



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 COM USO DE CONTRAPRESSÃO PNEUMÁTICA
DO ALUMÍNIO PURO AA1200-H14**

Andrison Rodrigues Teixeira

Tese de Doutorado

Porto Alegre

2024

ANDRISON RODRIGUES TEIXEIRA

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL COM USO DE CONTRAPRESSÃO PNEUMÁTICA
DO ALUMÍNIO PURO AA1200-H14**

Tese de Doutorado submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Lirio Schaeffer
PPGE3M/UFRGS

Porto Alegre

2024

ANDRISON RODRIGUES TEIXEIRA

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL COM USO DE CONTRAPRESSÃO PNEUMÁTICA
DO ALUMÍNIO PURO AA1200-H14**

Esta tese foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de doutor em engenharia e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni
Coordenador do PPGE3M

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rafael Gustavo Schreiber
Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)

Prof. Dr. Anderson Daleffe
Centro Universitário (UNISATC)

Prof. Dr. Daniel Fritzen
Centro Universitário (UNISATC)

*Dedico aos meus pais, João Vieira
Teixeira (in memoriam) e Maria de
Lourdes Rodrigues (in memorian).*

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pela vida e pela oportunidade de desenvolver minhas capacidades acadêmicas.

À minha esposa, Talita Reis Teixeira, por sempre estar ao meu lado e me apoiar e ser companheira em todos meus projetos.

Ao meu orientador, Professor Dr. Lirio Schaeffer, pela ajuda e contribuições com seu conhecimento na preparação e elaboração desse trabalho, com dedicação, seriedade e ética.

Ao Professor Dr. Rafael Gustavo Schreiber - Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC, pelo apoio e contribuição do seu conhecimento neste trabalho.

À Empresa G1 Equipamentos, por disponibilizar sua estrutura e recursos sem medir esforços para a execução dos experimentos práticos e às análises necessárias para a tese.

Ao colega Lucas Martins Teixeira, pela disponibilidade e prestação de serviços na programação de operação CNC.

RESUMO

Este trabalho avalia a influência do uso de contrapressão de ar na estampabilidade e na precisão geométrica de peças fabricadas por Estampagem Incremental. Os experimentos foram realizados no centro de usinagem CNC, com uma ferramenta semiesférica, montada no eixo árvore da máquina e a chapa fixada em um dispositivo, e nos experimentos com contrapressão de ar foi utilizada uma pressão de 1 bar. Para avaliar a estampabilidade foram realizados vinte e seis experimentos em chapas de alumínio puro AA1200-H14, conformando um canal reto, com e sem contrapressão e variando também as velocidades de avanço e de rotação. Para a avaliação da precisão geométrica foram realizados dois experimentos com perfil piramidal sendo realizado 1 experimento com contrapressão pneumática e 1 experimento sem contrapressão em uma matriz parcial. Ambos os testes foram realizados com o incremento vertical (Δz) constante.

Palavras-chaves: Estampagem Incremental. Estampabilidade. Precisão Geométrica. Contrapressão.

ABSTRACT

This work evaluates the influence of the use of air counterpressure on the stampability and geometric precision of parts manufactured by Incremental Sheet Forming. The experiments were carried out in the CNC machining center, with a semi-spherical tool, mounted on the machine's spindle and the plate fixed in a device, and in the experiments with air counterpressure, a pressure of 1 bar was used. To evaluate stampability, twenty-six experiments were carried out on AA1200-H14 pure aluminum sheets, forming a straight channel, with and without counterpressure and also varying the feed and rotation speeds. To evaluate the geometric precision, two experiments were carried out with a pyramidal profile, 1 experiment with pneumatic counterpressure and 1 experiment without counterpressure in a partial matrix. Both tests were performed with a constant vertical increment (Δz).

Keywords: Incremental Sheet Forming. Stampability. Geometric Precision. Counterpressure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - (a) Estampagem Incremental de Ponto Único, (b) Estampagem Incremental de Dois Pontos..... | 17 |
| Figura 2 - Torno de Repuxo..... | 23 |
| Figura 3 - Braço Robótico (Martelagem) | 24 |
| Figura 4 - Variantes de Estampagem Incremental..... | 25 |
| Figura 5 - Ciclo de Aplicação da Estampagem Incremental..... | 26 |
| Figura 6 - Tipos de Estampagem Incremental..... | 27 |
| Figura 7 - Estampagem Incremental com Ponto de Apoio..... | 28 |
| Figura 8 - Estampagem incremental de ponto simples..... | 29 |
| Figura 9 - Representação Esquemática de SPIF..... | 30 |
| Figura 10 - TPIF com matriz estacionária..... | 31 |
| Figura 11 - TPIF com Matriz Positiva na Situação Inicial (a) e na Situação Final (b)..... | 32 |
| Figura 12 - TPIF com Matriz Negativa na Situação Inicial (a) e na Situação Final (b)..... | 32 |
| Figura 13 - TPIF com Apoio Genérico Fixo na Situação Inicial (a) e na Situação Final (b) | 33 |
| Figura 14 - TPIF com Apoio Genérico Móvel utilizando robôs (a) e detalhe ampliado do processo (b)..... | 34 |
| Figura 15 - Estampagem incremental de ponto simples..... | 34 |
| Figura 16 - Processo MSPIF e o efeito de encruamento da chapa a cada passe..... | 36 |
| Figura 17 - Mecanismo de evolução da falha estrutural..... | 38 |
| Figura 18 - Comparação Curva Limite a FLC e o FFLD..... | 40 |
| Figura 19 - Redução da espessura de parede..... | 42 |
| Figura 20 - Relação entre o ângulo de parede e a espessura da chapa no processo de Estampagem Incremental..... | 43 |
| Figura 21 - Variação da inclinação da chapa..... | 44 |
| Figura 22 - Diagrama de correção de desvios..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Figura 23 - Ferramenta de conformação com ponta esférica de movimento “livre”..... | 46 |
| Figura 24 - Ferramentas de conformação..... | 47 |
| Figura 25 - Ferramentas com extremidade esférica sólida de conformação..... | 47 |
| Figura 26 - Contato da parede da chapa com a ferramenta de conformação... | 48 |
| Figura 27 - Ferramentas de conformação de ponta esférica sólida com 6,10 e 30mm de diâmetro e com ponta de plástico (direita)..... | 48 |
| Figura 28 - Influência do diâmetro da ferramenta no ângulo máximo da parede..... | 49 |
| Figura 29 - Comparação entre vários diâmetros de ferramenta no diagrama limite de conformação..... | 50 |
| Figura 30 - Aferimento da deformação pelo ferramental..... | 52 |
| Figura 31 - Centro de usinagem (CNC)..... | 53 |
| Figura 32 - prensa-chapas..... | 54 |
| Figura 33 - Célula de Hidroconformação..... | 56 |
| Figura 34 - (a) produto conformado e (b) processo de conformação Hidroconformação..... | 58 |
| Figura 35 - Ferramenta fabricada em policarbonato por impressão em 3D e aplicada no processo de Hidroconformação..... | 59 |
| Figura 36 - Tipos de Hidroconformação..... | 60 |
| Figura 37 - Etapas do processo de Hidroconformação..... | 61 |
| Figura 38 - Estampagem Incremental Hidroconformação..... | 62 |
| Figura 39 - Estratégia de múltiplos estágios e múltiplas etapas..... | 63 |
| Figura 40 - Centro de usinagem Romi Discovery 308..... | 66 |
| Figura 41 - Corpo de prova ensaio de tração..... | 67 |
| Figura 42 - Máquina EMIC 23-600..... | 67 |
| Figura 43 - Matriz bacia Hermética..... | 68 |
| Figura 44 - Desenho da peça estampada..... | 69 |
| Figura 45 - Ferramenta Ø 4mm..... | 69 |
| Figura 46 - Percurso da ferramenta nos experimentos..... | 70 |

| | |
|--|----|
| Figura 47 - Sistema de pressurização..... | 70 |
| Figura 48 - Medições da chapa..... | 71 |
| Figura 49 - Matriz parcial reta Hermética..... | 72 |
| Figura 50 - Dispositivo para realização dos experimentos de Estampagem Incremental..... | 72 |
| Figura 51 - Ferramenta Ø 9,5mm..... | 73 |
| Figura 52 - Percurso da ferramenta nos experimentos..... | 73 |
| Figura 53 - Resultados dos Ensaios de Estampagem Incremental de AA1200-H14..... | 74 |
| Figura 54 - Perfil do canal estampado após ensaios de Estampagem Incremental..... | 75 |
| Figura 55 - Deformações na chapa estampada..... | 75 |
| Figura 56 - Realização dos experimentos com Ferramenta Ø9,5mm..... | 78 |
| Figura 57 - Relação de rotação (N) e deformação (ϕ_1) para cada velocidade de avanço (a) nos experimentos de Estampagem Incremental, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm..... | 80 |
| Figura 58 - (a) Superfície externa com irregularidades e Experimento 10 e (b) sem irregularidades (demais experimentos)..... | 81 |
| Figura 59 - (a) Superfície interna com irregularidades (experimento 10) e (b) sem irregularidades (demais experimentos)..... | 82 |
| Figura 60 - Pontos de medição..... | 83 |
| Figura 61 - Medição das superfícies..... | 84 |
| Figura 62 - Retas Limite de Fratura (RLF) para Estampagem Incremental de AA1200, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm..... | 84 |
| Figura 63 - Matriz reta hermética pressurizada..... | 85 |
| Figura 64 - Relação de rotação (N) e deformação (ϕ_1) para cada velocidade de avanço (a) nos experimentos de Estampagem Incremental, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm..... | 87 |
| Figura 65 - Retas Limite de Fratura (RLF) para Estampagem Incremental de AA1200, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm..... | 88 |
| Figura 66 - Matriz parcial bacia hermética pressurizada..... | 89 |
| Figura 67 - (a) Experimento sem contrapressão de ar, (b) Experimento com contrapressão de ar..... | 89 |

| | |
|---|----|
| Figura 68 - Modelo matemático..... | 90 |
| Figura 69 - Gráfico de comparação dos perfis..... | 91 |
| Figura 70 - Experimento sem contrapressão de ar..... | 91 |
| Figura 71 - Experimento com contrapressão de ar..... | 92 |
| Figura 72 - Curva da “Tensão x Deformação”..... | 93 |
| Figura 73 - Gráfico da deformação principal em função do avanço..... | 95 |
| Figura 74 - Gráfico da deformação principal em função da rotação..... | 96 |
| Figura 75 - Gráfico de Deformação X Avanço X Rotação X Pressão em 1 bar. | 98 |
| Figura 76 - Gráfico de deformação X Avanço X Rotação X Pressão 0 bar..... | 99 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Resultados dos Ensaios de Estampagem Incremental de AA1200-H14, com $\Delta z = 0,5$ mm, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm..... | 79 |
| Tabela 2 - Tabela de resultados da rugosidade..... | 83 |
| Tabela 3 - Resultados dos Ensaios de Estampagem Incremental de AA1200-H14, com $\Delta z = 0,5$ mm, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm..... | 86 |
| Tabela 4 - Resultados dos experimentos de estampabilidade SPIF..... | 94 |
| Tabela 5 - Comparação dos resultados dos ensaios sem contrapressão..... | 100 |
| Tabela 6 - Comparação dos resultados dos ensaios com contrapressão..... | 100 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|--------|--|
| ANOVA | Análise de variância |
| BAR | Unidade de Pressão |
| CAD | Desenho Assistido por Computador (<i>Computer-Aided Design</i>) |
| CAE | Engenharia Assistida por Computador (<i>Computer-Aided Engineering</i>) |
| CAI | Inspeção Assistida por computador (<i>Computer-Aided Inspection</i>) |
| CAM | Manufatura Assistida por Computador (<i>Computer-Aided Manufacturing</i>) |
| CLC | Curva Limite de Conformação |
| CLF | Curva Limite de Fratura |
| CLFC | Curva Limite de Fratura ao Corte |
| CNC | Comando Numérico Computadorizado |
| CAPP | Planejamento de Processo Assistido por Computador (<i>Computer-Aided Process Planning</i>) |
| FFLD | Fracture Forming Limit Diagram |
| FLC | Forming Limit Curve |
| ISF | <i>Incremental Sheet Forming</i> |
| ISHF | Estampagem Incremental Hidroconformação |
| MSPIF | Estampagem Incremental de Ponto Único por Múltiplos Passes (<i>Multi Single Point Incremental Forming</i>) |
| PPGE3M | Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais |
| PSI | Libra Força por Polegada Quadrada |
| RLF | Reta Limite de Fratura |
| RPM | Rotação por Minuto |
| SPIF | Estampagem Incremental de Ponto Único (<i>Single Point Incremental Forming</i>) |
| TPIF | Estampagem Incremental de Ponto Duplo (<i>Two Points Incremental Forming</i>) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|----------|---|----------|
| α | Avanço da ferramenta | (mm/min) |
| d | Diâmetro do círculo gravado na chapa | (mm) |
| df | Diâmetro de Ferramenta | (mm) |
| d_0 | Diâmetro do círculo | (mm) |
| d_1 | Diagonal maior da elipse | (mm) |
| d_2 | Diagonal menor da elipse | (mm) |
| h_1 | Profundidade estampada em que ocorre a trinca | (mm) |
| N | Rotação da ferramenta | (rpm) |
| Rc | Raio Crítico da Ferramenta | (mm) |
| r | Raio | |
| s_0 | Espessura inicial da chapa | (mm) |
| s_1 | Espessura final da chapa | (mm) |

Símbolos Gregos:

| | | |
|---------------|--------------------------------------|------|
| Δ_z | Incremento vertical da ferramenta | (mm) |
| λ | Ângulo Eixo Vertical | (°) |
| $\Psi_{MÁX.}$ | Ângulo de Inclinação Máximo | (°) |
| Ψ | Inclinação da parede de chapa | (°) |
| Ψ' | Ângulo de parede inicial | (°) |
| φ | Deformação verdadeira | (-) |
| φ_3 | Deformação verdadeira na espessura | (-) |
| φ_2 | Deformação verdadeira na largura | (-) |
| φ_1 | Deformação verdadeira no comprimento | (-) |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 1.1. Objetivo Geral..... | 18 |
| 1.2. Objetivos Específicos..... | 18 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 19 |
| 2.1. Estampagem Incremental..... | 19 |
| 2.1.1. Competitividade do processo | 21 |
| 2.1.2. Processo de Estampagem Incremental..... | 26 |
| 2.1.3. Tipos de Estampagem Incremental..... | 28 |
| 2.1.3.1. Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF) | 29 |
| 2.1.3.2. Estampagem Incremental por Dois Pontos (TPIF)..... | 31 |
| 2.1.3.3. Estampagem Incremental por Múltiplos Passes (MSPIF)..... | 35 |
| 2.2. Estampabilidade..... | 36 |
| 2.2.1. Mecanismos de falha..... | 38 |
| 2.2.2. Estampabilidade e limites..... | 39 |
| 2.2.3. Limitação de deformação da peça..... | 42 |
| 2.3. Ferramenta de conformação e sua rotação..... | 45 |
| 2.4. Lubrificação..... | 50 |
| 2.5. Variáveis de aferimento..... | 51 |
| 2.6. Máquinas de usinagem CNC..... | 52 |
| 2.7. Springback..... | 54 |
| 2.8. Processo de Hidroconformação..... | 55 |
| 2.8.1. Tipos de processos de Hidroconformação..... | 60 |
| 2.8.2. Estampagem Incremental com Hidroconformação (ISHF)..... | 61 |
| 2.8.3. Estrutura da hidroconformação (ISHF)..... | 62 |
| 2.9. Análise de Variância (ANOVA)..... | 63 |

| | |
|---|------------|
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 66 |
| 3.1. Caracterização do Processo..... | 66 |
| 3.2. Experimentos para análise de Precisão Geométrica..... | 68 |
| 3.2.1. Medição Tridimensional da Geometria..... | 71 |
| 3.3. Experimentos para análise da Estampabilidade..... | 71 |
| 4. ANÁLISE EXPERIMENTAL..... | 78 |
| 4.1. Experimentos com ferramenta de diâmetro 9,5 mm – com matriz parcial reta sem a pressurização do ar interno | 78 |
| 4.2. Experimentos com Ferramenta de diâmetro 9,5 mm – com matriz parcial reta com pressurização de ar | 85 |
| 4.3. Experimentos com Ferramenta de diâmetro 4 mm – com matriz bacia hermética com pressurização de ar | 88 |
| 5. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS..... | 93 |
| 5.1 Avaliação do Ensaio de Tração..... | 93 |
| 5.2. Avaliação do Método Analítico..... | 93 |
| 5.3. Avaliação da Deformação na Profundidade do Canal com matriz sem contrapressão de ar..... | 101 |
| 5.4. Avaliação da Deformação na Profundidade do Canal com matriz com contrapressão de ar..... | 101 |
| 5.5. Avaliação da deformação do Perfil geométrico na matriz com e sem contrapressão de ar..... | 102 |
| 6. CONCLUSÕES | 104 |
| 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 106 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 107 |

1. INTRODUÇÃO

O processo de conformação por Estampagem Incremental (*Incremental Sheet Forming*) é um método caracterizado pela deformação de chapas metálicas, aplicado geralmente em prototipagem rápida. Nesse processo mecânico de conformação, o formato do produto é definido por meio da trajetória de uma ferramenta de ponta semi-esférica que age sobre a superfície da chapa (SCHREIBER *et al.*, 2022). Durante esse processo de conformação, é possível adquirir uma peça sem necessidade de uma matriz, apesar desse processo requerer um equipamento CNC (Controle Numérico Computadorizado), assim desenvolvendo o produto desejado, sendo ideal para pequenos lotes de produção (GRIMM & MEAR, 2020). Também é possível obter peças com formatos e acabamentos melhores, utilizando uma matriz parcial durante a conformação, proporcionando um melhor resultado do perfil estampado com o perfil teórico esperado (JESWIET *et al.*, 2005). Já na Estampagem tradicional, os processos são desenvolvidos para uma produção de alta escala, onde é necessário avaliar o desenvolvimento do produto, pois o mesmo necessita da fabricação de matrizes específicas para sua geometria, além do alto custo do ferramental e do tempo para o desenvolvimento do projeto (CAVALER & SCHAEFER, 2018).

A Estampagem Incremental possui duas variações principais:

- a) Estampagem Incremental de Ponto Único (*Single Point Incremental Sheet Forming*): nesse processo, a chapa, presa por uma flange denominada prensa-chapas, é deformada pelo movimento de uma ferramenta de ponta semi-esférica em sincronia com a rotação, realizando incrementos contínuos e progressivos contra a chapa metálica nos eixos x, y e z, assim a chapa assume o formato desejado.
- b) Estampagem Incremental de Dois Pontos (*Two Points Incremental Sheet Forming*): nesse método, a matriz fica posicionada abaixo da chapa metálica, possibilitando uma precisão maior na geometria dos ângulos a serem estampados no metal, permitindo que a chapa tenha conformações de perfis mais complexos e de formas que exijam precisão (KOPAC & KAMPUS, 2005), conforme indicado em (a) e (b) na (Figura 1).

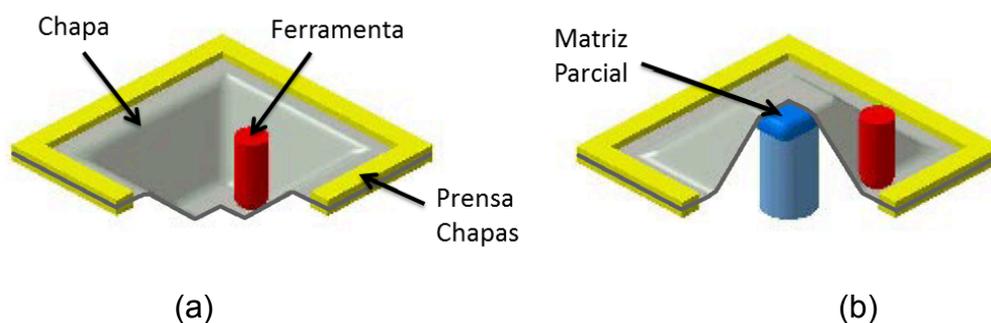


Figura 1 - (a) Estampagem Incremental de Ponto Único, (b) Estampagem Incremental de Dois Pontos
Fonte: Bambach (2004)

A Estampagem Incremental de Dois Pontos pode ser realizada com uma matriz parcial negativa ou positiva, ou ainda, com uma matriz completa negativa ou positiva, conforme o formato que se deseja realizar (CASTELAN, 2010). No caso da utilização da matriz parcial, a vantagem é que não se exige muito tempo ou recursos de fabricação, pois a matriz pode ser fabricada em máquina CNC, onde se realizará o processo de estampagem (KOPAC & KAMPUS, 2005). A matriz não tem a necessidade de ser fabricada em aço ferramenta, podendo assim serem utilizados materiais tanto de custo e fabricações acessíveis, como aço comum ou poliuretano rígido de alta densidade (CASTELAN, 2010).

Com o grande avanço tecnológico, as indústrias vêm revolucionando suas áreas do conhecimento a cada ano, seus setores de desenvolvimento de produtos, devido à grande demanda por inovações, começaram a necessitar de opções e serviços que permitam a customização e a prototipagem (CRISTINO *et al.*, 2021), otimização de processos, tecnologias inovadoras e melhorias contínuas, buscando cada vez mais o desenvolvimento de processos eficientes, inovadores e de baixos custos (DURGUN *et al.*, 2015) (DALENOGARE *et al.*, 2018). A indústria obteve grandes evoluções, como os sistemas de CAD (Desenho Assistido por Computador), CAM (Manufatura Assistida por Computador), CNC e a automação industrial, através da robotização. Nessa linha, os processos de conformação por Estampagem Incremental de Chapas (*Incremental Sheet Forming - ISF*) vêm se destacando por suas vantagens e suas características versáteis se comparado aos processos convencionais de estampagem de chapas (CRISTINO *et al.*, 2021).

O processo de Hidroconformação na estampagem de chapas permitiu a personalização de produtos na indústria, criando máquinas dedicadas à Estampagem Incremental, como tornos, centros de usinagem CNC e braços

robóticos (JESWIET *et al.*, 2005). O processo de conformação de chapas pela técnica da hidroconformação busca atingir níveis de deformação superiores às obtidas pelo processo de estampagem convencional, com o princípio de retardar o início das tensões de instabilidade plástica (ZAMPALONI *et al.*, 2003). Na Hidroconformação, é possível mesclar etapas dos processos da estampagem, assim reduzindo o número de operações de fabricação, simplificando e otimizando suas etapas de fabricação e atingindo peças com melhor qualidade dimensional e custos baixos (SCHULER, 1998).

A área de pesquisa da Estampagem Incremental possui diversas literaturas voltadas para alguns seguimentos de chapas, como o alumínio e titânio, mas ainda existe uma carência de informações voltado tanto em parâmetros como no processo de conformação em outros materiais utilizado na indústria (CAVALER & SCHAEFER, 2018). Porém, é possível utilizar outros materiais na conformação através do processo de Estampagem Incremental, como as chapas de aço de baixo carbono devido à sua baixa resistência à conformação, baixa dureza e excelente ductilidade e tenacidade, normalmente utilizada na fabricação de painéis, copos, peças de automóveis e outros itens da indústria (HAAG & FERRANTI, 2017)

1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é verificar a influência do uso de contrapressão pneumática no processo de Estampagem e os resultados de excelência e qualidade no produto final, buscando atingir uma melhor estampabilidade e precisão do perfil geométrico da peça.

1.2. Objetivos Específicos

Esse trabalho experimental tem como objetivo específico trazer a inovação do uso do ar como uma contrapressão oposta à estampagem da chapa de alumínio puro AA1200-H14, assim, avaliando a influência do avanço e da rotação na estampabilidade e também avaliando a precisão geométrica da peça durante esse processo, nos experimentos práticos de TPIF.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, tem-se uma breve revisão sobre os fundamentos de Estampagem Incremental, fatores que influenciam na deformação, além de novos desafios para o processo. Uma introdução ao método é feita e apresentada em relação ao processo, parâmetros, máquinas e dispositivos. Destacando suas propriedades, vantagens e desvantagens em relação a outros processos e suas aplicações, visando um melhor resultado neste processos.

2.1. Estampagem Incremental

A Estampagem Incremental é um processo prático normalmente utilizado na prototipagem rápida de produtos confeccionados por conformação mecânica. Neste processo, a vantagem é a simplicidade do ferramental, não tendo a necessidade de ferramentas complexas ou da utilização de prensas hidráulicas, podendo ser facilmente realizado em torno de repuxo, fresadora CNC, torno CNC ou centros de usinagens.

Os estudos relacionados aos parâmetros destacam as influências no processo de Estampagem Incremental, como a temperatura do processo (AL-OBAIDI *et al.*, 2016), a lubrificação utilizada (AZEVEDO, 2015), a espessura da chapa e o ângulo de parede formado na estampagem (DUFLOU *et al.*, 2008a), bem como o diâmetro (AL-GHAMDI & HUSSAIN, 2015), o incremento vertical (Δz) (BHATTACHARYA *et al.*, 2011), o avanço (a) (AMBROGIO *et al.* 2012) (BARUAH *et al.*, 2017) e a rotação (N) da ferramenta (XU *et al.*, 2013).

O processo de Estampagem Incremental foi patenteado no ano de 1967 (LESZAK, 1967), mas, somente na década de 90, com a evolução das CNC's, houveram amplos desenvolvimentos de estudos nessa área. Listando-se a visão básica do processo geral, a partir de apoio, punção e CNC, são performadas diferentes geometrias com grande flexibilidade de design, tornando a técnica econômica e eficiente para funções de pequenos lotes (FRITZEN *et al.*, 2017).

Dentre as diretrizes de processo para implementação na indústria, listam-se customização, economia e tempo, sendo estas áreas o foco na manufatura moderna (MOHANTY *et al.*, 2021). Ainda assim, é notável que processos que visam deformação permanente/plástica para formação do produto final possuem variáveis

que permitem seu controle, sendo que a modificação de cada parâmetro produz alterações na geometria/qualidade do produto final, por exemplo, o desenho, a temperatura e o uso de diferentes lubrificantes. As tensões atingidas levam à deformação plástica, e o resultado tem uma relação direta com custo energético do processo (TORRES *et al.*, 2021).

O processo de Estampagem Incremental ocorre progressivamente, mediante a ação de ferramental que produz deformação plástica localizada, gerando o produto final (EMMENS & VAN DEN BOOGAARD, 2009). Ainda, este processo é contemporaneamente efetivado com a utilização de um Comando Numérico Computadorizado (CNC), e a chapa deverá ter espessura dita fina (0,5 a 1,5 mm), sendo fixada no dispositivo que realiza deslizes paralelos ao eixo vertical, e elementos de fixação, evitam que a chapa se movimente durante o processo, assim, a deformação é gerada por uma ferramenta rotativa (acoplada ao eixo da CNC) (SILVA *et al.*, 2008).

A indústria 4.0 no mercado industrial vem modernizando e aprimorando seus recursos com velocidade e versatilidade em relação ao produto final, tendo peças customizadas, com qualidade técnicas e aparências complexas e precisas. Para atender essa nova tendência de mercado, é necessário o uso de ferramentas computacionais, como o CAD – Desenho Assistido por Computador (*Computer-Aided Design*); CAE – Engenharia Assistida por Computador (*Computer-Aided Engineering*); CAPP – Planejamento de Processo Assistido por Computador (*Computer-Aided Process Planning*); CAM – Manufatura Assistida por Computador (*Computer-Aided Manufacturing*); CAI – Inspeção Assistida por Computador (*Computer-Aided Inspection*), entre outros. Essa inovação permite que os processos de manufatura atinjam limites antes impossíveis pelos setores de engenharia nas estruturas empresariais das organizações industriais (FRITZEN, 2012).

Os processos de conformação e fabricação das chapas abrange funções como: cisalhamento, dobramento, laminação, forjamento, trefilação, extrusão e repuxo. Essas atividades de conformação que necessitam de acessórios com formas especiais para viabilizar os processos têm um custo alto e um prazo de fabricação demorado (SCHAEFFER, 2004).

2.1.1. Competitividade do processo

Durante o processo incremental, a deformação geralmente não é uniforme, desse modo, não é necessário estampar toda a superfície de forma direta/simultânea, assim, se alguns pontos específicos forem deformados suficientemente, todo o objetivo é concluído em consequência. Ainda, durante esta formação, o punção estampa gradualmente algumas posições que variam com profundidades até que o processo se concretize (WEI *et al.*, 2021). Assim sendo, o caminho do punção tem efeito direto sobre a precisão, acabamento, formabilidade, espessura e tempo (ZHANG *et al.*, 2018).

Tem-se, dentre as vantagens neste processo, o não desperdício de sobras de materiais reduzidos, diferentemente da usinagem, por exemplo (RODRIGUES & MARTINS, 2005). Ainda, tem-se a não exigência de matrizes dedicadas, e, devido à “formação” incremental, o tempo necessário é maior se comparado ao processo de repuxo profundo (ADAMS & JESWIET, 2015). Elucidam-se, segundo Rodrigues & Martins (2010), as seguintes vantagens no processo:

- Processo rápido e barato;
- São utilizados, por exemplo, braços robóticos e ferramentas universais;
- Peças são feitas a partir do desenho computadorizado, com alterações feitas de forma rápida;
- Há maiores deformações pela natureza incremental.

Os mesmos autores elucidam as seguintes desvantagens:

- Aplicado apenas para pequenos lotes;
- O tamanho da peça é limitado pelo ferramental;
- Para ângulos retos, deve-se usar estratégias de multi-passagem;
- O tempo do processo é muito maior em vista do convencional;
- Menor precisão geométrica se comparada ao fluo-torneamento.

O processo incremental com variáveis em placas de metal, realizam geometrias com precisão, alta eficiência e usam cargas de punção “baixas” em valor (ZHANG *et al.*, 2018). Ainda, avalia-se que a alta produção é um dos fatores que

prejudicam a disseminação dessas tecnologias, limitando os tamanhos dos lotes por um período de tempo fixo (BASTOS *et al.*, 2015). Tendo-se a fabricação convencional como base, vê-se que ela depende de forjamento, fundição e laminação de materiais, seguido por usinagem, e esses processos resultam em alto custo e longo tempo de processo. (OLEKSIK *et al.*, 2021).

Com esse conceito, no ano de 1994, Matsubara implantou a prática da Estampagem Incremental como o método e o processo para obtenção de prototipagem rápida, peças feitas com formatos especiais, com lotes pequenos, de forma rápida e com custo baixo. Essa manufatura é conhecida como prototipagem rápida (EMMENS *et al.*, 2010).

O processo convencional de estampagem tem dificuldades em peças com paredes finas e longas, sendo assim, a Estampagem Incremental (*Incremental Sheet Forming*, ou ISF) vem de encontro com essa necessidade (JESWIET *et al.*, 2005). O processo de Estampagem Incremental busca atingir o mercado de fabricações otimizadas de lotes pequenos ou a prototipagem de produtos estampados (LORA, 2014) e abrange várias áreas da engenharia, departamentos focados em chaparias metálicas com geometrias produzidas por dobras e formas complexas (LESZAK 1967 *apud* FRITZEN, 2012).

As áreas de pesquisas têm o objetivo de atingir resultados em setores como área médicas, prótese de crânio em titânio (CASTELAN, 2010), o setor da indústria mecânica, coletores solares em alumínio (ARRUDA, 2010), o setor da indústria termoplástica com material polimérico (MARTINS *et al.*, 2009), o setor da indústria automobilística (AMINO *et al.*, 2014), entre outros.

A utilização do processo de Estampagem Incremental vem crescendo, e isso mostra o quanto sua utilização está contribuindo para o setor da conformação mecânica de chapas, sempre associado a projetos e processos novos, como no caso da prototipagem rápida (DE SENA, 2009). O processo de conformação tem o objetivo de eliminar desperdício de material, sempre buscando o melhor aproveitamento da chapa, visando a produtividade, assim, otimizando etapas em outras máquinas operatrizes. Esse aproveitamento, por diminuir as sobras ou até mesmo eliminar a geração de cavados que são geradas em máquinas convencionais, reduz o custo do produto final, mas, em relação às tolerâncias dimensionais, não consegue atingir a rapidez da produção de peças fabricadas em processo de usinagem (RODRIGUES & MARTINS, 2010).

