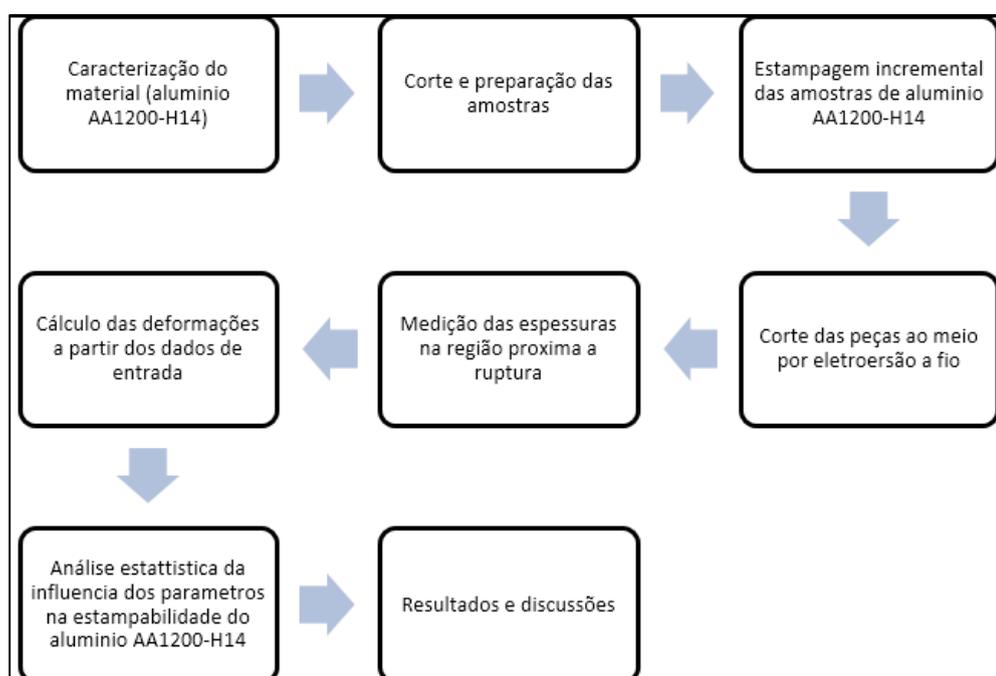


Figura 29: Diagrama de blocos com as etapas de desenvolvimento

A máquina selecionada para a estampagem foi um centro de usinagem da marca ROMI e modelo Discovery 4022 com comando MACH9, com curso longitudinal (Eixo X) de 559 mm, curso transversal (Eixo Y) de 406 mm e curso vertical (Eixo Z) de 508 mm.

3.3 LUBRIFICANTE UTILIZADO

Neste trabalho optou-se por utilizar o óleo mineral HIBRAMAX VG100 para a lubrificação da ferramenta e do corpo de prova durante o processo de estampagem incremental, lubrificante largamente utilizado em sistemas com alta fricção e rotação, e de acordo com o boletim técnico disponível no Anexo 2, possui boas características de resistência a cargas e ao desgaste, protegendo as partes móveis de bombas e outros componentes do sistema.

3.4 FERRAMENTA UTILIZADA

Para a Estampagem Incremental das amostras de alumínio AA1200-H14 foi utilizada ferramenta de aço SAE 1045 usinada em torno CNC ROMI GL 240, temperada e revenida, com ponta esférica de diâmetro 10mm, a escolha do diâmetro foi baseado no perfil hiperboloide que foi estampado nas amostras de modo a facilitar a trajetória do programa CNC desenvolvido para o processo e manter uma rugosidade superficial dentro dos limites aceitáveis para posterior análise, conforme figura 30.

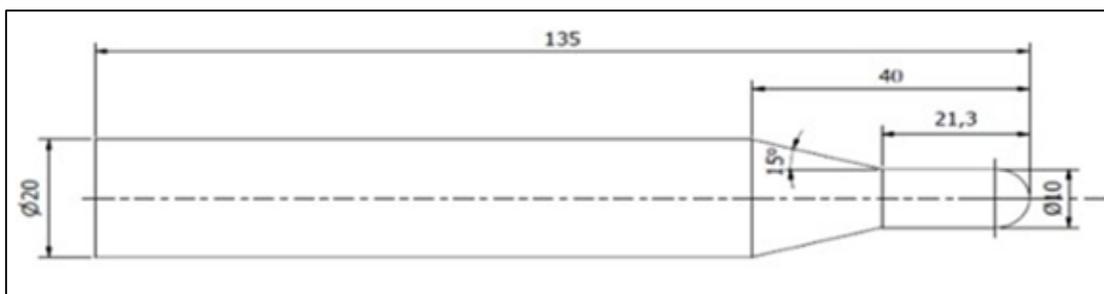


Figura 30: Ferramenta de ponta semiesférica de 10 mm de diâmetro.

3.5 DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO

Para a fixação das amostras de alumínio AA1200-H14, foi confeccionado um dispositivo em forma de matriz e um prensa-chapas, ambos de aço SAE1045 conforme indicado na Figura 31. O objetivo da utilização de matriz é garantir a precisão do canal restringindo sua geometria, o que caracteriza um processo de Estampagem Incremental por Dois Pontos.

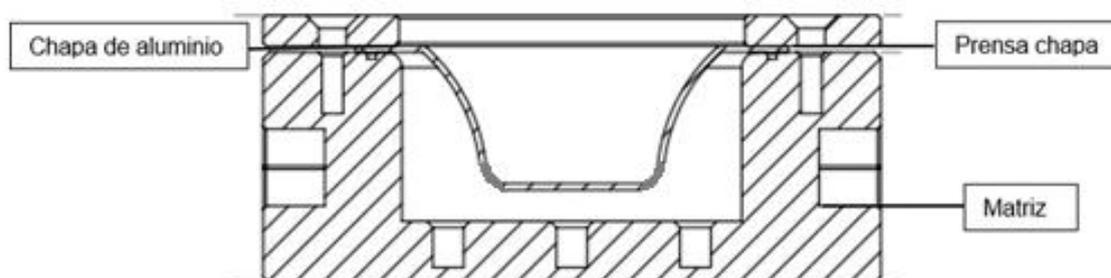


Figura 31: Ferramentas para estampagem incremental

O dispositivo foi fixado sobre os barramentos da máquina CNC e centralizado de acordo com o centro da ferramenta, em seguida foram fixadas as amostras, uma em cada ciclo conforme Figura 32.

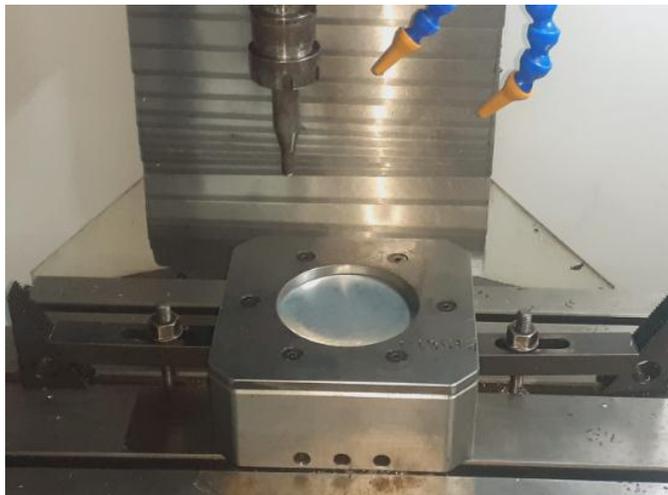


Figura 32: Fixação da ferramenta para estampagem incremental e amostras

3.6 DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS

Para a realização dos experimentos de Estampagem Incremental, foram determinados trajetos individuais em software CAM e transferidos os programas para o comando CNC da máquina operatriz. Os trajetos foram elaborados para fabricação das peças com incrementos verticais (Δ_z) e rotação da ferramenta (S) variados e com velocidade de avanço de 500 mm/min. O formato estampado foi de um hiperboloide, que é um perfil que permite a conformação da peça em um ângulo variável, desde um ângulo inicial θ_0 até um ângulo final θ_1 . As dimensões do hiperboloide estão indicadas na Figura 33(a) e a trajetória da ferramenta no experimento está indicada na Figura 33(b). O experimento foi conduzido até que ocorresse a fratura do material, ou seja, até a profundidade máxima h .

