



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**VIABILIDADE DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPAS DE ALUMÍNIO  
1200 PARA FABRICAÇÃO DE COLETORES SOLARES**

**GILSON DE MARCH**

**Criciúma, SC**

**2024**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SATC - UNISATC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**GILSON DE MARCH**

**VIABILIDADE DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPAS DE ALUMÍNIO**  
**1200 PARA FABRICAÇÃO DE COLETORES SOLARES**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da UNISATC, como requisito parcial para à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica.

Área de concentração: Processo de fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Fritzen

**Criciúma, SC**

**2024**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SATC - UNISATC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

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

**VIABILIDADE DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPAS DE ALUMÍNIO**  
**1200 PARA FABRICAÇÃO DE COLETORES SOLARES**

**GILSON DE MARCH**

Como requisito parcial para obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Metalúrgica.

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Anderson Daleffe (UniSatc)

Prof. Dr. Eng. Fábio André Lora (UFRB)

Prof. Dr. Jovani Castelan (UniSatc)

**Suplente:**

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

Criciúma, SC

2024

*Ao Yuri e Luciana pelo apoio, incentivo e motivação.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por tudo...

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Daniel Fritzen, pelo incentivo, atenção, por todo acompanhamento nas atividades pertinentes a este trabalho e por ser diretamente o maior responsável pela minha qualificação profissional.

Ao coordenador de Mestrado em Engenharia Metalúrgica Dr. Anderson Daleffe, pelo incentivo, atenção concedida, pelas valiosas informações técnicas e metodológicas repassadas.

À minha esposa, Luciana Zilli Reus, pela paciência, motivação e compreensão constante das seguidas ausências de seu convívio, este meu desenvolvimento técnico, científico e profissional em muito tem sua mão.

Ao meu filho, Yuri de March, pela compreensão por todo tempo que me mantive ausente para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho, Henrique Cechinel Casagrande, Vânia Medeiros Ribeiro e Hadrian Martins pelo apoio e contribuição ao desenvolvimento do trabalho.

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

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

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

Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o Céu, enquanto que as cheias as baixam para a terra, sua mãe.

Leonardo Da Vinci

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e validação do processo de fabricação de coletores solares por meio de estampagem incremental em chapas de alumínio 1200 H14 com 1,5mm de espessura, que foca na análise detalhada das propriedades mecânicas e do comportamento do material durante o processo de conformação. Este material tem grande aplicação em setores automotivos e aeroespacial devido sua leveza, boa conformabilidade e resistência a corrosão. Os experimentos foram realizados por meio do método de Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF), variando o Incremento Vertical ( $\Delta z$ ) e as geometrias das peças, como pirâmide e cone. Durante o estudo, foram conduzidas análises dimensionais, testes de tração, avaliação da deformação plástica e elasticidade, além da determinação do ângulo de parede, Curva Limite de Conformação (CLC) e a Linha de Fratura de conformação (LFC) do material. Os resultados permitiram compreender melhor o comportamento do alumínio sob diferentes condições, evidenciando os efeitos do retorno elástico e das tensões biaxiais, contribuindo para a otimização do processo de estampagem incremental em coletores solares.

**Palavras chave:** Alumínio 1200 H14; Curva Limite de Conformação (CLC); Estampagem incremental; Coletores solares.

## ABSTRACT

This work presents the development and validation of the manufacturing process for solar collectors through incremental stamping on 1.5mm thick 1200 H14 aluminum sheets, which focuses on the detailed analysis of the mechanical properties and material's behavior during the forming process. This material has wide application in the automotive and aerospace sectors due to its lightness, good formability and corrosion resistance. The experiments were carried out using the Single Point Incremental Stamping (SPIF) method, varying the Vertical Increment ( $\Delta z$ ) and the geometries of the parts, such as pyramid and cone. During the study, dimensional analyses, tensile tests, evaluation of plastic deformation and elasticity were made, in addition to determining the wall angle, Forming Limit Curve (FLC) and Fracture Forming Line (RLF) of the material. The results allowed us to better understand the behavior of aluminum under different conditions, highlighting the effects of elastic return and biaxial tensions, contributing to the optimization of the incremental forming process in solar collectors.

**Key- words:** Aluminum 1200 H14; Forming Limit Curve (FLC); Incremental Forming; Solar collectors.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Irradiação Média Anual .....	19
Figura 2: Fluxograma de pesquisa e estudo. ....	20
Figura 3: Capacidade térmica solar global em operação e energia anual 2000 - 2020 .....	24
Figura 4: Esquema de coletor solar. Painel coletor de placa plana típico para aquecimento de água (2a). Detalhe de montagem da aleta absorvedora nos tubos de cobre (2b). ....	25
Figura 5: Esquema coletor solar.....	26
Figura 6: Fator de desempenho através do contato da tubulação com placa absorvedora. ....	27
Figura 7: Princípio do processo de estampagem incremental.....	31
Figura 8: Tipos de estampagem incremental em chapas. ....	32
Figura 9: Estampagem incremental de ponto simples.....	33
Figura 10: TPIF com matriz positiva: Situação inicial (a); Situação final (b).....	34
Figura 11: TPIF com matriz negativa: Situação inicial (a); Situação final (b) .....	34
Figura 12: Trajetória paralela (a); Trajetória helicoidal (b).....	36
Figura 13: Tipos de ferramentas: (a) Ferramenta rígida; (b) Ferramenta vertical rolante; (c) Ferramenta oblíqua rolante. ....	37
Figura 14: Máquina SPIF-A: a) Atuadores Cinemáticos; b) Base Móvel da Plataforma Stewart; c) Conjunto do Spindle .....	39
Figura 15: Máquina CNC ROMI DISCOVERY 760 de três eixos utilizada na estampagem incremental de chapas.....	41
Figura 16: Comparação entre a CLC e a LFC.....	42
Figura 17: DLC obtido pelo método analítico para o alumínio 1200 H14. ....	43
Figura 18: Linha de Fratura de Conformação.....	44
Figura 19: Dimensões esquemáticas antes e após ensaio de tração. ....	45
Figura 20: Exemplo de deformações representadas pela gravação eletroquímica de círculos na peça. ....	48
Figura 21: Medição prática da deformação do círculo inicial e da elipse após a deformação. ....	48
Figura 22: Tipos de deformação em chapas metálicas. ....	49
Figura 23: Diagrama convencional Tensão x Deformação Relativa.....	50