Segundo Amino *et al.* (2014), o método da Estampagem Incremental é antigo, utilizado em utensílios domésticos, como a fabricação de panelas, em processo de estampagem por máquinas convencionais. Na fabricação de panelas por um método relativamente artesanal feito em tornos de repuxo pelo estiramento, conforme a (Figura 2), no qual é utilizado uma ferramenta e um mandril, o mandril é fabricado com o formato interno da peça que se deseja ser fabricada e a ferramenta tem formatos similares e raiados, parecidos com o formato externo do produto a ser fabricado para facilitar a conformação.

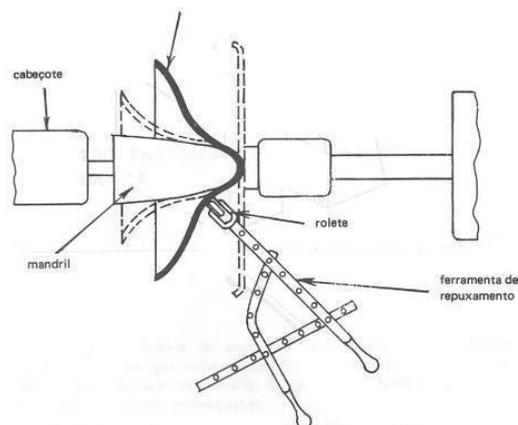


Figura 2 - Torno de Repuxo

Fonte: Rodrigues (2010)

O processo de repuxo é considerado um dos processos primários da conformação através da Estampagem Incremental de chapas, essa conformação apresenta características idênticas a Estampagem Incremental, e é focado apenas na produção de peças cilíndricas e de conformação profunda. O repuxo é realizado em tornos convencionais adaptados e destinados a esse tipo de operação, e os formatos adquiridos na fabricação de peças têm as geometrias cônicas e cilíndricas das mais variadas dimensões, podendo ser realizado a frio ou a quente.

A Martelagem (*hammering*) é um processo de deformação plástica incremental, sendo o método mais antigo de conformação desenvolvido de forma incremental. Este processo era inicialmente realizado por um martelo e uma bigorna, com a utilização de um conjunto de martelos com vários formatos de matrizes de geometrias simples. Essa técnica também é aplicada na indústria automotiva para fabricação de protótipos (AMINO *et al.*, 2014). Com a automatização e a utilização CNC, o processo evoluiu, sendo a máquina-ferramenta constituída por um braço

robótico que, na sua extremidade, possui um cabeçote com a fixação de um punção (Figura 3).

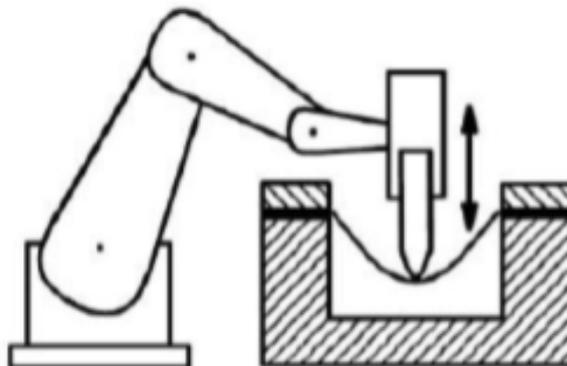


Figura 3 - Braço Robótico (Martelagem)

Fonte: Schaeffer (2004)

O mecanismo ocorre por um movimento constante de translação retilínea uniforme responsável pela conformação da chapa. Esse processo pode ser utilizado em diversos setores metalmeccânicos, porém apresenta problemas em seus acabamentos superficiais em aços com grandes resistências à deformação e repetibilidade no processo e nas tolerâncias dimensionais.

A Estampagem Incremental a frio sem o uso de matriz e com o auxílio de robôs e máquinas CNC visa atender às necessidades da indústria automobilística (DALEFFE, 2008). Conforme a (Figura 4), o processo de Estampagem Incremental de chapas metálicas se caracteriza em três etapas:

- a) Estampagem incremental sem matriz;
- b) Estampagem incremental com ferramenta auxiliar;
- c) Estampagem incremental com matriz, sendo que a matriz pode ser parcial ou total.

Em todas as opções, são necessários dispositivos de fixação, máquina CNC e estruturas dedicadas para a realização da conformação (SOEIRO, 2014).

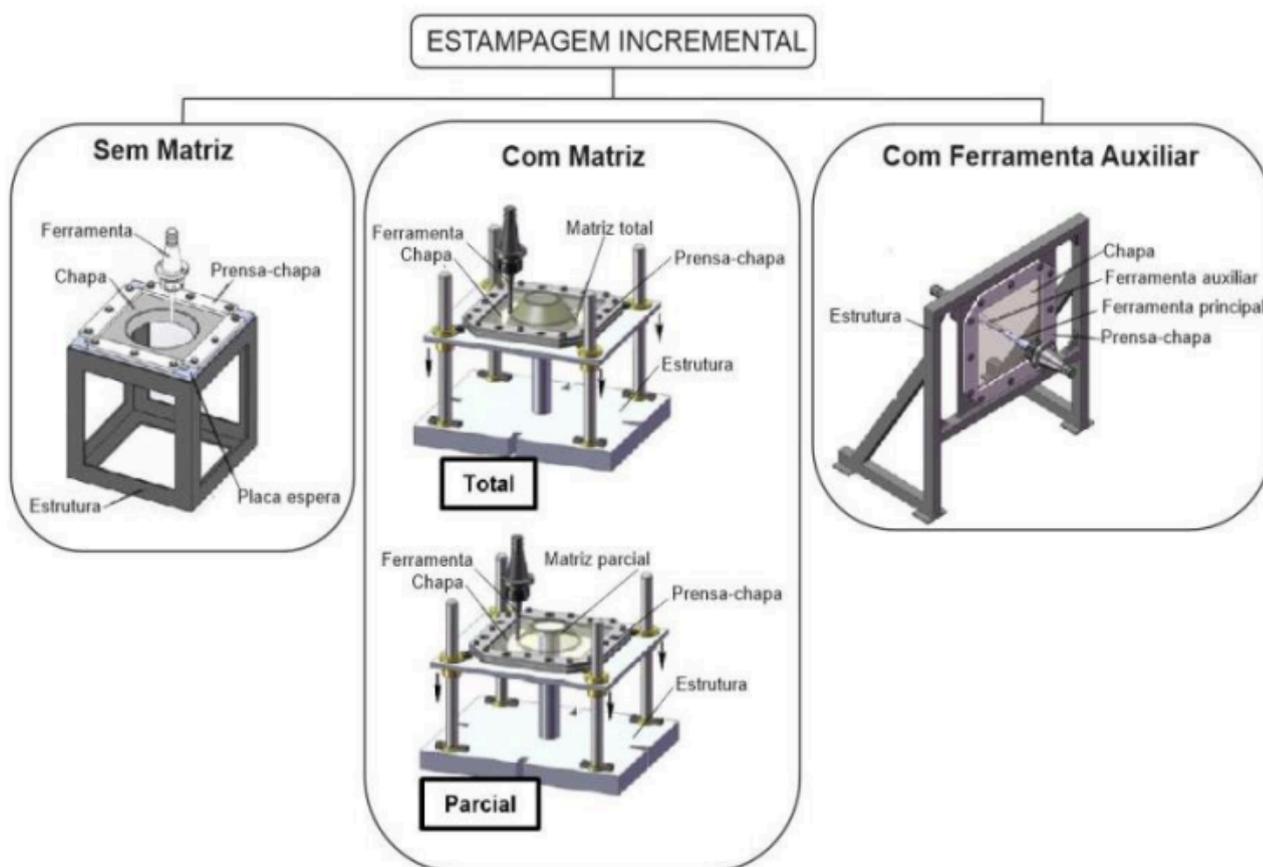


Figura 4 - Variantes de Estampagem Incremental

Fonte: Soeiro (2014)

A conformação mecânica através da Estampagem Incremental está relacionada com formato da peça e suas tolerâncias, também são levadas em conta as possibilidades que a máquina e o dispositivo de fixação permitem para execução do trabalho e o percurso da ferramenta programada em relação ao processo de conformação. Ou seja, o movimento da ferramenta que determina a geometria da peça, sendo que, nos processo de estampagem convencional por prensas excêntricas ou hidráulicas, esse fator está atribuído à precisão da construção da matriz, tanto pelo punção como da cavidade (TIBURI, 2007).

A (Figura 5) mostra o ciclo de aplicação da Estampagem Incremental normalmente utilizado no processo.



Figura 5 - Ciclo de Aplicação da Estampagem Incremental

Fonte: Castelan (2010)

2.1.2. Processo de Estampagem Incremental

Para a utilização do processo de Estampagem Incremental, é necessário:

- a) Definir o formato do produto a ser estampado – Modelo matemático – 3D;
- b) A trajetória da ferramenta programada – Programação CNC no CAD;
- c) O tipo de fixação, por flange ou prensa-chapa;
- d) Máquinas CNC;
- e) Acessórios e Dispositivos para conformação.

Na preparação da matéria prima a ser conformada, devem ser definidas as dimensões externas, assim definindo o *blank*, e, tendo o formato definido (quadrado, retangular ou circular), a sua espessura pode ir de 0,7 mm à 1,5 mm, dependendo da sua aplicação. O formato externo do *blank* está relacionado com a geometria a ser conformada, e a chapa é presa por um flange no dispositivo, que serve como prensa-chapa. Essa fixação tem a responsabilidade de manter a chapa estável durante o processo de estampagem, assim permitindo que a deformação plástica aconteça.

O equipamento deve ser CNC, sendo assim, o modelo matemático em 3D do formato de uma peça desenhada em um computador CAD e programada para uma linguagem do comando da máquina, através do software CAM, de movimento auxiliado por computador, define a trajetória da ferramenta (FILIPPE, 2013).

No processo de Estampagem Incremental, a ferramenta desliza sobre a superfície da chapa, ocorrendo a deformação. A rotação da ferramenta do eixo árvore do centro de usinagem pode ser programada com rotação ou com seu giro livre, sendo assim, a máquina incrementa constantemente sobre a chapa, tendo um profundidade em Z controlada, realizando a conformação mecânica (MIN *et al.*, 2018).

Para definir a Estampagem Incremental, os pontos de apoio e a matriz, é necessário entender o formato do produto a ser conformado, conforme a (Figura 6) (JESWIET *et al.*, 2005):

- a) Estampagem Incremental com ponto simples;
- b) Estampagem Incremental com ponto duplo;
- c) Estampagem Incremental com matriz negativa;
- d) Estampagem Incremental com matriz positiva.

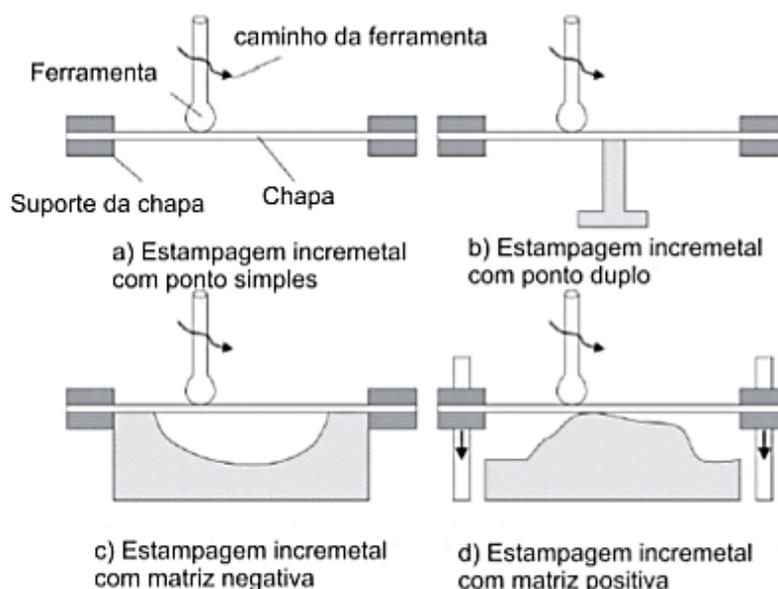


Figura 6 - Tipos de Estampagem Incremental

Fonte: Allwood (2005)

Sendo assim, há a conformação pelo método “ponto duplo”, formado por um ponto de apoio conforme (Figura 7). O sentido da ferramenta é oposto, através de movimentos sincronizados de interpolações com penetração do eixo vertical (Z) da ferramenta, com movimentos de X e Y da mesa do equipamento CNC, assim definindo o formato da peça (KOPAC & KAMPUS, 2005).

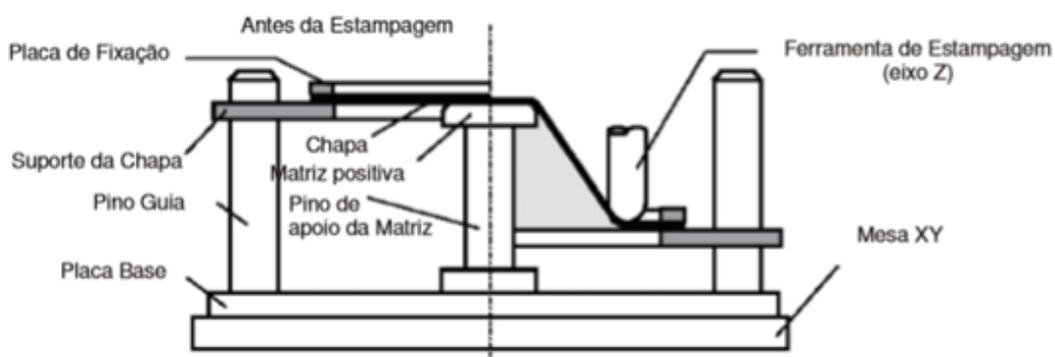


Figura 7 - Estampagem Incremental com Ponto de Apoio

Fonte: Hirt *et al.* (2005)

Na Estampagem Incremental com o método ponto simples, a ferramenta do eixo árvore Z incrementa a superfície interna da chapa, produzindo penetrações constantes na cavidade. Com esse processo, o formato do produto é construído e realizado pela trajetória programada e assumida da ferramenta.

No processo de Estampagem Incremental com duplo ponto, é necessário uma matriz positiva. Esse dispositivo é desenvolvido para ficar na parte de baixo da chapa, com a ferramenta do eixo Z entre a chapa e o dispositivo, tendo como objetivo moldar o formato do produto final (BAMBACH, 2004).

2.1.3. Tipos de Estampagem Incremental

A opção de Estampagem Incremental é baseada na quantidade de pontos de apoio ou dos acessórios como ferramenta a serem utilizados. Na estampagem de ponto simples, a ferramenta executa movimentos de translação e rotação, e ocorre a estampagem com uma ferramenta de forma geométrica simples e estacionária posicionada sob a chapa. Temos dois processos, ainda na estampagem simples, que utiliza formatos de matrizes positivas ou negativas, posicionadas também sob a chapa e que irão dar forma ao produto final (JACKSON, 2009).

2.1.3.1. Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF)

Inicia-se com uma chapa (*blank*) de um formato retangular com espessura definida previamente (0,7 a 1,5 mm). Esta é presa em um dispositivo, estando perpendicular á um sistema CNC, ocorrendo deformação plástica gerada por uma ferramenta rotativa acoplada que desliza sobre a chapa realizando incrementos verticais negativos (Figura 8) (HIRT *et al.*, 2005).

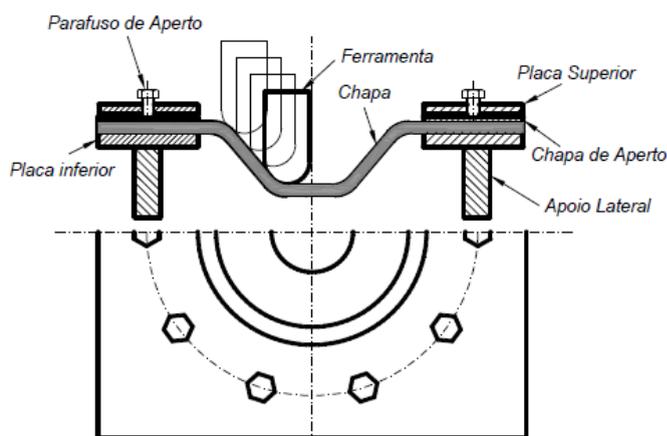


Figura 8 - Estampagem incremental de ponto simples

Fonte: Duflou *et al.* (2005) (adaptado)

É possível, então, obter boa simetria axial. Entretanto, para peças mais complexas, não há precisão dita mínima necessária fabril aceitável (BAHLOUL *et al.*, 2013).

Com esse processo, a principal técnica na Estampagem Incremental com Ponto Único, assim representado pela sigla SPIF (*Single Point Incremental Forming*), é fazer uma deformação progressiva no *blank* de espessura s_0 através do incremento vertical. Ou seja, incrementa-se a ferramenta de formato e diâmetro semi-esférico d_f para conformação da chapa, onde a chapa é apoiada entre o prensa-chapas e a placa de apoio, conforme indicado na (Figura 9).

A região de trabalho livre está relacionada à distância do prensa-chapas e as placas de fixação da chapa a ser conformada. A ferramenta de conformação pode desenvolver seu esforço de estampagem vertical, tendo como característica a parte inferior do dispositivo livre, ou seja, sem matriz abaixo da chapa conformada. Ao passo que a ferramenta incrementa verticalmente no eixo Z com velocidade de rotação (rpm) controlada e penetração sobre a chapa, também controlada, vai sendo

realizada a conformação da chapa, assim, estampando a peça (Δz). Nessa estratégia de trabalho, o processo de conformação é realizado por 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).

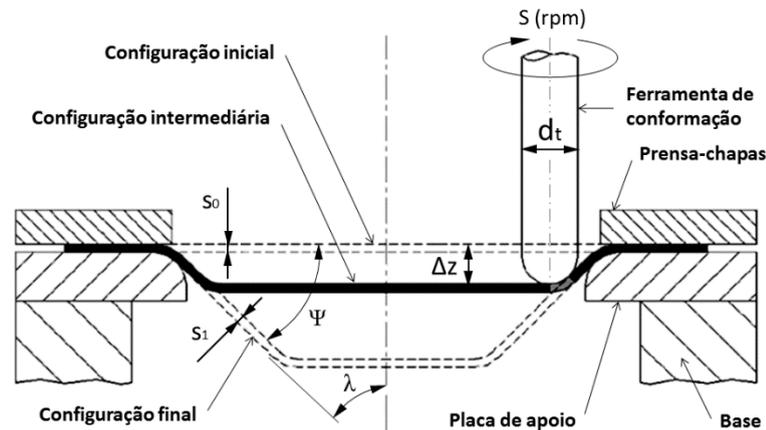


Figura 9 - Representação Esquemática de SPIF

Fonte: Martins (2008) (adaptado)

Na Estampagem Incremental, a ferramenta pressiona, através do eixo Z, a chapa pelo movimento do incremento vertical formando o ângulo ψ com o eixo horizontal e o ângulo λ com o eixo vertical. Podendo ter como análise que conforme maior o ângulo ψ , menor será o ângulo λ e, dessa maneira, menor será a espessura da parede (s_1) da peça conformada pelo processo de estampagem.

A qualidade do produto final na Estampagem Incremental é influenciada pelos seguintes parâmetros:

- A rotação (N);
- O avanço (a);
- O diâmetro da ferramenta (df);
- O incremento vertical (Δz);
- O lubrificante utilizado.

Para melhores resultados, podemos combinar os esforços dos diâmetros menores de ferramenta com incrementos verticais maiores que também fazem diminuir a força de estampagem (CENTENO *et al.*, 2014).

Segundo Hamilton e Jeswiet (2010), valores altos de avanço e rotação do eixo árvore altos não representam influência no acabamento da superfície (rugosidade) dos produtos estampados. Mas os parâmetros de incrementos verticais menores melhoram a rugosidade superficial da chapa e também permitem uma maior estampabilidade do produto final.

2.1.3.2. Estampagem Incremental por Dois Pontos (TPIF)

Além das ferramentas de conformação acima indicadas, há um suporte inferior rígido (Figura 10) que é utilizado para expandir as possibilidades geométricas e melhorar a acuidade, sendo importante para geometrias assimétricas (ARAGHI *et al.*, 2009).

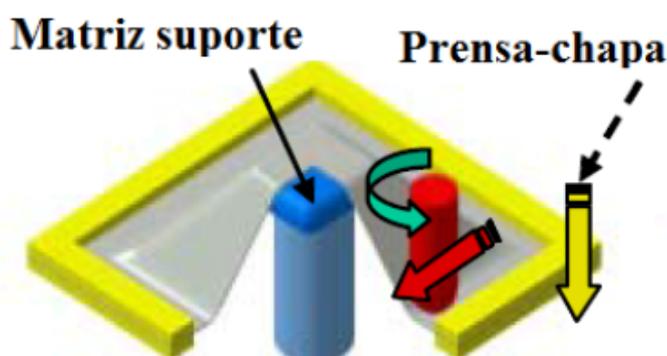


Figura 10 - TPIF com matriz estacionária

Fonte: Bambach *et al.* (2004)

Na Estampagem incremental por Dois Pontos (TPIF), se utiliza uma ferramenta semiesférica de conformação mecânica e um suporte que serve como base na parte inferior, tendo a função de apoio para a chapa. Essa estrutura busca atingir resultados de conformação com maior qualidade e precisão dimensional no produto final.

O TPIF é determinado pelos seguintes processos de conformação:

- a) Matriz positiva: A chapa, através da conformação pela pressão da ferramenta, se movimenta por um sistema que permite o prensa-chapas se deslocar verticalmente por colunas e buchas guia deslizantes através da matriz. Outro cuidado importante é com o formato da que a matriz positiva precisa ter o mesmo perfil da parte interna da peça a ser conformada, e durante o

processo, a ferramenta desenvolve uma força de conformação na chapa, descarregando a mesma intensidade na matriz (CASTELAN, 2010), conforme a (Figura 11) (a), que mostra o momento inicial do processo, e na (Figura 11) (b), que indica a situação final do processo.

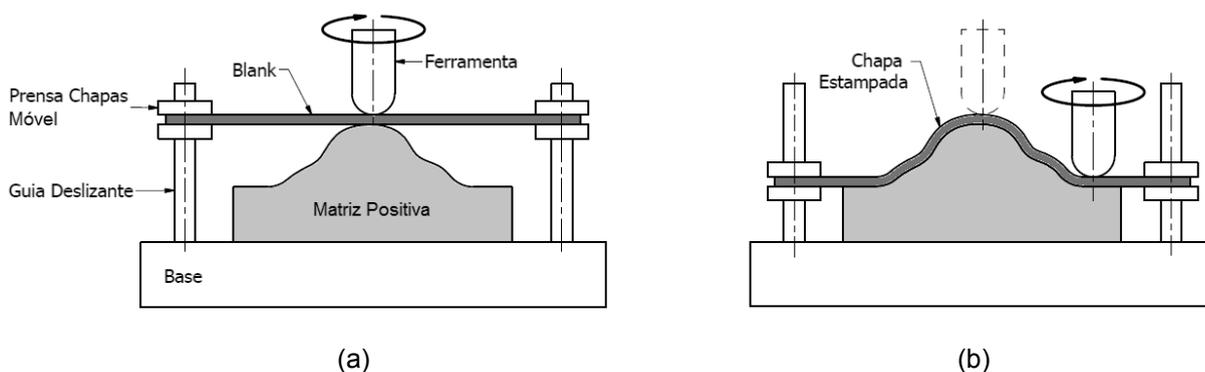


Figura 11 - TPIF com Matriz Positiva na Situação Inicial (a) e na Situação Final (b)
Fonte: Castelan (2010) (adaptado)

b) **Matriz Negativa:** Nesse método, a matriz tem o formato do perfil externo da peça. A vantagem é que, neste processo com matriz negativa, não é necessária a utilização de um prensa-chapas com bucha e colunas deslizantes. Desse modo, apenas prendemos o prensa-chapas com a função de um flange de fixação, representado pela (Figura 12) (a), que indica a situação inicial do processo, e na (Figura 12) (b), que indica a situação final do processo (CASTELAN, 2010).

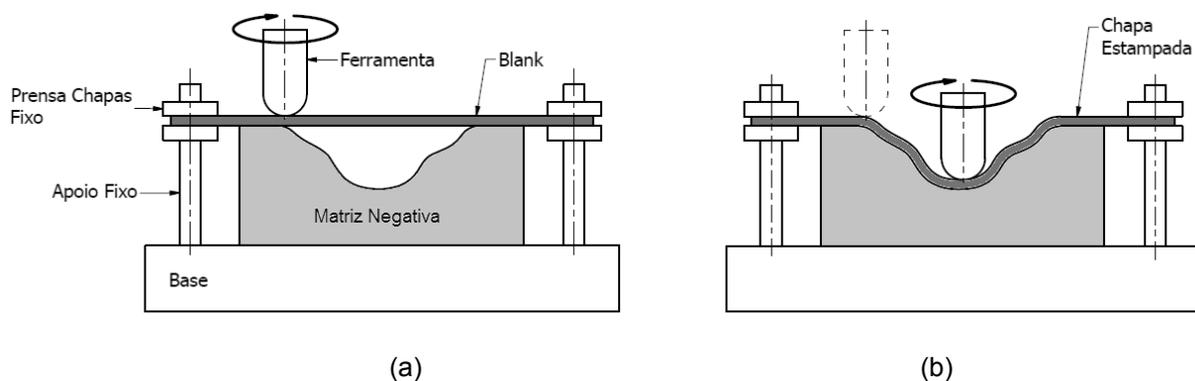


Figura 12 - TPIF com Matriz Negativa na Situação Inicial (a) e na Situação Final (b)
Fonte: Castelan (2010) (adaptado)

Apesar de o processo TPIF com matriz positiva exigir ferramental de maior complexidade, se analisarmos a melhor eficiência no processo de conformação por

estampagem TPIF, comparando a matriz positiva com a matriz negativa, a positiva apresenta melhores resultados na conformação, onde a ferramenta apresenta menor força no momento da estampagem, assim, gerando baixas tensões residuais na chapa e por fim menor retorno elástico. (ARAGHI *et al.*, 2009).

- c) Apoio Fixo Genérico: O apoio fixo genérico busca ter um formato na parte inferior apenas de base, não precisa ter o formato do produto final. Esse pilar tem a função da matriz positiva. No processo de conformação, a ferramenta penetra na chapa, tendo a movimentação vertical do prensa-chapas através das buchas e colunas guias deslizantes no dispositivo da matriz, sendo igual ao processo de Matriz Positiva. A única diferença é que, na matriz, o ponto fixo tem um perfil genérico e seu punção simples. À medida que a ferramenta executa a conformação, a força de apoio auxilia na determinação do perfil geométrico final da chapa estampada (MAXIMILIANO, 2016), conforme indicado na (Figura 13) (a), que apresenta a situação inicial do processo, e a (Figura 13) (b) que apresenta a situação final.

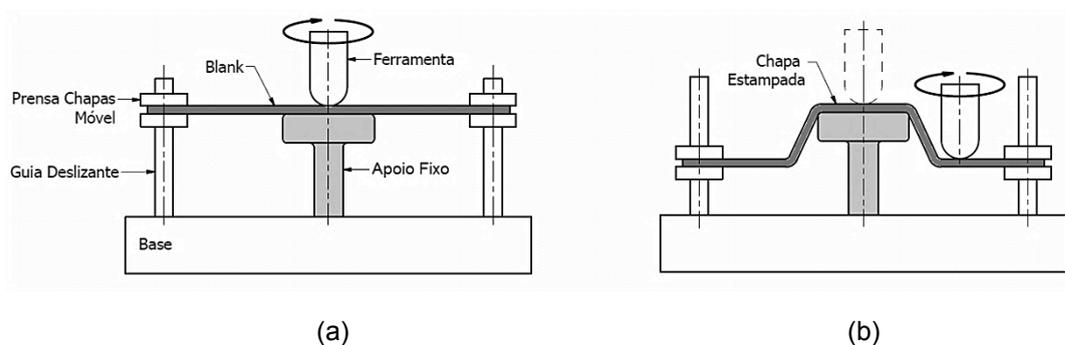


Figura 13 - TPIF com Apoio Genérico Fixo na Situação Inicial (a) e na Situação Final (b)

Fonte: Maximiliano (2016)

- d) Apoio Móvel Genérico: Esse método é realizado com prensa-chapas fixo, tendo um apoio móvel que possui sincronia de deslocamento com a ferramenta de conformação, ao passo que a ferramenta vai percorrendo o formato da peça que está sendo estampada, existe um apoio oposto a ferramenta, que acompanha a trajetória da ferramenta. O resultado da conformação é de alta precisão e qualidade superficial no produto estampado se comparado ao TPIF de apoio fixo que não exige a fabricação de uma matriz de apoio e permite que esse método de conformação tenha uma

flexibilidade maior na preparação e variedade nos formatos a serem conformados.

O exemplo de conformação com apoio genérico móvel que se utiliza nas empresas é realizado por robôs industriais, conforme indicado na (Figura 14) (a). Neste processo, enquanto um robô conduz a ferramenta de conformação, o outro robô, de forma sincronizada, conduz o apoio móvel conforme indicado na (Figura 14) (b) (MEIER *et al.*, 2011).

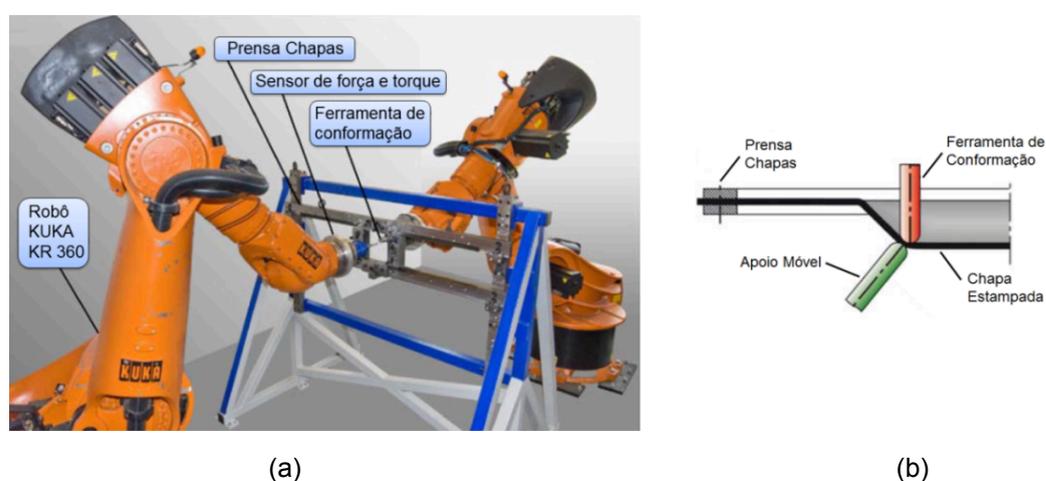


Figura 14 - TPIF com Apoio Genérico Móvel utilizando robôs (a) e detalhe ampliado do processo (b)
Fonte: Meier *et al.* (2011)

Este processo é análogo ao SPIF, entretanto, usam-se duas ferramentas sincronizadas, sem matriz auxiliar (PENG *et al.*, 2019), como se vê na (Figura 15).