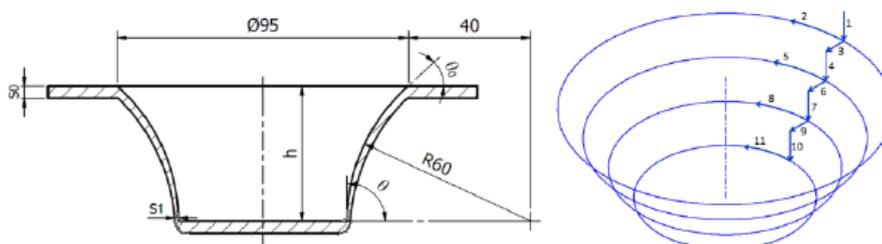


Figura 33: Dimensões do hiperboloide (a) e Trajetória da ferramenta no experimento (b)
Fonte: (SCHREIBER et al. 2021)

Para a ferramenta de conformação foi definida uma trajetória paralela, ou seja, o deslocamento do eixo Z, ocorre separadamente em relação ao deslocamentos dos eixos X e Y, por programação em software CAM, através da qual foram executados movimentos nos eixos Z e X conforme indicado na Figura 34. Desta forma, após cada incremento vertical a ferramenta foi deslocada longitudinalmente (em um percurso de 100 mm) até que no lado oposto foi realizado novo incremento vertical, sendo que após a verificação de trinca da chapa o experimento foi interrompido.

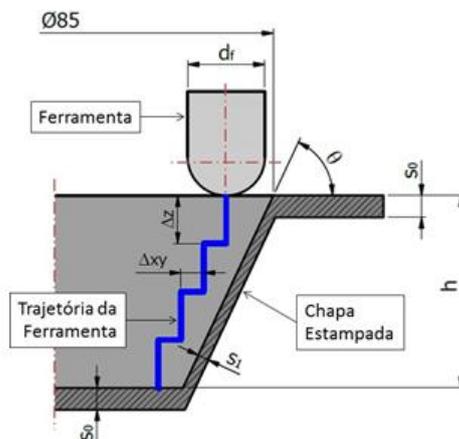


Figura 34: Trajetória da ferramenta nos experimentos de Estampagem Incremental
Fonte: (SCHREIBER et al. 2021)

Na primeira série de experimentos foi analisada a influência dos parâmetros de rotação e incremento vertical no processo através de 18 ensaios, com ferramenta semiesférica de diâmetro 10 mm.

Nestes experimentos foram selecionados os valores de rotação $S = 0$ rpm, 400 rpm e 800 rpm e os valores de incremento vertical de $\Delta z = 0,5$ mm, 1 mm e 1,5 mm, totalizando 18 ensaios. O valor de avanço foi mantido em $a = 250$ mm/min tanto para deslocamento no eixo X quanto no eixo Z, devido ao fato de que este parâmetro apresenta pouca influência na estampabilidade e na rugosidade (AMBROGIO; FILICE; GAGLIARDI, 2012; BARUAH; PANDIVELAN; JEEVANANTHAM, 2017).

Os parâmetros de saída analisados, além das profundidades h (mm) foram a espessura final da peça estampada S (mm), as deformações verdadeiras φ_1 , φ_2 e φ_3 e as tensões aplicadas. A Figura 31, apresenta o processo de Estampagem Incremental sendo realizado no centro de usinagem CNC, nesta primeira série de experimentos. Antes do início de cada experimento foi depositada uma fina camada de 5 ml de óleo VG100 por meio de uma pipeta sobre a superfície a ser estampada.



Figura 35: Estampagem Incremental das amostras de alumínio AA1200-H14 no centro de usinagem CNC

Todos os experimentos foram realizados até que ocorresse a primeira trinca no material, considerando o valor de profundidade no instante em que ocorreu a fratura como h (mm), os valores da altura da fratura h de cada peça estampada foram coletados diretamente do monitor da máquina CNC utilizada e os resultados são apresentados na tabela 4.

Tabela 4: Resultado da altura h (mm) dos experimentos de estampabilidade em SPIF

Amostra	Incremento Δz (mm)	Rotação N(rpm)	Fratura h (mm)
1	0,5	0	36
2	1	0	32
3	1,5	0	29
4	0,5	400	36,5
5	1	400	35
6	1,5	400	34
7	0,5	800	38
8	1	800	38
9	1,5	800	37
10	0,5	0	36,5
11	1	0	34
12	1,5	0	27
13	0,5	400	37
14	1	400	35
15	1,5	400	34
16	0,5	800	38,5
17	1	800	37
18	1,5	800	37

As amostras de alumínio estampadas foram numeradas de 01 a 18, medem 0,8 mm de espessura e apresentam formato hexagonal, o perfil estampado foi de um hiperboloide, conforme apresentado na Figura 36.

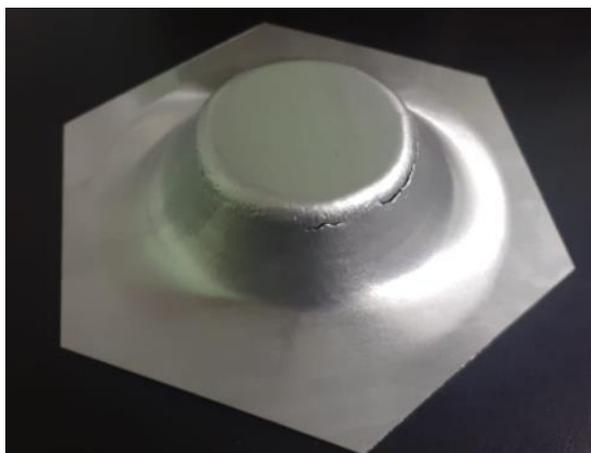


Figura 36: Perfil do hiperboloide estampado

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta os resultados dos experimentos realizados em corpos de prova da liga de alumínio AA1200-H14, de Estampagem Incremental.

A análise das deformações do material foi realizada por meio de medição direta, da espessura de cada peça na região onde ocorreu a fratura, com auxílio de instrumentos de medição como micrometro analogico Mitutoyo de 0 a 25 mm com resolução de 0,01 mm, os resultados das medições das espessuras foram utilizados para calculo das deformações e tensões envolvidas no processo de Estampagem Incremental.

No caso do hiperboloide obteve-se o estado plano de deformações, onde a deformação secundária $\varphi_2 = 0$ e a deformação na espessura é definida como $\varphi_3 = -\varphi_1$ (em função da lei da constância de volume). A espessura final foi estimada em função da deformação na espessura (Equação 9). Enquanto que o ângulo de parede final θ foi calculado pela Equação 10, também em função da deformação na espessura.

A deformação equivalente de von Mises em cada experimento foi calculada pela Equação 16, que para o estado plano de deformações foi simplificada pela Equação 20.

$$\varphi_{eq} = 2 \frac{\sqrt{3}}{3} |\varphi_3| \quad \text{Eq.(20)}$$

A tensão equivalente (σ_{eq}) foi determinada em função das propriedades do material e da deformação equivalente, conforme expresso na Equação 17 (equação de Ludwick-Hollomon), utilizando os dados contidos na tabela 2.

Para o estado plano de deformações as tensões principais (usando o critério de von Mises) foram calculadas pelas Equações 12, 13 e 14 e a tensão média (σ_m) foi calculada pela Equação 15, BHATTACHARYA, A. *et al* (2011).

4.1 ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

A Tabela 5 apresenta os resultados dos experimentos de estampabilidade, com os parâmetros de entrada de material, raio de ferramenta e espessura inicial. bem como com os resultados de espessura final, ângulo final, deformações e tensões.