Figura 24: Corpos de prova usinados de seção retangular para ensaio de tração. a) Corpo de prova antes do ensaio. b) Corpo de prova após o ensaio. ....	51
Figura 25: Curva de engenharia "Tensão x Deformação" alumínio 1200 H14 para ensaio de tração. ....	52
Figura 26: Curva de escoamento para alumínio 1200 H14. ....	54
Figura 27: Corpos de prova ensaio Nakajima. ....	54
Figura 28: Representação do círculo gravado na chapa e a elipse formada após a deformação. ....	55
Figura 29: CLC de Alumínio, Aço e Latão. ....	55
Figura 30: CLC para alumínio 1200 H14. ....	56
Figura 31: Redução da espessura de parede. ....	57
Figura 32: Método geométrico para determinação do ângulo de parede ( $\Psi$ ). ....	57
Figura 33: Relação entre ângulo de parede e a espessura da chapa no processo de estampagem incremental ....	58
Figura 34: Variação da inclinação da chapa. ....	59
Figura 35: Fluxograma dos experimentos realizados ....	62
Figura 36: Gravação eletroquímica. ....	63
Figura 37: Corpo de prova para ensaio de tração. ....	64
Figura 38: Ensaio Nakajima. ....	65
Figura 39: Desenho para estampagem incremental: (a) modelo pirâmide; (b) modelo cone. ....	66
Figura 40: Estratégia da ferramenta. ....	67
Figura 41: Preparação da SPIF: (A) Prensa chapa fixado na mesa CNC; (B) Prensa chapa pronto para estampagem incremental. ....	68
Figura 42: Ferramenta com ponta semiesférica de 10mm de diâmetro. ....	68
Figura 43: Desenho da matriz para estampagem de canais de coletor solar ....	69
Figura 44: Conformação chapa coletor solar. ....	70
Figura 45: Configuração de diferentes canais: Três canais retos de contorno (a); Cinco canais retos no centro(b). ....	70
Figura 46: Medição das elipses com microscópio digital. ....	72
Figura 47: Medição tridimensional da peça estampada. ....	73
Figura 48: Curva Tensão x Deformação média para os corpos de prova a 0°, 45° e 90° ao sentido de laminação. ....	75

Figura 49: Curvas de escoamento do alumínio 1200 H14 em 0°, 45° e 90° no sentido de laminação.....	76
Figura 50: Peça estampada com geometria de pirâmide e cone. ....	78
Figura 51: LFC Alumínio 1200 H14 Pirâmide.....	79
Figura 52: LFC Alumínio 1200 H14 Cone. ....	80
Figura 53: Placa absorvedora estampada.....	81
Figura 54: LFC Alumínio 1200 H14 placa absorvedora.....	81
Figura 55: Corpos rompidos no ensaio Nakajima.....	82
Figura 56: Curva CLC e FLC do alumínio 1200 H14 1,5mm.....	83
Figura 57: Comparação geometria da peça desenhada e medição peça estampada em máquina Tridimensional: Incremento de 0,2mm (a); incremento 0,5mm (b). ....	84
Figura 58: Formato da geometria do canal central.....	86
Figura 59: Formato geometria do canal tipo contorno.....	86
Figura 60: Coletores finalizados com diferentes estratégias. ....	87
Figura 61: Representação do coletor solar sem e com tubo de cobre interno para passagem de água.....	90
Figura 62: Representação de temperatura da água na vazão do coletor solar. ....	91
Figura 63: Gráfico da eficiência de temperatura do coletor solar. ....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Terminologias da geometria dos corpos de prova usinados de seção retangular para ensaio de tração.....	51
Tabela 2: Composição química do alumínio 1200 H14. ....	61
Tabela 3: Parâmetros SPIF cone e pirâmide.....	67
Tabela 4: Parâmetro estampagem canal. ....	71
Tabela 5: Análise química do alumínio 1200 H14. ....	74
Tabela 6: Dados dos ensaios de tração 0°,45° e 90° obtidos do alumínio 1200 H14 com espessura de 1,5mm. ....	75
Tabela 7: Propriedades mecânicas dos corpos de prova de 0°, 45° e 90° no sentido de laminação obtidas do alumínio 1200 H14 com $s_0 = 1,50$ mm.....	77
Tabela 8: Angulo de parede da estampagem incremental cone e pirâmide.....	85
Tabela 9 Valor estimado do coletor com 3 canais retos.....	88
Tabela 10: Valor estimado do coletor com 3 canais retos com tubo de cobre. ....	89
Tabela 11: Dados para simulação da eficiência do coletor solar.....	91

## LISTA DE SIMBOLOS

A	Área	[ m <sup>2</sup> ]
A <sub>0</sub>	Área inicial	[ mm <sup>2</sup> ]
a	Comprimento do eixo maior da elipse	[ mm ]
b	Comprimento do eixo menor da elipse	[ mm ]
b <sub>0</sub>	Largura inicial	[ mm ]
b <sub>1</sub>	Largura final	[ mm ]
C	Constante do material	[ MPa ]
d <sub>0</sub>	Diâmetro inicial	[ mm ]
F	Força	[ N ]
F <sub>R</sub>	Velocidade de avanço	[ mm/min ]
I	Radiação Solar	[ KWm <sup>2</sup> ]
kf	Tensão de Escoamento	[ MPa ]
kf <sub>0</sub>	Tensão inicial de escoamento	[ MPa ]
l	Comprimento instantâneo	[ mm ]
l <sub>0</sub>	Comprimento inicial	[ mm ]
l <sub>1</sub>	Comprimento final	[ mm ]
l <sub>c</sub>	Comprimento Paralelo do Corpo de Prova	[ mm ]
l <sub>t</sub>	Comprimento Total do Corpo de Prova	[ mm ]
N	Velocidade de rotação da Ferramenta	[ rpm ]
n	Grau de encruamento	[ - ]
Qu	Taxa de energia	[ W ]
r	Índice de Anisotropia	[ - ]
R <sub>F</sub>	Raio da Ferramenta	[ mm ]
s <sub>0</sub>	Espessura inicial da chapa	[ mm ]
s <sub>1</sub>	Espessura final da chapa	[ mm ]
X	Eixo X da máquina-ferramenta	[ - ]
Y	Eixo Y da máquina-ferramenta	[ - ]
Z	Eixo Z da máquina-ferramenta	[ - ]

## LISTA DE SIMBOLOS GREGOS

$\sigma$	Tensão	[ N / mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_B$	Tensão Máxima (Limite de Resistência)	[ N / mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_E$	Tensão Limite de Escoamento	[ N / mm <sup>2</sup> ]
$\Delta b$	Deformação absoluta na largura da chapa	[ mm ]
$\Delta l$	Deformação absoluta no comprimento da chapa	[ mm ]
$\Delta s$	Deformação absoluta na espessura da chapa	[ mm ]
$\Delta t$	Varição de Temperatura	[ °C ]
$\Delta z$	Incremento Vertical da Ferramenta	[ mm ]
$\varepsilon$	Deformação relativa	[ % ]
$\varepsilon_l$	Deformação relativa no comprimento da chapa	[ % ]
$\varepsilon_b$	Deformação relativa na largura da chapa	[ % ]
$\varepsilon_{máx}$	Deformação relativa máxima	[ % ]
$\varepsilon_s$	Deformação relativa na espessura da chapa	[ % ]
$E$	Módulo de Elasticidade	[ GPa ]
$\eta_t$	Rendimento térmico	[ % ]
$\mu$	Atrito de Deslizamento	[ - ]
$\delta$	Alongamento	[ % ]
$\varphi$	Deformação verdadeira	[ - ]
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	Deformação verdadeira nas direções 1, 2 e 3	[ - ]
$\varphi_l$	Deformação verdadeira no comprimento	[ - ]
$\varphi_b$	Deformação verdadeira na largura	[ - ]
$\varphi_s$	Deformação verdadeira na espessura	[ - ]
$\rho$	Densidade do material	[ g/cm <sup>3</sup> ]
$\nu$	Coefficiente de Poisson	[ - ]
$\Psi$	Ângulo de Parede	[ ° ]
$\Psi_s$	Ângulo de Parede Simulado	[ ° ]