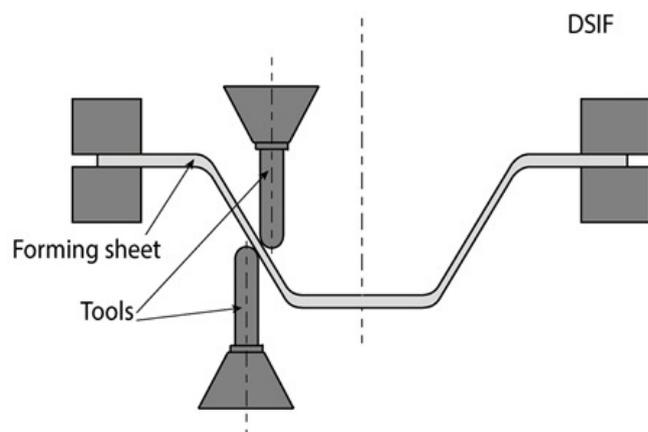


Figura 15 - Estampagem incremental de ponto simples
Fonte: Peng *et al.* (2019)

O processo gera o efeito de maiores deformações e maior precisão geométrica que o SPIF e apresenta menos custos se comparados ao TPIF (PENG *et al.*, 2019).

2.1.3.3. Estampagem Incremental por Múltiplos Passes (MSPIF)

Em seus trabalhos, Castelan (2010) classifica que o processo de Estampagem Incremental por múltiplos passes também se inclui como um dos principais tipos por ser de baixo custo e prático em sua utilização.

A Estampagem Incremental por Múltiplos Passes, representada pela sigla MSPIF (*Multi Single Point Incremental Forming*), tem um método de trabalho que se desenvolve também análogo ao SPIF, todavia, aplicado em ângulos maiores que 90°, de forma a se terem maiores ângulos de parede a partir do multipasse, seguindo-se com ângulos intermediários se comparado ao projetado (CAO *et al.*, 2015), com o objetivo de obter maior estampabilidade no formato projeto da peça final, com maior ângulo de parede (DUFLOU *et al.*, 2008).

Assim, a (Figura 16) nos permite analisar e entender que o método busca desenvolver uma conformação progressiva, 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, percebe-se que a espessura final (s_1) é menor que a espessura inicial (s_0). Consequentemente, o encruamento da chapa aumenta a cada passe, bem como a força necessária para realização da estampagem, conforme indicado no detalhe A da (Figura 16) (CASTELAN, 2010).

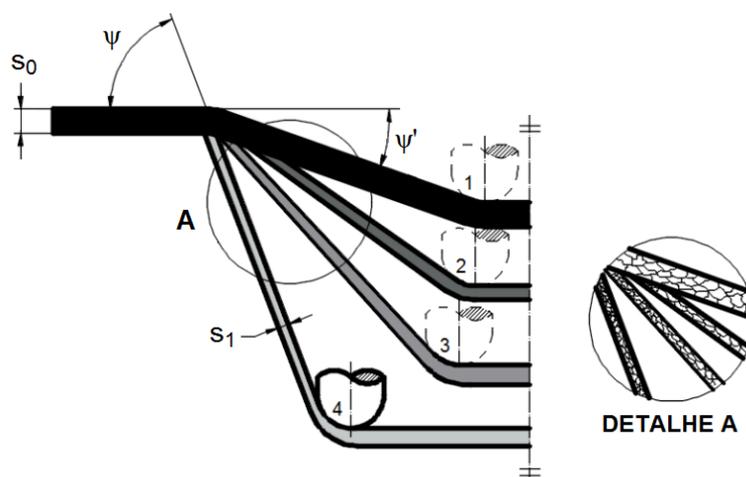


Figura 16 - Processo MSPIF e o efeito de encruamento da chapa a cada passe

Fonte: Castelan (2010)

Nesse método, o processo de conformação da Estampagem Incremental tem como objetivo atingir resultados com melhores formatos e utilizar ângulos maiores nas paredes, assim realizados por passes múltiplos definidos por perfis intermediários, alternando a trajetória da ferramenta em movimentos descendentes e ascendentes (HIRT *et al.*, 2004).

2.2. Estampabilidade

Há, durante o processo incremental, a existência de tensões residuais que são esforços que se retêm dentro da peça mesmo após a remoção das cargas, estes afetam o desempenho e a vida útil da peça. Verifica-se que a magnitude dessas tensões diminui à medida que o raio e a altura da peça aumentam, e, ainda, isso acontece de forma não linear. Além disso, as tensões são de natureza compressiva na superfície interna que irão influenciar na melhoria da fadiga do produto final (WU *et al.*, 2021).

As tensões residuais são conhecidas por terem um efeito importante nos seguintes aspectos:

- Resistência à fadiga;
- Corrosão sob tensão;
- Precisão da forma.

Se essas tensões residuais estiverem desuniformes, elas reduzem a resistência à fadiga, causam corrosão por tensão, deterioram a precisão da peça, assim, levando à falha prematura. O desenvolvimento da tensão durante a formação depende do grau de deformação do material enquanto sua recuperação elástica está associada às propriedades intrínsecas ao material (WU *et al.*, 2021). Além disso, o comportamento da conformabilidade baseado na deformação leva à visibilidade da falha dúctil, e ainda à melhora da formação de vazios compactados ao longo da direção meridional (CHANG & CHEN, 2021).

A conformabilidade no processo relacionado ao produto tem a ver com a temperatura da chapa. Assim, devido a rotações elevadas, a ferramenta em contato com a chapa gera atrito, proporcionando uma melhor conformação (PALUMBO & BRANDIZZI, 2012).

Outro fato interessante é que, com o aumento do diâmetro da ferramenta, o acabamento superficial do produto estampado vai melhorando, assim diminuindo a rugosidade superficial (BHATTACHARYA *et al.*, 2011).

No estudo de Al-Ghamdi e Hussain (2015), a Estampagem Incremental tem um limite no diâmetro da ferramenta. Foi analisado que o diâmetro da ferramenta tem influência na conformação da chapa durante o processo de Estampagem Incremental. Assim, vemos que é importante a escolha do diâmetro da ferramenta na determinação do material e formato a ser estampado ou as características mecânicas exigidas, mas o que tem grande importância e define o processo pelos seus parâmetros é a espessura da chapa estampa. Com esse estudo, foi determinada uma relação do raio crítico da ferramenta com o ângulo máximo da parede para uma melhor conformabilidade. Na equação 1, percebemos a relação onde R_c é o raio crítico da ferramenta e s_0 é a espessura inicial da chapa.

$$R_c \approx 2,2 \cdot s_0 \quad (1)$$

Devido ao atrito, a lubrificação é muito importante na Estampagem Incremental, estando inteiramente ligada ao acabamento superficial da peça, segundo o estudo de Azevedo *et al.* (2015), que analisou a qualidade superficial das peças de alumínio AA1050 e aço DP780 através do processo SPIF e definiu que

quanto maior a dureza da chapa a ser estampada menor a viscosidade do lubrificante.

Temos os melhores resultados nos produtos estampados quando, na Estampagem Incremental, utilizamos ângulos maiores em relação a parede da peça. Assim como na conformação realizada por múltiplos passes, o perfil intermediário é alcançado através da trajetória da ferramenta em movimentos descendentes e ascendentes que moldam o perfil da peça (HIRT *et al.*, 2004).

2.2.1. Mecanismos de falha

Para Jeswiet e Young (2005), os efeitos de flexão e cisalhamento são os principais mecanismos na Estampagem Incremental, e afetam diretamente o comportamento de fratura. Ainda, Jackson e Allwood (2009) indicam que, para os alongamentos (circunferencial e meridional), assim esses mecanismos, durante o processo inibem o acúmulo de danos, com desenvolvimento do processo em um aço de alta resistência, há fissuras intensas nos limites do grãos à direção da espessura. Ainda, as rachaduras sob estado de deformação plana são paralelas e estratificadas ao longo da direção conforme (Figura 17) que se segue:

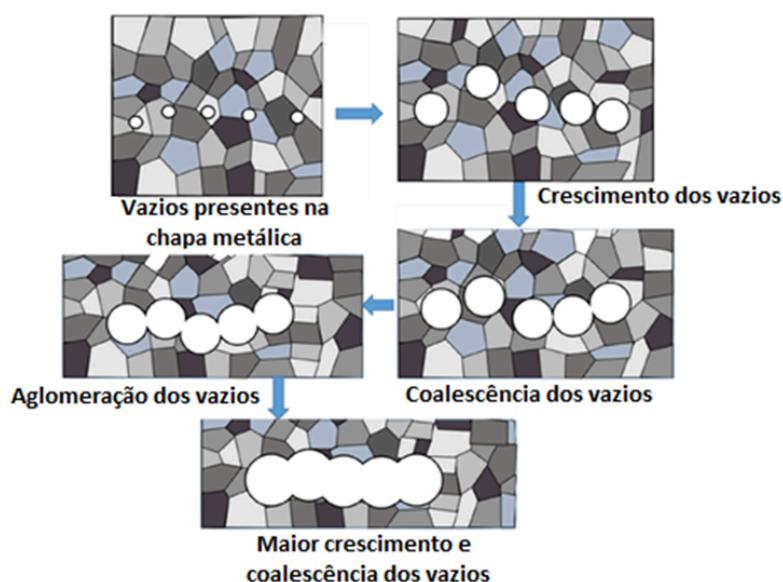


Figura 17 - Mecanismo de evolução da falha estrutural

Fonte: Chang (2021)

No princípio do evento, um certo número de vazios existem no metal, e a densidade de vazios aumenta por nucleação com o aumento da deformação em combinado com a tensão de tração meridional. Esses vazios crescem gradualmente, portanto, sob a ação de tensão de cisalhamento. Vários vazios próximos uns dos outros começam a se aglutinar, e a coalescência ocorre ao longo da direção meridional, em vez da direção da espessura. Então, o crescimento de *clusters* ocorre sempre ao longo da espessura que são restringidos. Esses aglomerados vazios existem de forma estável dentro da chapa, sem causar fratura, entretanto, levam ao aumento contínuo do tamanho de vazios críticos dentro do metal. Como resultado, a porosidade de falha é muito maior do que na tensão uniaxial (CHANG & CHEN, 2021).

2.2.2. Estampabilidade e Limites

Vistos os efeitos acima citados, reflete-se que o *springback* e a baixa conformabilidade são os defeitos comuns de placas de metal aplicadas em processos de conformação (WEI *et al.*, 2021). A “previsão” de falha adjunto da otimização da forma inicial sob complexas condições térmicas/mecânicas não simplesmente dependem de seu afinamento/deformação, mas também abrangem os resultados de temperatura, taxa de deformação e o “caminho” deformado (ZHU *et al.*, 2021).

A representação dos limites no plano das extensões principais tem o nome de Diagrama Limite de Fratura (ZHU *et al.*, 2021). Neste diagrama, encontram-se as:

- Curva Limite de Conformação (CLC);
- Curva Limite de Fratura (CLF);
- Curva Limite de Fratura ao Corte (CLFC), esta e a CLF, juntamente, definem a deformação plástica a partir da qual surgem fraturas na chapa.

Desde os estudos de Keeler (1965) em que publicou sua investigação na análise em corpos de prova deformados a partir de um punção, analisando a distribuição de tensões, seguido de Goodwin (1968), que aplicou o conceito à análise de deformações com o fim de prever a ocorrência de fratura permitindo o aparecimento da CLC, ainda, no final da década de 70, se teve o conceito de curva

limite de fratura, em que Embury e Duncan (1981) mostraram, através de ensaios, que a CLC e a CLF podem interagir de tal forma que a fratura pode ocorrer sem a existência de estrição.

No Estudo de Ai e Long (2019), os limites de deformação na Estampagem Incremental são diferentes dos determinados na Curva Limite de Conformação (*Forming Limit Curve* - FLC), onde esses dados são utilizados para delimitar os limites da estampabilidade durante o processo de Estampagem convencional. O Diagrama Limite de Fratura na Conformação (*Fracture Forming Limit Diagram* - FFLD) é o que melhor representa o processo de Estampagem Incremental. A (Figura 18) mostra a comparação, utilizando um mesmo material, entre os processos FLC e o FFLD, avaliando a estampabilidade dos mesmos, com as deformações principais representadas por φ_1 e φ_2 . Na (Figura 18), é possível notar que a estampabilidade é maior na Estampagem Incremental do que na Estampagem Convencional.

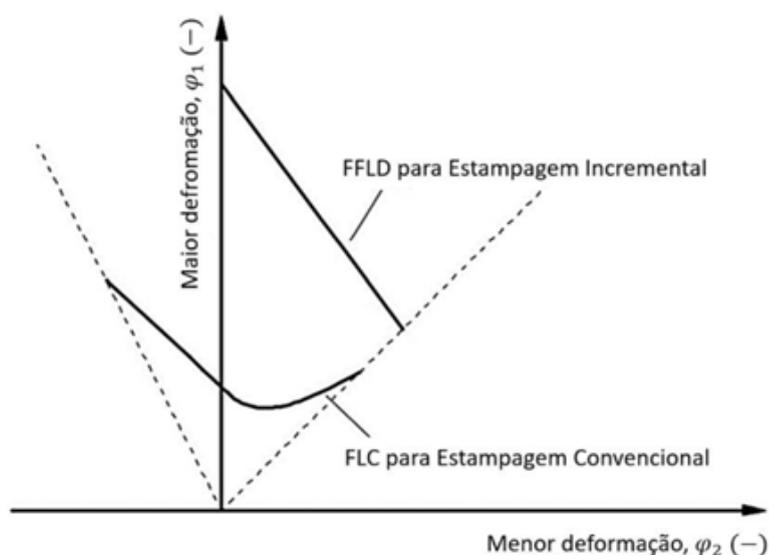


Figura 18 - Comparação Curva Limite a FLC e o FFLD

Fonte: Ai e Long (2019)

Conforme representado na (Figura 18), é possível notar que diferente da FLC com o seu formato em "V", o FFLD é demonstrado por uma linha reta no primeiro quadrante, como $\varphi_1 = a \varphi_2 + b$ (DO *et al.*, 2017), sendo que o coeficiente angular da reta em vários trabalhos é considerado igual a "-1" (MARTINS *et al.*, 2008) (DO *et al.*, 2017), assim representando reta de inclinação negativa. Quando avaliado o

estado plano de deformação (sendo $\varphi_2 = 0$), o índice de estampabilidade é extremamente alto, enquanto que na deformação de expansão biaxial ($\varphi_1 = \varphi_2$) ocorre o ponto mais baixo da reta, sendo que em todos os casos os limites de deformação do FFLD para Estampagem Incremental são superiores aos representados na FLC para Estampagem Convencional (PARK & KIM, 2003).

Para Silva *et al.* (2011), tem-se que a fratura em Estampagem Incremental pode ocorrer sem o aparecimento prévio de estrição, e conclui-se disso que a fratura com supressão de estrição é governada pela CLF. Ainda, considera-se que as fissuras resultam das tensões de corte no plano e, ainda, fora do plano. Antes de se efetuarem os ensaios, as chapas são marcadas com uma grelha de círculos para determinar as CLC, podendo ser dimensionadas as medidas de tração e de expansão hemisféricas. O método utilizado consiste em determinar, na fratura de cada corpo de prova, as extensões principais, máximas e mínimas. Assim, os círculos marcados previamente transformam-se em elipses, cujos lados maior e menor correspondem às direções principais (ZHU *et al.*, 2021).

Assim, a estampabilidade é a capacidade do material de deformar sem falhar, e pode ser representado pela altura máxima que o metal atinge sem fraturar, sendo, portanto, essencial encontrar a relação entre conformabilidade e parâmetros de processo a fim de evitar quaisquer defeitos (HARFOUSH *et al.*, 2021).

A tensão residual é a tensão que permanece dentro do componente uma vez que a carga de formação é removida. No processo incremental, a ferramenta de modelagem atua na superfície da chapa de metal, que inevitavelmente leva a tensões residuais na peça. Devido ao acúmulo destas tensões, a geometria da peça formada desvia do modelo, resultando em uma menor precisão de conformação. Assim, as propriedades elásticas do material e o estado de tensão estão relacionados com a estabilidade do ciclo de tensão (WU *et al.*, 2021).

Atendo-se à abordagem teórica, tem-se a proposta que existe tensão residual na conformação incremental de natureza compressiva (WU *et al.*, 2021). A natureza local da deformação é a causa raiz para maior conformabilidade em comparação com o processo convencional. A “teoria do macarrão” é a explicação proposta para a maior conformabilidade e propõe que a deformação local aumenta a deformação plástica e danos logo no início. No entanto, devido à natureza local, esta região com instabilidade de material não fratura, portanto, a natureza local da deformação é a principal razão para o aumento da estampabilidade (MALHOTRA *et al.*, 2012).

2.2.3. Limitação de deformações da peça

Kopac e Kampus (2005), *apud* Silva (2011), comparam os processos de conformação como forjamento e estampagem convencional, mostrando que existem valores máximos de ângulos para a manufatura da peça, assim, definido as regiões possíveis para sua fabricação. No caso da Estampagem Incremental, pesquisas apontam que o ângulo máximo na parede da chapa é de 65° . Quando esse ângulo é ultrapassado, torna-se muito frequente a trinca do material e a diminuição da espessura da chapa, diminuindo a resistência mecânica na região localizada.

Na conformação assimétrica, é importante cuidar o ângulo da parede durante o processo de Estampagem Incremental. Sendo assim, o projetista deve ter atenção quando desenhar o produto, utilizando o software CAD, e cuidar para que o ângulo de parede da peça desenvolvida seja inferior ao ângulo de conformação permitido pelas características do material da chapa durante a deformação (JESWIET, 2005 *apud* SENA, 2009).

A espessura da chapa tem relação direta com a constância de volume e o ângulo de parede, conforme a (Figura 19), assim referenciado como “lei do seno” e que apresenta falhas ou diminuição da espessura da parede quando feitos com ângulos maiores permitidos e em um passe único (JUNK *et al.*, 2003, *apud* SILVA, 2011).

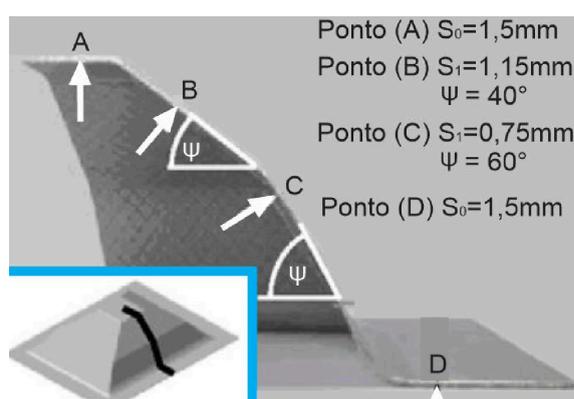


Figura 19 - Redução da espessura de parede
 Fonte: Junk *et al.* (2003)

O máximo ângulo na Estampagem Incremental é determinado por uma relação entre a espessura da chapa e seu ângulo de conformação, assim

determinado pela equação matemática chamada de lei dos senos (ARAGHI *et al.*, 2011), conforme representado na equação 2:

$$s_1 = s_0 \cdot \text{sen} (90^\circ - \psi) \quad (2)$$

Onde:

Ψ = inclinação da parede de chapa (°);

s_0 = espessura do blank (mm);

s_1 = espessura final da chapa (mm).

A lei de senos não prevê como se comporta a variação da espessura durante o processo de Estampagem Incremental. Sendo que a relação da chapa com ângulo de inclinação da parede (65°) e sua relação com a diminuição de espessura estão mostradas na (Figura 20). O ângulo ideal para a maioria dos materiais conformados sem que ocorra um afinamento extremo na parede é de 45° em sua inclinação. Já os ângulos maiores e próximos a 90°, considerando uma estampagem por conformação pelo um único passe, produzem seções extremamente finas e que geram problemas de ruptura (KOPAC & KAMPUS, 2005 *apud* SILVA, 2011).

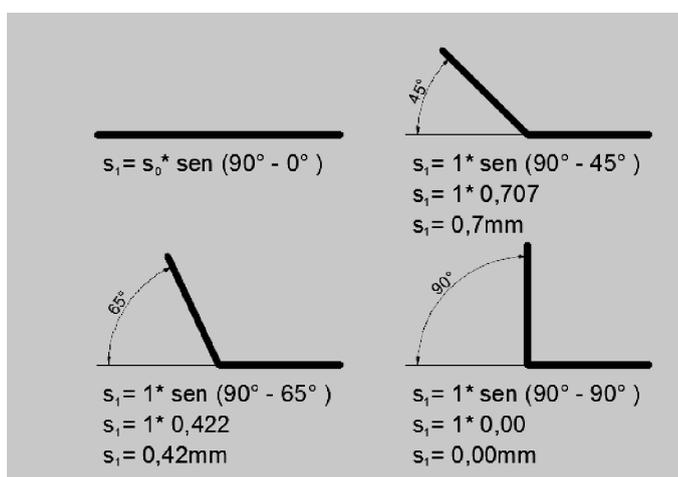


Figura 20 - Relação entre o ângulo de parede e a espessura da chapa no processo de Estampagem Incremental

Fonte: Silva (2011)

Hussain *et al.* (2009) *apud* Silva (2011), em seu estudos sobre o limite de conformação das chapas de alumínio nos setores da indústria automobilística, determinaram dois parâmetros:

- limite de espessura (*thinning limit*), e
- ângulo limite de estampagem (*forming angle limit*).

Através dessas pesquisas, os resultados mostraram que, variando a inclinação da chapa ao longo da profundidade, consegue-se uma maior capacidade de estampagem do que se utilizando uma inclinação constante.

Os trabalhos de Hussain *et al.* (2008) indicam que, no teste da Estampagem Incremental, o ângulo de parede (Ψ) aumentou gradativamente à medida que a profundidade de estampagem também aumentava (Figura 21).

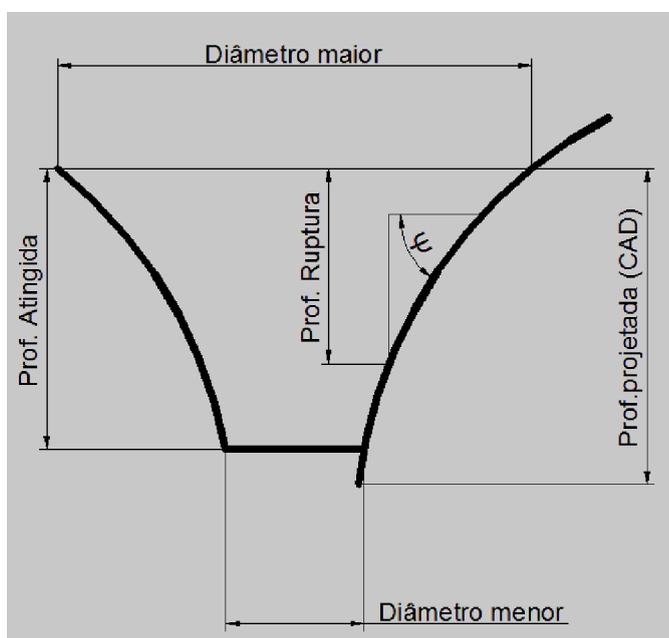


Figura 21 - Variação da inclinação da chapa

Fonte: Castelan (2007) (adaptado)

Uma característica comum nos processos de Estampagem Incremental que impacta na qualidade e na geometria da peça é o retorno elástico, além da deformação plástica e a deformação elástica, produzindo diferenças geométricas entre o produto final e seu modelo correspondente em CAD (SILVA, 2011).

Meier *et al.* (2011) *apud* Marabuto (2010) desenvolveu um sistema para correção da malha fechada na conformação que consiste em fazer um levantamento em tempo real da superfície a ser gerada por Estampagem Incremental e calcular os desvios face ao modelo CAD. Os dados são introduzidos num algoritmo de correção e novamente são calculados os desvios para a interação seguinte, até que o erro

entre a superfície real e o modelo CAD esteja dentro da tolerância pretendida. A (Figura 22) representa um diagrama de correção de desvios.

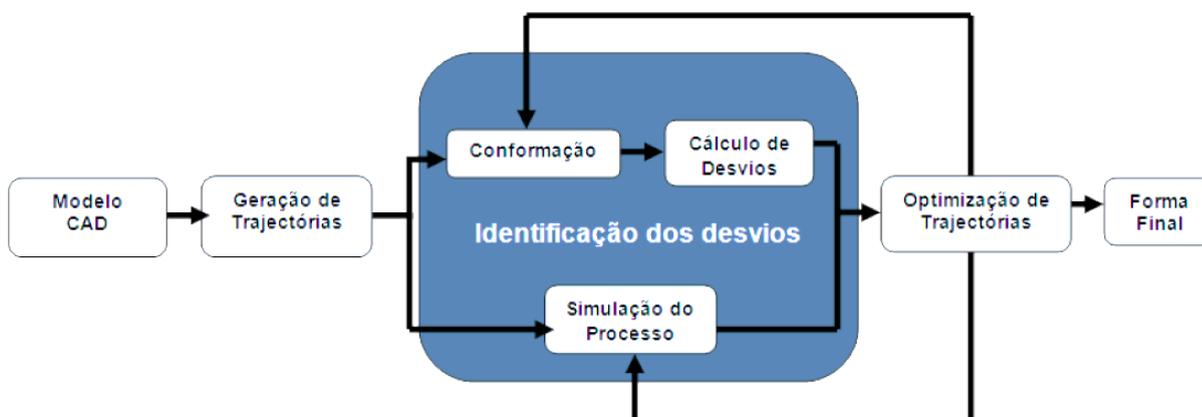


Figura 22 - Diagrama de correção de desvios

Fonte: Meier *et al.*, (2011)

2.3. Ferramenta de conformação e sua rotação

O atrito, durante o processo de deformação, gera calor devido o deslocamento da ferramenta sobre a superfície da chapa durante a conformação, sendo esse movimento realizado através do avanço (a) e rotação (N). Tendo essas variáveis sob controle, regula-se o calor formado entre o contato da ferramenta e a superfície da chapa durante a conformação da Estampagem Incremental.

O deslocamento da ferramenta sobre a superfície da chapa com rotações elevadas no seu arraste gera calor por fricção. Esse movimento relativo da ferramenta é inversamente proporcional ao calor gerado pelo atrito resultante do escorregamento. Se esse movimento de trabalho durante a conformação da chapa for elevado, o calor gerado é inversamente proporcional à velocidade da ferramenta (JESWIET *et al.*, 2005).

Pode ser utilizado o sistema de esfera livre na extremidade da ferramenta de conformação, como ilustrado na (Figura 23). O contato sobre a superfície da chapa ocorre por movimentos rotativos e não proporciona atrito, assim, o calor gerado na superfície da chapa não é tão elevado.

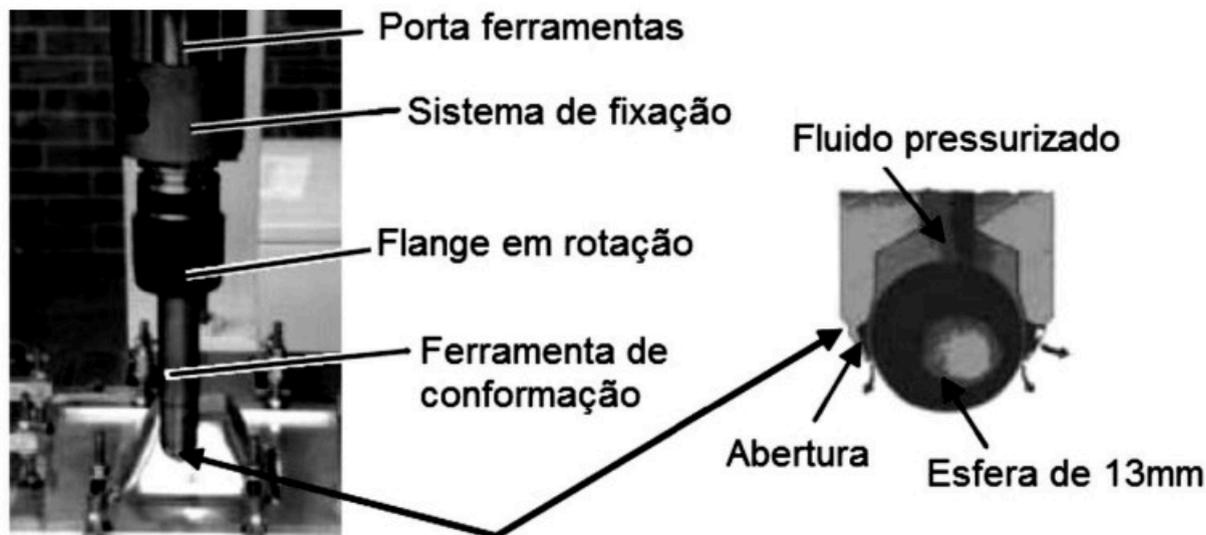


Figura 23 - Ferramenta de conformação com ponta esférica de movimento "livre"

Fonte: Jeswiet *et al.* (2005)

Se a velocidade angular da ferramenta aumentar, o atrito e o aquecimento aplicados no local favorecem o processo de deformação na zona de contato entre a chapa e a ferramenta. O aspecto negativo do aumento da velocidade de rotação da ferramenta de conformação é a necessidade de aplicar mais lubrificante, pelo fato desta se danificar rapidamente devido ao calor gerado por atrito. Outro fator importante está relacionado com o tempo e custo de produção do componente: quanto maior o tempo para produzir a peça, mais cara fica, no entanto, a qualidade do produto final aumenta. Quanto mais deformável é o material, menor pode ser a velocidade rotacional da ferramenta (HAM & JESWIET, 2006).

Diferentes dimensões são utilizadas no processo de Estampagem Incremental, desde ponteiras com diâmetros de 6 mm até as com 100 mm, conforme a (Figura 24). Os diâmetros maiores exigem mais força pelo ângulo de contato e, no geral, o diâmetro utilizado tem relação direta com o menor raio côncavo necessário para conformação (JESWIET *et al.*, 2005). Numa baixa velocidade (0 - 1000 rpm), o atrito é o principal fator para a mudança de conformabilidade. Com rotações de 2000 a 7000 rpm, o efeito térmico se torna a razão dominante. A 2000 rpm, observa-se a melhora da ductilidade e, quando se atinge valores acima de 3000 rpm, as temperaturas são altas de maneira a ativar a recristalização dinâmica (XU *et al.*, 2013).



Figura 24 - Ferramentas de conformação

Fonte: Le (2009) (adaptado)

Na passagem da ferramenta, a variação de temperatura associada ao mais elevado coeficiente de atrito indica uma relação estreita entre as variações de temperatura e a velocidade de rotação. Todavia, representa uma geração de calor insignificante, uma vez que esses valores não são capazes de afetar o desempenho do lubrificante (REAGAN & SMITH, 1991).

A seleção da ferramenta para conformação está relacionada ao formato da geometria a ser conformada, sendo assim, o diâmetro ideal também deve ser levado em conta, assim como o tipo de material, que profundidade a ser conformada e a área de trabalho. Na Estampagem Incremental, normalmente utilizam-se as pontas das semi esféricas, como as expostas na (Figura 25).



Figura 25 - Ferramentas com extremidade esférica sólida de conformação

Fonte: Vihtonen (2007)

Quando o ângulo das paredes (α) da chapa em conformação é muito acentuado, é necessário que a ponta esférica da ferramenta tenha um diâmetro

superior ao diâmetro de suporte desta com o intuito de evitar o contato entre o suporte da ponta esférica e a chapa. A (Figura 26) ilustra o contato limite tangencial para duas tipologias de ferramentas diferentes.

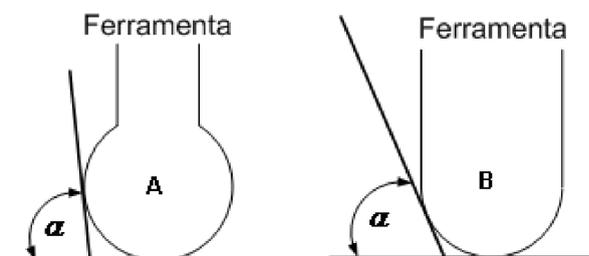


Figura 26 - Contato da parede da chapa com a ferramenta de conformação

Fonte: Sena (2009)

A definição do formato da ferramenta está relacionada ao material a ser conformado no processo de estampagem, a ponta esférica da ferramenta deve ser fabricada em aço dependendo do material. No entanto, para reduzir o atrito e aumentar a vida útil da ferramenta, esta pode ser coberta superficialmente por outros materiais, à base de carbonetos. Conforme a utilização do produto final, a ferramenta deve ser fabricada com material polimérico, como na (Figura 27), para evitar a formação de substâncias químicas ou reações com o material da chapa estampada, de modo a não contaminar a peça final (VIHTONEN, 2007).