Tabela 5: Resultado dos experimentos de estampabilidade em SPIF

Nº	Δz (mm)	N (rpm)	h (mm)	S_0 (mm)	S (mm)	ϵ (%)	θ (rad)	φ_1 (-)	φ_2 (-)	φ_3 (-)	φ_{eq} (-)	σ_1 (N/mm ²)	σ_2 (N/mm ²)	σ_3 (N/mm ²)	σ_{eq} (N/mm ²)	σ_m (N/mm ²)
01	0,5	0	36	0,8	0,53	34%	0,847	0,324	0	-0,324	0,374	170,35	76,15	-18,06	163,16	76,15
02	1,0	0	32	0,8	0,52	35%	0,863	0,347	0	-0,347	0,401	171,93	77,03	-17,88	164,39	77,03
03	1,5	0	29	0,8	0,53	34%	0,847	0,324	0	-0,324	0,374	170,35	76,15	-18,06	163,16	76,15
04	0,5	400	36,5	0,8	0,44	45%	0,988	0,542	0	-0,542	0,626	183,07	83,48	-16,11	172,50	83,48
05	1,0	400	35	0,8	0,45	44%	0,973	0,516	0	-0,516	0,596	181,78	82,71	-16,36	171,60	82,71
06	1,5	400	34	0,8	0,45	44%	0,973	0,516	0	-0,516	0,596	181,78	82,71	-16,36	171,60	82,71
07	0,5	800	38	0,8	0,38	53%	1,076	0,705	0	-0,705	0,814	190,44	87,98	-14,47	177,46	87,98
08	1,0	800	38	0,8	0,41	49%	1,033	0,621	0	-0,621	0,717	186,82	85,75	-15,32	175,05	85,75
09	1,5	800	37	0,8	0,42	48%	1,018	0,594	0	-0,594	0,686	185,58	85,00	-15,59	174,22	85,00
10	0,5	0	36,5	0,8	0,52	35%	0,863	0,347	0	-0,347	0,401	171,93	77,03	-17,88	164,39	77,03
11	1,0	0	34	0,8	0,52	35%	0,863	0,347	0	-0,347	0,401	171,93	77,03	-17,88	164,39	77,03
12	1,5	0	27	0,8	0,54	33%	0,830	0,301	0	-0,301	0,347	168,69	75,24	-18,22	161,87	75,24
13	0,5	400	37	0,8	0,44	45%	0,988	0,542	0	-0,542	0,626	183,07	83,48	-16,11	172,50	83,48
14	1,0	400	35	0,8	0,41	49%	1,033	0,621	0	-0,621	0,717	186,82	85,75	-15,32	175,05	85,75
15	1,5	400	34	0,8	0,4	50%	1,047	0,649	0	-0,649	0,749	188,04	86,50	-15,04	175,87	86,50
16	0,5	800	38,5	0,8	0,38	53%	1,076	0,705	0	-0,705	0,814	190,44	87,98	-14,47	177,46	87,98
17	1,0	800	37	0,8	0,45	44%	0,973	0,516	0	-0,516	0,596	181,78	82,71	-16,36	171,60	82,71
18	1,5	800	37	0,8	0,41	49%	1,033	0,621	0	-0,621	0,717	186,82	85,75	-15,32	175,05	85,75

Para a obtenção dos dados apresentados na Tabela 5 foram utilizadas as equações descritas no capítulo 2.7. Os resultados indicam que no primeiro experimento (com menor rotação e menor incremento) se obteve maior deformação $\varphi_1 = 0,324$ e tensão máxima $\sigma_1 = 170,35$ N/mm². No 16º experimento (com menor incremento e maior rotação) se obteve maior deformação $\varphi_1 = 0,705$ e tensão máxima $\sigma_1 = 190,44$ N/mm². Ou seja, variando-se a rotação entre a máxima e a mínima, obteve-se uma variação da deformação φ_1 de 54% e a tensão máxima variou 10%.

Conforme apresentado na Tabela 5, a deformação φ_1 variou de 0,324 a 0,705 com a deformação φ_2 igual a 0, o que caracteriza a deformação plana, os valores da espessura final das amostras S (mm), foram medidos na região onde ocorreu a trinca no material, conforme Figura 37.

A profundidade h (mm) em que ocorreu a trinca foi determinada de acordo com a profundidade registrada no painel do centro de usinagem CNC no instante em que cada experimento foi interrompido, variando de 29,0 mm a 38,5 mm.

Como esperado, a espessura inicial s_0 (mm) da chapa conformada pelo processo de Estampagem Incremental é reduzida para a espessura final S (mm). Estes parâmetros são apresentados na chapa cortada, indicada na Figura 38, onde foi considerada a profundidade em que ocorreu a fratura h.

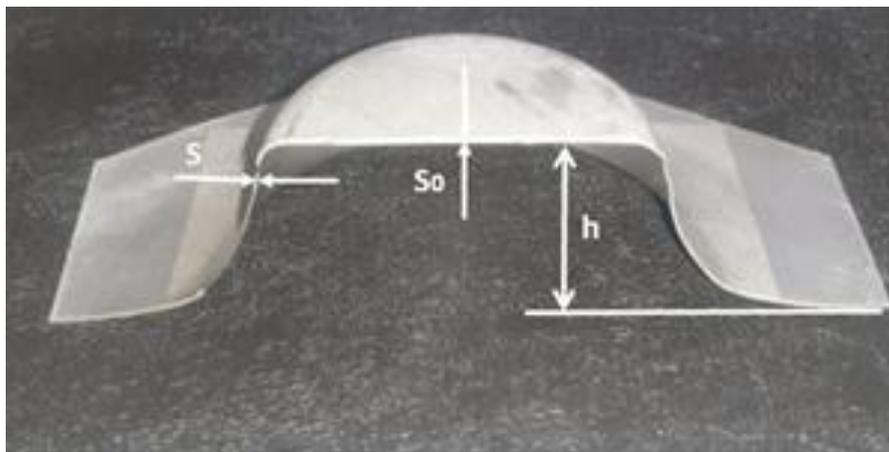


Figura 37: Variação de espessura na chapa estampada

As espessuras finais apresentaram valores (obtidos por cálculo) entre 0,38 mme 0,53 mm, conforme indicado na Tabela 5. Essa variação é função da profundidade estampada (MARTINS *et al.*, 2008), ou seja, quanto maior a profundidade estampada, menor será a espessura final da chapa, a Figura 38 apresenta os nove primeiros experimentos realizados variando os parâmetros, a Estampagem Incremental foi conduzida até o surgimento da trinca de modo a se obter a máxima deformação para cada grupo de parâmetros.

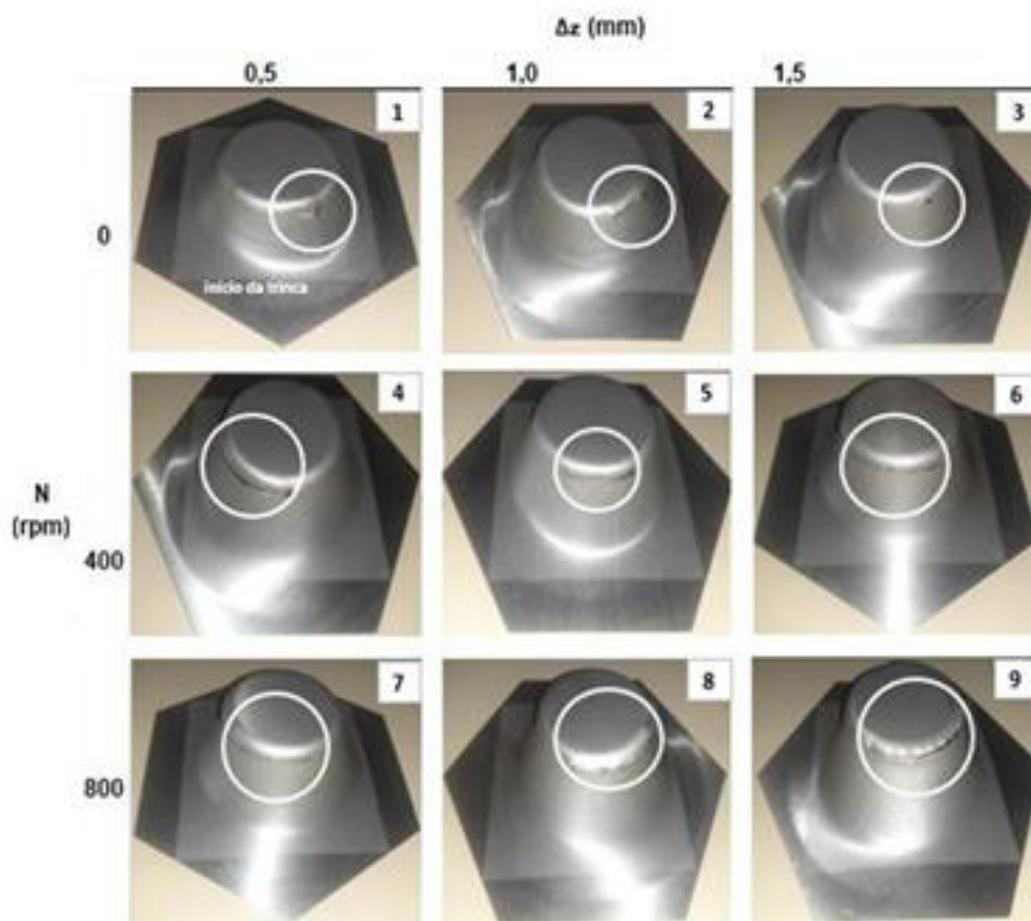


Figura 38: Início da trinca nos ensaios 1 a 9

Na segunda serie de ensaios, utilizando os mesmos parâmetros iniciais para incremento vertical e rotação, se obteve resultados bastante similares a da primeira etapa, os dados obtidos são apresentados na Tabela 5: Resultado dos experimentos de estampabilidade em SPIF com os números de amostras de 10 a 18, as amostras estampadas nessa etapa são apresentadas na Figura 39.