## LISTA DE ABREVIATURAS

CAD	Desenho Assistido por Computador ( <i>Computer Aided Design</i> )
CAM	Manufatura assistida por computador ( <i>Computer Aided Manufacturing</i> )
CLC	Curva Limite de Conformação ( <i>Forming Limit Curve</i> )
CNC	Comando Numérico Computadorizado ( <i>Computer Numerical Control</i> ) <sup>3</sup>
DLC	Diagrama Limite de Conformação ( <i>Forming Limit Diagram</i> )
EI	Estampagem Incremental ( <i>Incremental Sheet Forming – ISF</i> )
LFC	Linha de Fratura na Conformação ( <i>Fracture Forming Line</i> )
SPIF	Estampagem Incremental de Ponto Simples ( <i>Single Point Incremental Forming</i> )
TPIF	Estampagem Incremental de Ponto Duplo ( <i>Two Point Incremental Forming</i> )

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	21
<b>1.1.1 Objetivos Específicos</b> .....	<b>21</b>
1.2 JUSTIFICATIVA .....	21
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>23</b>
2.1 ENERGIA RENOVÁVEL .....	23
<b>2.1.1 Aquecedor Solar</b> .....	<b>24</b>
2.2 CONFORMAÇÃO DE CHAPAS .....	28
2.3 ESTAMPAGEM INCREMENTAL .....	29
<b>2.3.1 Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF)</b> .....	<b>32</b>
<b>2.3.2 Estampagem Incremental de Ponto Duplo (TPIF)</b> .....	<b>33</b>
2.4 PARÂMETROS DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL .....	35
<b>2.4.1 Trajetória da Ferramenta</b> .....	<b>35</b>
<b>2.4.2 Ferramenta para Estampagem Incremental</b> .....	<b>36</b>
<b>2.4.3 Lubrificação</b> .....	<b>38</b>
<b>2.4.4 Máquinas para Estampagem Incremental</b> .....	<b>38</b>
2.5 LIMITES DE ESTAMPABILIDADE .....	41
<b>2.5.1 Deformações no Processo de Estampagem</b> .....	<b>45</b>
<b>2.5.2 Ensaio de Tração</b> .....	<b>50</b>
<b>2.5.3 Curva de Escoamento</b> .....	<b>52</b>
<b>2.5.4 Ensaio de Nakajima</b> .....	<b>54</b>
<b>2.5.5 Limites de Conformação da Peça</b> .....	<b>56</b>
<b>2.5.6 Discrepância Geométrica</b> .....	<b>59</b>
2.6 ALUMÍNIO 1200 H14 .....	60
<b>2.6.1 Características das Ligas de Alumínio 1200 H14</b> .....	<b>60</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>62</b>
3.1 ANÁLISE QUÍMICA .....	62
3.2 GRAVAÇÃO ELETROQUÍMICA .....	63
3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO .....	64
3.4 ENSAIO DE NAKAJIMA .....	64
3.5 ENSAIO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL .....	65

3.6 FABRICAÇÃO DAS PLACAS DO COLETOR SOLAR POR SPIF .....	69
3.7 MEDIÇÃO DAS ELIPSES .....	71
3.8 MEDIÇÃO TRIDIMENSIONAL DA GEOMETRIA.....	72
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>74</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE ALUMÍNIO AA120 H14.....	74
4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO .....	74
<b>4.2.1 Curva de Escoamento.....</b>	<b>76</b>
4.3 ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES.....	77
<b>4.3.1 Linha de Fratura da Conformação Pirâmide e Cone .....</b>	<b>78</b>
<b>4.3.2 Linha de Fratura de Conformação do Coletor Solar .....</b>	<b>80</b>
<b>4.3.3 Curva limite de conformação ensaio Nakajima .....</b>	<b>82</b>
<b>4.3.4 Análise Geométrica .....</b>	<b>84</b>
4.4 ANÁLISE E VALIDAÇÃO DO COLETOR SOLAR.....	86
<b>4.4.1 Custo de Fabricação .....</b>	<b>88</b>
<b>4.4.2 Eficiência térmica .....</b>	<b>89</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>94</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>97</b>
<b>7 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os setores industriais buscam continuamente melhorar seus processos, adotando novos materiais para aumentar a flexibilidade, qualidade e reduzir custos. Nesse contexto, a Estampagem Incremental (EI) (*Incremental Sheet Forming – ISF*) tem se destacado nas pesquisas globais, devido ao seu potencial para atender essas demandas com eficiência e inovação [1].

O processo de Estampagem Incremental de chapas é geralmente aplicado para prototipagem rápida e pequenos lotes de peças, possibilitando alta deformação nas mais variadas formas geométricas [2] [3].

Este processo de conformação não requer ferramentas específicas, e por ser extremamente flexível pode ser realizado através de máquina de Comando Numérico Computadorizado (CNC) [4].

Estudos tem sido aplicado em diversas áreas, como a produção de painéis para veículos especiais [2], protótipos de implantes cranianos [5] e no desenvolvimento de novos modelos de coletores solares [6].

Compreender o comportamento do material durante o processo é de suma importância para otimizar os custos de fabricação. No contexto deste artigo, o foco recai sobre uma liga de Alumínio ASTM/ABNT 1200 H14, com uma faixa de 99,00% de teor de alumínio [7].

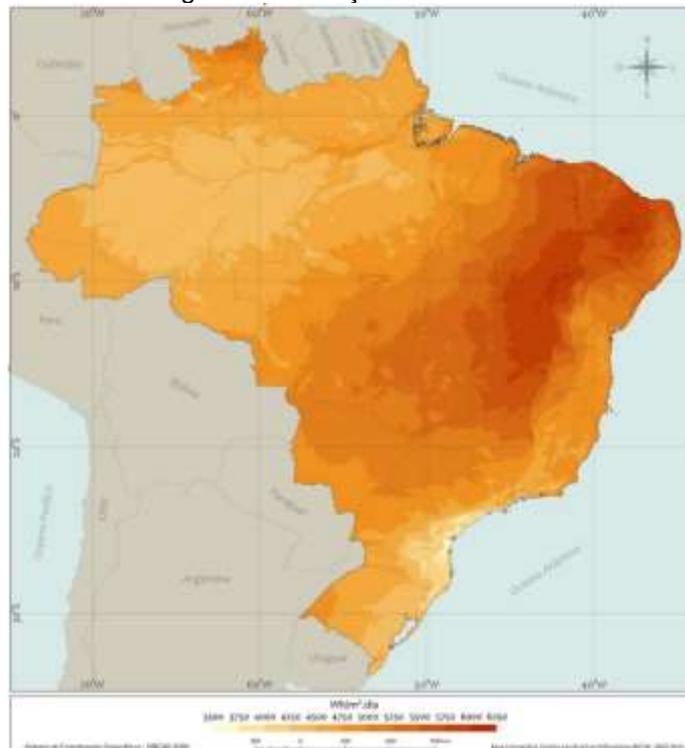
A versatilidade do alumínio abrange desde a fabricação de instrumentos domésticos até a aplicação na indústria aeroespacial. Sua característica mais proeminente é sua leveza, proporcionando um peso relativamente baixo em comparação com outros materiais, ao mesmo tempo em que exibe alta resistência à corrosão, excelentes propriedades condutoras de eletricidade e calor [8].