Figura 27 - Ferramentas de conformação de ponta esférica sólida com 6, 10 e 30mm de diâmetro e com ponta de plástico (direita)

Fonte: Jeswiet *et al.* (2005)

Sobre o desempenho na conformação entre a ferramenta e os locais de deformação da chapa e o acabamento superficial, devemos cuidar os seguintes fatores:

- a velocidade de deslocamento;
- o incremento da ferramenta;
- o controle de avanço;
- o diâmetro da esfera.

A (Figura 28) mostra o comportamento do ângulo da parede da peça em alumínio AA 3003-O em função do aumento do diâmetro da esfera na extremidade da ferramenta, através de resultados obtidos por HAM e JESWIET (2006).

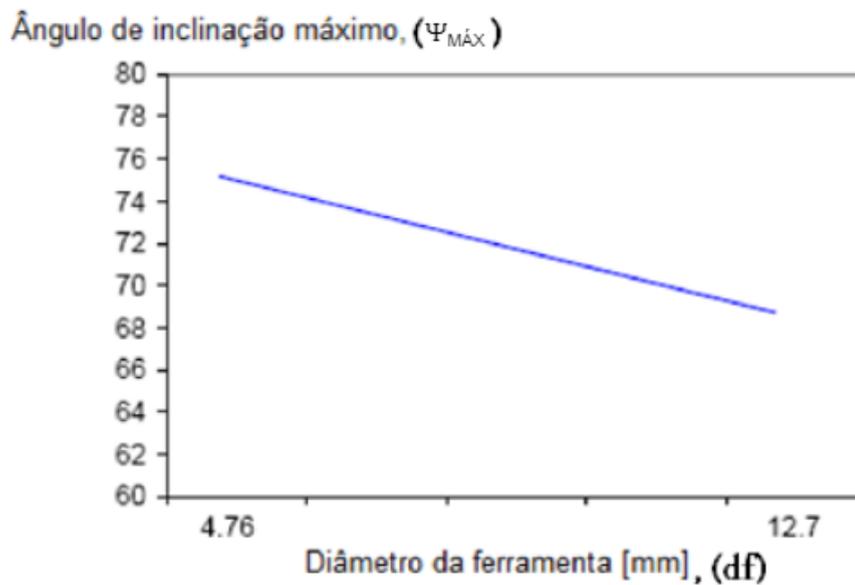


Figura 28 - Influência do diâmetro da ferramenta no ângulo máximo da parede
Fonte: Ham; Jeswiet (2006)

Resultados obtidos por Hirt *et al.* (2004) na conformação de pirâmides com bases quadrangulares com declives variados mostram que, com a diminuição do diâmetro da ferramenta de 30 mm para 6 mm, podem ser alcançadas maiores deformações para o mesmo material da chapa, como representado no diagrama das conformações da (Figura 29).

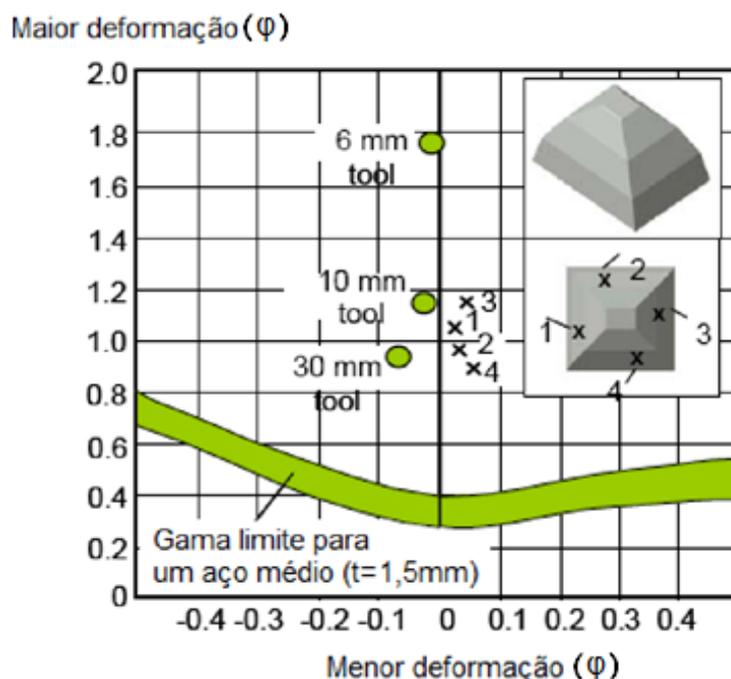


Figura 29 - Comparação entre vários diâmetros de ferramenta no diagrama limite de conformação
 Fonte: Hirt *et al.* (2004)

2.4. Lubrificação

Os lubrificantes na Estampagem Incremental compõem o fator de maior importância no processo (NAWI & MAHDAVIAN, 1994) e têm a função de diminuir a rugosidade do produto final, contribuindo para que o atrito da ferramenta em relação ao material não seja tão elevado, assim, reduzindo a temperatura da peça e da ferramenta, o que minimiza o desgaste desta (DALEFFE, 2008).

São fatores favoráveis com a lubrificação:

- Diminuição do aquecimento da ferramenta e da peça;
- Diminuição do esforço de trabalho da ferramenta em relação a peça;
- Baixo coeficiente de atrito entre ferramenta e a peça;
- Apresentação de um melhor acabamento superficial no produto;
- Baixo nível de desgaste da ferramenta durante o processo de estampagem.

Nos estudos de Azevedo *et al.* (2015), a menor rugosidade atingida no processo de conformação em chapas de aços de DP780 foi atingida pelo óleo Finarol B5746 e pela graxa AS-40, já em alumínio AA1050, pelo óleo SAE 30 e pela graxa AL-M. Nessas pesquisas, foi concluído que quanto maior a dureza do material,

menor deve ser a viscosidade do lubrificante a fim de se obter um melhor acabamento.

No trabalho de Jawale *et al.* (2018) em chapas de cobre, a menor rugosidade atingida em processos de conformação por peça estampada foi obtida com óleo mineral Castrol Magnaglide D68 comparado com as graxas Copaslip, AS40, Weicon Ni Special e Weicon Montage.

Segundo Reagan e Smith (1991), nos processos de conformação, é possível acharmos maneiras mais simples para a lubrificação, mas todas relacionadas ao tipo de material e à temperatura em que o processo está inserido.

Os lubrificantes artesanais tradicionalmente utilizados são:

- a) Sebo de velas;
- b) Sebo misturado com óleo;
- c) Sabão misturado com óleo.

O trabalho de Nawi e Mahdavian (1994) mostra que a lubrificação é importante para manter as características técnicas no produto final, garantindo seu dimensional, mantendo um bom acabamento superficial e respeitando as dimensões projetadas e suas tolerâncias, e diminuindo as forças na estampagem e melhorando a rugosidade do produto final.

No estudo de Tiburi (2007), para diminuir o aquecimento entre a chapa e a ferramenta no processo de estampagem foi primordial a diminuição do atrito, e a redução foi atingida com a utilização do lubrificante à base de lítio, utilizando uma graxa para rolamentos.

2.5. Variáveis de aferimento

Durante a conformação de chapas com espessura inicial conhecida (s_0), uma máquina operatriz equipada com um punção de ponta semi esférica de raio (r) é acoplado a um dos eixos da máquina e irá percorrer um trajeto com parâmetros de (ZAVALA *et al.*, 2021):

- Incrementos verticais (Δz);
- Incrementos horizontais ($\Delta x, y$);
- Avanço da ferramenta (α);
- Rotação da ferramenta (N).

Na verificação da visioelasticidade, os corpos de prova necessitam receber uma gravação eletroquímica de círculos de diâmetro inicial (d_0) de 1 mm, formando uma malha que cobre a superfície oposta à que recebeu o punção. Verifica-se então o alongamento desses círculos, o que varia conforme a aplicação de diferentes incrementos (Figura 30).

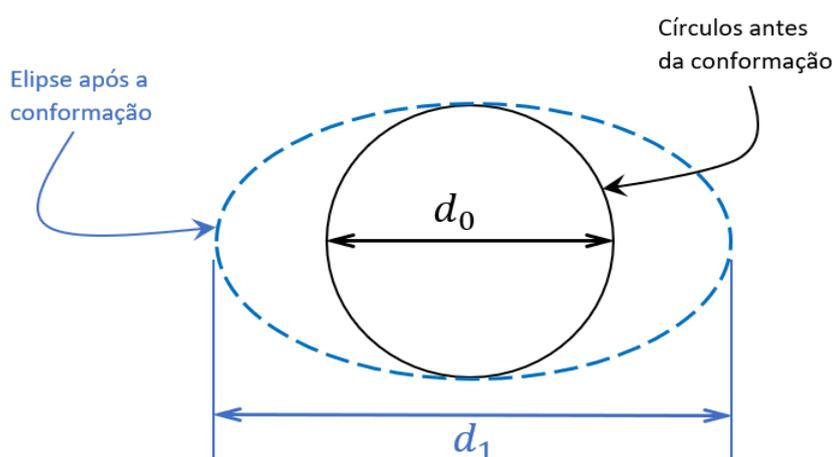


Figura 30 - Aferimento da deformação pelo ferramental

Fonte: Campanella *et al.* (2021)

Para interpretação da maior deformação φ_1 (deformação verdadeira no comprimento), determina-se no logaritmo natural da razão do comprimento da elipse (d_1) pelo diâmetro do círculo (d_0), conforme a equação 3 que se segue:

$$\varphi_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \quad (3)$$

2.6. Máquinas de usinagem CNC

No processo de Estampagem Incremental, as Máquinas de Usinagem CNC (Figura 31), transmitem as coordenadas de processo a partir de programas CAD/CAM (CAVALER, 2010). A formação incremental é um processo de conformação de metal e é afetado por vários parâmetros do processo, nomeadamente do material, espessura, diâmetro de ferramenta, geometria da ferramenta, profundidade, taxa de avanço, velocidade de rotação/direção, e suas interações (MOHANTY *et al.*, 2021).



Figura 31 - Centro de usinagem (CNC)

Fonte: Torres *et al.* (2021) (adaptado)

As forças aplicadas são fatores críticos, especialmente quando uma CNC normal é usada, já que tais forças são os primeiros fatores considerados na determinação da máquina apropriada, uma vez que a potência necessária é uma função direta da força. Conhecer as forças garante que nenhum dano ocorra à máquina ou peça. Além disso, as forças de formação são afetadas pelo ângulo, profundidade e espessura da folha, entre outros (HARFOUSH *et al.*, 2021).

Para Duflou *et al.* (2005), a fixação da chapa no dispositivo é responsável pelo maior tempo do *setup*,. Para reduzir o tempo, o mesmo autor desenvolveu uma prensa de placas que permite uma variação do encaixe de acordo com o tamanho da peça, conforme (Figura 32).

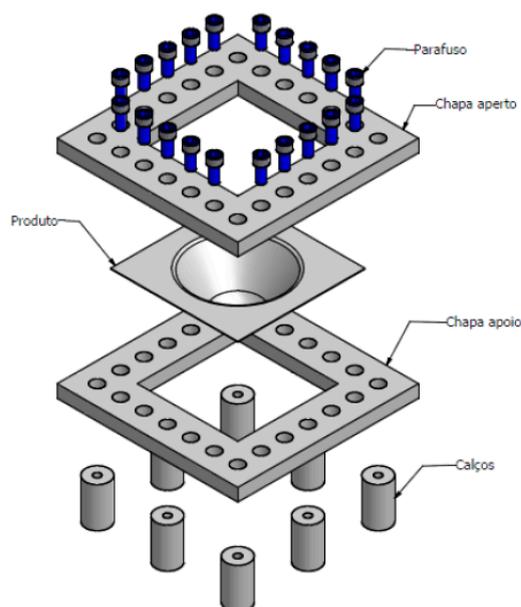


Figura 32 - prensa-chapas

Fonte: Silva et al. (2008) (adaptado)

O prensa-chapas impede que a chapa deslize por entre as chapas de aperto (DUFLOU *et al.*, 2005).

2.7. Springback

O efeito *springback* é causado na liberação de tensão residual quando a força de formação aplicada é descarregada e ocorre após cada “passo de dobra”. Assim, a fim de obter componentes com boa precisão, trabalhando seu retorno elástico. Ainda, os últimos estudos elencam fatores como retorno elástico, fricção e propriedades do material como fatores determinantes desse efeito (ZHANG *et al.*, 2018).

Normalmente, o passe em ângulo é investigado para verificar a magnitude do retorno elástico, e tem-se que: quando a profundidade é maior, a quantidade de retorno é maior. Ainda, a quantidade de retorno após cada flexão do processo está relacionado com a profundidade de “dobra e posição”, sendo que a carga de formação durante o processo é significativamente reduzida naturalmente (ZHANG *et al.*, 2018). Um dado determinante que diz respeito ao processo está no oneroso processo para fabricar a matriz necessária para estampar cada placa curva (WEI *et al.*, 2021).

2.8. Processo de Hidroconformação

Segundo Kumar e Kumar (2019), a Estampagem Incremental por Hidroconformação (ISFH) é uma técnica onde a ferramenta se desloca sobre a face da chapa, tendo a pressurização de um fluido hidráulico no lado oposto da chapa em relação a ferramenta, assim tendo a função de apoio e sustentação contra a ferramenta, e os movimentos da ferramenta são programados através de uma máquina CNC.

Os aspectos negativos na Estampagem Incremental de Chapas (ISF) estão relacionados com a qualidade, a precisão da geometria e a diminuição da espessura da chapa durante a conformação da chapa. Na área da Estampagem Incremental de Chapas, pesquisadores se aprofundam nesses estudos. Malhotra *et al.* (2012), em seus estudos, descobriu que o ponto de contato da ferramenta com a chapa metálica é o local onde acontece maior conformação da chapa no processo SPIF. Ai *et al.* (2017) também notou que o retorno elástico tem um papel fundamental na estabilidade do processo durante a deformação da chapa no processo de Estampagem Incremental, comparado a estampagem convencional conforme Cheng *et al.* (2017).

A utilização de um processo de estampagem convencional vem aumentando, principalmente na utilização de prensas hidráulicas motorizadas nos processos de conformação, onde as mesmas atingem ótimos resultados por obterem uma alta velocidade e impacto em relação à parede da matriz em relação ao punção, tendo uma boa taxa de deformação efetiva.

Attanasio *et al.* (2008) menciona que a Estampagem Incremental por dois pontos, utilizando uma matriz parcial com apoio na trajetória da ferramenta, vem trazendo resultados positivos na área automotiva, tendo melhor precisão dimensional, ótima qualidade na face da chapa e uma resultado melhor em relação ao espessura da chapa em seu afinamento. Segundo Singh *et al.* (2021), a Estampagem Incremental, tem vantagens em relação aos processos de conformações tradicionais, como peças com alturas maiores, mais profundas, devido o processo ser executado por camadas, melhorando o estiramento da chapa devido a ser gradual. Nessa técnica, a ferramenta de conformação é colocada no

porta-ferramenta de uma máquina CNC, com seus movimentos sendo programados para se deslocarem por cima da superfície da chapa.

A desvantagem desse processo é o afinamento da chapa e seu retorno elástico. Sendo assim, através do uso de uma contrapressão hidrostática, se busca atender e superar de uma maneira promissora esse problema de afinamento da chapa. Este método é determinado e denominado por Hidroconformação Incremental de Chapas (ISHF), o mesmo utiliza uma pressão hidrostática do fluido de retorno como suporte para deformar a chapa.

Kumar e Kumar (2014) e Kumar e Kumar (2015) também descrevem que o processo utilizando a contrapressão hidrostática como apoio nas regiões a serem deformadas mantém a uniformidade e a distribuição na espessura da chapa durante o processo de conformação durante o processo de Estampagem Incremental. A (Figura 33) mostra como funciona a estrutura no processo de Hidroconformação, onde um robô industrial com a ferramenta de conformação adaptada a ele é responsável pela trajetória da ferramenta e a chapa a ser conformada é fixada em uma estrutura que possui uma câmara que fornecerá contrapressão hidrostática.



Figura 33 - Célula de Hidroconformação

Fonte: Singh *et al.* (2021)

Kumar e Kumar (2018b) utilizaram Software de CAE com objetivo de simular a Estampagem Incremental com uma pressão, assim simulando a contrapressão do fluido conforme o processo de hidroconformação feito mecanicamente. Seus resultados mostraram que a ductilidade induzida pela pressão ajuda na redução das forças de conformação, demonstrando que o processo realizado por pressão apresentou um resultado melhor do que processo normal de Estampagem Incremental.

O processo de Hidroconformação, em inglês *Hydroforming*, que também é cunhado Conformação de Hidroformagem, Hidrostática e Hidroformação, teve início no século XX e o patenteamento dessa técnica foi registrado, durante o mesmo período, nos EUA, na Europa, na Alemanha e no Japão (RAMALHEIRA, 2008). O processo de estampagem, por ser um método mecânico, facilitou o desenvolvimento da técnica de hidroconformação, assim como a criação de derivações do método.

O mesmo é utilizado em vários setores da indústria e para a obtenção de diversos produtos, com foco na conformação de chapas e tubos, conferindo alta resistência nos produtos conformados. O processo de conformação por essa técnica desenvolve o encruamento da matéria prima (LI *et al.*, 2016). Esse resultado é consequência do processo ser realizado a frio. Podemos aplicar esse método de conformação em materiais como ligas de alumínio, bronze, cobre, aço, titânio, entre outras, sendo um processo simples e de baixo recurso financeiro, desse modo, de grande interesse por pesquisadores e empresas do setor de produção (GUK, *et al.*, 2006).

Essa técnica tem pontos positivos, como a fabricação de lotes pequenos em chapas metálicas, com espessuras finas e formatos complexos, mas, dependendo do formato e profundidade, apresenta certas limitações durante a conformação mecânica (GUK *et al.*, 2006) (ALVES, 2011). O processo desse método de estampagem por conformação mecânica em produtos metálicos e desenvolvido como uma técnica de dois processos combinados se utiliza convencionalmente de estampagem por pressão para dar conformação à peça e a força inversa do óleo pressionando a chapa contra o punção, assim tendo um momento hidrostático (BORTOLUSSI *et al.*).

Nessa técnica, o processo utiliza um fluido com alta pressão para conformação, assim conseguindo desenvolver formatos uniformes como tubos

curvos e chapas de formas tridimensionais, suas matrizes apresentam os contornos e formas complexas desejados no produto desenvolvido.

Em trabalhos como a conformação de tubos, a pressão do fluido pode atingir 1035 MPa, e, em outros processos de conformação como em chapas de alumínio, a pressão do fluido pode atingir de 30 MPa a 200 MPa (LANG *et al.*, 2004). A (Figura 34) mostra o processo de conformação.

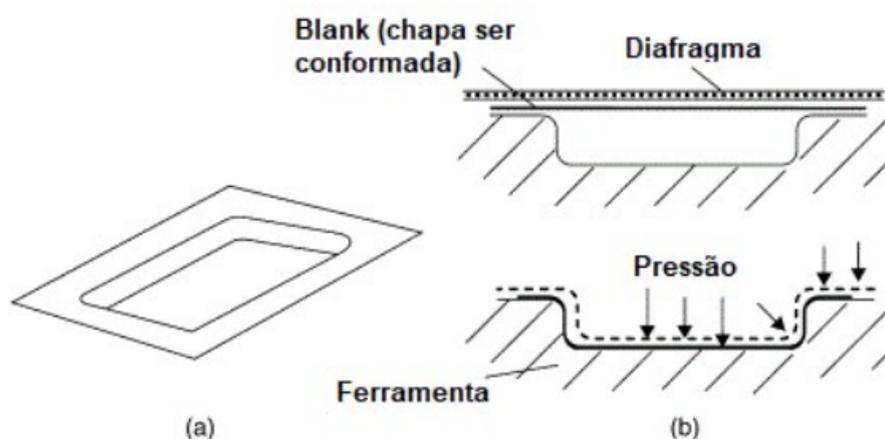


Figura 34 - (a) produto conformado e (b) processo de conformação Hidroconformação

Fonte: Marciniak *et al.* (2002)

A indústria automobilística e aeroespacial, nos meados dos anos 90, deram início aos processos de conformações metálicas, assim dando início à processos de conformação mais simples de produtos metálicos com formatos mais complexos. Com objetivo em melhorias nos processos de fabricação, na redução nos ciclos produtivos e melhorias contínuas dos produtos finais, a indústria investiu e desenvolveu tecnologias a serem introduzidas nos processos de conformação mecânica, focando principalmente em produtos como tubos e chapas. Esse processo atualmente é conhecido e operante na indústria automotiva e aeroespacial, e o setor tecnológico vem mostrando interesse devido às vantagens produtivas (LANG *et al.*, 2004) (ZHANG *et al.*, 2004).

O processo de Hidroconformação possui grandes vantagens, tais como:

- Eliminação de regiões soldadas;
- Eliminação de produtos montados por outros processos de união;
- Aumento da resistência nos produtos;
- Aumento na produção e qualidade dimensional do produto;

- A matriz pode ser utilizada em chapas com diferentes espessuras;
- Produtos com formas complexas;
- Estabilidade na espessura das paredes, tanto em tubos e chapas;
- Não alterar as propriedades mecânicas do material, permitindo processos simples e com custos baixos, mantendo a qualidade e também permitindo a produção em nível de protótipos (ABRANTES *et al.*).

A hidroconformação permite produzir peças reforçadas sem flanges, componentes que foram incorporados no setor da indústria automobilística, assim apresentando vantagens de tecnologias que despertaram interesse das montadoras em seus processos produtivos. As empresas automobilísticas, por muito tempo, fabricaram itens como chassis, eixos dianteiros, eixos traseiros pelo processo de hidroconformação, porém, mais tarde esses itens passaram a ser fabricados por processo de estampagem convencional, forjamento e soldagem (LEI *et al.*, 2001). Empresas como a Piper Aircraft relatam que utilizam, em sua manufatura, os processos de hidroconformação em seus produtos estruturais em chapas de alumínio (HIEMENZ, 2014). A (Figura 35) mostra uma ferramenta utilizada no processo de hidroconformação.



Figura 35 - Ferramenta fabricada em polycarbonato por impressão em 3D e aplicada no processo de Hidroconformação.

Fonte: Durgan (2015)

2.8.1. Tipos de processos de Hidroconformação

Com objetivo de adquirir produtos com maior qualidade, maior conformação e com tolerâncias dimensionais melhores, o processo por hidroconformação desenvolveu maneiras diversas para atender essa demanda. Assim, essa técnica passou a ter uma estrutura variada, utilizando diferentes *blanks* e pré-formas, assim tendo diferentes modos para esse processo. Desse modo, a técnica foi dividida em cinco tipos, conforme a (Figura 36) (LANG *et al.*, 2004) (YADAV, 2008).



Figura 36 - Tipos de Hidroconformação

Fonte: Alves (2011)

Na década de 30, antes da 2ª Guerra Mundial, foi o momento que os primeiros processos de hidroconformação surgiram, e autores indicam que essa técnica foi fundamental nesse momento da história (RAMALHEIRA, 2008) (LANG *et al.*, 2004). Essa técnica é de baixo custo em relação aos equipamentos a serem utilizados, sua utilização é focada em processos de produção em lotes pequenos de produtos, que têm grandes tendências de utilização em produtos fabricados de alumínio (GUK *et al.*, 2006).

Na estampagem convencional, as ferramentas são nomeadas por punção e matriz, onde os mesmos possuem o formato do produto a ser conformado. No processo de Hidroconformação de chapas, o punção ou a matriz é substituído por uma pressão aplicada através de um fluido, assim tendo um dos lados da chapa aparente ou com uma membrana de borracha, denominado como diafragma. Esse modelo de hidroconformação apresenta uma distribuição uniforme que atinge toda a

superfície da chapa, obtendo maiores deformações, conforme representado na (Figura 37).

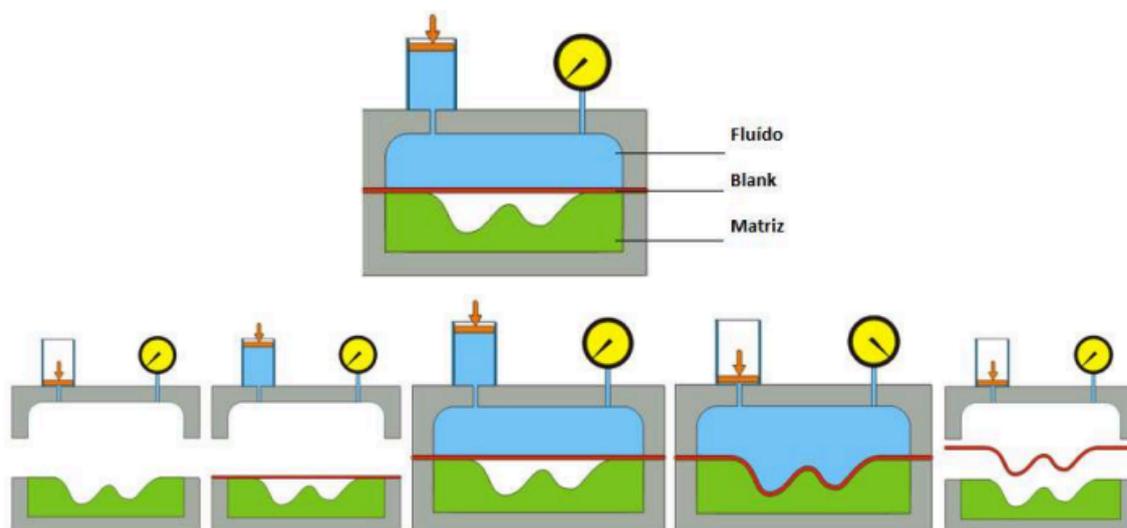


Figura 37 - Etapas do processo de Hidroconformação

Fonte: Massa (2022)

As etapas da Hidroconformação em Chapa são classificadas:

- Hidroconformação com diafragma de borracha com punção fixo;
- Hidroconformação profunda hidromecânica aquecida;
- Hidroconformação de chapas (ZHANG *et al.*, 2004).

2.8.2. Aplicação da Hidroconformação no processo de Estampagem Incremental (ISHF)

O processo de conformação por Estampagem Incremental de chapas (ISF) é uma técnica flexível na produção de peças metálicas, principalmente em formatos complexos de terceira dimensão. Na Estampagem Incremental, o seu índice de deformação é superior aos processos convencionais de conformação mecânica (MALHOTRA *et al.*, 2012). As empresas de manufatura buscam desenvolver técnicas que possam oferecer a seus parceiros métodos para atingir produtos customizados, tendo baixos custos de fabricação e versatilidade (KUMAR e KUMAR, 2016). Sendo assim, a conformação por Estampagem Incremental derivou uma forma de trabalho híbrido, atendendo a exigência da indústria por novas técnicas, assim conhecido como *Incremental Sheet Hydro-Forming* (ISHF).

Conforme os estudos de Singh *et al.* (2021), o uso de uma contrapressão hidrostática, ou seja, utilização de um fluido como apoio na conformação, pode reduzir o retorno da mola e aumentar a região de espessura uniforme da chapa em comparação com a Estampagem Incremental Tradicional durante formação do perfil estampado. No processo de hidroconformação, em relação ao processo convencional de Estampagem Incremental, as deformações ocorrem de uma maneira muito suave.

Também nota-se variação da espessura comparado aos dois processos ISF e ISHF. No ISF, uma variação de espessura se apresenta ao longo da estampagem ligada a profundidade desejada, e a chapa apresenta os seguintes diagnósticos: diminui rapidamente devido à grande deformação plástica e, em seguida, torna-se quase estável ao longo da região de deformação. Já no processo ISFH, quando a pressão do fluido é aplicada na parte de trás, que atua como apoio, percebe-se que a variação de espessura sobre a profundidade é quase uniforme do meio da profundidade em relação ao final da estampagem da chapa.

2.8.3. Estrutura da hidroconformação (ISHF)

Kumar e Kumar (2016) desenvolveu uma estrutura de laboratório para a hidroconformação por Estampagem Incremental de chapas, realizando seus experimentos conforme a (Figura 38).

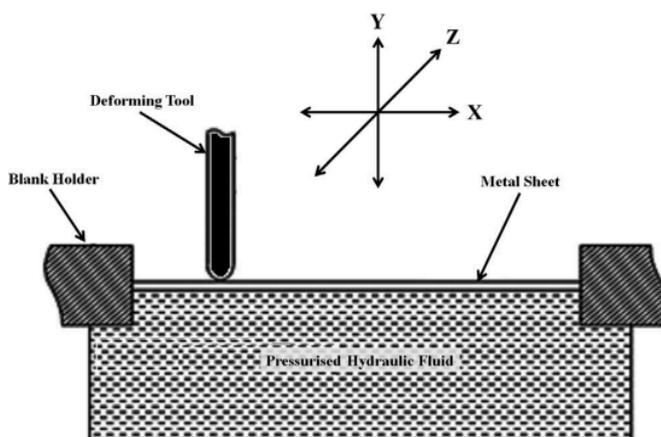


Figura 38 - Estampagem Incremental Hidroconformação
Fonte: Kumar e Kumar (2015)

As principais características da máquina de hidroformação de chapas incrementais são identificados como:

- *Blank* da chapa de metal;
- Matriz com câmara para fluido e fixação do *blank*;
- Ferramenta de ponta esférica para deformação;
- Máquina CNC;
- Sistema hidráulico.

Kumar e Kumar (2019) relata que o processo ISHF pode ser realizado como conformação por vários estágios até a quantidade necessária que atinja o formato do produto final. A chapa de metal é deformada na forma final gradualmente em cada estágio de sua formação, como visto na (Figura 39).

Dessa forma, o tamanho do passo é variado conforme cada etapa da deformação até atingir o resultado desejado. Portanto, para alcançar um alto ângulo de conformação, é definida uma estratégia de conformação por múltiplos estágio e múltiplas etapas.

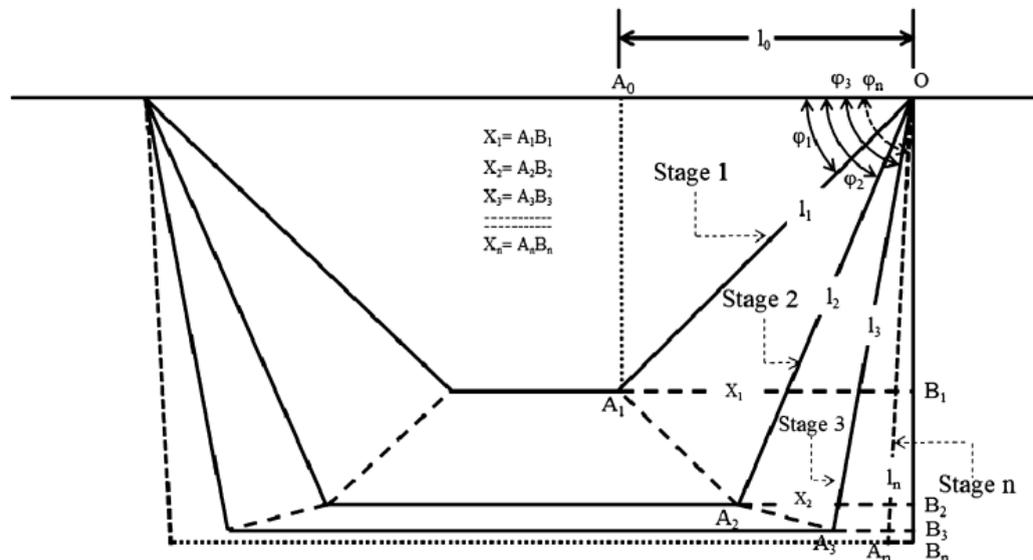


Figura 39 - Estratégia de múltiplos estágios e múltiplas etapas

Fonte: Kumar e Kumar (2019)

2.9. Análise de Variância (ANOVA)

A Análise de Variância (ANOVA) é uma ferramenta de tecnologia computacional, utilizada em trabalhos acadêmicos com o recurso de softwares de estatística avançados para verificar e validar resultados experimentais, apesar de

muitos pesquisadores usarem esse recurso de maneira errada, pois o mesmo possui modelos estatísticos estabelecidos, ignorando os requisitos determinados pelo modelo, requisitos esses chamados de pressupostos. A confiança desse modelo estatístico está ligada aos dados e os mecanismos matemáticos aplicados, sua precisão é garantida quando os pressupostos são atendidos, viabilizando seu uso (SOUZA, 2017).