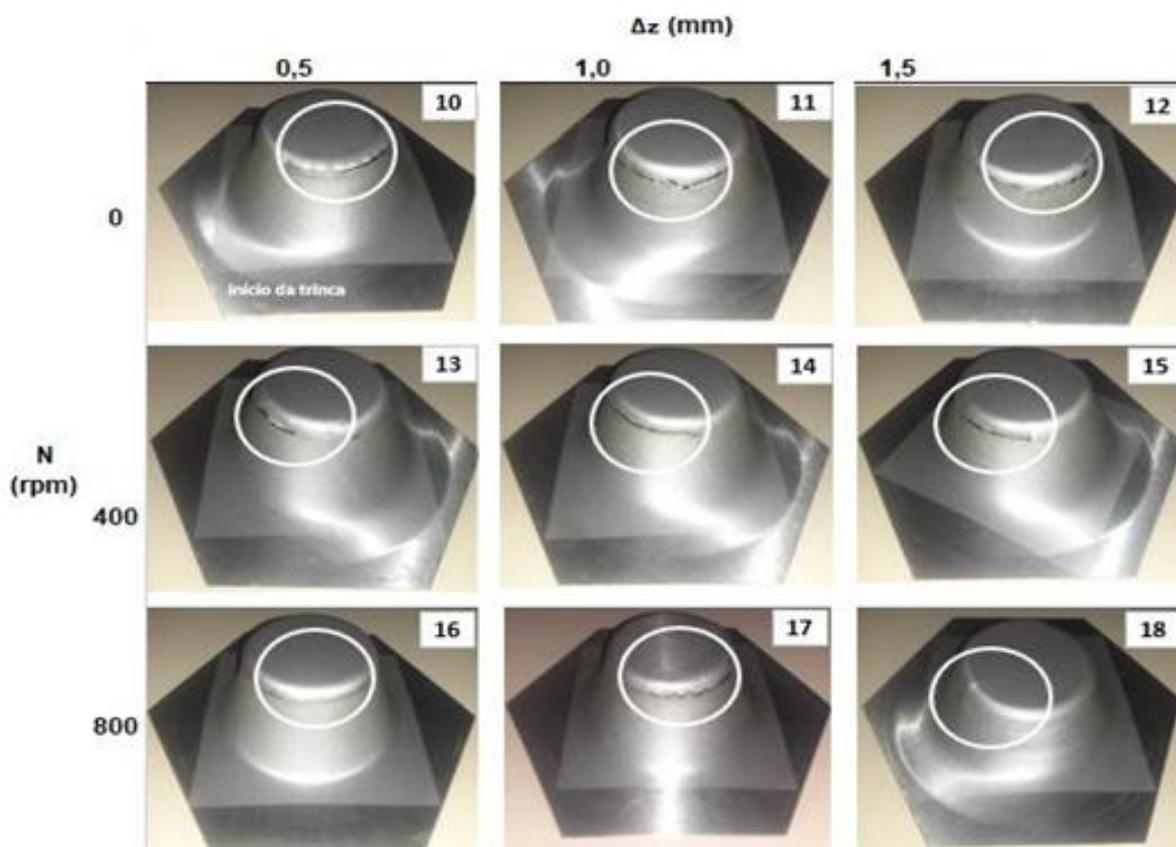


Figura 39: Início da trinca nos ensaios 10 a 18

A partir destes resultados é possível estabelecer uma relação entre a profundidade em que ocorre a trinca (h) e a rotação (S) em cada ensaio, conforme indicado na Figura 40, na qual é possível verificar que em grandes incrementos ($\Delta z = 1$ mm e $1,5$ mm) há pouca influência da rotação na profundidade em que ocorre a trinca, enquanto que em pequenos incrementos ($\Delta z = 0,5$ mm) essa influência passa a ser significativa. Sendo assim, verifica-se que quanto maior for a rotação da ferramenta utilizada no processo, maior será também a profundidade estampada, do mesmo modo como apresentado no estudo de Xu et al. (2015). No entanto, considerando que há pouca variação nos resultados para este tipo de material, dependendo da profundidade do hiperboloide a ser estampado pode ser mais produtivo utilizar incrementos grandes e fabricar a peça em menor período de tempo.

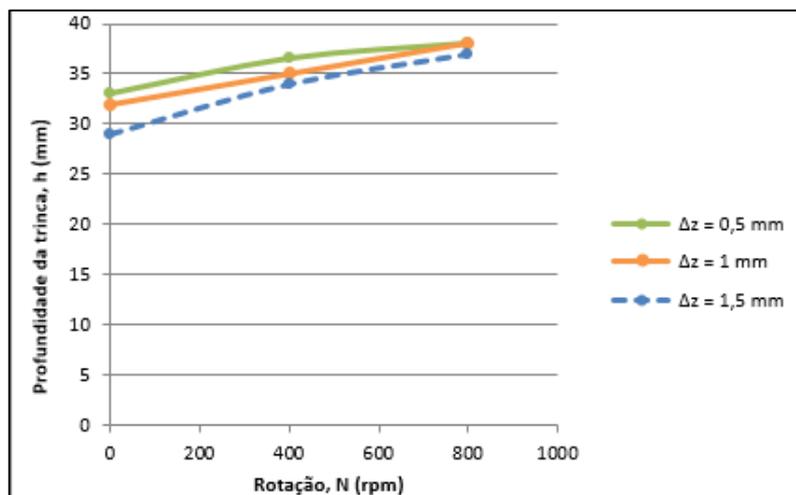


Figura 40: Relação de profundidade da trinca (h) e rotação (S) nos ensaios

A Figura 41 indica a relação entre a profundidade em que ocorre a trinca (h) e o incremento vertical (Δz) em cada ensaio, onde é possível observar que em todos os casos quanto maior o incremento, menor será a profundidade estampada sem trinca. Também é possível observar que a rotação só apresenta influência significativa combinada a pequenos valores de incremento vertical. No estudo de Bhattacharya *et al.* (2011) também é indicada a diminuição da estampabilidade da chapa (medida pelo ângulo da peça estampada) em virtude do aumento do incremento vertical.

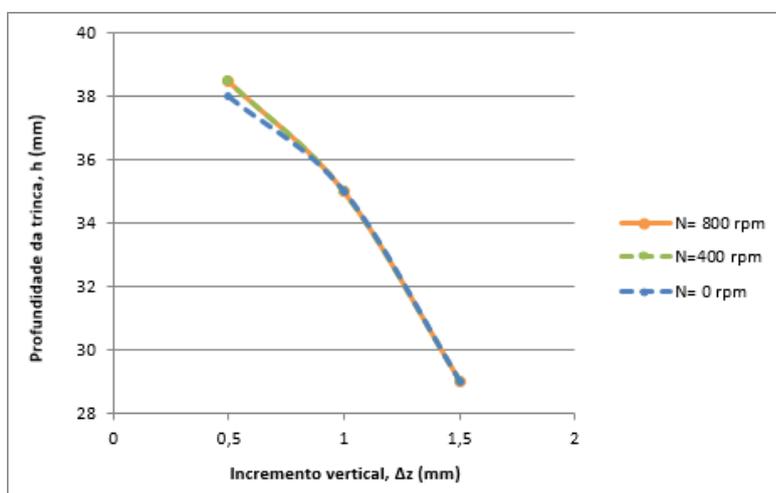


Figura 41: Relação de profundidade da trinca (h) e incremento vertical (Δz)

Para a determinação da Curva Limite de Conformação (CLC) foram utilizados os dados obtidos pelo ensaio Nakajima realizado por (SCHREIBER, 2018) que utilizou mesma liga de alumínio e espessura de chapa. O ensaio foi realizado em uma prensa hidráulica de duplo efeito com capacidade de 20 toneladas e marca Dan-Press.

Essa maior deformação obtida na Estampagem Incremental pode ser atribuída à forma como o processo ocorre, no qual a deformação plástica é realizada quando a ferramenta é forçada sobre a chapa, aplicando assim uma tensão concentrada em uma

pequena área de contato (ARSHAD, 2012). A estampabilidade, no processo de Estampagem Incremental, também aumenta à medida que ocorre a diminuição do diâmetro da ferramenta ou a diminuição do incremento vertical (PARK; KIM, 2003).