O alumínio é extraído principalmente do óxido de alumínio, um recurso abundante na crosta terrestre. Vale destacar que o Brasil detém a quarta maior reserva de bauxita do mundo, uma fonte primária para a produção de alumínio [7].

As ligas de alumínio desempenham um papel fundamental em diversos setores industriais. No contexto do segmento elétrico, o panorama global exige uma expansão contínua na produção de energia, com foco crescente no aproveitamento de fontes renováveis. Entre essas fontes, destaca-se a energia proveniente de coletores solares, os quais utilizam a transferência térmica como um método acessível e econômico [9].

O Brasil possui um enorme potencial para o aproveitamento da energia solar, graças aos elevados níveis de radiação solar global média que incidem sobre o território conforme ilustrado na Figura 1. Esse recurso pode ser aproveitado tanto para geração de energia solar fotovoltaica quanto para a economia de eletricidade através da instalação de sistemas de aquecimento solar (energia solar térmica). Estima-se que cerca de 25% da energia elétrica consumida nas residências brasileiras seja destinada ao aquecimento de água em chuveiros elétricos. Diante disso, a adoção de sistemas de aquecimento solar para banho representa uma alternativa com grande potencial para a eficiência energética no país. [10] [11].

Figura 1: Irradiação Média Anual



Fonte: [11]

O Brasil possui um dos maiores potenciais de energia renovável do mundo, com uma matriz energética fortemente baseada em fontes limpas e sustentáveis. As principais fontes de energia renovável no país incluem a hidrelétrica, que representa cerca de 60% da geração elétrica nacional, além da crescente participação da energia eólica e solar [11].

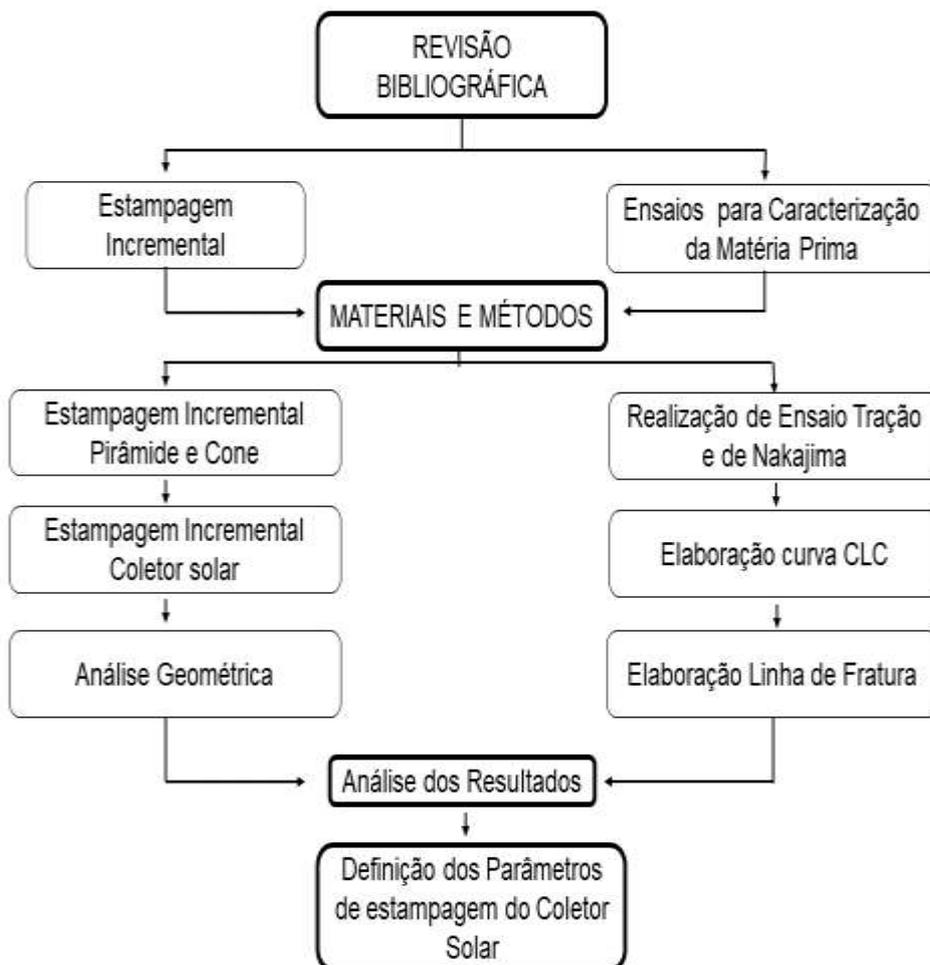
Especificamente sobre a energia solar, a captação desta energia pode ser essencialmente dividida em três formas: conversão química, elétrica e térmica. A conversão térmica baseia-se na absorção da energia radiante por uma superfície

escura, como uma chapa negra coberta com vidro comum, que maximiza a captura de calor, dentre essas tecnologias, o coletor solar plano se destaca por sua simplicidade e eficiência, convertendo a energia solar em calor de maneira prática e com baixo custo [12] [13].

Esta pesquisa propõe o uso da Estampagem Incremental para fabricar canais em chapas de alumínio para coletores solares, eliminando a necessidade de tubos de cobre e aprimorando o processo atual. Essa abordagem melhora o contato entre a placa negra e a serpentina e aumenta a flexibilidade do processo, aproveitando as propriedades do alumínio 1200 H14.

O fluxograma representado na Figura 2 abaixo resume os procedimentos propostos para o estudo deste trabalho.

Figura 2: Fluxograma de pesquisa e estudo.



Fonte: Do Autor

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo desenvolver e validar o processo de fabricação de coletores solares por meio da Estampagem Incremental, em chapas de Alumínio 1200 H14, substituindo as tradicionais tubulações de cobre por canais conformados na própria chapa.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho, aplicados na fabricação de um novo modelo de placa absorvedora para coletores solares, usando chapa de Alumínio 1200 H14 com 1,50mm de espessura, estão relacionados a seguir:

- Caracterização química e física da chapa Alumínio 1200 H14, por meio dos ensaios de espectrometria e de tração;
- Definição das Curvas Limite de Conformação (CLC) do material proposto, por meio do ensaio Nakajima;
- Definição da Linha Fratura de Conformação (LFC) da chapa de Alumínio 1200 H14, por meio de experimentos em Estampagem Incremental, usando as geometrias de Pirâmide e Cone;
- Definir os parâmetros de Estampagem Incremental para conformação dos canais das chapas para coletor solar;
- Fabricar as chapas do coletor solar por meio da ISF;
- Analisar dados de custo na fabricação de placas de coletor solar através da ISF.
- Analisar a eficiência térmica através de simulação da placa de coletor solar.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A Estampagem Incremental (ISF) tem sido amplamente estudada em diversos setores industriais devido à sua versatilidade, capacidade de produzir geometrias complexas e baixos custos de produção. Contudo, sua aplicação no

setor de energia solar permanece pouco explorada, destacando-se como uma oportunidade de inovação e desenvolvimento tecnológico.