Segundo Gomes (1990), a ANOVA é um modelo estatístico que testa se as médias de duas ou mais situações são iguais ou diferentes, através da hipótese nula e a hipótese alternativa respectivamente. Quando considerada a hipótese nula, as médias destas situações são iguais. Sendo assim, estatisticamente seus tratamentos estabelecidos são os mesmos. Na hipótese alternativa, as médias das situações determinadas são diferentes, o que significa que um dos tratamentos testados pelo pesquisador apresentou diferença estatística dos demais.

Na ANOVA, um dos modelos mais utilizados é o de medidas repetidas, esse modelo utiliza a variável a ser avaliada como resposta durante o longo do processo, assim criando um modelo longitudinal de medidas repetidas. Nesse modelo, existem quatro pressupostos que permitem garantir o modelo adequado para os dados do pesquisador, sendo eles a homocedasticidade, normalidade, independência e esfericidade (GOMES, 1990). A ANOVA é uma ferramenta importante na verificação estatística dos resultados de um pesquisador, mas para isso seu modelo deve ser utilizado e aplicado de maneira correta, aplicando todos os pressupostos determinados, e evitando usar dados brutos para testar o método, assim, garantindo os resultados (LEWIS, 1995). Os dados brutos dos experimentos estatisticamente podem ser definidos como a diferença de cada uma das observações experimentais e a média do processo correspondente ao seu tratamento (BUSSAB, 1988).

Na homocedasticidade, parte do princípio que os experimentos tenham suas variâncias estatisticamente iguais entre seus níveis experimentais, sendo assim, as variâncias dos experimentos deve ser constante entre seus níveis. A não homocedasticidade dos experimentos afeta diretamente na ANOVA e influencia nos seus cálculos (ROYSTON, 1982).

A normalidade parte do princípio que os experimentos tenham uma distribuição normal. Caso não seja normal, esta distribuição apresentará um maior erro padrão e as estimativas não serão eficientes no cálculo, visto que a linha de distribuição normal (com forma de sino) se distanciará do formato da curva dos

experimentos não normais. Quanto menor a amostragem, maior tende a ser o erro (ROYSTON, 1982). Quando os experimentos não são normais, é possível tratar os dados brutos utilizando transformadas matemáticas, como raiz quadrada, logaritmo e logaritmo natural, por exemplo. Depois que os dados brutos foram tratados, são recalculados os resultados e se aplica novamente o teste de normalidade sobre estes. Muitas vezes, esse procedimento resolve a não normalidade dos dados. O mesmo pode ser aplicado para a homocedasticidade, quando os resultados se mostrarem heterocedásticos. Já para a independência dos dados, os tratamentos matemáticos geralmente não surtem efeito (SOUZA, 2017).

A independência parte do princípio que a correlação entre os experimentos seja zero, ou seja, uma observação tem efeito nulo sobre a outra. Quando os dados são dependentes uns dos outros, significa que há um vício na coleta dos resultados brutos e as observações dependem umas das outras. Esta dependência retorna ao erro padrão elevado e à ineficiência nas estimativas dos resultados da ANOVA (FAVERO, 2009).

Já na esfericidade, a igualdade das variâncias é oriunda de um nível de tratamento dos dados. É ainda uma forma matematicamente mais leve de considerar e avaliar a simetria composta dos resultados, pois esta é a que mais exige da esfericidade (DRUMOND *et al.*, 1996). Os parâmetros da esfericidade que precisam ser analisados são os dados longitudinais (que variam com o tempo) e que sejam dependentes, pois esses dados que são responsáveis para garantir a qualidade do processo. Como padrão, se a esfericidade for igual a 1, significa que os dados são esféricos, ou seja, na matriz dos dados experimentais, as variâncias são iguais e as covariâncias também são iguais. Se diferente de 1, existe fuga da esfericidade (XAVIER & DIAS, 2001).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Caracterização do Processo

Neste estudo, foram realizados experimentos de Estampagem Incremental, variando parâmetros de máquina e matrizes em um centro de usinagem CNC da marca ROMI, modelo Discovery 308, comando Mach 8, com curso longitudinal de 450 mm, curso transversal de 310 mm e curso vertical de 410 mm conforme indicado na (Figura 40).



Figura 40 - Centro de usinagem Romi Discovery 308

Este trabalho busca comparar a conformabilidade e a precisão geométrica da chapa com e sem uso de uma contrapressão de ar, assim realizados pelo método de Estampagem Incremental. Para fornecer a contrapressão pneumática, foram projetadas e desenvolvidas duas matrizes parciais, ambas com uma câmara interna hermética, onde o ar fica pressurizado internamente.

O ensaio de uniaxial de tração foi realizado para determinar a curva de escoamento para o alumínio AA1200-H14, formatado do corpo de prova conforme (Figura 41).

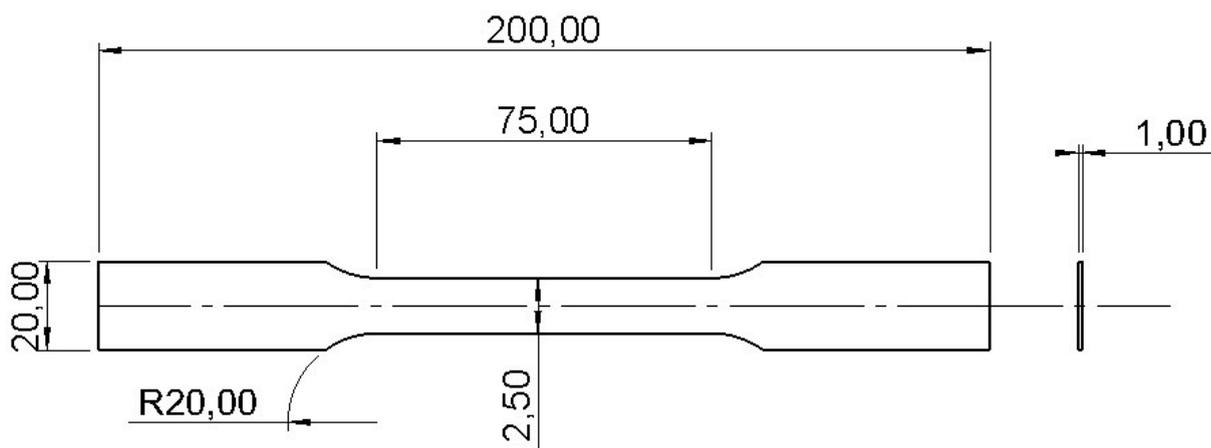


Figura 41 - Corpo de prova ensaio de tração

As amostras foram cortadas em ângulos de 0°, 45° e 90° em relação ao sentido da laminação. Para realizar este ensaio, foi utilizada a máquina de ensaios da marca INSTRON/EMIC, modelo EMIC 23-600 (Figura 42), que foi cedida pelo Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS.



Figura 42 - Máquina EMIC 23-600

3.2. Experimentos para análise de Precisão Geométrica

Para a comparação da deformação do perfil geométrico, foi utilizada a matriz parcial bacia hermética, fabricada em aço SAE 1045, a mesma é composta de um anel *oring* para vedação, conforme a (Figura 43).

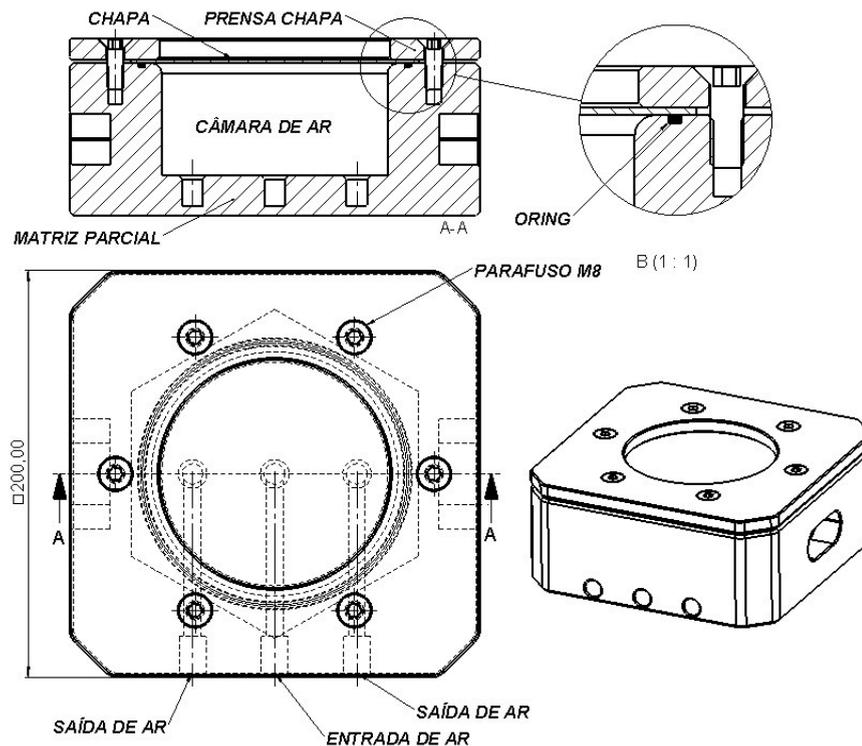


Figura 43 - Matriz bacia Hermética

A peça estampada, a partir de um chapa de alumínio AA1200-H14 com formato sextavado de 140 mm com espessura de 1 mm (Figura 44), tendo como objetivo estampar uma peça com formato de pirâmide, é fixada por um flange e abaixo, na matriz, está a câmara com o ar pressurizado alimentado por rede de ar através de um compressor.

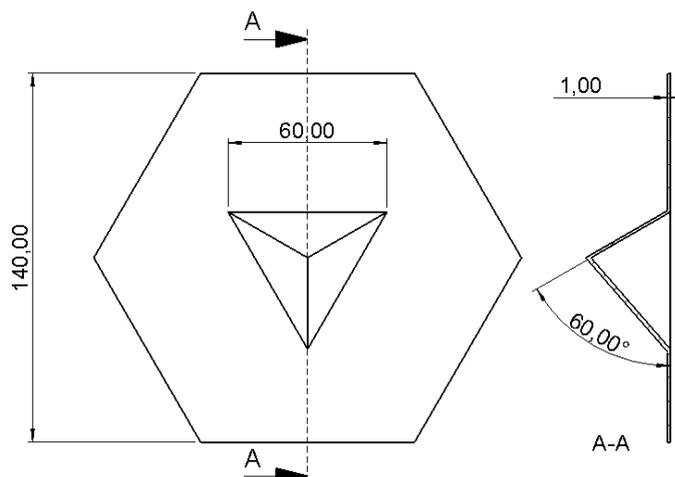


Figura 44 - Desenho da peça estampada

A conformação das chapas foi realizada por uma ferramenta de Estampagem Incremental com ponta semi esférica, com diâmetro 4 mm, fabricadas em aço rápido (Figura 45).



Figura 45 - Ferramenta \varnothing 4mm

Para realização de cada experimento, foi determinada a trajetória da ferramenta de estampagem por programação CNC, com incremento vertical de 1 mm sobre a chapa (no eixo Z). Após cada incremento vertical, ocorre um deslocamento da ferramenta no eixo X e Y, formando a seção do triângulo. Após o passo, a ferramenta incrementa verticalmente, até altura em Z programada, então o experimento é finalizado. A (Figura 46) apresenta o percurso da ferramenta em cada experimento de Estampagem Incremental.

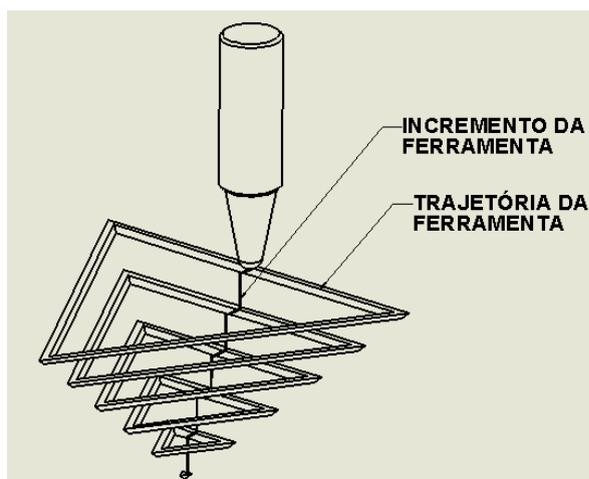


Figura 46 - Percurso da ferramenta nos experimentos

O sistema desenvolvido para pressurizar e manter internamente a contrapressão, conforme a (Figura 47), funciona da seguinte maneira: o compressor que abastece a rede de ar é responsável em mandar o ar para matriz parcial hermética. Entre o compressor e a matriz, existe um registro de esfera, de modo a ser fechado no momento em que a pressão interna atinja a medida de 1 bar (14,5 psi), aferida por um manômetro digital - 150 PSI, do fabricante Steula. Existe um segundo registro de esfera na saída de modo a ser usado se acaso a pressão ultrapasse a desejada. Uma vez equilibrada a pressão, a mesma se mantém, pois a matriz possui um sistema de vedação por *oring*, não permitindo o ar escapar.

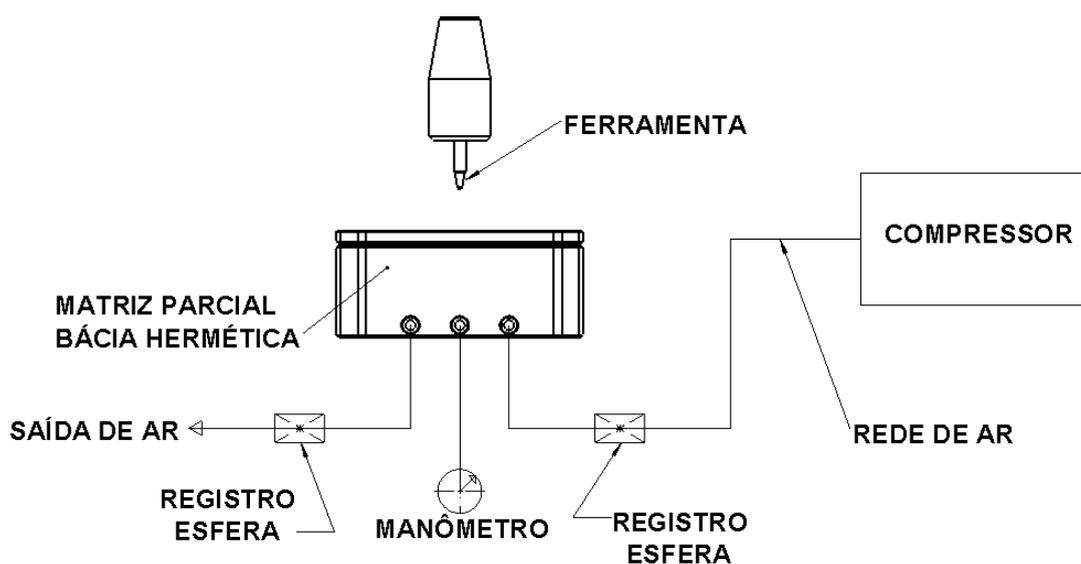


Figura 47 - Sistema de pressurização

3.2.1. Medição Tridimensional da Geometria

Nesses ensaios realizados pela Estampagem incremental no centro de usinagem CNC, tendo um experimento sem contrapressão e outro experimento com contrapressão, para avaliarmos o perfil geométrico, utilizamos uma Tridimensional Hexagon Tesa, Modelo 454 Micro Hite 3D Eixos X400mm, Y500mm, Z400mm para fazermos as comparações dimensionais. Nas medições, a chapa foi fixada em um dispositivo desenvolvido e fabricado para manter o paralelismo da peça e sua fixação, sendo assim a máquina tridimensional efetuou suas medições (Figura 48).

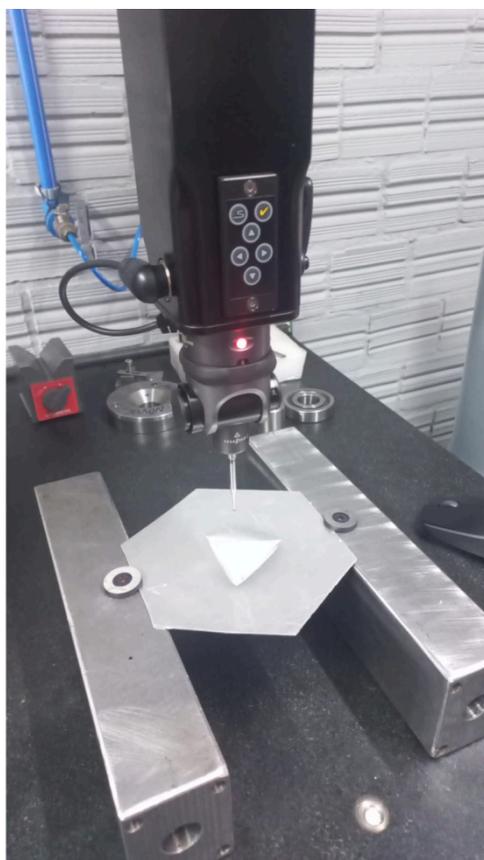


Figura 48 - Medições da chapa

3.3. Experimentos para análise da Estampabilidade

Para a comparação da deformação da profundidade, foi utilizada a matriz parcial reta hermética (Figura 49). A chapa é presa por um flange e abaixo está a câmara com o ar pressurizado alimentado por uma rede de ar através de um compressor.

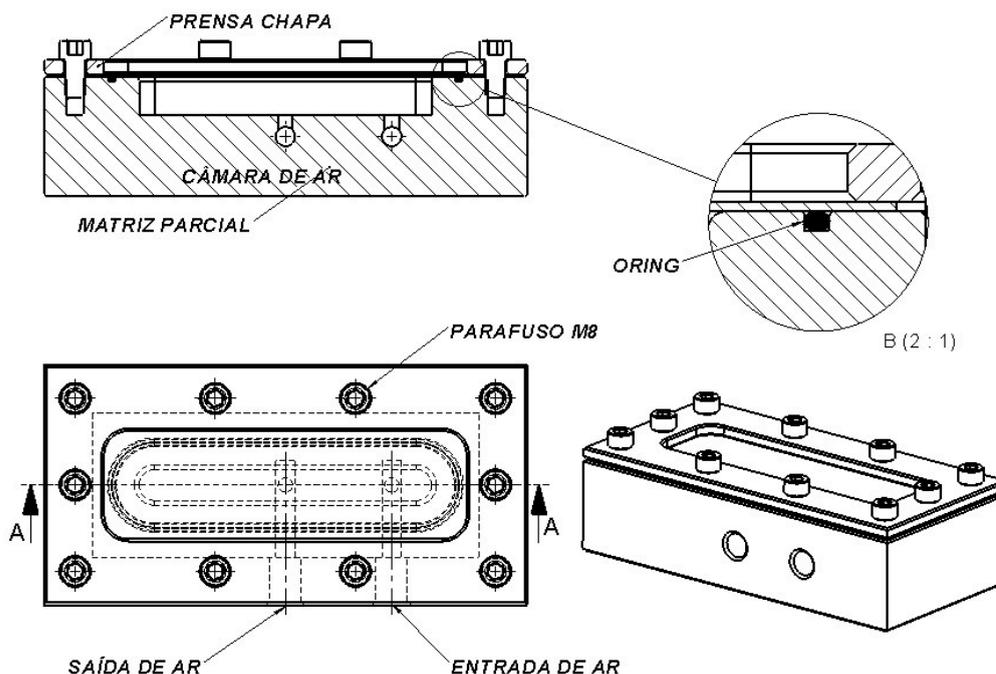


Figura 49 - Matriz parcial reta Hermética

Nos experimentos para avaliação da deformação na profundidade com canal reto, a estampagem foi realizada em chapas de alumínio AA1200-H14 com dimensões 1 x 60 x 160 mm, em um dispositivo desenvolvido para realizar os ensaios numa matriz parcial. A matriz parcial foi fabricada para ter um conceito hermético, de maneira a impedir a saída do ar tendo o mesmo controlado, com a possibilidade de realizar os testes com a pressurização do ar internamente ou sem estar pressurizado, sobre a qual foi fixada cada chapa por meio do prensa-chapas, conforme indicado na (Figura 50).

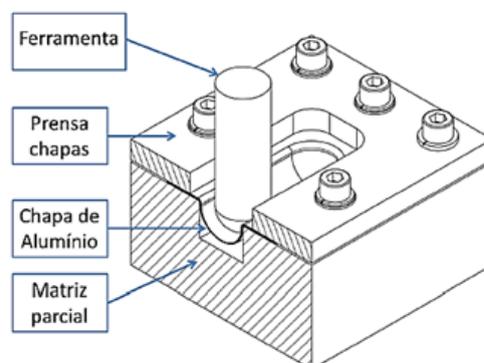


Figura 50 - Dispositivo para realização dos experimentos de Estampagem Incremental

A conformação das chapas foi realizada por uma ferramenta de Estampagem Incremental com ponta semi esférica, com diâmetro $d_f = 9,5$ mm, fabricadas em aço rápido, conforme indicado na (Figura 51).

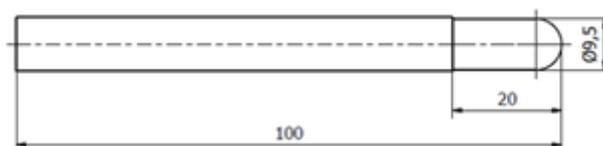


Figura 51 - Ferramenta $\varnothing 9,5$ mm

Para realização de cada experimento, foi determinado o percurso da ferramenta de estampagem por programação CNC, com incremento vertical de 0,5 mm sobre a chapa (no eixo Z). Após cada incremento vertical, ocorre um deslocamento da ferramenta em 100 mm (no eixo X) e outro incremento vertical, até que ocorra o surgimento de trinca na chapa, então o experimento é interrompido. A (Figura 52) apresenta o percurso da ferramenta em cada experimento de Estampagem Incremental.

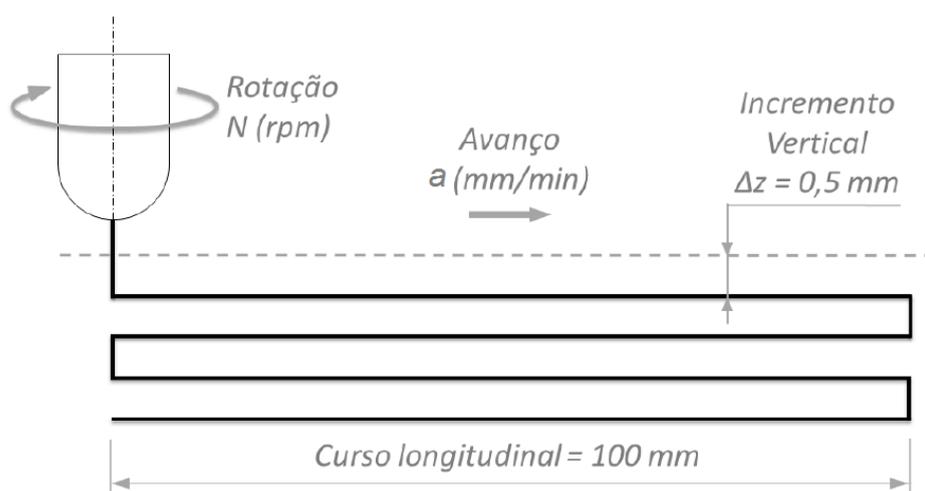


Figura 52 - Percurso da ferramenta nos experimentos

Foram realizados 24 experimentos, sendo 12 ensaios com a matriz parcial livre da pressurização e 12 ensaios com a matriz parcial hermeticamente pressurizada com ar e com a pressão interna controlada, com cada método com cada ferramenta, variando os parâmetros de avanço e rotação. A rotação variou

entre 0 rpm, (com eixo livre), 200 rpm, 400 rpm e 800 rpm, e o avanço variou entre 200 mm/min, 400 mm/min e 800 mm/min.

Nestes ensaios, a lubrificação foi realizada por meio da graxa preta com bissulfeto de molibdênio - UNILIT MP BSM. Sua aplicação foi feita por meio de pincel, sendo que a cada incremento da ferramenta essa graxa foi reaplicada manualmente à medida que a interface chapa-ferramenta ficava sem lubrificação. A escolha da graxa foi orientada por Azevedo *et al.* (2015), que na Estampagem Incremental de alumínio obteve bons resultados de rugosidade das chapas com o uso de uma graxa similar (graxa AL-M).

Em cada chapa de alumínio, foram gravados círculos com 2,5 mm de diâmetro por um processo eletroquímico. Após o surgimento da trinca em cada experimento, ocorreu sua interrupção, sendo a medição das deformações máximas realizada nas formas elípticas (geradas pela deformação da chapa) logo ao lado da região onde a trinca ocorreu, conforme ilustrado na (Figura 53).

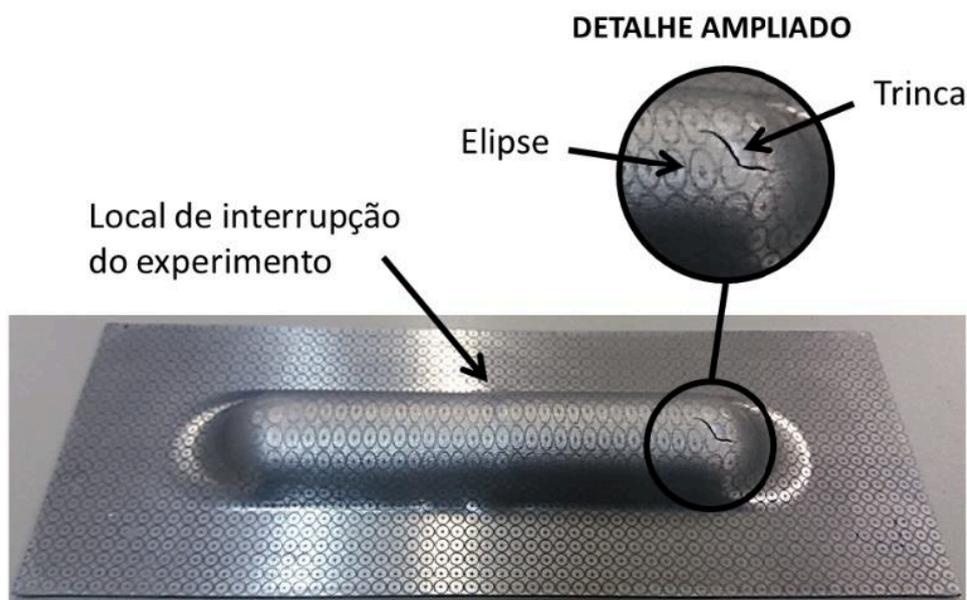


Figura 53 - Resultados dos Ensaios de Estampagem Incremental de AA1200-H14

A (Figura 54) mostra a chapa estampada com redução significativa da espessura inicial (s_0) para a espessura final (s_1), sendo que cada experimento foi interrompido logo após a apresentação da trinca na chapa, registrando-se a profundidade final (h_1) em que ela ocorreu.

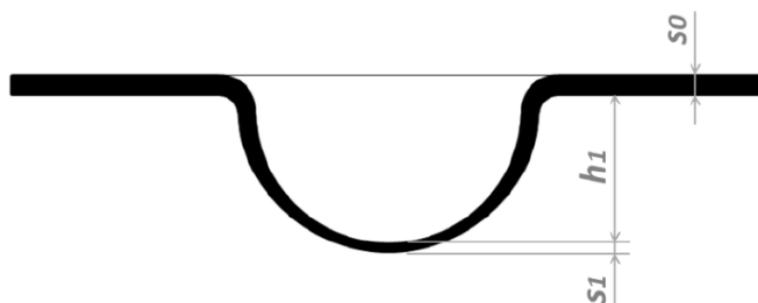


Figura 54 - Perfil do canal estampado após ensaios de Estampagem Incremental

A (Figura 55) mostra a variação dimensional do círculo gravado nas chapas após a Estampagem Incremental.

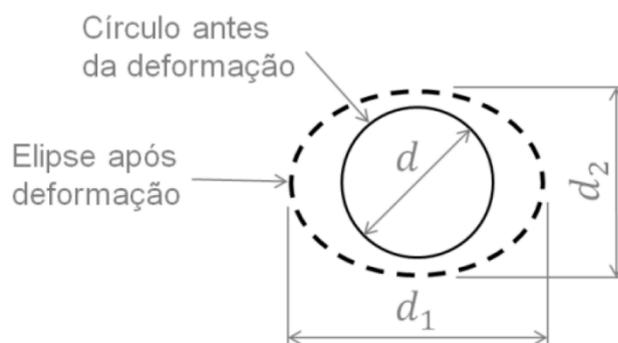


Figura 55 - Deformações na chapa estampada

O valor da deformação φ_1 foi determinado pela relação entre o comprimento da elipse e o diâmetro do círculo gravado na chapa (equação 4), enquanto o valor da deformação φ_2 foi determinado pela relação entre a largura da elipse pelo diâmetro do círculo gravado na chapa, conforme a equação 5.

$$\varphi_1 = \ln \frac{d_1}{d} \quad (4)$$

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).

$$\varphi_2 = \ln \frac{d_2}{d} \quad (5)$$

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).

Também foi analisada a variação de deformação φ_1 com a deformação φ_2 , se mantendo em 0, o que caracteriza a deformação plana, assim mediando ao lado da trinca. A deformação na espessura φ_3 foi determinada pela lei da constância de volume, que determina que a variação das deformações é nula, conforme indicado na equação 6.

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (6)$$

Onde:

φ_1 = Deformação no comprimento (-);

φ_2 = Deformação na largura (-);

φ_3 = Deformação na espessura (-).

Conhecendo a deformação na espessura φ_3 e o valor da espessura inicial ($s_0 = 1$ mm), a partir da equação 7, foi possível calcular a espessura final s_1 , conforme indicado na Equação 8.

$$\varphi_3 = \ln \frac{s_1}{s_0} \quad (7)$$

$$s_1 = e^{\varphi_3} \cdot s_0 \quad (8)$$

Com base nesses dados, foi realizada a elaboração de um método para estimar o limite de deformação do material em função dos parâmetros utilizados no processo.

Após a conclusão dos experimentos de estampabilidade para validação dos resultados medidos, foi realizada uma equação de regressão múltipla com objetivo de prever a melhor condição da deformação na profundidade do canal no processo, utilizando a matriz com e sem contrapressão de ar. Também foi desenvolvida uma equação da reta para termos uma melhor condição de avanço e de rotação em relação a profundidade estampada.

Conforme o planejamento experimental desenvolvido neste trabalho, foram realizados através dos 24 experimentos de estampabilidade, em função da deformação do canal reto, em relação aos dois métodos utilizados pela matriz parcial, rotação e avanço do processo. Os dados obtidos nestes experimentos foram utilizados para elaboração de um método para estimar os limites de deformação e de uma equação para estimar a deformação no processo de Estampagem Incremental.

Para definir um método analítico a ser utilizado como critério de avaliação nos parâmetros que influenciam nos resultados da deformação, foram calculadas as tensões principais em cada experimento, realizada uma análise de variância (ANOVA), e então foram desenvolvidas as equações do método. A análise de variância ANOVA foi realizada para avaliar os efeitos dos parâmetros no alumínio puro, como o avanço, rotação, matriz sem contrapressão e matriz com contrapressão de ar no resultado de cada experimento.