A partir desse ponto foi estabelecida a Reta Limite de Fratura (RLF) para cada combinação de parâmetros utilizada nestes 18 experimentos de Estampagem Incremental. A figura 42 apresenta os FFLDs mínimo e máximo, cada FFLD foi determinado utilizando coeficiente angular -1, de modo que φ_3 apresenta valor constante em qualquer modo de deformação, enquanto que no estado plano de deformações $\varphi_2=0$ e que no estado de tensão biaxial $\varphi_1= \varphi_2$.

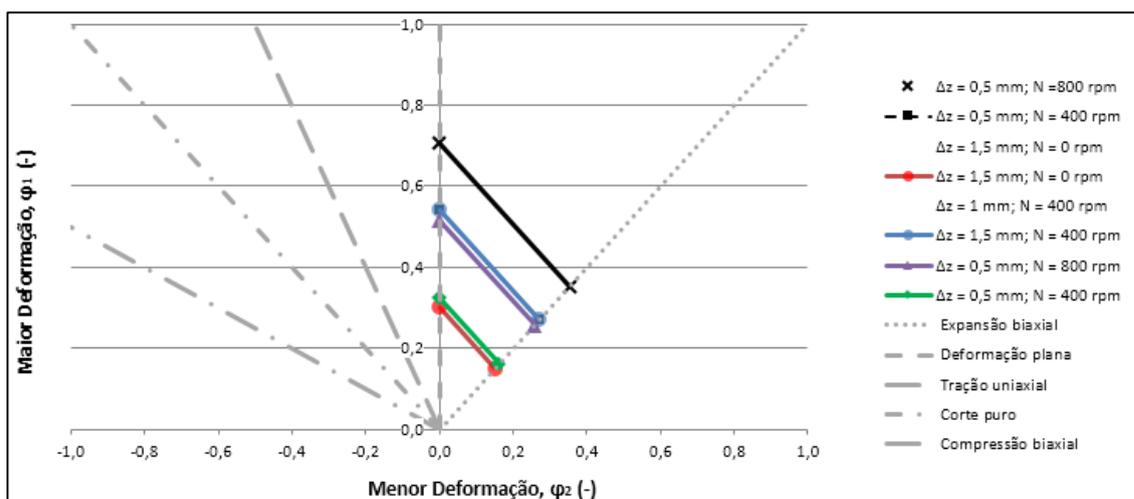


Figura 42: Reta Limite de Fratura (RLF) para os 18 experimentos com ferramenta de diâmetro $d_f = 10$ mm

A RLF com maior deformação foi obtida com $\Delta z = 0,5$ mm e $N = 800$ rpm. Também é possível observar que com $\Delta z = 1,5$ mm e $N = 800$ rpm obteve-se a mesma deformação que com $\Delta z = 1$ mm e $N = 400$ rpm. Sendo assim, pode-se verificar que é mais produtivo utilizar $\Delta z = 1,5$ mm do que $\Delta z = 1$ mm, o que possibilita a conformação em menor período de tempo com as mesmas deformações e praticamente a mesma profundidade estampada até o surgimento da trinca. Por outro lado, as menores deformações foram obtidas com $\Delta z = 1,5$ mm e $\Delta z = 1$ mm, independente da rotação utilizada.

4.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARAMETROS NA ESTAMPABILIDADE DO ALUMÍNIO AA1200-H14

Com o objetivo de analisar a influência dos parâmetros, incremento vertical Δz (mm) e rotação da ferramenta N (rpm) na estampabilidade do alumínio AA1200-H14, foi aplicada a técnica do Projeto e Análise de Experimentos (DoE), utilizando como

ferramenta a análise de variância ANOVA com auxílio do software Minitab.

Para examinar as diferenças entre as médias de nível para os fatores incremento vertical Δz (mm) e rotação da ferramenta N (rpm) foi utilizado o gráfico de efeitos principais. A Figura 43 apresenta os resultados da análise.

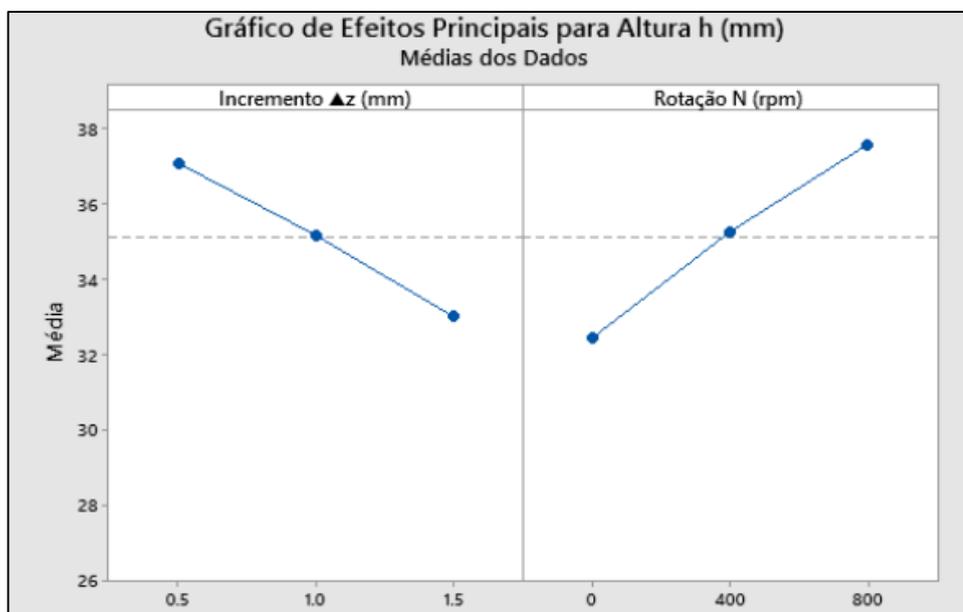


Figura 43: Efeitos principais para altura em que ocorre a trinca (mm), do incremento vertical Δz (mm) e rotação da ferramenta N (rpm).

Como pode ser observado no gráfico de efeitos principais, diferentes níveis de um fator estão afetando a resposta de maneira diferente, portanto, pode-se verificar estatisticamente que há um efeito principal.

Uma vez concluído que há efeitos principais, utilizou-se outra ferramenta da ANOVA para determinar se há ou não um padrão estatisticamente significativo. O gráfico de efeitos principais não é capaz de apresentar as interações, portanto para visualizar as interações utilizou-se o gráfico de interação.

A Figura 44 apresenta o gráfico de interação entre os parâmetros avaliados na ANOVA de duas vias.

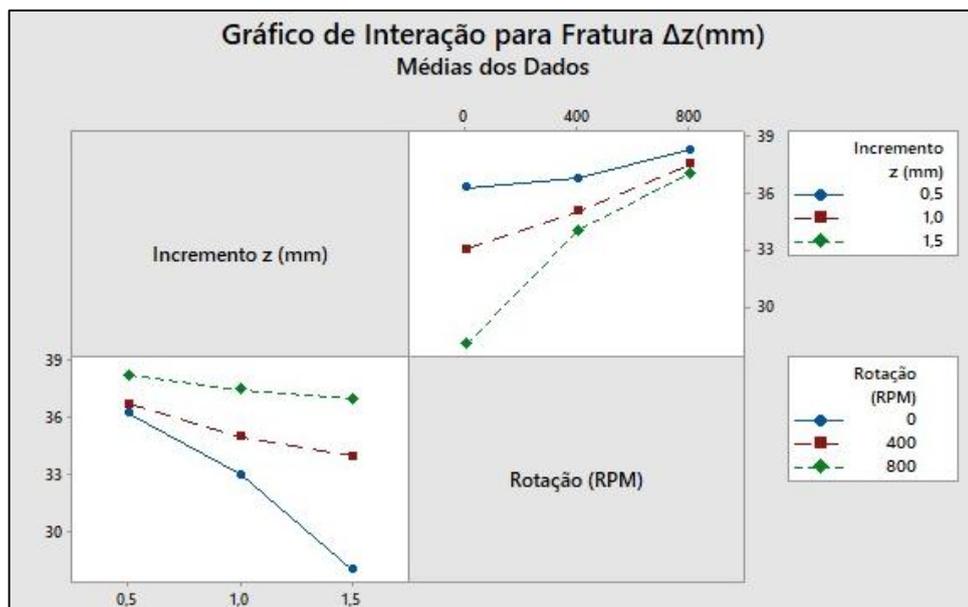


Figura 44: Gráfico de interação para altura em que ocorre a trinca (mm), incremento vertical Δz (mm) e rotação da ferramenta N (rpm).