A proposta do estudo envolve o desenvolvimento de uma solução viável para a fabricação de coletores solares, utilizando a ISF para conformar chapas absorvedoras. A metodologia proposta sugere a substituição das tubulações de cobre, tradicionalmente utilizadas, por canais formados diretamente em chapas de alumínio, com o objetivo de reduzir os custos de fabricação e minimizar o uso de materiais caros e de elevado impacto ambiental, como o cobre.

Além do aspecto econômico, essa abordagem visa preservar a eficiência térmica dos coletores solares, ao mesmo tempo em que aumenta a flexibilidade do processo de fabricação. O uso do alumínio, devido às suas propriedades de leveza, resistência à corrosão e boa condutividade térmica, reforça o potencial de desenvolvimento de sistemas mais acessíveis e sustentáveis, alinhados às crescentes demandas por soluções energéticas limpas e economicamente viáveis. Este estudo, portanto, busca contribuir para o avanço de tecnologias que promovam maior acessibilidade ao uso de energia solar, impactando positivamente o mercado e o meio ambiente.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica relacionada à caracterização das chapas de alumínio, os conceitos e características no processo de estampagem incremental, com a finalidade de avaliar os parâmetros que influenciam neste processo de conformação.

### 2.1 ENERGIA RENOVÁVEL

O sol é de extrema importância para existência de vida no planeta terra, tanto para questões biológicas e geração da vida, como na criação de fontes de energias renováveis. A radiação solar se destaca como uma das alternativas energéticas mais promissoras para os desafios deste milênio. Embora tecnicamente não seja uma fonte renovável, ela é considerada inesgotável dentro da escala de tempo da vida no planeta Terra [11].

Além dos benefícios ambientais e das vantagens de uma matriz energética renovável, um dos principais impulsionadores do investimento em energias renováveis, especialmente em energia solar, é o imenso potencial dessa fonte. Se fosse possível captar 100% da energia solar que incide sobre o planeta, teríamos capacidade para suprir a demanda energética global atual por cerca de 6.000 anos [14].

No entanto, o desenvolvimento dessas indústrias ao longo dos anos resultou em impactos significativos no meio ambiente. As construções de represas e usinas hidroelétricas frequentemente alteram drasticamente o curso dos rios, afetando diretamente os habitats naturais de várias espécies animais e vegetais, impactando negativamente a biodiversidade [11], [15].

Diante desses desafios, surgiram as energias renováveis, que representam uma alternativa mais sustentável e amigável ao meio ambiente. Entre elas, a energia solar se destaca como uma fonte limpa e renovável que não agride o ecossistema. O uso de painéis (coletores) solares é um exemplo claro, sendo amplamente empregados para o aquecimento de água, dentre outras aplicações. Essas tecnologias solares permitem a captura e conversão direta da energia do sol, sem causar impactos prejudiciais ao meio ambiente, oferecendo uma abordagem

sustentável para atender às necessidades energéticas, sem comprometer a fauna, flora e os ecossistemas naturais [15], [16].

### 2.1.1 Aquecedor Solar

Os coletores solares planos são muito utilizados em residências para o aquecimento de água, e tem como objetivo a captação de energia proveniente do sol para converter em calor útil [17].

A capacidade térmica solar global de coletores de água, em operação, aumentou de 62 GWth (89 milhões de m<sup>2</sup>) em 2000 para 501 GWth (715 milhões de m<sup>2</sup>) em 2020. Os rendimentos anuais de energia térmica solar associados subiram de 51 TWh em 2000 para 407 TWh em 2020, conforme ilustrado na Figura 3 [18].

Figura 3: Capacidade térmica solar global em operação e energia anual 2000 - 2020



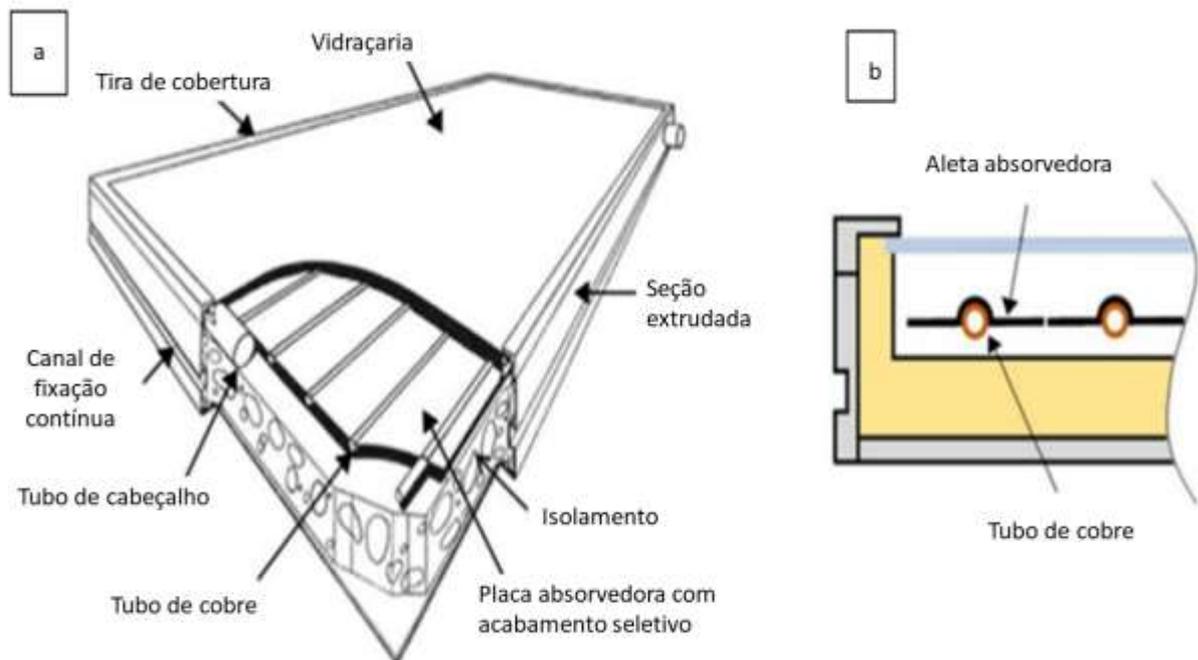
Fonte: [18]

Os coletores planos, que são utilizados para temperaturas mais baixas, atingem temperatura de até 100°C, estes são formados por uma placa absorvedora ou também chamada de placa preta, as quais são fabricadas de materiais que apresentam característica de boa condutância térmica, pois executam a absorção da radiação solar e a transmissão dessa energia para as tubulações [17], [19].

Esses coletores podem apresentar diferentes configurações estruturais. Uma das mais comuns utiliza tubos de cobre, que podem ser revestidos por uma placa absorvedora soldada diretamente a eles ou por diversas aletas absorvedoras conectadas aos tubos de cobre. Esse design permite uma transferência térmica

entre os tubos e a placa absorvedora, otimizando o aquecimento do fluido no interior do sistema. A Figura 4 (a) ilustra o modelo de um coletor solar de placa plana fechado, destacando seus principais componentes, enquanto a Figura 4 (b) apresenta um detalhe ampliado que evidencia como as aletas absorvedoras são montadas nos tubos de cobre [20].