4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1. Experimentos com ferramenta de diâmetro 9,5 mm – com matriz parcial reta sem a pressurização do ar interno

Na análise dos 12 primeiros experimentos, realizados com ferramenta de diâmetro 9,5 mm, utilizando a matriz parcial reta, buscou-se analisar a deformação da profundidade sem a pressurização do ar interno. Na (Figura 56), mostra-se o processo de Estampagem Incremental sendo realizado no centro de usinagem CNC com ferramenta $\varnothing 9,5$ mm e a superfície da chapa devidamente lubrificada.



Figura 56 - Realização dos experimentos com Ferramenta $\varnothing 9,5$ mm

Partindo dos experimentos de estampabilidade através do método Estampagem incremental, variando os parâmetros de avanço e rotação e mantendo o incremento vertical constante em 0,5 mm, foi construída a tabela 1. Nela, também foram adicionados os resultados de cada experimento, como a profundidade em que ocorreu a trinca (h_1), a espessura final da chapa (s_1), a deformação no comprimento (φ_1), a deformação na largura (φ_2), e a deformação na espessura (φ_3).

Tabela 1 - Resultados dos Ensaios de Estampagem Incremental de AA1200-H14, com $\Delta z = 0,5$ mm, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm

| N° | ROTAÇÃO | AVANÇO | ALTURA | ESPESSURA | DEFORMAÇÕES | | |
|----|---------|----------|--------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | N | a | h_1 | s_1 | Comprimento | Largura | Espessura |
| | (rpm) | (mm/min) | (mm) | (mm) | φ_1 (-) | φ_2 (-) | φ_3 (-) |
| 1 | livre | 200 | 7,0 | 0,41 | 0,88 | 0 | -0,88 |
| 2 | livre | 400 | 7,0 | 0,41 | 0,88 | 0 | -0,88 |
| 3 | livre | 800 | 6,5 | 0,5 | 0,69 | 0 | -0,69 |
| 4 | 200 | 200 | 7,0 | 0,41 | 0,88 | 0 | -0,88 |
| 5 | 200 | 400 | 7,0 | 0,41 | 0,88 | 0 | -0,88 |
| 6 | 200 | 800 | 6,5 | 0,5 | 0,69 | 0 | -0,69 |
| 7 | 400 | 200 | 7,0 | 0,41 | 0,88 | 0 | -0,88 |
| 8 | 400 | 400 | 6,5 | 0,5 | 0,69 | 0 | -0,69 |
| 9 | 400 | 800 | 6,5 | 0,5 | 0,69 | 0 | -0,69 |
| 10 | 800 | 200 | 8,0 | 0,38 | 0,96 | 0 | -0,96 |
| 11 | 800 | 400 | 6,5 | 0,5 | 0,69 | 0 | -0,69 |
| 12 | 800 | 800 | 6,5 | 0,5 | 0,69 | 0 | -0,69 |

Nos experimentos 1 a 12, a deformação φ_1 variou de 0,69 a 0,88 com a deformação φ_2 se mantendo em 0, o que caracteriza as deformações planas, medidas ao lado da trinca. A deformação na espessura φ_3 foi determinada pela lei da constância de volume, que determina que a variação das deformações é nula.

A profundidade em que ocorreu a trinca h_1 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 6,5 mm a 8 mm.

Na (Figura 57), é apresentada a relação entre rotação (N) e deformação máxima obtida (φ_1) para cada avanço (a) utilizado nos experimentos.

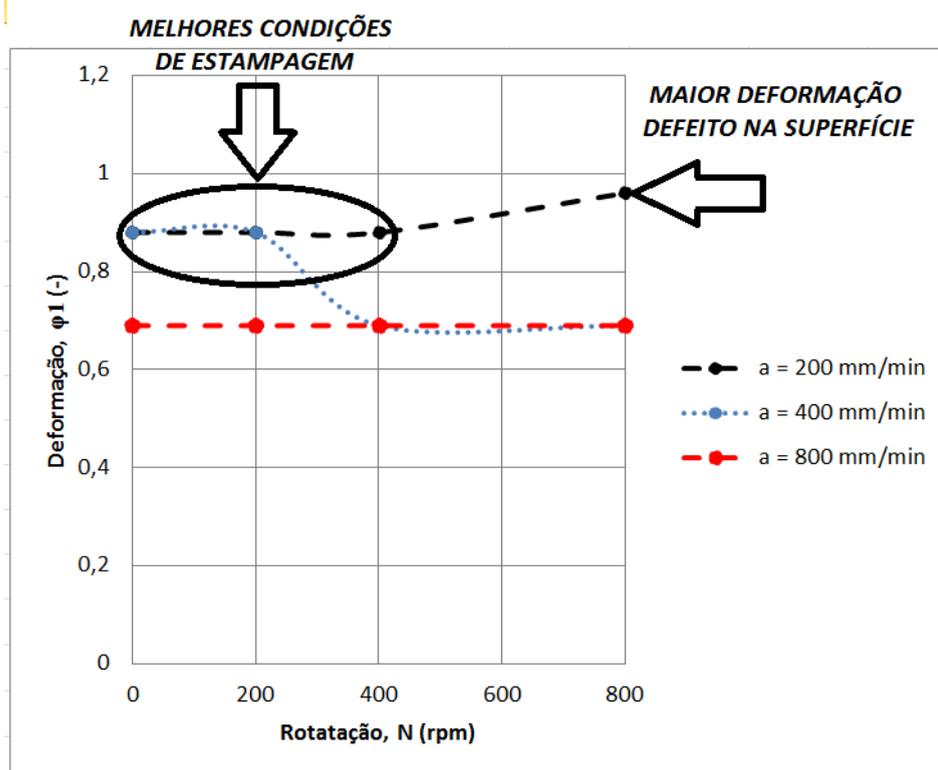


Figura 57 - Relação de rotação (N) e deformação (ϕ_1) para cada velocidade de avanço (a) nos experimentos de Estampagem Incremental, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm

A (Figura 57) mostra que se diminuirmos a velocidade de avanço, aumenta a estampabilidade no processo de deformação por Estampagem Incremental, assim como também concluído por Arruda (2010). Notamos que, com avanço $a = 200$ mm/min, foi possível obter os maiores valores de deformação, enquanto que com avanço de $a = 800$ mm/min, foram obtidas as menores deformações e com $a = 400$ mm/min, deformações intermediárias dependendo da rotação utilizada.

Também foi analisado que, com baixo valor de velocidade no avanço (200 mm/min) e com rotação alta de 800 rpm, a deformação aumenta, confirmando as conclusões dos estudos de Xu *et al.* (2013) com o mesmo incremento vertical e faixa de avanço próxima, o que indicam que, em geral, a estampabilidade aumenta à medida que ocorre aumento da rotação da ferramenta. No entanto, com a velocidade de avanço de 400 mm/min, a deformação diminui. Em compensação, com a velocidade de avanço de 800 mm/min, a de rotação não tem influência nenhuma na profundidade da peça estampada.

Na (Figura 58), ainda podemos notar uma região em destaque onde foram apresentadas as melhores situações de Estampagem Incremental, ou seja, onde foi

possível obter melhor e maior deformação sem que houvesse comprometimento na superfície da chapa e não alterasse a rugosidade superficial da peça estampada. Desta região, foi excluído o ensaio que apresentou maior deformação, pois este também apresentou defeitos superficiais.

O 10° experimento foi o que apresentou maior deformação com seus parâmetros de regulação da máquina e valor de avanço baixo ($a = 200 \text{ mm/min}$) e velocidade de rotação alta ($N = 800 \text{ rpm}$). No entanto, nessa condição, a rugosidade da chapa foi visivelmente comprometida, apresentando a aparência característica do “efeito casca de laranja” (*orange peel effect*) na parte externa. Este tipo de defeito também é verificado em alguns experimentos nos estudos de Hamilton e Jeswiet (2010) para valores de avanço muito mais elevados (entre 5080 e 8890 mm/min). Na (Figura 58), fica evidente a elevada rugosidade apresentada na superfície externa do 10° experimento quando comparada com o 7° experimento (semelhante aos demais).

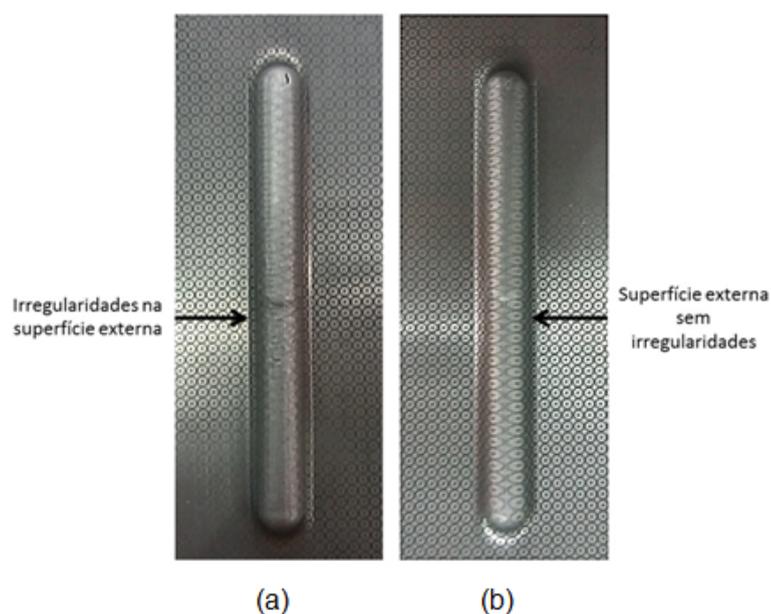


Figura 58 - (a) Superfície externa com irregularidades e Experimento 10 e (b) sem irregularidades (demais experimentos)

Também notamos que o 10° experimento apresentou deformidades internas, certas irregularidades. A (Figura 59) apresenta a comparação entre as superfícies internas do 10° experimento (com muitas irregularidades) e do 7° experimento (com a aparência uniformemente lisa, muito semelhante a dos demais experimentos).

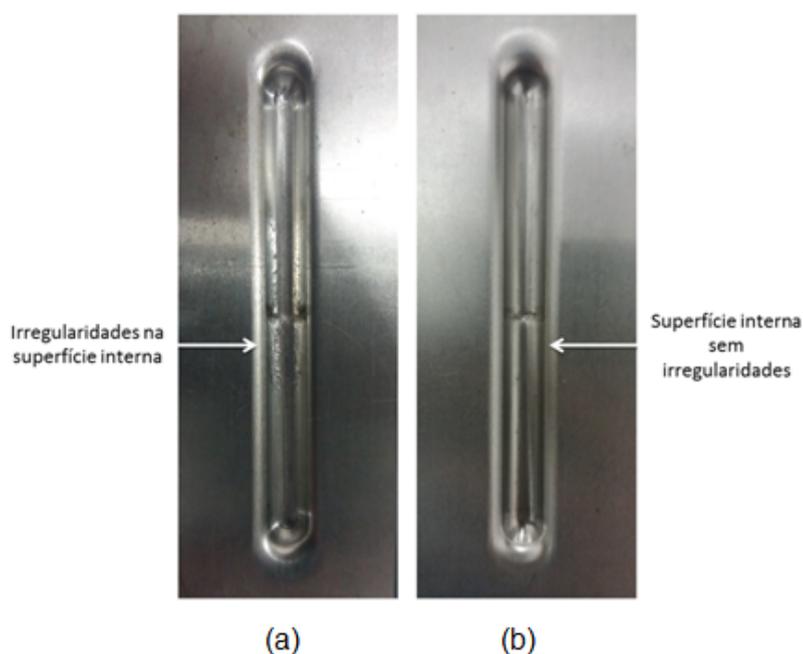


Figura 59 - (a) Superfície interna com irregularidades (experimento 10) e (b) sem irregularidades (demais experimentos)

Já nos demais experimentos, as superfícies não apresentaram defeitos, não comprometendo a rugosidade de suas faces que fossem visíveis a olho nu.

Devido o experimento número 10 ter apresentado irregularidades em suas superfícies, e o experimento número 7 ter visualmente apresentado suas superfícies iguais aos demais, foram separadas uma amostra da melhor situação de cada bateria de ensaios para avaliarmos sua rugosidade (experimentos 1, 4, 7 e 10).

A (Figura 60) demonstra os pontos que foram determinados para a medição da rugosidade, sendo eles:

- A – interno do rasgo;
- B – externo do rasgo;
- C – superfície superior do rasgo;
- D – superfície inferior do rasgo.

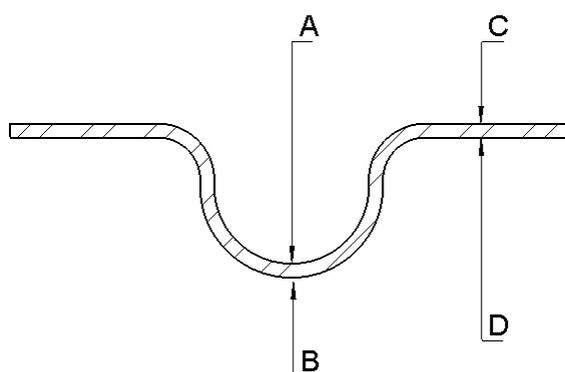


Figura 60 - Pontos de medição

O objetivo da medição dos pontos C e D foi obter uma referência da rugosidade na chapa antes da conformação, assim tendo como comparar com os pontos A e B. Pode-se analisar, através da tabela 2, a comparação das rugosidades entre os corpos de prova.

Tabela 2 - Tabela de resultados da rugosidade

| N° | ROTAÇÃO | AVANÇO | PONTOS DE MEDIÇÃO | | | |
|----|---------|------------|-------------------|---------|---------|---------|
| | | | A | B | C | D |
| | N (rpm) | a (mm/min) | Ra (µm) | Ra (µm) | Ra (µm) | Ra (µm) |
| 1 | livre | 200 | 0,42 | 0,50 | 0,18 | 0,18 |
| 4 | 200 | 200 | 0,40 | 0,36 | 0,14 | 0,14 |
| 7 | 400 | 200 | 0,45 | 0,50 | 0,14 | 0,20 |
| 10 | 800 | 200 | 1,42 | 1,66 | 0,18 | 0,20 |

Para as medições de rugosidades demonstradas acima após a Estampagem Incremental, foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo, Modelo SJ-210 4mN com curso total eixo X = 16,0 mm (Figura 61).

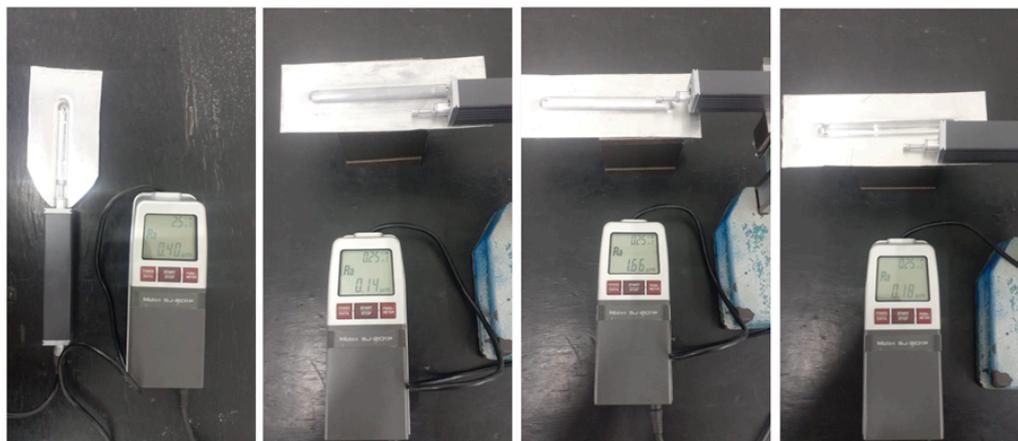


Figura 61 - Medição das superfícies

Com base nos dados obtidos nos 12 experimentos, foi possível agrupar os resultados de deformação em três Retas Limite de Fratura (RLF): a primeira com RLC com o menor valor de deformação para os ensaios n° 3, 6, 8, 9, 11 e 12; a segunda RLF com valor intermediário de deformação para os ensaios n° 1, 2, 4, 5 e 7; a terceira reta com maior valor de deformação para o ensaio n° 10, conforme indicado na (Figura 62).

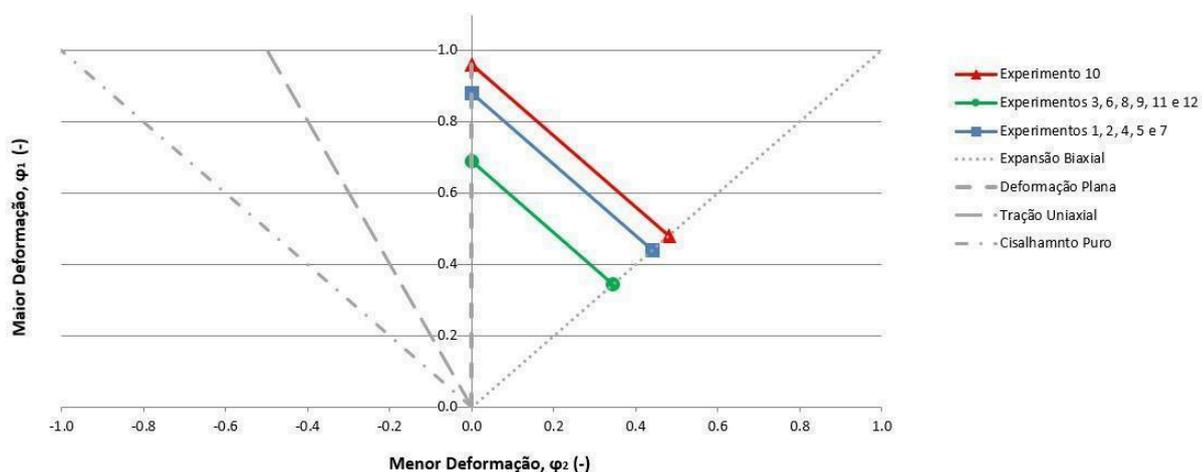


Figura 62- Retas Limite de Fratura (RLF) para Estampagem Incremental de AA1200, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm

4.2. Experimentos com Ferramenta de diâmetro 9,5 mm – com matriz parcial reta com pressurização de ar

Nesses 12 experimentos, realizados com ferramenta de diâmetro 9,5 mm, utilizando a matriz parcial reta hermética com a pressurização de 1 bar (14,50 psi) de pressão interna uniforme, a chapa é fixada firmemente, o trajeto da ferramenta esférica é programado para percorrer o formato da peça a ser fabricada, e a chapa a ser desenvolvida recebe a contrapressão de 1 bar (14,50 psi). A pressão do ar é criada através de um compressor e controlada por manômetro, conforme (Figura 63).

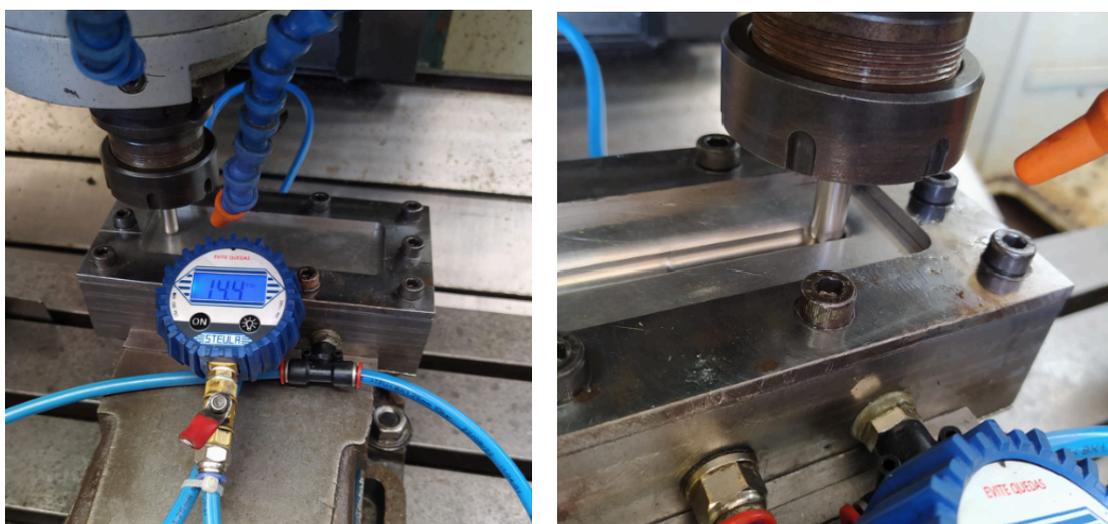


Figura 63 - Matriz reta hermética pressurizada

Entretanto, podemos analisar a deformação em relação a profundidade, variando os parâmetros de avanço e rotação e mantendo o incremento vertical constante em 0,5 mm, foi construída a tabela 3. Nela, também foram adicionados os resultados de cada experimento, como a profundidade em que ocorreu a trinca (h_1), a espessura final da chapa (s_1), a deformação no comprimento (φ_1), a deformação na largura (φ_2), e a deformação na espessura (φ_3).

Tabela 3 - Resultados dos Ensaios de Estampagem Incremental de AA1200-H14, com $\Delta z = 0,5$ mm, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm

| N° | ROTAÇÃO | AVANÇO | ALTURA | ESPESSURA | DEFORMAÇÕES | | |
|----|---------|----------|--------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | N | a | h_1 | s_1 | Comprimento | Largura | Espessura |
| | (rpm) | (mm/min) | (mm) | (mm) | φ_1 (-) | φ_2 (-) | φ_3 (-) |
| 13 | livre | 200 | 7,5 | 0,39 | 0,93 | 0 | -0,93 |
| 14 | livre | 400 | 7,5 | 0,39 | 0,93 | 0 | -0,93 |
| 15 | livre | 800 | 7 | 0,41 | 0,88 | 0 | -0,88 |
| 16 | 200 | 200 | 7,5 | 0,39 | 0,93 | 0 | -0,93 |
| 17 | 200 | 400 | 7,5 | 0,39 | 0,93 | 0 | -0,93 |
| 18 | 200 | 800 | 7,0 | 0,41 | 0,88 | 0 | -0,88 |
| 19 | 400 | 200 | 7,5 | 0,39 | 0,93 | 0 | -0,93 |
| 20 | 400 | 400 | 7,0 | 0,41 | 0,88 | 0 | -0,88 |
| 21 | 400 | 800 | 7,0 | 0,41 | 0,88 | 0 | -0,88 |
| 22 | 800 | 200 | 8,5 | 0,36 | 1,01 | 0 | -1,01 |
| 23 | 800 | 400 | 7,0 | 0,41 | 0,88 | 0 | -0,88 |
| 24 | 800 | 800 | 7,0 | 0,41 | 0,88 | 0 | -0,88 |

Nos experimentos 13 ao 24, a deformação φ_1 variou de 0,88 a 1,01 com a deformação φ_2 se mantendo em 0, o que caracteriza a deformação plana, medidas ao lado da trinca. A deformação na espessura φ_3 foi determinada pela lei da constância de volume, que determina que a variação das deformações é nula.

A profundidade em que ocorreu a trinca h_1 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 7,0 mm a 8,5 mm.

Na (Figura 64), é apresentada a relação entre rotação (N) e deformação máxima obtida (φ_1) para cada avanço (a) utilizado nos experimentos.

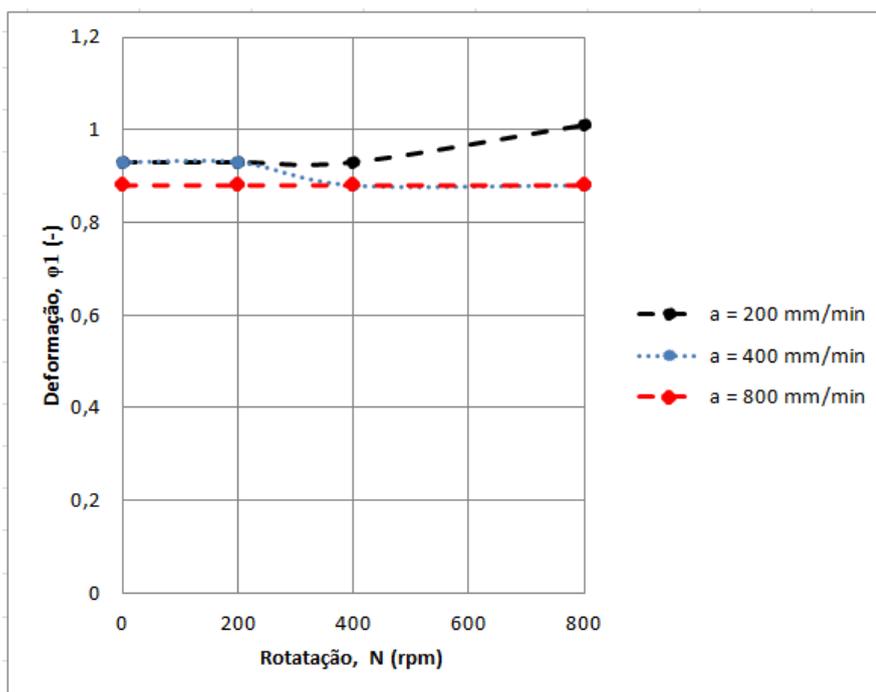


Figura 64 - Relação de rotação (N) e deformação (ϕ_1) para cada velocidade de avanço (a) nos experimentos de Estampagem Incremental, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm

O gráfico da (Figura 64) indica que quanto menor a velocidade de avanço mais aumenta a estampabilidade no processo de Estampagem Incremental, assim também visto pelos resultados da ferramenta de diâmetro 9,5 mm e concluído por Arruda (2010). Também é possível avaliar que o avanço de 0 mm/min à 400 mm/min não influenciam no índice de deformações, ou seja, na profundidade estampada, enquanto que com o avanço de 800 mm/min foi identificada a menor deformação plástica, no entanto, com avanço de 800 mm/min, há diminuição na profundidade estampada com a rotação de 800 rpm.

É possível analisar que, com um baixo avanço, há o aumento da deformação máxima com a rotação 800 rpm, conforme conclusões dos estudos de Xu *et al.* (2013), 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.

A (Figura 64) apresenta dados das melhores condições de Estampagem Incremental, ou seja, onde foi possível obter um maior índice de deformação plástica, ocorreu com avanço baixo ($a = 200$ mm/min) e alta rotação ($N = 800$ rpm),

sendo assim, com o ferramenta de diâmetro de 9,5 mm, só há influência na estampabilidade com altas rotações.

Com base nos dados obtidos nos experimentos 13 a 24, foi possível agrupar os resultados de deformação em três Retas Limite de Fratura (RLF): a primeira com RLC com o menor valor de deformação para os ensaios n° 15, 18, 20, 21, 23 e 24; a segunda RLC com valor intermediário de deformação para os ensaios n° 13, 14, 16, 17 e 19; a terceira reta com maior valor de deformação para o ensaio n° 22, conforme indicado na (Figura 65).

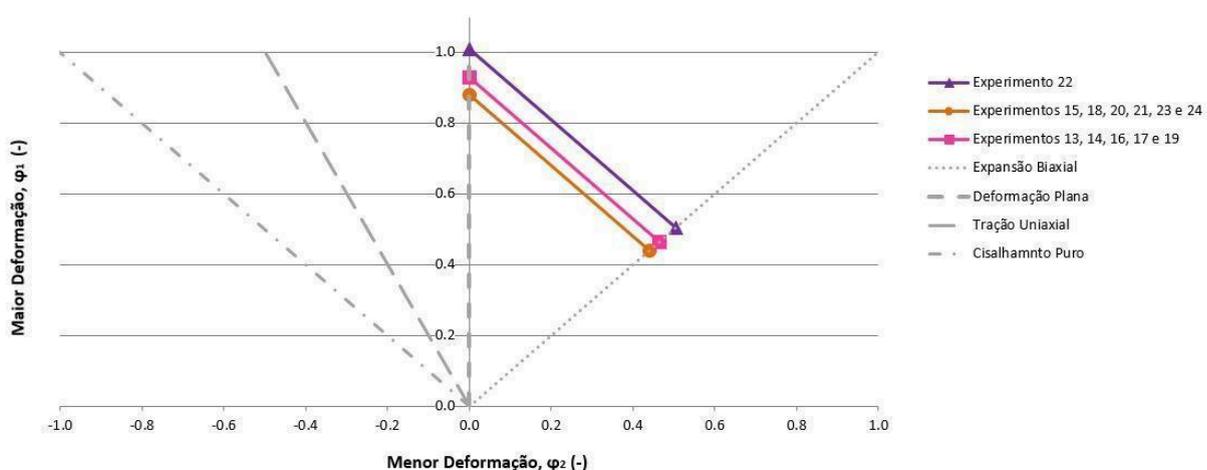


Figura 65 - Retas Limite de Fratura (RLF) para Estampagem Incremental de AA1200, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm

4.3. Experimentos com Ferramenta de diâmetro 4 mm – com matriz bacía hermética com pressurização de ar

Nesses ensaios, foram realizados dois experimentos de Estampagem Incremental utilizando chapas de alumínio puro com espessura de 1 mm e formato sextavado de 140mm. Tendo como objetivo avaliar a deformação do seu perfil geométrico, com e sem a utilização de uma contrapressão. Os experimentos foram realizados no centro de usinagem CNC, com uma ferramenta semi esférica de diâmetro 4 mm, montada no eixo árvore da máquina e a chapa fixada em um dispositivo, conforme ilustra a (Figura 66).

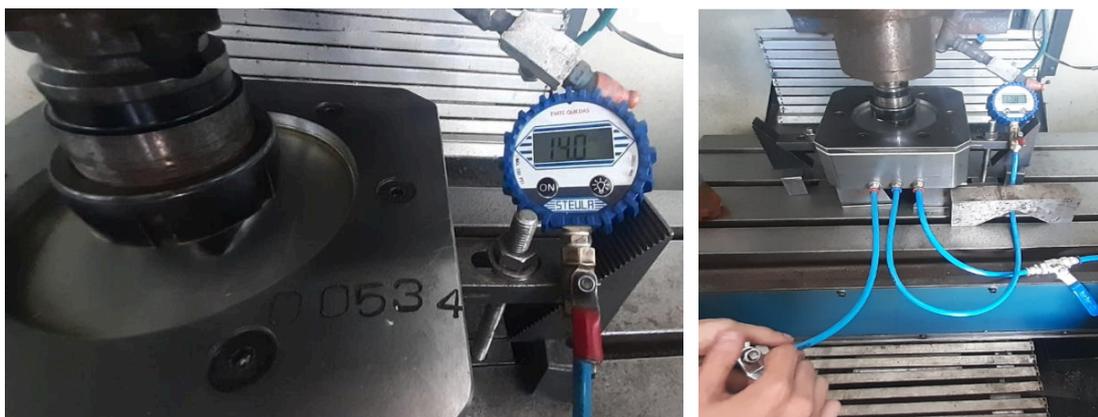


Figura 66 - Matriz parcial bacia hermética pressurizada

Nos dois experimentos, foram estampadas peças no formato de pirâmide com lados de 60 mm, profundidade de 25 mm e ângulo de parede de 60°. O incremento vertical utilizado foi de 1 mm, rotação de 0 RPM, cabeçote livre e a velocidade de avanço foi de 400 mm/min.

No experimento (a), conforme (Figura 67), foi conformada uma pirâmide sem a utilização da contrapressão na matriz parcial, já percebemos na imagem uma deformação visual, demonstrando um raio no início da pirâmide, e, no experimento (b), com utilização de matriz parcial bacia hermética com contrapressão de 1 bar (14,5 psi), é possível notar que o formato da pirâmide em seu contorno representa visualmente uma superfície mais plana.