O gráfico de interação (Figura 44) mostra o incremento vertical Δz (mm) versus a rotação da ferramenta N (rpm) para as alturas h (mm) de fratura do material, obtidas no processo de Estampagem Incremental do alumínio AA1200-H14. As linhas não paralelas no gráfico de interação indicam efeitos de interação entre o tipo de incremento vertical Δz (mm), rotação da ferramenta N (rpm) e altura h (mm). Este efeito de interação indica que a relação entre o incremento vertical de 0,5 mm e a rotação de 800 rpm, são mais significativos na altura onde ocorre a fratura no hiperboloide de alumínio AA1200-H14, do que os demais parâmetros, ou seja, exercem maior influência, conforme o trabalho de Xu et al. (2013) que afirma que maiores rotações resultam em maiores deformações.

4.3 ANÁLISE DE OTIMIZAÇÃO DE RESPOSTA

Com o objetivo de identificar o conjunto de parâmetros ideal para o processo de estampagem incremental do alumínio AA1200-H14, foi utilizado um gráfico de otimização de resposta, onde os resultados da altura h (mm) onde ocorreu a fratura do material, o incremento vertical Δz (mm) e a rotação da ferramenta N (rpm) utilizados na Estampagem Incremental foram analisados, por meio da ferramenta de otimização de resposta no Minitab, utilizando a resposta do tipo “Maior melhor” uma vez que o objetivo é justamente avaliar qual conjunto de parâmetros apresenta uma maior deformação do material. A Figura 45 mostra os resultados obtidos com um intervalo de confiança de 95%.

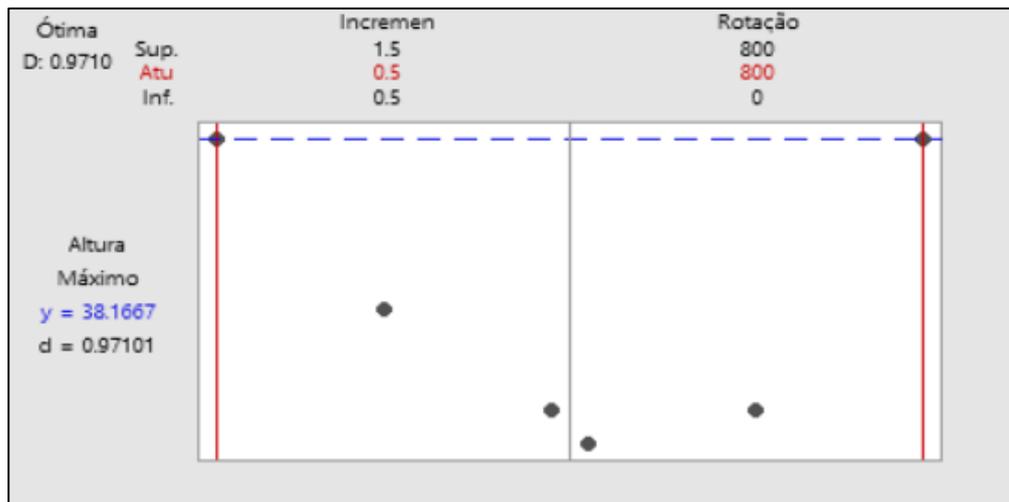


Figura 45: Gráfico de otimização de resposta para altura h (mm), incremento vertical Δz (mm) e rotação da ferramenta N (rpm).

A partir da Figura 45 é possível verificar, que as combinações que maximizam a altura h (mm) onde ocorre a fratura no alumínio AA1200-H14 são, incremento vertical de 0,5mm e rotação da ferramenta de 800 rpm.

5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

O processo se desenvolveu por meio da execução e análise de duas séries de experimentos de Estampagem Incremental do material, o procedimento foi realizado por meio da fabricação de peças com formato de hiperboloides estampadas em máquina CNC, com ferramenta de ponta esférica de 10 mm de diâmetro, variando os parâmetros de rotação (S) e incremento vertical (Δz) da ferramenta, totalizando 18 experimentos.

O estudo apresentou a relação entre a profundidade em que ocorre a trinca (h), incremento vertical (Δz) e rotação da ferramenta (S) em cada ensaio, onde é possível observar que a rotação mais alta utilizada no processo ($N=800$ rpm) apresenta influência significativa na deformação do alumínio AA1200-H14, combinada a pequenos valores de incremento vertical ($\Delta z=0,5$ mm), assim como constatado nos estudos de TEIXEIRA 2019 e XU et al. 2013.

Com base na análise dos 18 experimentos, foi possível determinar diferentes Retas Limite de Fratura para a mesma chapa, de acordo com a variação dos parâmetros de velocidade de rotação e incremento vertical da ferramenta, desta forma é possível fazer um comparativo com os trabalhos de SCHREIBER 2018 e AL-GHAMDI e HUSSAIN 2015, que variaram parâmetros como velocidade de rotação e geometria da ferramenta de estampagem e diferentes Retas Limites de Fratura para o mesmo material.

Apenas nos experimentos com maior velocidade de rotação (800 rpm) foram observadas irregularidades e excesso de rugosidade na superfície da peça após a Estampagem Incremental, assim como nos experimentos de TEIXEIRA 2019 e HAMILTON e JESWIET 2010.

Com o objetivo de analisar a influência dos parâmetros, incremento vertical Δz (mm) e rotação da ferramenta N (rpm) na estampabilidade do alumínio AA1200-H14, foi aplicada a técnica do Projeto e Análise de Experimentos (DoE), utilizando como ferramenta a análise de variancia ANOVA com auxílio do software Minitab.

Para examinar as diferenças entre as médias de nível para os fatores incremento vertical Δz (mm) e rotação da ferramenta N (rpm) foi utilizado o gráfico de efeitos principais, que revelou haver um efeito principal na deformação do alumínio AA1200-H14 durante o processo de Estampagem Incremental.

Uma vez concluído que há efeitos principais, utilizou-se outra ferramenta da ANOVA para determinar se há ou não um padrão estatisticamente significativo. O gráfico de efeitos principais não é capaz de apresentar as interações, portanto para visualizar as interações utilizou-se o gráfico de interação.

O gráfico de interação relacionou o incremento vertical Δz (mm) versus a rotação da ferramenta N (rpm) para as alturas h (mm) de fratura do material, obtidas no processo de Estampagem Incremental do alumínio AA1200-H14. As linhas não paralelas no gráfico

de interação indicaram efeitos de interação entre o tipo de incremento vertical Δz (mm), rotação da ferramenta N (rpm) e altura h (mm), este efeito de interação indica que a relação entre o incremento vertical de 0,5 mm e a rotação de 800 rpm, são mais significativos na altura onde ocorre a fratura no hiperboloide de alumínio AA1200-H14, do que os demais parâmetros, ou seja, exercem maior influência, conforme o trabalho de Xu et al. (2013) que afirma que maiores rotações resultam em maiores deformações.

Observou-se também que embora o incremento vertical contribua diretamente na deformação do material, ou seja, quanto menor o incremento vertical, maiores serão as deformações que poderão ser obtidas, o parâmetro rotação se mostrou ser o efeito principal na deformação, ou seja, é o parâmetro que exerce maior influência na estampabilidade do material estudado nessa pesquisa

Com o objetivo de identificar o conjunto de parâmetros ideal para o processo de estampagem incremental do alumínio AA1200-H14, foi utilizado um gráfico de otimização de resposta, onde os resultados da altura h (mm) onde ocorreu a fratura do material, o incremento vertical Δz (mm) e a rotação da ferramenta N (rpm) utilizados na Estampagem Incremental foram analisados, por meio da ferramenta de otimização de resposta no Minitab, utilizando a resposta do tipo “Maior melhor” uma vez que o objetivo é justamente avaliar qual conjunto de parâmetros apresenta uma maior deformação do material.

A partir da análise de otimização de resposta, foi possível verificar com um intervalo de confiança de 95%, que as combinações que maximizam a altura h (mm) onde ocorre a fratura no alumínio AA1200-H14 são, incremento vertical de 0,5mm e rotação da ferramenta de 800 rpm.

A RLF com maior deformação foi obtida com $\Delta z = 0,5$ mm e $N = 800$ rpm. Também é possível observar que com $\Delta z = 1,5$ mm e $N = 800$ rpm obteve-se a mesma deformação que com $\Delta z = 1$ mm e $N = 400$ rpm. Sendo assim, pode-se verificar que é mais produtivo utilizar $\Delta z = 1,5$ mm do que $\Delta z = 1$ mm, o que possibilita a conformação em menor período de tempo com as mesmas deformações e praticamente a mesma profundidade estampada até o surgimento da trinca. Por outro lado, as menores deformações foram obtidas com $\Delta z = 1,5$ mm e $\Delta z = 1$ mm, independente da rotação utilizada.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliado a influência dos parâmetros, incremento vertical (Δz) e rotação da ferramenta (S) na estampabilidade do alumínio puro AA1200-H14, com espessura de 0,8 mm.