Figura 4: Esquema de coletor solar. Painel coletor de placa plana típico para aquecimento de água (2a). Detalhe de montagem da aleta absorvedora nos tubos de cobre (2b).



Fonte: Adaptado de [20]

No design geral, a vidraçaria serve como cobertura transparente, permitindo a entrada de radiação solar e minimizando as perdas de calor, enquanto a tira de cobertura e o canal de fixação contínua mantêm os elementos do coletor firmemente conectados. O tubo de cabeçalho distribui ou coleta o fluido térmico que circula pelos tubos de cobre, responsáveis por transferir o calor absorvido pela placa absorvedora com acabamento seletivo, otimizada para captar e transformar radiação solar em calor. Além disso, o isolamento térmico reduz as perdas de calor na parte inferior. Na seção transversal, destacam-se a aleta absorvedora, que aumenta a eficiência na transferência de calor, os tubos de cobre, que conduzem o fluido térmico, e o isolamento, que preserva o calor captado, garantindo a eficiência do sistema. Esses componentes trabalham em conjunto para maximizar a captura de radiação solar e a transferência de calor ao fluido térmico [20].

As tubulações que compõem o sistema são responsáveis pela circulação do fluido. Como há uma diferença no comprimento de ondas entre a radiação da placa e a radiação advinda da baixa temperatura da placa, utiliza-se uma cobertura de vidro, geralmente opaca, para que não haja perda de energia, a mesma absorve a energia e a emite novamente para a placa preta, formando um efeito estufa, conforme ilustra a Figura 5 [13], [21], [22].

Figura 5: Esquema coletor solar.



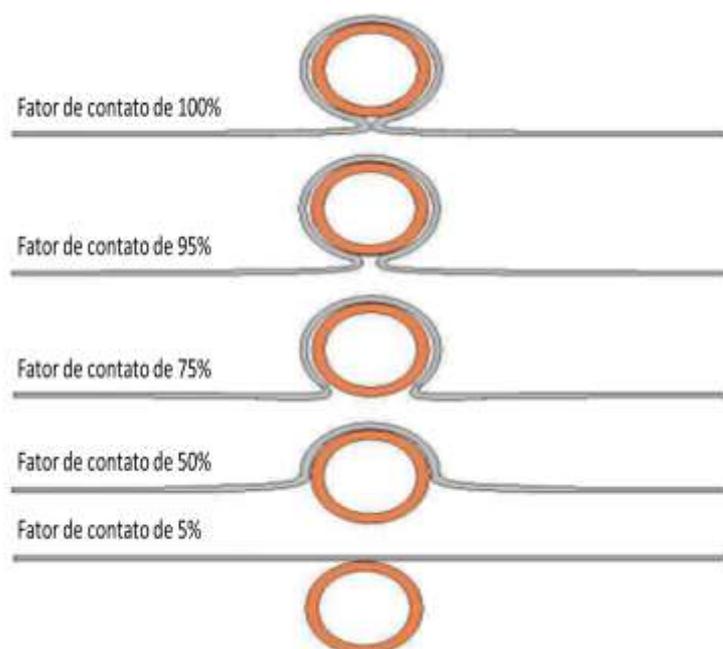
Fonte: Adaptado de [13]

Esses coletores são construídos com tubos de cobre de aproximadamente 10 mm de diâmetro, que são cortados e distribuídos sobre chapas de cobre ou alumínio com 0,3 mm de espessura. Durante a fabricação, os tubos são cortados e dobrados em formato de serpentina para permitir a passagem da água, e então acoplados mecanicamente às aletas.

Em alguns casos, é realizada solda em pontos específicos ao longo da tubulação para melhorar a fixação com a chapa. No entanto, um dos principais desafios desse processo, além de sua execução frequentemente manual, é a eficiência da superfície de troca de calor, a maior parte da tubulação entra em contato com a chapa absorvedora apenas por pressão mecânica, limitando a transferência de calor às áreas onde há solda [23].

A fabricação das placas absorvedoras atualmente enfrenta desafios, como o contato entre a chapa negra e a tubulação da serpentina. O desempenho do coletor é avaliado com base no fator de contato entre seus componentes. A Figura 6 apresenta a classificação desse fator de contato [24].

Figura 6: Fator de desempenho através do contato da tubulação com placa absorvedora.



Fonte: Adaptado de [24]

Com o avanço dos processos de fabricação ao longo das últimas décadas, a área de conformação tem evoluído significativamente, ampliando o conhecimento sobre os materiais utilizados e buscando constantemente a redução de custos e maior flexibilidade nos processos produtivos. Nesse contexto, a estampagem incremental se destaca como uma alternativa eficiente, especialmente voltada para a produção de pequenos lotes e prototipagem rápida. Essa técnica oferece flexibilidade de fabricação, permitindo a redução de custos operacionais e a adaptação a diferentes geometrias, sendo uma solução promissora para minimizar despesas e otimizar o uso de materiais em projetos inovadores [23], [25].

A eficiência de coletores solares é um fator determinante para a viabilidade do seu uso em sistemas de aquecimento de água. No estudo conduzido por Cavalcante (2023), foram analisadas duas configurações de coletores solares: com e sem aletas. Os testes foram realizados utilizando um coletor solar de fluxo forçado de 10, 20 e 30 l/h. Os resultados indicaram que o coletor com aletas apresentou

melhor desempenho térmico em comparação ao modelo sem aletas. A eficiência térmica média do coletor aletado variou de 23,9% a 34,1%, dependendo da vazão de água utilizada, enquanto o coletor sem aletas apresentou eficiência entre 19,7% e 27,3%. A presença de aletas contribuiu para um maior aproveitamento da radiação solar e uma transferência de calor mais eficiente. Esses dados reforçam a importância do design do coletor na maximização da captação e conversão de energia solar para aquecimento de água de forma sustentável. [26]

Para determinar o rendimento térmico do coletor ( $\eta_t$ ) utiliza-se a Equação (1):

$$\eta_t = \frac{Q_u}{A \cdot I} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

Onde:

$Q_u$  = taxa de energia útil transferida ao fluido de trabalho (W);

$A$  = área do coletor (m<sup>2</sup>);

$I$  = radiação solar global (kW/m<sup>2</sup>).

No caso dos coletores solares planos, a aplicação da ISF permite criar canais diretamente em chapas de alumínio ou outros metais, eliminando a necessidade de circuitos hidráulicos fixos e reduzindo etapas como corte e soldagem de tubos. Essa abordagem não apenas simplifica o processo produtivo, mas também melhora a integração estética e funcional dos coletores solares. Além disso, a ISF possibilita o desenvolvimento de placas absorvedoras solares personalizados para atender demandas específicas, aumentando a aplicação de sistemas solares térmicos em construções modernas e sustentáveis [27].

## 2.2 CONFORMAÇÃO DE CHAPAS

A utilização de chapas metálicas na produção de produtos é muito abundante e variada. Isso exige um grande uso dos processos de manufatura, tal como a conformação das chapas, que se diversificam em suas formas de trabalho e aplicação com o intuito de deformar a chapa tornando um produto de

aproveitamento industrial com dimensões e formas geométricas conforme o projeto [28].