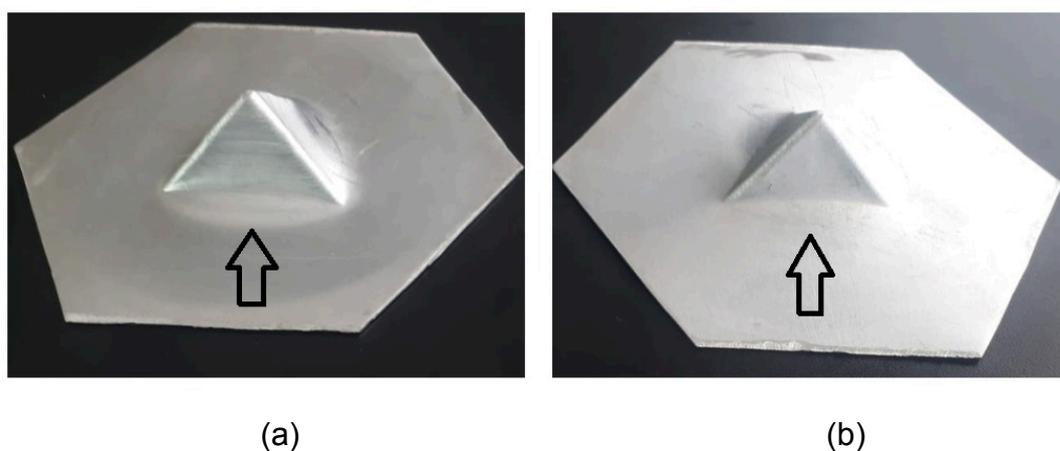


Figura 67 - (a) Experimento sem contrapressão de ar, (b) Experimento com contrapressão de ar

Após os ensaios com ajuda da Tridimensional, foi mapeada a superfície da chapa, deslocando a ponteira esférica da máquina no eixo X, em um passo 1 mm para cada medição em Z. Se obteve o perfil geométrico da peça, através desse mapeamento, e, com a utilização de software 3D, foi criado um modelo matemático, conforme a (Figura 68).

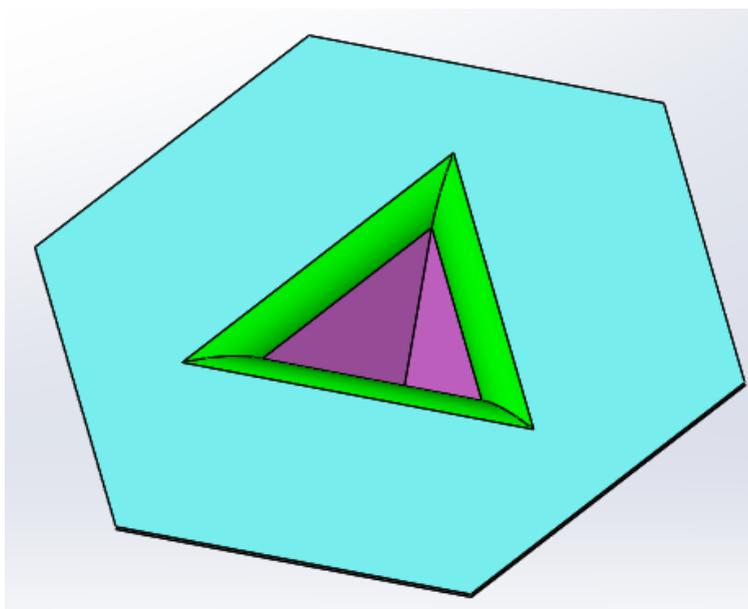


Figura 68 - Modelo matemático

Com a medição do perfil de cada peça, foi desenvolvido o gráfico na figura 69, onde são apresentadas as comparações dos perfis da peça estampada, ou seja, o perfil com contrapressão, perfil teórico esperado e o perfil sem contrapressão. O gráfico indica que, na chapa conformada com uso de contrapressão, o formato obtido do perfil geométrico ficou próximo do perfil teórico, em comparação com a chapa conformada sem uso da contrapressão. Comparando o perfil da peça estampada sem contrapressão com o perfil teórico esperado, foi obtido um desvio maior em relação a peça estampada com contrapressão.

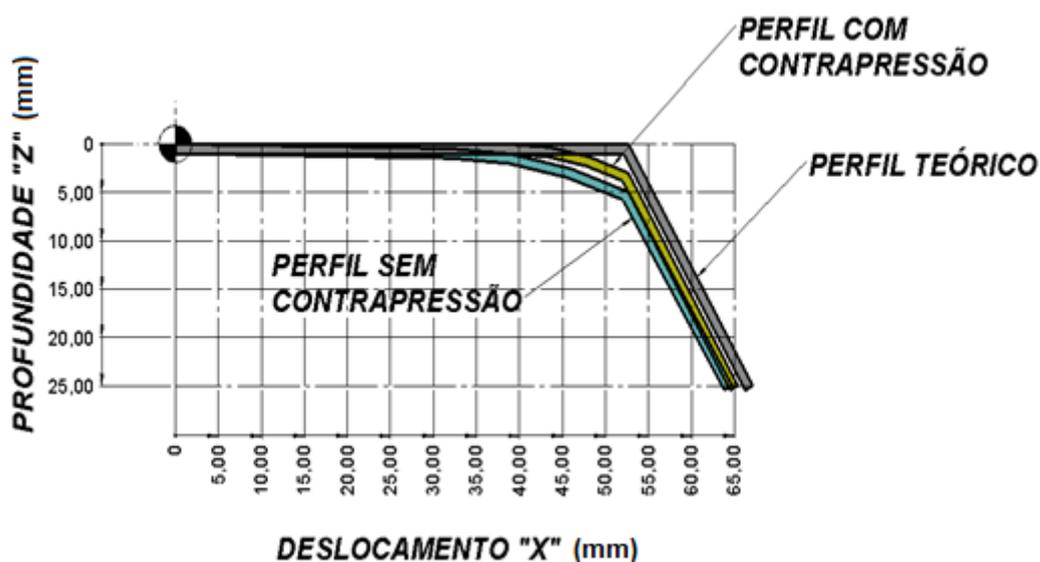


Figura 69 - Gráfico de comparação dos perfis

Entretanto, através do gráfico da (Figura 69), para analisarmos as deformações do perfil geométrico 3D do CAD, em relação aos dois experimentos tridimensionais físicos, utilizamos as referências por medidas lineares e medidas angulares, tendo o incremento vertical constante de 1 mm. Assim, através de uma análise tridimensional, foi possível apresentar valores de desvio do experimento sem contrapressão, conforme (Figura 70) e do experimento com contrapressão conforme (Figura 71).

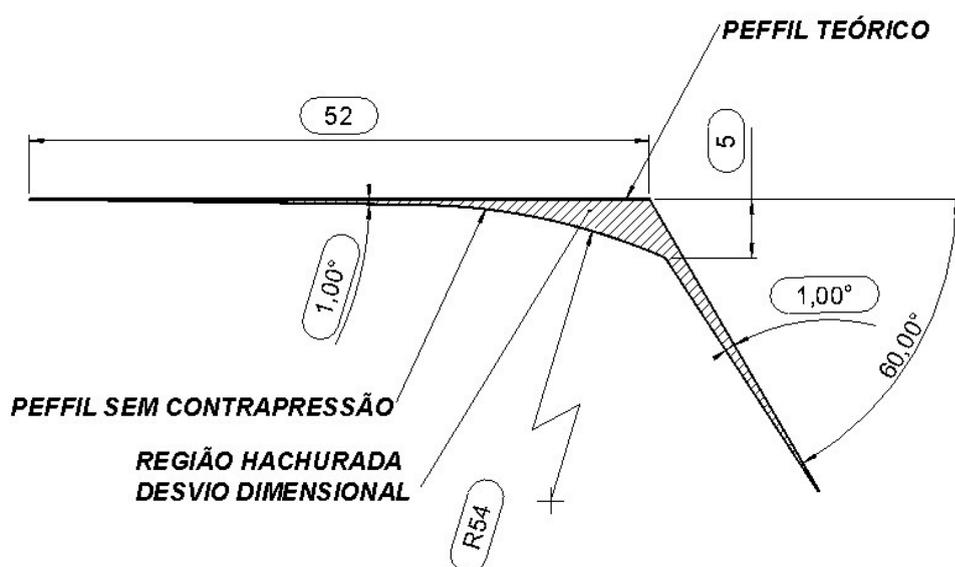


Figura 70 - Experimento sem contrapressão de ar

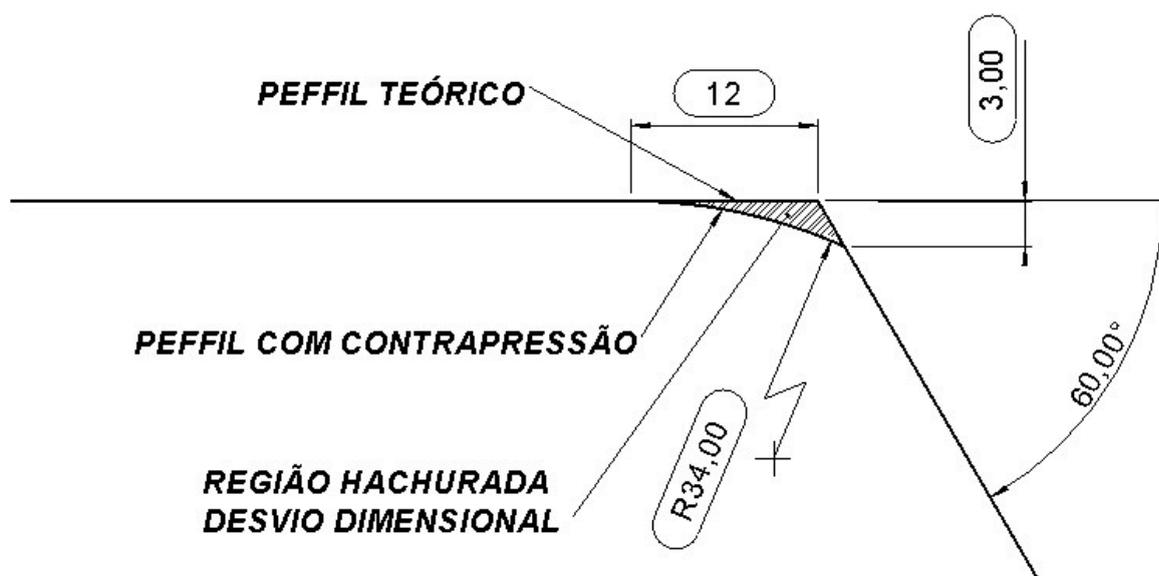


Figura 71 - Experimento com contrapressão de ar

É possível analisar que quanto maior a resistência interna de apoio da chapa, melhor a estampabilidade no processo de Estampagem Incremental. Também é possível avaliar que o processo em que mantemos a contrapressão nas medidas angulares não influenciam no índice de deformações, ou seja, o ângulo projetado se manteve na peça estampada, enquanto que, com o processo sem contrapressão, foram identificadas as menores deformações plásticas.

5. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

5.1 Avaliação do Ensaio de Tração

Com os valores observados nos cálculos a partir do ensaio, a seguinte curva “Tensão x Deformação” de engenharia foi delineada (Figura 72). Quando comparadas as especificações técnicas do fabricante com os resultados obtidos no ensaio em questão, notou-se que a tensão de escoamento e a deformação relativa não estavam fora dos padrões especificados pelo fornecedor. Porém, a tensão máxima especificada pelo fabricante era de $\sigma_{\text{máx}} = 110 \text{ N/mm}^2$, um pouco maior do que o valor obtido pela equipe no ensaio, que foi de $\sigma_{\text{máx}} = 99 \text{ N/mm}^2$.

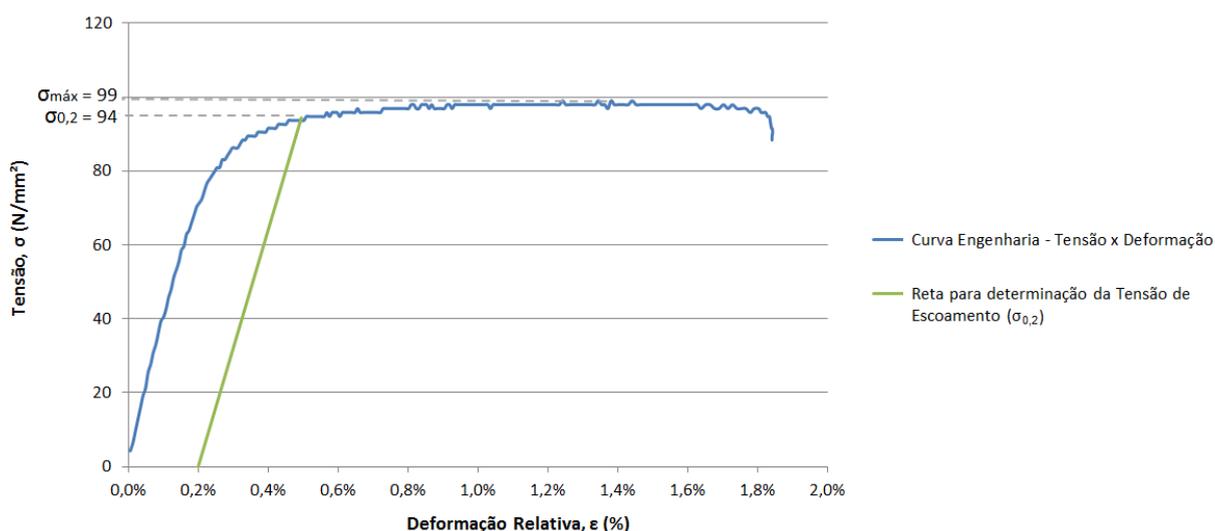


Figura 72 - Curva da “Tensão x Deformação”

5.2. Avaliação do Método Analítico

Nos experimentos, foram realizadas duas análises, a primeira sendo a ANOVA (Análise de Variância). Essa análise serve para verificar se os parâmetros influenciam nos resultados da deformação. A segunda análise foi uma regressão múltipla, assim realizada para avaliar se é possível prever o resultado através de uma equação.

A tabela 4 apresenta os resultados dos experimentos de estampabilidade, com os parâmetros de rotação, avanço, altura e deformação.

Tabela 4 - Resultados dos experimentos de estampabilidade SPIF

| Nº | Rotação (rpm) | Avanço (mm/min) | Altura (mm) | Deformação φ_1 (-) | Pressão (bar) |
|----|---------------|-----------------|-------------|----------------------------|---------------|
| 1 | 0 | 200 | 7,0 | 0,88 | 0 bar |
| 2 | 0 | 400 | 7,0 | 0,88 | 0 bar |
| 3 | 0 | 800 | 6,5 | 0,69 | 0 bar |
| 4 | 200 | 200 | 7,0 | 0,88 | 0 bar |
| 5 | 200 | 400 | 7,0 | 0,88 | 0 bar |
| 6 | 200 | 800 | 6,5 | 0,69 | 0 bar |
| 7 | 400 | 200 | 7,0 | 0,88 | 0 bar |
| 8 | 400 | 400 | 6,5 | 0,69 | 0 bar |
| 9 | 400 | 800 | 6,5 | 0,69 | 0 bar |
| 10 | 800 | 200 | 8,0 | 0,96 | 0 bar |
| 11 | 800 | 400 | 6,5 | 0,69 | 0 bar |
| 12 | 800 | 800 | 6,5 | 0,69 | 0 bar |
| 13 | 0 | 200 | 7,5 | 0,93 | 1 bar |
| 14 | 0 | 400 | 7,5 | 0,93 | 1 bar |
| 15 | 0 | 800 | 7,0 | 0,88 | 1 bar |
| 16 | 200 | 200 | 7,5 | 0,93 | 1 bar |
| 17 | 200 | 400 | 7,5 | 0,93 | 1 bar |
| 18 | 200 | 800 | 7,0 | 0,88 | 1 bar |
| 19 | 400 | 200 | 7,5 | 0,93 | 1 bar |
| 20 | 400 | 400 | 7,0 | 0,88 | 1 bar |
| 21 | 400 | 800 | 7,0 | 0,88 | 1 bar |
| 22 | 800 | 200 | 8,5 | 0,93 | 1 bar |
| 23 | 800 | 400 | 7,0 | 0,88 | 1 bar |
| 24 | 800 | 800 | 7,0 | 0,88 | 1 bar |

Com base na análise dos resultados obtidos na tabela 4, verificou-se que, para cada combinação entre a rotação e o avanço, foi gerada uma deformação.

Através da ANOVA, foram verificados os parâmetros que influenciam ou não nos resultados da deformação. Esse análise serve para verificar a influência da rotação e do avanço combinados com como o uso como da contrapressão de ar na deformação principal.

Um modelo 1 de ANOVA de três vias (rotação * pressão * avanço) mostrou que há efeito da Pressão [$F(1,16) = 43.87$; $p < 0.001$] e do Avanço [$F(1,16) = 28.20$; $p < 0.001$] e da interação Pressão x Avanço [$F(1,16) = 5.60$; $p < 0.01$] sobre a deformação principal. Um modelo 2 de ANOVA de três vias (rotação + pressão +

avanço) mostrou que há efeito da Pressão [$F(1,20) = 32.36$; $p < 0.001$] e do Avanço [$F(1,20) = 20.80$; $p < 0.001$] sobre a deformação principal.

A deformação principal em relação a profundidade do canal, analisada e verificada pela significância estatística dos parâmetros que influenciam na estampabilidade, mostra a influência da pressão, avanço e rotação e suas interações na estampabilidade. A influência está relacionada ao uso da contrapressão e do avanço na deformação principal, mas a rotação não mostrou possuir influência. Sendo assim, essas análises nos permitem entender que a rotação não influencia na deformação, mas com o uso da contrapressão de ar combinado com o avanço é possível atingir ótimos índices de estampabilidade durante o processo de Estampagem Incremental.

A (Figura 73) apresenta o gráfico de interação entre os parâmetros avaliados na ANOVA, onde é possível avaliar a influência do avanço na deformação, com o uso de contrapressão e sem o uso da contrapressão na matriz parcial.

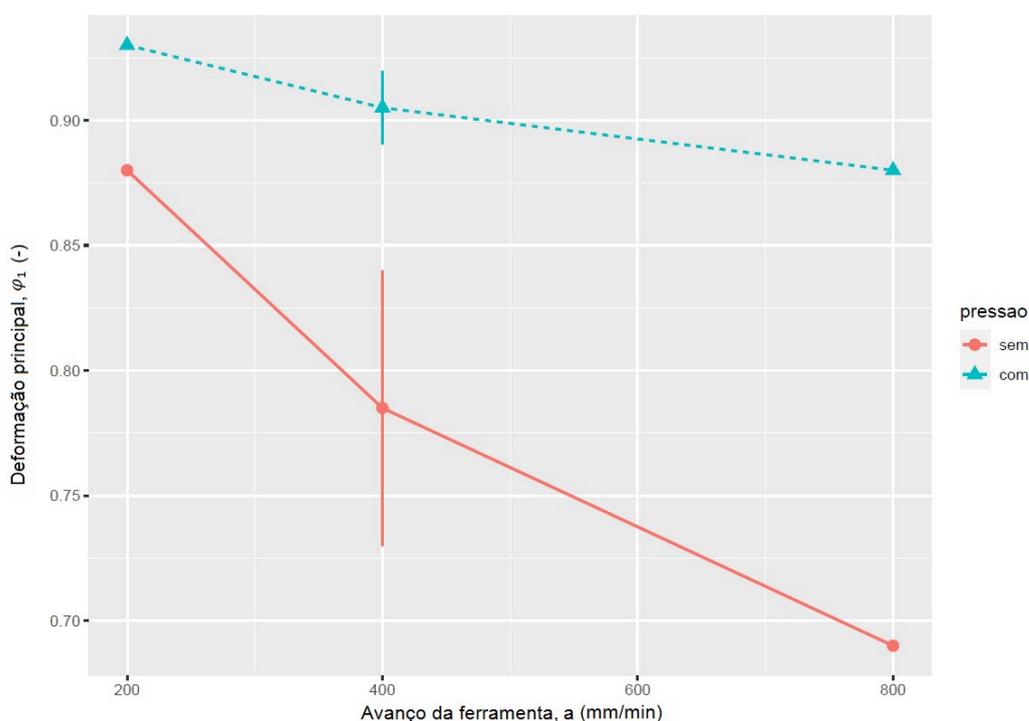


Figura 73 - Gráfico da deformação principal em função do avanço

A (Figura 74) apresenta o gráfico que expressa a interação entre os parâmetros avaliados na ANOVA, onde é possível avaliar a influência da rotação na

deformação, com o uso de contrapressão e sem o uso da contrapressão na matriz parcial.

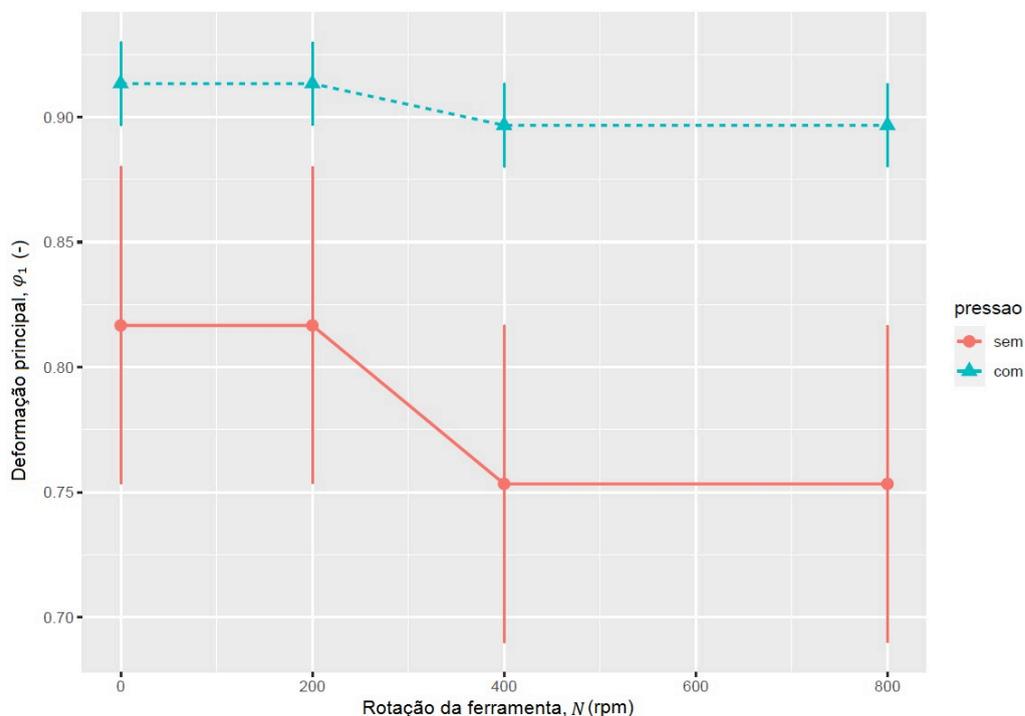


Figura 74 - Gráfico da deformação principal em função da rotação

A partir da construção de um modelo de regressão linear múltipla, foram obtidas equações que relacionam a deformação principal em função do avanço, da rotação e da situação em que a matriz se encontra, pressurizada ou não, e das interações entre seus parâmetros.

- Regressão Linear Múltipla sem Contrapressão:

Na Regressão Linear Múltipla modelo 1 sem contrapressão para a deformação principal, foi gerada a equação 9. Para construção dos modelos, o R^2 obtido nessa regressão múltipla foi de 72,79% nos dados (Avanço X Rotação), sendo a equação 9:

$$\varphi_1 = 0,975 - (0,0003393 \cdot a) - (0,0001357 \cdot N) + (0,00000009694 \cdot a \cdot N) \quad (9)$$

- Regressão Linear Múltipla com Contrapressão:

Na Regressão Linear Múltipla modelo 2 com contrapressão para a deformação principal, foi gerada a equação 10, e para construção dos modelos, O R^2 obtida nessa regressão múltipla foi de 72,79% nos dados (Avanço X Rotação), sendo a equação 10:

$$\varphi_1 = 0,955 - (0,00008929 \cdot a) - (0,00003571 \cdot N) + (0,0000002551 \cdot a \cdot N) \quad (10)$$

Com a regressão múltipla linear, também foi gerado um gráfico de superfície de respostas onde é possível notar o comportamento da deformação principal e as suas interações dos parâmetros de rotação, avanço e pressão (1 bar) conforme a (Figura 75).

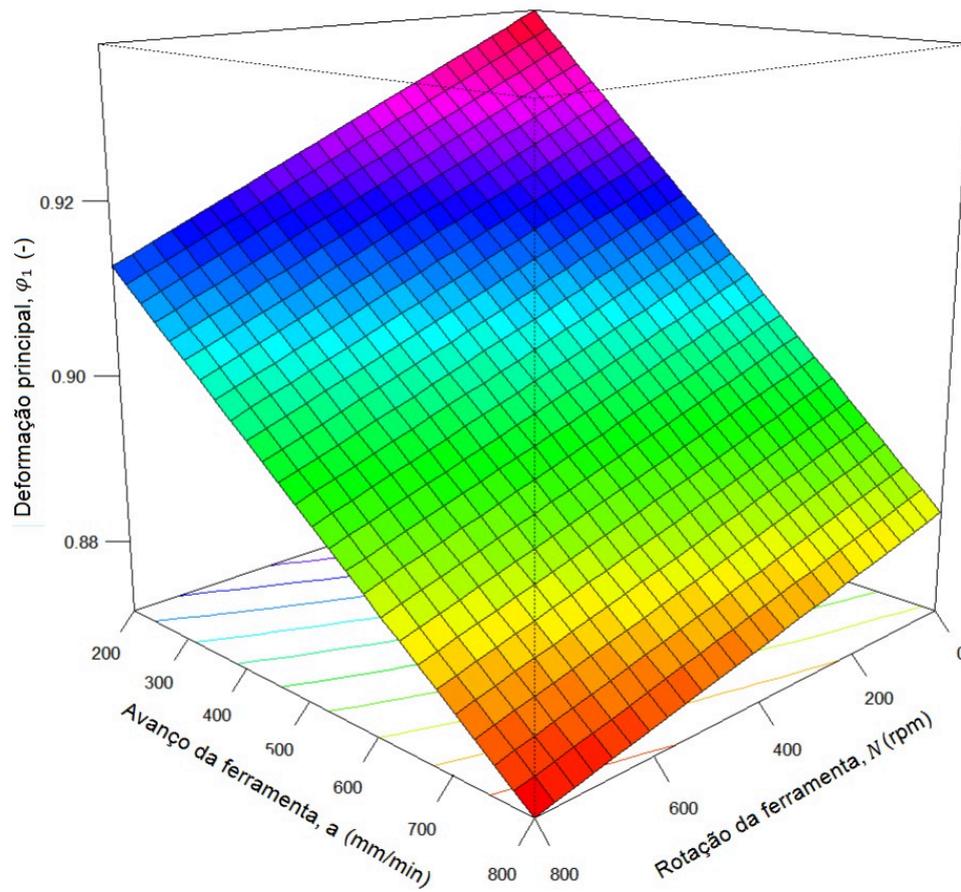


Figura 75 - Gráfico de Deformação X Avanço X Rotação X Pressão em 1bar

Já na (Figura 76), o gráfico de superfície de respostas mostra o comportamento da deformação principal e as suas interações dos parâmetros de avanço, rotação e pressão (0 bar).

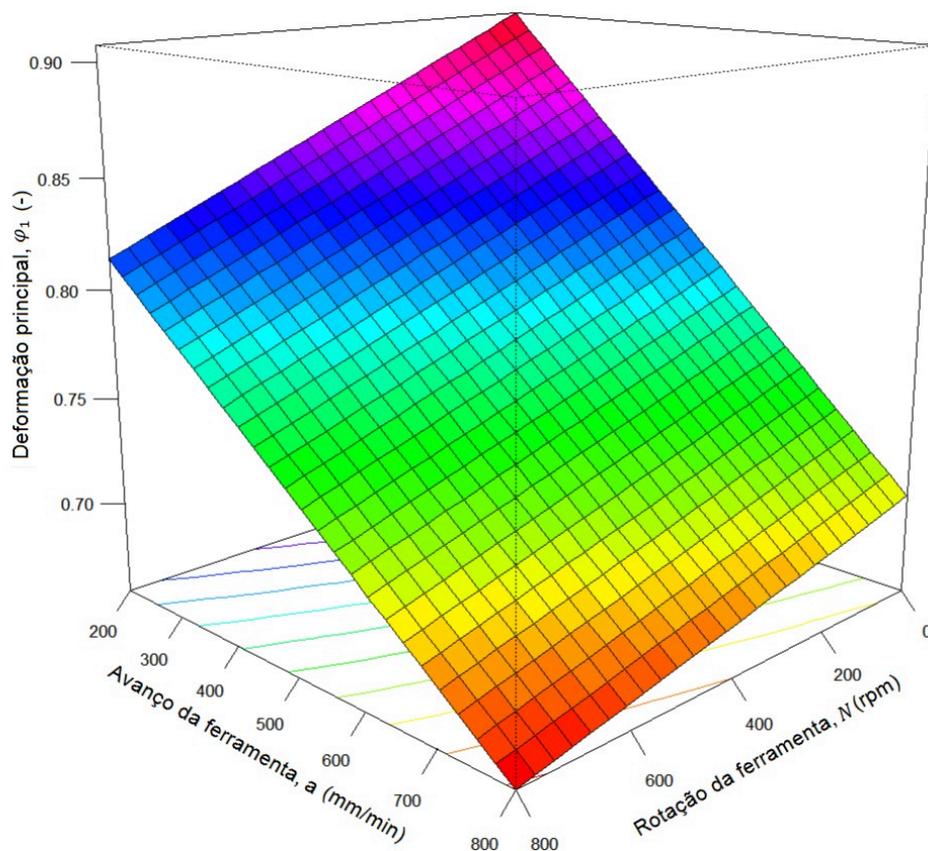


Figura 76 - Gráfico de deformação X Avanço X Rotação X Pressão 0 bar

Com os gráficos de superfícies de resposta, foi possível notar que, utilizando a contrapressão de ar ou não utilizando a contrapressão de ar, o avanço possui influência na deformação principal, já a rotação não possui influência na deformação principal.

Com base nos resultados de análise estatística, e com a utilização do software RStudio, foi possível avaliar, através das equações de Regressão Linear Múltipla, o comportamento do material. Assim, avaliando a situação da máxima deformação em cada experimento, com contrapressão e sem contrapressão de ar, aplicando a equação 9 da Regressão Linear Múltipla sem Contrapressão, foi desenvolvida a tabela 5, onde é feita a comparação dos resultados dos ensaios sem contrapressão, e, aplicando a equação 10 da Regressão Linear Múltipla com Contrapressão, foi gerada a tabela 6, onde é feita a comparação dos resultados dos ensaios com contrapressão. As tabelas indicam a comparação entre a deformação real do experimento com a deformação teórica adquirida pela equação.