Nos 18 experimentos de Estampagem Incremental realizadas na chapa de alumínio AA1200 H14, utilizando ferramenta de diâmetro 10 mm, foi verificado que as maiores deformações nas chapas podem ser obtidas utilizando baixos valores de incremento vertical, assim como constatado nos estudos de TEIXEIRA 2019, combinadas com altos valores de rotação, assim como também verificado por Xu et al. 2013.

Com a aplicação da análise de variância, por meio do software Minitab, utilizando o gráfico de interação, gráfico de efeitos principais e gráfico de otimização de resposta, foi possível verificar estatisticamente que entre os parâmetros estudados neste trabalho, a maior rotação utilizada (800 rpm) associado com o menor incremento vertical (5 mm), proporcionaram a maior deformação no material, também foi possível verificar que a rotação da ferramenta exerce maior influência na deformação do alumínio AA1200-H14 do que o incremento vertical.

A máxima deformação encontrada nos experimentos foi $\phi_{eq} = 0,814$ para incremento vertical de 0,5mm e rotação da ferramenta de 800 rpm

Observou-se que incrementos verticais menores (como 0,5 mm), mesmo permitindo maiores deformações, apresentam o inconveniente de deixar o período de tempo de processo demasiadamente longo.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros há a possibilidade de ampliar a análise de parâmetros aqui descrita na área de Estampagem Incremental, aplicando-a a chapas de alumínio com menores espessuras.

Também é possível ampliar a análise de parâmetros de Estampagem Incremental comparando uma faixa maior de diâmetros de ferramentas, bem como a análise da influência da velocidade de avanço no processo.

Outra alternativa que este estudo indica é a análise mais aprofundada da influência da seleção do lubrificante adequado para o processo de Estampagem Incremental e sua relação com o surgimento de rugosidade na superfície do material estampado. Uma análise comparativa entre graxa e óleo na Estampagem Incremental seria uma opção.

8 REFERÊNCIAS

AI S, LONG H. A review on material fracture mechanism in incremental sheet forming. *IntJAdvManufTechnol*2019;104:33–61. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-3682->.

AL-GHAMDI, K. A.; HUSSAIN, G. Threshold tool-radius condition maximizing the formability in SPIF considering a variety of materials: Experimental and FE investigations. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Amsterdam, v. 88, p. 82–94, 2015.

AMBROGIO, G.; FILICE, L.; GAGLIARDI, F. Improving industrial suitability of incremental sheet forming process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 58, n. 9–12, p. 941–947, 2012.

ARAGHI, B. T. *et al.* Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 225–228, 2009.

ARAGHI, B.T. *et al.* Investigation on Incremental Sheet Forming Combined with Laser Heating and Stretch Forming for the Production of Lightweight Structures. **Key Engineering Materials**, Aedermannsdorf, v. 473, p. 919–928, 2011.

ARRUDA, R. P. **Estampagem Incremental na Conformação de Chapas para Fabricação de Coletores Solares Planos**. 96 f. 2010. - 96 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ARSHAD, S. **Single Point Incremental Forming: A study of Forming Parameters, Forming limits and Part accuracy of Aluminium 2024, 6061 and 7475 alloys**. Stockholm: 101 f. Thesis (Doctorate in Engineering) - Department of Industrial Engineering and Production, KTH Royal Institute of Technology, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892-1: Materiais metálicos - Ensaio de Tração - Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2013.

AZEVEDO, N. G. *et al.* Lubrication aspects during Single Point Incremental Forming for steel and aluminum materials. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, Seoul, v. 16, n. 3, p. 589–595, 2015.

BARUAH, A.; PANDIVELAN, C.; JEEVANANTHAM, A. K. Optimization of AA5052 in incremental sheet forming using grey relational analysis. **Measurement**, Oxford, v. 106, p. 95–100, 2017.

BHATTACHARYA, A. *et al.* Formability and Surface Finish Studies in Single Point Incremental Forming. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, [s. l.], v. 133, n. December, 2011.

BLAZYNSKI, T.Z. *Plasticity and Modern Metalforming Technology*. London: Elsevier, 1989. 359p.

BONDUELLE, A. **Caractérisation du panneau de particules surface mélaminé par son aptitude a l'usinabilité**. Tese de Doutorado, 205p., Université de Nancy I. Nancy, 1994

CASTELAN, J. **Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano**. 2010. - 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

Centeno G, Bagudanch I, Martínez-Donaire AJ, García-Romeu ML, Vallellano C. **Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming**. Mater Des 2014;63:20–9. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.066>.

CHANG Z, LI M, CHEN J. Analytical modeling and experimental validation of the forming force in several typical incremental sheet forming processes. Int J Mach Tools Manuf 2019;140:62–76. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.03.003>

COBDEN, Ron; ALCAN; BANBURRY. Aluminium physical properties, characteristics and alloys. 1994. Disponível em: <<http://www.alueurope.eu/>>. Acesso em: 15 abr. 2015.

CRUZ, Alexandre Monteiro *et al.* Estampagem Incremental Em Aço Automobilístico.[s. l.], n. 2011, 2015.

Do V-C, Pham Q-T, Kim Y-S. **Identification of forming limit curve at fracture in incremental sheet forming**. Int J Adv Manuf Technol 2017;92:4445–55. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0441-8>.

Durante M, Formisano A, Langella A, Minutolo FMC. **Technology The influence of tool rotation on an incremental forming process**. J Mater Process 2009;209:4621–6. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.11.028>.

DUFLOU, J. R. *et al.* Improved SPIF performance through dynamic local heating. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Amsterdam, v. 48, n. 5, p. 543–549, 2008.

Fan G, Gao L, Hussain G, Wu Z. **Electric hot incremental forming: A novel technique**. Int J Mach Tools Manuf 2008;48:1688–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.07.010>.

FRITZEN, D. **Estudo Do Processo De Estampagem Incremental Em Chapa De Latão 70/30**. 2012. [s. l.], 2012.

GATEA, S., LU, B., CHEN, J., et al. Investigation of the effect of forming parameters in incremental sheet forming using a micromechanics based damage model, Int. J. Mater. Form., v. 12, n. 4, pp. 553-574, 2019.

GALDINO, A. Estampagem Profunda. Faculdade de Teconologia Mogi Mirim / SP. Mogi Mirim, p. 116. 2010,

GOUVEIA, B.; RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica - Volume III - Exercícios Resolvidos**. Lisboa: Escolar Editora, 2011.

HAGAN, E.; JESWIET, J. A review of conventional and modern single point sheet metal forming methods. of Engineering Manufacture. 2003 vol 217 No B2. Pp 213 - 225.

HAM M, JESWIET, J. Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2006; 55:241-4. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60407-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60407-7).

HAMILTON, K.; JESWIET, J. Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 59, n. 1, p. 311–314, 2010.

HANDBOOK OF ALUMINUM, Physical Metallurgy and Processes, Volume 1, 1996. 1309 p

HIRT, G. *et al.* Forming strategies and Process Modelling for CNC Incremental Sheet Forming. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 53, n. 1, p. 203–206, 2004.

HUSSAIN, G., GAO, L., ZHANG, Z.Y., Formability evaluation of a pure titanium sheet in the cold incremental forming process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, v. 37, n. 9-10, pp. 920-926, 2008.

<https://www.unilubrificantes.com.br/produto/hidramax-aw>

ISO_16840-3. International Standard International Standard. **61010-1 © Iec:2001**, [s.l.], v. 2003, p. 13, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION for STANDARD. Metallic Materials – Guidelines for the Determination of Forming-Limit Diagram: **ISO 12004**. Suisse, 1997. 7p.

JACKSON, K.; ALLWOOD, J. **The Mechanics of Incremental Sheet Forming.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 209, n. 3, p. 1158-1174, 2009.

JESWIET, J.; SZEKERES, A. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, [s. l.], v. 54, n. 2, p. 88–114, 2005.

Kim Y. H, Park J. J. **Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal.** *J Mater Process Technol* 2002;130–131:42–6. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00788-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00788-4).

KOPAC, J.; KAMPUS, Z. Incremental sheet metal forming on CNC milling machinetool. *Journal of Materials Processing Technology*, [s. l.], v. 162–163, n. SPEC. ISS., p. 622–628, 2005

LESZAK, E. **Apparatus and process for incremental dieless forming.** US3342051A, 19 set. Concessão: 1967.