A conformação de chapas no modelo tradicional ou convencional é amplamente utilizada na indústria devido à sua capacidade de produzir itens em larga escala com alta precisão e repetibilidade. Esse processo é realizado por meio do uso de prensas mecânicas ou hidráulicas, que, em conjunto com matrizes ou moldes específicos, conformam a chapa metálica na forma desejada [29].

As matrizes desempenham um papel importante, pois definem o formato final da peça, garantindo uniformidade dimensional e qualidade superficial. Essa abordagem é ideal para produções em massa, uma vez que permite a fabricação de grandes volumes de peças idênticas em ciclos de operação rápidos. No entanto, o custo elevado para o desenvolvimento de matrizes personalizadas e a falta de flexibilidade para ajustes no design são desvantagens significativas desse método, especialmente em aplicações que exigem pequenas tiragens [30].

A conformação de chapas consiste na alteração das geometrias do material através das forças aplicadas por ferramentas gerando deformações plásticas nos materiais [31] [32].

Podemos citar alguns ramos industriais que fazem utilização de chapas metálicas, seja no seu produto ou no processo, tal como indústrias automobilística, indústria de maquinários agrícolas, utensílios domésticos, construção civil, transporte e medicina [33].

Os processos de estampagem de chapas são variados, tendo objetivos de deformar a chapa gerando formas geométricas precisas e bem definidas para produtos de aplicações industriais [34].

O funcionamento básico desse processo é a transformação da geometria plana, através de aplicações de tensões externas na chapa metálica, utilizando uma punção e uma matriz, buscando assim, a formação de geometrias tridimensionais [33].

## 2.3 ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Com o constante crescimento e incessante procura por novas tecnologias de estampagem em chapas, surge a estampagem incremental, uma inovação no processo de estampagem desenvolvida no Japão para atender necessidades na

área automobilística, tendo como foco a produção de pequenas séries de peças, com agilidade na fabricação de protótipos com geometrias complexas. [35], [31] e [28].

A Estampagem Incremental, diferente da estampagem convencional, não tem como objetivo a produção em larga escala, pois esse processo visa um mercado onde tem como objetivo a análise de peças individuais. Encaixando assim, nos requisitos das áreas de biomecânica e prototipagem rápida, que se diferem dos processos convencionais [28], [31].

O cenário industrial está em constante busca por aprimoramento, abrangendo todos os setores. Este avanço envolve a contínua melhoria de processos e a adoção de novos materiais visando a flexibilidade, o aprimoramento da qualidade e a redução de custos. Nesse contexto, a técnica conhecida como ISF tem conquistado destaque em pesquisas em nível mundial [36].

A ISF representa um método promissor no âmbito da conformação plástica de materiais em chapas. Em contraste com a produção em série, seu foco principal reside na análise individual de cada peça a ser concebida. Esse enfoque permite uma abordagem mais personalizada e orientada para análises específicas de cada componente, tornando-a particularmente relevante em contextos nos quais a produção em grande escala não é a prioridade, mas sim a precisão e a singularidade de cada peça fabricada [36]; [37].

O processo da ISF envolve a estampagem de chapas metálicas de maneira rápida, a partir de arquivos de Desenho assistido por Computados (CAD) em 3D. A trajetória da ferramenta é gerada por meio da Manufatura Assistida por Computador (CAM) e controlada por um programa CNC. Esse sistema vai formando gradualmente a peça desejada por meio de pequenas e sucessivas deformações [36] [38].

A ISF emprega uma ferramenta semiesférica que oferece versatilidade ao possibilitar a conformação de diferentes formatos geométricos, proporcionando flexibilidade no processo de fabricação e pode ser aplicada em vários produtos com diferentes formas geométricas [36].

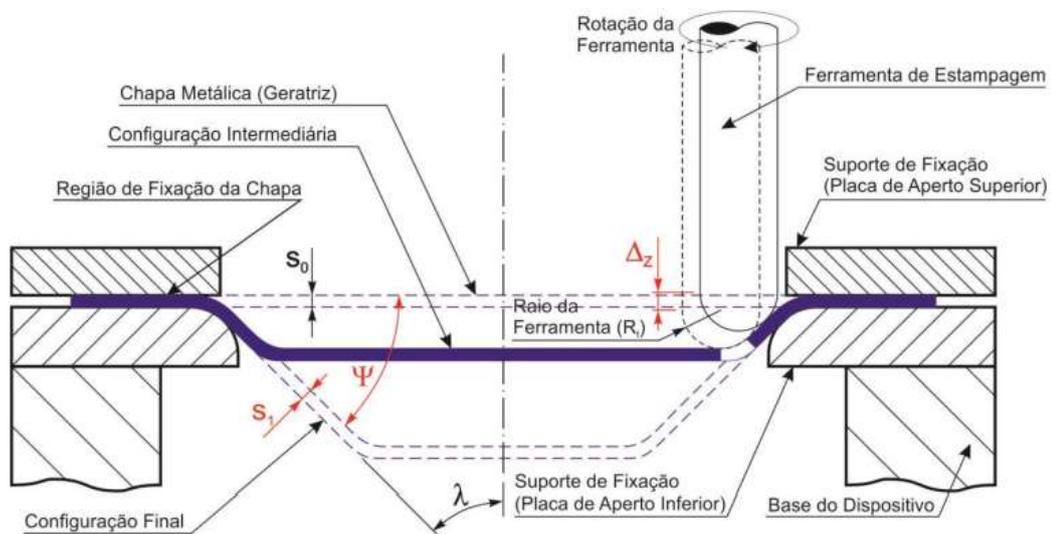
Outro fator importante neste processo é o tamanho e formato da ferramenta que apresenta um fator importante na conformação dos materiais no processo Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF). Experimentos demonstraram que um raio de ferramenta menor favorece uma conformabilidade superior em

comparação a um raio maior. Além disso, diâmetros de ferramenta maiores proporcionam um suporte mais eficiente para a chapa metálica devido a uma zona de contato maior. Isso resulta em um aumento na força de conformação, uma vez que a área de contato entre a ferramenta e a peça bruta é ampliada, no caso de um raio de ferramenta pequeno, observa-se uma zona de deformação altamente concentrada, resultando em tensões elevadas que contribuem para uma melhor conformabilidade [39].

A chapa a ser conformada é fixada em um dispositivo específico desenvolvido para essa tecnologia. Quanto à máquina utilizada para a Estampagem Incremental, esta pode ser um centro de usinagem CNC adaptado, um robô também adaptado ou até mesmo máquinas projetadas especificamente para a aplicação da ISF [31] [36].

A Estampagem Incremental consiste em deformar chapas de forma progressiva. A fixação da chapa é feita através de um suporte prensa-chapas que pode ter um ou mais pontos de apoio para evitar o movimento da peça durante o processo, acoplado ao eixo árvore de uma máquina CNC comandado numericamente através dos movimentos dos eixos X, Y e Z, um punção com ponta esférica que por movimentos repetitivos sobre a chapa realizando a conformação gradativa do material. A Figura 7 apresenta a fixação da chapa em suas extremidades sendo deformada por uma ferramenta de ponta esférica que dá início ao processo ISF [28] [31] [40].