Tabela 5 - Comparação dos resultados dos ensaios sem contrapressão

| Nº | Rotação (rpm) | Avanço (mm/min) | Altura (mm) | Deformações φ_1 (-) | | Erro % |
|----|---------------|-----------------|-------------|-----------------------------|---------|--------|
| | | | | Real | Teórica | |
| 1 | 0 | 200 | 7 | 0,88 | 0,91 | -3,08 |
| 2 | 0 | 400 | 7 | 0,88 | 0,84 | 4,63 |
| 3 | 0 | 800 | 6,5 | 0,69 | 0,70 | -1,97 |
| 4 | 200 | 200 | 7 | 0,88 | 0,88 | -0,44 |
| 5 | 200 | 400 | 7 | 0,88 | 0,82 | 6,83 |
| 6 | 200 | 800 | 6,5 | 0,69 | 0,69 | -0,28 |
| 7 | 400 | 200 | 7 | 0,88 | 0,86 | 2,20 |
| 8 | 400 | 400 | 6,5 | 0,69 | 0,80 | -16,02 |
| 9 | 400 | 800 | 6,5 | 0,69 | 0,68 | 1,41 |
| 10 | 800 | 200 | 7 | 0,88 | 0,81 | 7,49 |
| 11 | 800 | 400 | 6,5 | 0,69 | 0,76 | -10,40 |
| 12 | 800 | 800 | 6,5 | 0,69 | 0,66 | 4,78 |

Tabela 6 - Comparação dos resultados dos ensaios com contrapressão

| Nº | Rotação (rpm) | Avanço (mm/min) | Altura (mm) | Deformações φ_1 (-) | | Erro % |
|----|---------------|-----------------|-------------|-----------------------------|---------|--------|
| | | | | Real | Teórica | |
| 13 | 0 | 200 | 7,5 | 0,93 | 0,94 | -0,77 |
| 14 | 0 | 400 | 7,5 | 0,93 | 0,92 | 1,15 |
| 15 | 0 | 800 | 7 | 0,88 | 0,88 | -0,41 |
| 16 | 200 | 200 | 7,5 | 0,93 | 0,93 | -0,11 |
| 17 | 200 | 400 | 7,5 | 0,93 | 0,91 | 1,70 |
| 18 | 200 | 800 | 7 | 0,88 | 0,88 | -0,06 |
| 19 | 400 | 200 | 7,5 | 0,93 | 0,92 | 0,55 |
| 20 | 400 | 400 | 7 | 0,88 | 0,91 | -3,30 |
| 21 | 400 | 800 | 7 | 0,88 | 0,88 | 0,29 |
| 22 | 800 | 200 | 7,5 | 0,93 | 0,91 | 1,86 |
| 23 | 800 | 400 | 7 | 0,88 | 0,90 | -2,15 |
| 24 | 800 | 800 | 7 | 0,88 | 0,87 | 0,99 |

No processo de Estampagem sem contrapressão, a deformação máxima calculada pela equação e a deformação máxima obtida pelo experimento apresentaram um erro de 16% em apenas um experimento, podendo ser apenas um desvio do padrão, já que os demais experimentos tiveram seu erro percentual baixo de 10%. Já no processo de Estampagem com contrapressão, o erro percentual foi relativamente baixo, de 3,30%. Sendo assim, esse erro indica que a

equação gerada pelo software de estatística conseguiu atingir seu objetivo, assim conseguindo prever o comportamento do material.

5.3. Avaliação da Deformação na Profundidade do Canal com matriz sem contrapressão de ar

Nos 12 primeiros experimentos da Estampagem Incremental de alumínio puro AA1200-H14, utilizando ferramenta de diâmetro 9,5 mm, com a matriz parcial sem a contrapressão de ar, percebemos que as maiores deformações nas chapas podem ser atingidas com baixos valores de velocidade de avanço, assim como mencionados nos estudos de Arruda (2010), combinadas com altos valores de rotação, assim como também verificado por Xu *et al.* (2013).

No experimento nº 10, com parâmetros de velocidade baixa de avanço (200 mm/min) com a maior velocidade rotação da ferramenta (800 rpm), foram encontradas deformações nas superfícies internas e externas da chapa, caracterizando o “efeito casca de laranja”. Este defeito foi encontrado em experimentos realizados por Hamilton e Jeswiet (2010) com altos valores de avanço.

Nestes experimentos com ferramenta de diâmetro 9,5 mm, foi verificado que, com o avanço de 800 mm/min, a deformação máxima obtida pela chapa na Estampagem Incremental se mantém constante independentemente da rotação utilizada.

5.4. Avaliação da Deformação na Profundidade do Canal com matriz com contrapressão de ar

Nos experimentos 13 ao 24, utilizando a ferramenta de diâmetro de 9,5 mm com a matriz parcial bacia hermética com contrapressão 1 bar (14,5 psi), foram obtidas as maiores deformações nas chapas estampadas por meio da combinação de baixos valores de avanço com altos valores de rotação, assim como verificado também nos experimentos com a ferramenta de diâmetro de 9,5 mm e como também está descrito nos estudos de Arruda (2010) e Xu *et al.* (2013).

Diferente do que foi verificado com a matriz parcial sem contrapressão de ar em relação a matriz parcial com contrapressão de ar, a deformação máxima obtida na Estampagem Incremental é menos sensível à variação dos parâmetros de

rotação e avanço, já que, na maioria dos experimentos, as deformações se mantiveram constantes.

Com base na análise dos 24 experimentos, foi possível determinar diferentes Retas Limite de Fratura para a mesma chapa, de acordo com a variação dos parâmetros de velocidade de avanço, rotação e diâmetro da ferramenta, conforme também verificado por Schreiber e Schaeffer (2018).

Assim como verificado por Al-Ghamdi e Hussain (2015) e Schreiber (2018), neste trabalho também se constatou que podem ser obtidas maiores deformações na Estampagem Incremental utilizando menores diâmetros de ferramenta.

5.5. Avaliação da deformação do Perfil geométrico na matriz com e sem contrapressão de ar

Uma vez que ambas as formas tenham sido alcançadas, sua geometria ao longo da região de deformação foi medida desde o formato cônico da pirâmide até a superfície plana e comparada com perfil teórico. Os ensaios foram analisados pelos dois processos, a matriz parcial bacia hermética com a contrapressão de 1 bar (14,5 psi) e matriz parcial bacia sem contrapressão. No processo de deformação para a forma piramidal com contrapressão, ocorreu de uma maneira muito suave comparado ao parâmetro do processo sem a contrapressão de ar, portanto, a distribuição da deformação se manteve uniforme principalmente no processo de conformação com contrapressão, porém as deformações em ambos os processos atingiram a profundidade final conforme o projetado. A variação da geometria das chapas obtida na Estampagem Incremental com uso da contrapressão comparada com a distância da superfície plana em relação a profundidade indica que, na chapa conformada por esse processo, foi obtido um perfil geométrico mais próximo do perfil teórico. Em comparação ao processo de conformação com a matriz sem contrapressão, podemos notar que a contrapressão que faz o papel da Estampagem Incremental com a matriz fixa tem um resultado melhor (SCHREIBER *et al.*, 2022) (ALLWOOD *et al.*, 2005). A partir dos resultados desenvolvidos, a variação do perfil geométrico ao longo da profundidade é quase igual nos dois processos comparados ao sistema de Estampagem Incremental.

No processo sem contrapressão, o formato no início da estampagem sede devido a pressão da ferramenta devido à grande deformação plástica e, em seguida,

tornar-se quase estável ao longo da região de deformação. Quando a pressão do ar é aplicada na parte de trás, que atua como um matriz fixa parcial a chapa, esta apresenta uma uniformidade durante o processo, atingindo a profundidade projetada.

Enfim, comparando o perfil da peça estampada sem contrapressão na matriz parcial com o perfil teórico esperado, foi obtido um desvio de 5,0 mm em Z. Para a peça estampada com matriz parcial bacia hermética com contrapressão de 1 bar (14,5 psi), esse desvio foi de apenas 3,0 mm em Z.

6. CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma análise de 26 experimentos de Estampagem Incremental de alumínio puro AA1200-H14, comparando os seguintes fatores:

- Quatro velocidades de rotação;
- Três avanços de deslocamento;
- Dois métodos de processos na matriz para Estampagem Incremental.

Com as deformações obtidas através destes experimentos, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- 1) Ferramenta de diâmetro 9,5 mm, com matriz parcial sem contrapressão de ar:
 - a) As maiores deformações foram obtidas com as menores velocidades de avanço combinadas com as maiores rotações;
 - b) Quando se utiliza altos valores de velocidade de avanço de ferramenta (800 mm/min) a variação de rotação não apresenta influência na estampabilidade;
 - c) Há uma faixa de parâmetros ($a = 200$ mm/min e $N = 800$ rpm) em que se obtêm elevadas deformações na chapa, no entanto, esta apresenta defeitos superficiais.
- 2) Ferramenta de diâmetro 9,5 mm, com matriz parcial com contrapressão de ar:
 - a) As maiores deformações também foram obtidas com as menores velocidades de avanço combinadas com as maiores rotações;
 - b) Na maior parte dos experimentos, a variação da velocidade de avanço e de rotação não influenciaram na estampabilidade.

Em relação às duas séries de experimentos:

 - c) É possível determinar diferentes Retas Limite de Fratura para o mesmo material variando os parâmetros de Estampagem Incremental, como diâmetro de ferramenta, velocidade de avanço e rotação da ferramenta;
 - d) As maiores deformações foram obtidas utilizando menor diâmetro de ferramenta.

3) Ferramenta de diâmetro 4 mm – com matriz bacia hermética com e sem pressurização de ar:

- a) Concluímos do trabalho realizado que o uso da contrapressão de ar pode reduzir o retorno elástico da chapa e aumentar a deformação da chapa em comparação a Estampagem Incremental convencional;
- b) A geometria final da peça é influenciada pela presença de uma matriz parcial com contrapressão;
- c) O desvio geométrico do perfil é maior no processo com o uso de matriz parcial sem contrapressão de ar.

4) Com a análise estatística, é possível concluir que é notória a influência da contrapressão de ar em relação aos resultados da deformação da chapa, apresentando uma maior precisão e maior estampabilidade da peça final, sendo que os parâmetros que realmente influenciam na deformação foram o avanço e o uso da pressão pneumática, já a rotação não influencia no processo.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros, existe a alternativa de avaliar:

- a) a influência da deformação variando as pressões internas na matriz;
- b) o processo de Estampagem Incremental utilizando fluídos internos na matriz pressurizados;
- c) a influência do diâmetro da ferramenta na Estampagem Incremental utilizando diferentes diâmetros de ferramentas;
- d) o impacto da utilização de diferentes espessuras de chapas no processo;
- e) a influência do lubrificante no processo de Estampagem Incremental;
- f) as formas de prensa-chapas e seus resultados no produto final;
- g) o retorno elástico da chapa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRANTES, J. P.; de Lima, C. E. C. **Simulação numérica da expansão hidrostática de tubos de alumínio**. Acesso: 30/05/2020. Disponível em: http://sites.poli.usp.br/pmr/lefa/download/COF_031024538.pdf.

ADAMS, D.; Jeswiet, J. A new model for contact geometry in single-point incremental forming. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: **Journal of Engineering Manufacture**. v. 229, n. 6, p. 982–989, 2015.

Al, S.; Long, H. A review on material fracture mechanism in incremental sheet forming. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. 2019;104:33–61. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03682-6>.

Al, S., Lu, B., Chen, J., Long, H., Ou, H., 2017. **Evaluation of deformation stability and fracture mechanism in incremental sheet forming**. Int. J. Mech. Sci. 124–125,174–184.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740316310657>.

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.

ALLWOOD, J. M.; Bramley, A. N.; Ridgman, T. W.; Mileham, A. R. A novel method for the rapid production of inexpensive dies and moulds with surfaces made by incremental sheet forming. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: **Journal of Engineering Manufacture**. 2020:323, p. 323-327, 2005.

ALVES, J. A. C.; Button, S. T. Estudo da conformabilidade de abas convexas da liga de alumínio aa-2024-o no processo de hidroconformação. **6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, 2011.

AL-OBAIDI, A.; Kräusel, V.; Landgrebe, D. Hot single-point incremental forming assisted by induction heating. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. [s. l.], v. 82, n. 5–8, p. 1163–1171, 2016.

AMBROGIO, G.; Filice, L.; Gagliardi, F. Improving industrial suitability of incremental sheet forming process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. [s. l.], v. 58, n. 9–12, p. 941–947, 2012.

AMINO, M.; Mizoguchi, M.; Terauchi, Y.; Maki, T. Current status of “Dieless” Amino’s incremental forming. **Procedia Engineering**. [s. l.], v. 81, n. October, p. 54–62, 2014.

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.; Manco, G. L.; Bambach, M.; Hirt, G. 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**. 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.

ATTANASIO, A.; Ceretti, E.; Giardini, C.; Mazzoni, L. Asymmetric two points incremental forming: improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization. **J. Mater. Process. Technol.** 197 (1–3), 59–67. 2008.

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.

AZEVEDO, N. G.; Farias J. S.; Bastos R. P.; Teixeira P.; Davim J. P.; Sousa R. J. A.; *et al.* Lubrication aspects during Single Point Incremental Forming for steel and aluminum materials. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**. 2015; 16:589–95. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0079-0>.

BAHLOUL, R.; Arfa, H.; Salah, H. B. Application of response surface analysis and genetic algorithm for the optimization of single point incremental forming process. In: **TRANS TECH PUBL**. Key Engineering Materials. [s.l.], 2013. v. 554, p. 1265–1272.

BASTOS, R. N. P.; Sousa, R. J. A. de; Ferreira, J. A. F. Enhancing time efficiency on single point incremental forming processes. **International Journal Of Material Forming.**, [s.l.], v. 9, n. 5, p. 653-662, 17 jul. 2015. Springer Science and Business Media LLC.

BAMBACH, M. Modeling of Optimization Strategies in the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process. **AIP Conference Proceedings**. [s. l.], v. 712, p. 1969–1974, 2004. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1766822>>. Acesso em: 24 jan. 2019.

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.; Maneesh, K.; Cao, J. Formability and Surface Finish Studies in Single Point Incremental Forming. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, [s. l.], v. 133, n. Dezembro, 2011.

BUSSAB, W. O. **Análise de variância e de regressão**: uma introdução. 2. ed. São Paulo: Atual, 1988.

BORTOLUSSI, R.; Batalha, G. F.; Ponce, A. S. **Hidroconformação de Tubos**: Influência dos Parâmetros no Processo. Acesso: 30/05/2020. Disponível em: http://www.poli.usp.br/pmr/lefa/download/COF_031010141.pdf.

CAMPANELLA, D.; Buffa, G.; Lovalvo, E.; Fratini, L. A numerical approach for the modelling of forming limits in hot incremental forming of AZ31 magnesium alloy. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**. [s.l.], v. 114, n. 11-12, p. 3229-3239, 22 abr. 2021.

CAO T., Lu B., Xu D., Zhang H., **An efficient method for thickness prediction in multi-pass incremental sheet forming**. 2015:469-83.

CASTELAN, J. **Utilização das tecnologias CAD/CAM para estampagem incremental do alumínio série 1000**. 2007. 193p. Dissertação (Mestrado em Processo de Fabricação) – Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Materiais - PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

CASTELAN, J. **Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano**. 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.

CAVALER, L. C. C. & SCHAEFFER, L. **Fundamentos da estampagem incremental de chapas aplicados no aço AISI 304L.1**. ed. Curitiba: Appris, 2018.181 p. ISBN 9788547311636.

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

CENTENO, G.; Silva, M. B.; Cristino, V. A. M.; Vallellano, C.; Martins, P. A. F. Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming. **Materials and Design**. [s. l.], v. 63, p. 20–29, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.066>>. Acesso em: 24 jan. 2019.

CHANG, Zhidong; Chen, J. Analytical modeling of fracture strain and experimental validation in incremental sheet forming. **Journal Of Materials Processing Technology**. [s.l.]. v. 294, p. 117118, ago. 2021. Elsevier BV.

CHENG, J.; Green, D. E.; Golovashchenko, S. F. Formability enhancement of {DP600} steel sheets in electro-hydraulic die forming. **J. Mater. Process. Technol.** 244, 178–189. 2017.

CRISTINO, V. A.; Magrinho, J. P.; Centeno, G.; Silva, M. B.; Martins, P. A. F. Theory of single point incremental forming of tubes. **Journal of Materials Processing Tech.** v. 287, 2021.

DALEFFE, A. **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapa de Alumínio Puro**. 2008. 84 f. Dissertação de Mestrado, LdTM. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre. 2008.

DALENOGARE, L. S. *et al.* The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of Production Economics** v. 204, pp. 383-394. 2018.

DE SENA, J. I. V. **Estampagem incremental: Um novo conceito de produção**. Aveiro: Dissertação - Universidade de Aveiro, 2009.

DRUMOND, F. T.; Werkema, M. C. C.; Aguiar, S. **Análise de variância: comparação de várias situações**. 1. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1996.

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.

DUFLOU, J. R.; Verbert, J.; Belkassen, B.; Gu, J.; Sol, H.; Henrard, C.; Habraken, A. Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. [s. l.]. v. 57, n. 1, p. 253–256, 2008. a.

DUFLOU, J. R.; Verbert, J.; Belkassen, B.; Gu, J.; Sol, H.; Henrard, C.; Habraken, A. Improved SPIF performance through dynamic local heating. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Amsterdam. v. 48, n. 5, p. 543–549. 2008. b.

DUFLOU J.R. et al (2005). Medical application of single point incremental forming: **Cranial plate manufacturing**. BARTOLO, P.J. et al. **Virtual Modeling and Rapid Manufacturing**, London. p. 161-166.

DURGUN, I. Sheet metal forming using FDM rapid prototype tool. **Rapid Prototyping Journal** **21**, No. 4, pp. 412-422. 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>.

EMBURY, J. D.; Duncan, J. L. Formability maps. **Annual Review of Materials Science**, 11, 505-521. 1981.

EMMENS, W. C.; Boogard, V. D.; Antonius H. An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 8, p. 3688-3695, 2009.

EMMENS, W. C.; Sebastiani, G.; Boogaard, A. H. V. D. The technology of Incremental Sheet Forming — A brief review of the history. **Journal of Materials Processing Technology**. [s. l.]. v. 210, n. 8, p. 981–997. 2010.

FAVERO, L. P. **Análise de dados**: Modelagem multivariada para tomada de decisões. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FILIPE, P. **Aplicação da Estampagem Incremental no fabrico de moldes: Estudo de viabilidade técnico-económica para industrialização**. Porto. Dissertação - Faculdade de Engenharia Universidade do Porto (FEUP). 2013.

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

FRITZEN, D.; Daleffe, A.; Lucca, G. S.; Castellan, J.; Schaeffer, L.; Sousa, R. J. A. Incremental forming of Cu-35Zn brass alloy. **International Journal Of Material Forming**. [s.l.]. v. 11, n. 3, p. 389-404, 4 ago. 2017. Springer Science and Business Media LLC.

GOODWIN, G. M. **Application of the strain analysis to sheet metal forming in the press shop**. La Metallurgia Italiana, Vol.8, p. 767-772. 1968.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 13. ed. Piracicaba: Nobel, 1990.

GRIMM, T. J.; Mear, L. Investigation of a radial toolpath in single point incremental forming. **Procedia Manufacturing**, v. 48, p. 215–222, 2020.

GUK, S. V.; Smirnov, O. M.; Kavalla, R. **Stampability of steel sheet and strip in axisymmetric hydraulic forming with fluid counterpressure**. Metallurg 3. p. 34–37. 2006.

HAAG, J.; FERRANTI, G. O. Estampabilidade de aços de baixo carbono, p. 308-319. In: 54º **Seminário de Laminação e Conformação**, São Paulo, 2017.

HAM, M.; Jeswiet, J. Forming Limit Curves in Single Point Incremental Forming. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. p. 277 – 280. 2006.

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.

HARFOUSH, A.; Haapala, K. R.; Tabei, A. **Application of Artificial Intelligence in Incremental Sheet Metal Forming: a review**. Procedia Manufacturing. [s.l.]. v. 53, p. 606-617. Elsevier BV. 2021

HIEMENZ, J. **Additive Manufacturing Trends In Aerospace – Leading the way**. Stratasys Inc. 2014.

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

HIRT, G.; Junk, S.; Bambach, M.; Chouvalova, I.; Ames, J. **Flexible cnc incremental sheet forming: process evaluation and simulation**. Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP), Saarland University, Alemanha. p. 12. 2005.

HIRT, G.; Witulski, N. **Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation**. Institute of Materials Technology / Precision Forming (LWP), Saarland University, Alemanha. 2005.

HUSSAIN, G.; Gao, L.; Hayat, N.; Ziran, Xu. A new formability indicator in single point incremental forming. **Journal Of Materials Processing Technology**. [s.l.]. v. 209, n. 9, p. 4237-4242. Elsevier BV. 2009.

HUSSAIN, G.; Gao, L.; Zhang, Z. Y. Formability evaluation of a pure titanium sheet in the cold incremental forming process. II **Int. Adv. Manufacturing Technology**. 37. 920-926. 2008.

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

JAWALE K.; Duarte J. F.; Reis A.; Silva M. B. **Microstructural investigation and lubrication study for single point incremental forming of copper**. *Int. J. Solids Struct.* 151:145–51. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijssolstr.2017.09.018>. 2018.

JESWIET; Micari F.; Hirt G.; Bramley A.; Duflou J.; Allwood J. **Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal**. v. 54. 2005.

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. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607600213>. Acesso em: 24 jan. 2019.

JESWIET, Jack; YOUNG, D. Forming limit diagrams for single-point incremental forming of aluminium sheet. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 219, n. 4, p. 359-364, 2005.

JUNK, S.; Hirt, G.; Bambach, M.; Chouvalova, I.; Ames, J. Flexible CNC Flexible CNC incremental sheet forming: Process evaluation and simulation. VI. **Conferência Nacional de Conformação de Chapas**, 15. Porto Alegre/RS, Brasil, ed. Schaeffer L., Gráfica e Editora Brasul Ltda., pp. 30-38. 2003.

KEELER, S. P. Determination of the forming limits in automotive stamping. **Sheet Metal Industries**, Vol. 461, 1965, p. 683-691.

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

KUMAR, S.; Kumar, Y. Design and development of single point incremental sheet forming machine. **5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference**. 2014.

KUMAR, S.; Kumar, Y. Incremental sheet forming (isf), in: **Advances in Material Forming and Joining**. Springer. pp. 29–46. 2015.

KUMAR, S.; Kumar, Y. **Incremental Sheet Hydroforming Machine**. IN Patent App. 3312/DEL/2,014. 2016.

KUMAR, S.; Kumar, Y. Analysis of incremental sheet forming process through simulation. **Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev.** 8 (3), 145–152. 2018a.

KUMAR, S.; Kumar, Y. Analysis of pressure assisted incremental sheet forming process through simulation. **Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev.** 8 (3), 921–932. 2018b.

KUMAR, S., Kumar, Y. **Experimental and analytical evaluation of Incremental Sheet Hydro-Forming strategies to produce high forming angle sheets**. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844018356895>. 2019.

LANG, L. H.; Wang, Z. R.; Kang, D. C.; Yuan, S. J.; Zhang, S. H.; Danckert, J.; Nielsen, K. B. Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 151. p. 165–177. 2004.

LE, V. S. **Modeling of single point incremental forming process for metal and polymeric sheets**. PhD thesis. 2009.

LEI, L. P.; Kang, B. S.; Kang, S. J. Prediction of the forming limit in hydroforming processes using the finite element method and a ductile fracture criterion. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 113. p. 673-679. 2001.

LESZAK, E. **Apparatus and process for incremental dieless forming**. **US3342051A**. 1967.

LEWIS, D. G. **Análise de variância**. 1. ed. São Paulo: Harbra, 1995.

LI, H. W. *et al.*, Forming mechanism and characteristics of a process for equal-thickness in-plane ring roll-bending of a metal strip by twin conical rolls. **Journal Of Materials Processing Technology**. v. 227. p. 288-307. 2016.

LORA, F. A. Avaliação Das Deformações no Aço Dc04 quando Submetido ao Processo Híbrido de Estampagem Incremental posterior ao processo convencional. **Igarss**. [s. l.]. n. 1, p. 1–5. 2014.

MALHOTRA, R.; Xue, L.; Belytschko, T.; Cao, J. Mechanics of fracture in single point incremental forming. **Journal Of Materials Processing Technology**. [s.l.]. v. 212, n. 7, p. 1573-1590. Elsevier BV. 2012.

MARABUTO, S. R. J. H. **Desenvolvimento de uma máquina para operações de estampagem incremental**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de Aveiro (Portugal).

MARCINIAK, Z. *et al.* **Hydroforming**: Mechanics of Sheet Metal Forming (2ª Edição). p. 152–163. 2002.

MARTINS, P. A. F.; Bay, N.; Skjødt, M.; Silva, M. B. Theory of single point incremental forming. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. [s. l.]. v. 57, n. 1, p. 247–252. 2008.

MARTINS, P. A. F.; Bay, N.; Skjødt, M.; Silva, M. B. Single point incremental forming of polymers. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. [s. l.]. v. 58, n. 1, p. 229–232. 2009.

MARTINS, P. A. F.; Bay, N. Skjoedt, M.; Silva, M. B. Theory of single point incremental forming. **CIRP Ann. - Manuf. Technol.** 2008;57:247–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.047>.

MASSA, R. C. **Avaliação da Estabilidade Dimensional de Ferramentas de Hidroconformação Fabricadas por Manufatura Aditiva**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru. Universidade Estadual Paulista. São Paulo. 2022

MAXIMILIANO, G. **Estampagem Incremental de Múltiplos Passes em Chapa de Latão C268**. 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.

MIN, J. *et al.* Experimental and numerical investigation on incremental sheet forming with flexible die-support from metallic foam. **Journal of Manufacturing Processes**. [s. l.], v. 31, p. 605–612. 2018.

MOHANTY, S.; REGALLA, S. P.; RAO, Y. V. D. Effect of inclination and rotation of the sheet on sheet thinning and formability in robot assisted incremental sheet metalforming. **Materials Today**: Proceedings, v. 46, pp. 1039–1049, 2021.

NAWI, I.; Mahdavian, S. M. Hydrodynamic lubrication in metal spinning. **ASME-PUBLICATIONS-PED**, v. 69, p. 119-119, 1994.

OLEKSIK, V.; Trzepieciński, T.; Szpunar, M.; Chodoła, Ł.; FICEK, D.; Szczęsny, I. **Single-Point Incremental Forming of Titanium and Titanium Alloy Sheets**. *Materials*. [s.l.]. v. 14, n. 21, p. 6372. 2021. MDPI AG.

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. **J. Mater. Process. Technol.** 2003;140:447–53. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00768-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00768-4).

PENG, W., Ou, H., Becker, A., **Double-sided Incremental Forming: A Review**. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 141Journal:050802. 2019.

RAMALHEIRA, J. M. L. **Comportamento Mecânico de Peças Hidroformadas**. Relatório do Projeto Final/ Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. 2008.

REAGAN, J.; Smith, E. **Metal Spinning**. Lindsay Publications, Bradley,. 80p. 1991.

RODRIGUES, J.; Martins, P. **Tecnologia Mecânica - Tecnologia da Deformação Plástica - Vol. 1**. Lisboa: Escolar Editora, 2010.

RODRIGUES, J.; Martins, P. **Tecnologia mecânica - Tecnologia da Deformação Plástica**. vol 1. 2005.

ROYSTON, P. An Extension of Shapiro and Wilk's W Test for Normality to Large Samples. **Journal of the Royal Statistical Society**, 31(2), 115-124, 1982.

SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre. 2004.

SCHREIBER, R. G. **Estampagem Incremental e Soldagem FSW para Fabricação de coletor Solar**. 109 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, 2018.

SCHREIBER, R. G.; De Sousa, A. L.; Santos, E. M.; Filho, F. F.; Norberto, J. C.; Mondo, L. S. S.; Cabral, T.; Schaeffer, L. Incremental sheet forming parameters and applications: a review. **Brazilian Journal of Development**. 2022.

SCHREIBER, R, G.; Schaeffer, L. Manufacture of absorber fins for solar collector using incremental sheet forming. **Journal of Materials Research and Technology**, [s.l.], p. 1–9. 2018.

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

SCHAFER, T.; Schraft, R. D. Incremental sheet forming by industrial robots using a hammering tool. In: **AFPR, Association Francais de Prototypage Rapid, 10th European Forum on Rapid Prototyping**. 2004.

SCHULER. **Metal forming handbook**. Alemanha. Ed. Springer Science & business media, 1998.

SILVA, M. *et al.* Single point incremental forming of metals sheets: experimentation and theoretical interpretation. **Anais da 11ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas**. Porto Alegre:. Editora Schaeffer L. Gráfica Metrópole. p. 11-28. 2008.

SILVA, M. B.; Skjoedr, M.; Atkins A. G.; Bay, N.; Martins, P. A. F. Single-point incremental forming and formability-failure diagrams. **J. Strain. Anal. Eng. Des.** 43:15– 35. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA340>. 2008.

SILVA, P. J. **Estampagem incremental utilizada para prototipagem de peças de aço ABNT 1008 e ABNT 304**. Dissertação de mestrado em Ciências Mecânicas. Universidade de Brasília: Brasília. 2011.

SINGH, R. P.; Gupta, S. K.; Singh, P. K.; Kumar S *et al.* Robot assisted incremental sheet forming of Al6061 under static pressure: Preliminary study of thickness distribution within the deformation region. **Materials Today: Proceedings**. India. 2021.

SOEIRO, J. M. C. **Enformabilidade em estampagem Incremental**. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica). Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal. 2014.

SOUSA, N. **Planejamento experimental usando ANOVA de 1 e 2 fatores com R: uma breve abordagem prática**. 1 ed. Lisboa: Editora Universidade Aberta, 2017.

TIBURI, F. **Aspectos do processo de Estampagem Incremental**. 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.

TORRES, S.; Calderón, E.; Ortega, R.; Acosta, P. **Sustainability in terms of energy consumption in processes of incremental forming and stamping**. *Materials Today: Proceedings*, [s. l.], v. 67 p. 1-6, ago. 2021. Elsevier BV.

VIHTONEN, L.; Tuomi, J. Incremental sheet forming (ISF) as small batch production method. **3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping**. Leiria, Portugal. p. 611-6, 2007.

XAVIER, L. H.; Dias, C. T. S. Acurácia do modelo univariado para análise de medidas repetidas por simulação multidimensional. **Scientia Agricola**, 58(2), 241-250, 2001.

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**, [s. l.], v. 73, p. 37-46, 2013.

WEI, B.; Wei, Y.; Zhang, F.; He, K.; Dang, X.; Du, R.. Springback control and plastic deformation of metal plates with large curvature in heat-assisted incremental bending process. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**. [s.l.], v. 112, n. 5-6, p. 1483-1500, jan. 2021. Springer Science and Business Media LLC.

WU, R.; Liu, X.; Li, M.; Chen, J. Investigations on deformation mechanism of double-sided incremental sheet forming with synchronous thermomechanical steel-aluminum alloy bonding. **Journal Of Materials Processing Technology**. [s.l.], v. 294, p. 117147, ago. 2021. Elsevier BV.

WU, R.; Hu, Q.; Li, Meng; Cai, S.; Chen, J. Evaluation of the forming limit of incremental sheet forming based on ductile damage. **Journal Of Materials Processing Technology**. [s.l.], v. 287, p. 116497, jan. 2021. Elsevier BV.

WU, J.; Xiong, D.; Li, X.; Liu, Y.; Chen, H.; Wen, L.; Dong, L.; Zheng, S.; Xu, H.; Zhang, H. Investigation on Residual Stress in Rotational Parts Formed Through Incremental Sheet Forming: a novel evaluation method. **International Journal Of Lightweight Materials And Manufacture**, [s.l.], p. 1-22, ago. 2021. Elsevier BV.

YADAV, A. D. **Process analysis and design in stamping and sheet hydroforming**. Doctorate Thesys, The Ohio State University, 223 f. 2008.

ZAMPALONI, M.; Abedrabbo, N.; Pourboghrat, F. **Experimental and Numerical Study of Stamp**. 2003.

ZAVALA, J. M. D., Romero, O. M., Zuñiga, A. E., Gutierrez, H. M. L., Tijerina, J. T.: **Investigation of tool wear in single point incremental sheet forming, Study of Friction and Wear Effects in Aluminum Parts Manufactured via Single Point Incremental Forming Process Using Petroleum and Vegetable Oil-Based Lubricants**. *Materials*, v. 14, 3973. 2021.

ZHANG, F.; He, K.; Dang, X.; Du, R. Experimental and numerical study on one flexible incremental bending process. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 96, n. 5-8, p. 2643-2655, 24 fev. 2018. Springer Science and Business Media LLC.

ZHANG, S. H.; Wang, Z. R.; Xu, Y.; Wang, Z. T.; Zhou L. X. Recent developments in sheet hydroforming Technology. **Journal of Materials Processing Technology**. v.151, 2004, pp. 237-241.

ZHU, M.; Lim, Y. C.; Liu, X.; Cai, Z.; Dhawan, S.; Gao, H.; Politis, D. J. Numerical forming limit prediction for the optimisation of initial blank shape in hot stamping of AA7075. **International Journal Of Lightweight Materials And Manufacture**, [s.l.], v. 4, n. 3, p. 269-280, set. 2021. Elsevier BV.