LORA, F. A. **Avaliação das deformações no aço DC04 quando submetido ao processo híbrido de estampagem incremental posterior ao processo convencional.** 1–5 f. 2014. - 101 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

Malhotra R, Xue L, Belytschko T, Cao J. Mechanics of fracture in single point incremental forming. *J Mater Process Technol* 2012;212:1573–90.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.021>.

MARTINS, P. A F *et al.* Single point incremental forming of polymers. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 229–232, 2008.

MAXIMILIANO, G. **Estampagem Incremental de Múltiplos Passes em Chapa de Latão C268**. 104 f. 2016. - 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MEIER, H.; MAGNUS, C.; SMUKALA, V. Impact of superimposed pressure on dieless incremental sheet metal forming with two moving tools. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 60, n. 1, p. 327–330, 2011.

MENDELSKI, J. Técnicas do projeto e análise de experimentos (DoE – Design of Experiment) aplicado no processo de forjamento. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017

NETTO, Sergio. Desenvolvimento do processo de construção de curvas limite de conformação. [s. l.], v. 101, n. 3, p. 55, 2004.

PALUMBO, G.; BRANDIZZI, M. Experimental investigations on the single point incremental forming of a titanium alloy component combining static heating with high tool rotation speed. **Materials and Design**, Amsterdam, v. 40, p. 43–51, 2012.

PARK, J. J.; KIM, Y. H. Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 140, n. 1-3 SPEC., p. 447–453, 2003.

PRADELLA, M. P., FOLLE, L. F., Estudo dos parâmetros de estampagem incremental para PVC TT - Study of incremental sheet forming process of PVC, *Matéria* (Rio Janeiro), v. 21, n. 4, pp. 1094-1104, 2016.

PONTICEL, P. **Ford sheet-metal-forming technology on journey from lab to application**. [S. l.], 2016.

PONTICEL, Patrick. **Ford sheet-metal-forming technology on journey from lab to application**. [S. l.], 2013.

Rauch M, Hascoet JY, Hamann JC, Plenel Y. **Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications**. *CAD Comput Aided Des* 2009;41:877–85. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2009.06.006>.

REAGAN, J., SMITH, E. *Metal Spinning*, 1991, (Lindsay Publications, Bradley, IL) .80p

SCHAEFFER, L. **Manufatura por Conformação Mecânica**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SCHAEFFER, Lírio. **Conformacao_Mecanica_Lirio_Schaeffer.pdf**. [S. l.: s. n.], 2004.

SCHREIBER RG, TEIXEIRA AR, PEREIRA RSF, DA SILVA OSÓRIO F, SCHAEFFER L. Prototyping of absorber plate for solar collector by ISF and FSW processes. *J*

Brazilian Soc Mech Sci Eng 2021;43:1–12. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03083-5>

SCHREIBER, Rafael Gustavo; SCHAEFFER, Lirio. Manufacture of absorber fins for solar collector using incremental sheet forming. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 1132–1140, 2019.

SENA, J. I. V. de. *Estampagem incremental: Um novo conceito de produção*. 2009. 65 Tese (Dissertação de Mestrado). Universidade de Aveiro Ano 2009 Departamento de Engenharia Mecânica, Aveiro, 2009

SILVA, P.J. Estampagem incremental utilizada para prototipagem de peças de aço ABNT 1008 e ABNT 304. 2011. Dissertação de mestrado. UNB, Brasília/DF, 2011

Silva MB, Skjoedr M, Atkins AG, Bay N, Martins PAF. Single-point incremental forming and formability-failure diagrams. *J Strain Anal Eng Des* 2008;43:15–35. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA340>.

TEIXEIRA A R, Schreiber RG, Schaeffer L. Influência das velocidades de Avanço e rotação na Estampagem Incremental de Alumínio. *Rev Ferram* 2018:22–6.

TEIXEIRA A R. Análise de Parâmetros de Estampagem Incremental para Alumínio Puro com Diâmetro de Ferramenta 22 mm. **Dissertação - UFRGS**, [s. l.], 2019.

THE ALUMINUM ASSOCIATION. *Aluminum Alloys: Selection and Applications*. Washington, D.C: The Aluminum Association, Inc., 1998. 24 p.

TIBURI, F. Aspectos do processo de Estampagem Incremental. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

XU, D. *et al.* Mechanism investigation for the influence of tool rotation and laser surface texturing (LST) on formability in single point incremental forming. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Amsterdam, v. 73, p. 37–46, 2013.

ANEXOS

Anexo 01 - certificado de material prima

 Galeazi Sul Metais Não Ferrosos		IRMÃOS GALEAZI LTDA Rua João Brufatto, 45 - Bairro Navegantes - CEP: 90.240-380 - Porto Alegre/RS Telefone: (51) 2104.1066 - Fax: (51) 2104.1080 Site: www.galeazi.com.br - E-mail: galeazi@galeazi.com.br																	
CNPJ: 00.083.742/2980-20 CÓDIGO: 220582		ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA <i>Informamos que os materiais constantes em nossa nota fiscal abaixo mencionada, obedecem conforme nosso fornecedor, as seguintes normas técnicas de fabricação.</i>																	
ESPECIFICAÇÃO Nº: 1126		NFE Nº: 104783																	
CLIENTE: #N/D		DATA DE EMISSÃO: 06/02/2017																	
NORMA CORRESPONDENTE: ASTM 1200 LIGA 1200 H-14 TÊMPERA: H14		MATERIAL: CHAPA ALUMINIO 2000X1000 1,00 MM NL																	
PROPRIEDADES MECÂNICAS																			
L. R. (kgf/mm ²)		L. E. (kgf/mm ²)		Along. (%)		Dureza H. B.		C. E. (%)											
MIN.	MÁX.	MIN.	MÁX.	MIN.	MÁX.	MIN.	MÁX.	MIN.	MÁX.										
110	145	95	-	1	3	-	32	-	-										
COMPOSIÇÃO QUÍMICA																			
	Al	B	Be	Bi	Ca	Cr	Cu	Fe	Ga	Grafite	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P	Pb	
MIN.	0,050	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
MÁX.	0,200	-	-	-	-	-	0,050	(Si+Fe)	-	-	-	-	0,050	-	-	-	-	-	
	Si	Sn	Sr	Ti	V	Zn	Zr	Outros											
MIN.	-	-	-	-	-	-	-	-											
MÁX.	1,000	-	-	-	0,050	-	0,100	-	0,150										
Legenda L. R. Limite de Resistência L. E. Limite de escoamento Along. Alongamento (%) H. B. Dureza Brinell C. E. Condutividade Elétrica												Porto Alegre 06/02/2017 _____ Jorge Carvalho							



HIDRAMAX AW

A linha **HIDRAMAX AW** é recomendada para uso em sistemas hidráulicos de alta rotação, redutores, mancais de deslizamento, compressores de ar, caixas de engrenagens, mancais de rolamento, máquinas operatrizes, prensas, injetoras, máquinas têxteis, etc.

São formulados com óleos básicos parafínicos e contém aditivos antioxidante, anticorrosivo, antidesgaste e antiespumante. Possuem boas características de resistência a cargas e ao desgaste, protegendo as partes móveis da bomba e outros componentes do sistema. Recomendado para pressões até 4.200 psi.

Atende as seguintes especificações: DIN 51524 Parte 2 - HLP, ASTM D-6158/99 (HM), SAE MS1004 (HM) e U.S. Steel 126 e 127. Atende ainda aos níveis de desempenho Denison HF-0, HF-1 e HF-2, Eaton I-286-S/ M-2950-S, Cincinnati P-68, P-69 e P-70 e ISO 11158 (HH, HL, HM e HR).

CARACTERÍSTICAS TÍPICAS ORIENTATIVAS

HIDRAMAX AW	32	46	68	100	150
Viscosidade a 40°C, cSt	32,10	46,20	68,30	102,00	152,50
Viscosidade a 100°C, cSt	5,40	6,80	9,20	12,30	15,90
Índice de Viscosidade	102	101	111	113	108
Densidade a 20/4 °C, g/ml	0,871	0,873	0,877	0,881	0,886
Ponto de Fulgor, °C	212	220	230	245	248
Corrosão em Lâmina de Cobre	1 A	1 A	1 A	1 A	1 A
Demulsibilidade	40/40/0 54 °C	40/40/0 54 °C	40/40/0 54 °C	40/40/0 82 °C	40/40/0 82 °C