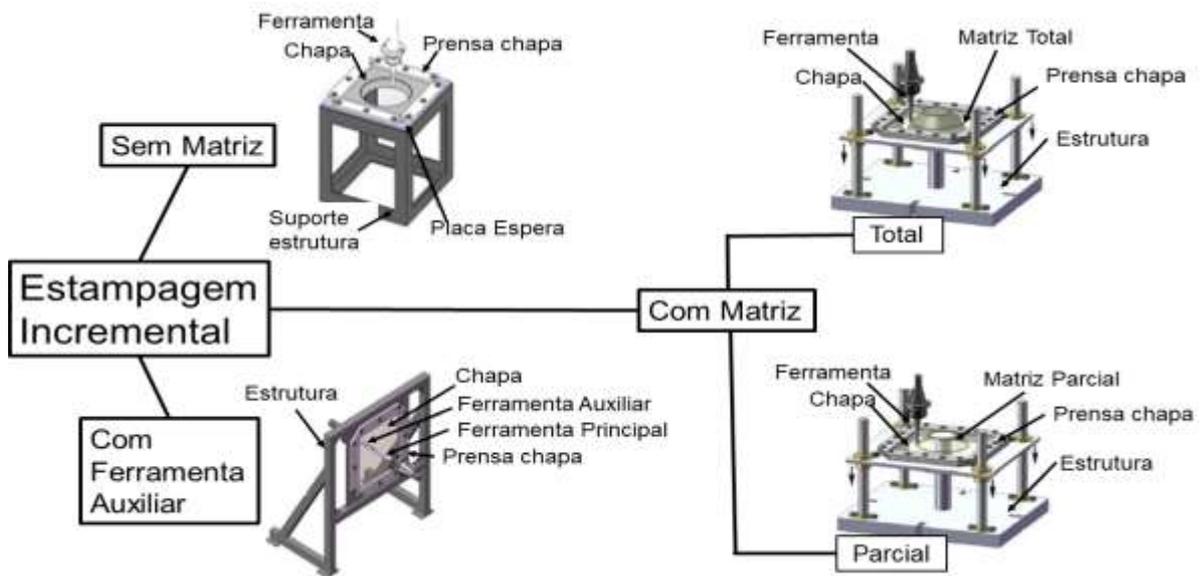
Figura 7: Princípio do processo de estampagem incremental



Fonte: [41] [42]

A estampagem incremental de chapa possui três variações principais, conforme ilustrado na Figura 8, denominadas estampagem incremental sem matriz, estampagem incremental com ferramenta auxiliar e estampagem incremental com matriz, esta última podendo ser parcial ou total. Independentemente da variante escolhida, todas requerem a presença de encostadores (prensa-chapas), máquinas-ferramentas CNC, ferramentas e estruturas [36] [43].

Figura 8: Tipos de estampagem incremental em chapas.



Fonte: Adaptado de [43]

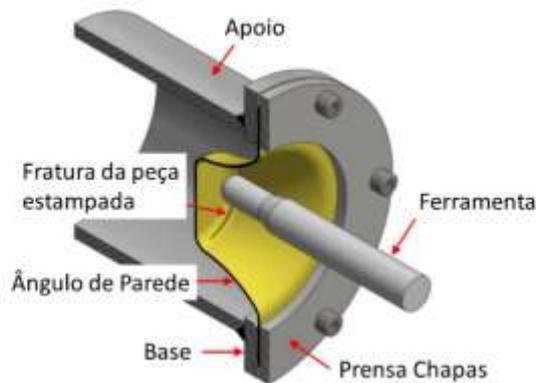
As variações no processo de Estampagem Incremental se fundamentam na quantidade de pontos de apoio ou ferramentas empregadas. A estampagem de ponto simples, que é o tipo mais comum conhecida como SPIF, o qual utiliza uma ferramenta realizando movimentos apenas em um único ponto de apoio sobre a chapa para realizar o processo. Além disso, existe a estampagem que utiliza uma segunda ferramenta na parte inferior, introduzindo um segundo ponto de apoio, denominada TPIF (*Two Points Incremental Sheet Forming*). Adicionalmente, há processos que fazem uso de múltiplos passes para concluir a estampagem [44].

### 2.3.1 Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF)

Na Estampagem Incremental de ponto simples (ou ponto único) a superfície da chapa não está suportada, ou seja, é deformada de uma forma “livre” pela

ferramenta que desliza sobre a superfície da chapa, conforme ilustrado na Figura 9 [45].

Figura 9: Estampagem incremental de ponto simples



Fonte: Adaptado de [46]

A SPIF, consiste na estampagem progressiva de uma chapa plana fixada a um suporte universal estacionário. A ferramenta de conformação com ponta esférica é controlada por um centro de usinagem ou torno CNC, realizando o contorno da geometria desejada. A abertura da placa de apoio (prensa-chapas) determina a área de trabalho da ferramenta de conformação, sem haver nenhuma matriz na parte inferior do dispositivo. À medida que a ferramenta de conformação entra sobre a chapa é realizado um incremento de estampagem na peça. Durante o processo são realizados diversos incrementos até que a chapa obtenha o formato desejado [42] [47].

### 2.3.2 Estampagem Incremental de Ponto Duplo (TIPIF)

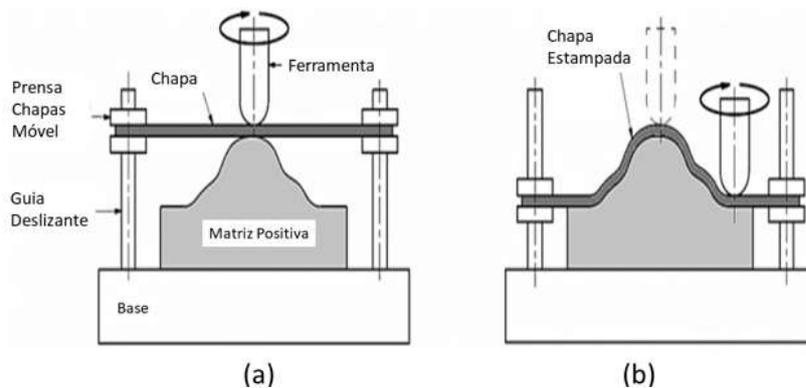
O processo TIPIF utiliza, além da ferramenta de conformação, um apoio na parte inferior da chapa para conferir maior precisão dimensional à peça estampada. Esse método pode ser realizado com matriz dedicada (positiva ou negativa) ou com matriz parcial (fixa ou móvel).

Na abordagem do TIPIF com matriz dedicada positiva, à medida que a chapa é conformada pela ferramenta, ocorre o deslocamento do prensa-chapas por meio de guias deslizantes no dispositivo de fixação. A matriz possui o perfil da peça desejada, gerando uma força de apoio durante o processo de conformação

proporciona um maior controle e precisão dimensional à peça durante o processo de estampagem conforme Figura 10(a) ilustra a situação inicial do processo, enquanto a Figura 10(b) representa a situação final [40] [45].

A TPIF pode ser realizada com um suporte de matriz positivo parcial ou com uma matriz totalmente positiva. A matriz positiva oferece uma maior restrição à deformação do material. Um exemplo interessante de aplicação da TPIF com matriz positiva foi evidenciado nos estudos de Scheffer (2019), nos quais foram desenvolvidas peças externas de um carro utilizando essa técnica [48] [49].

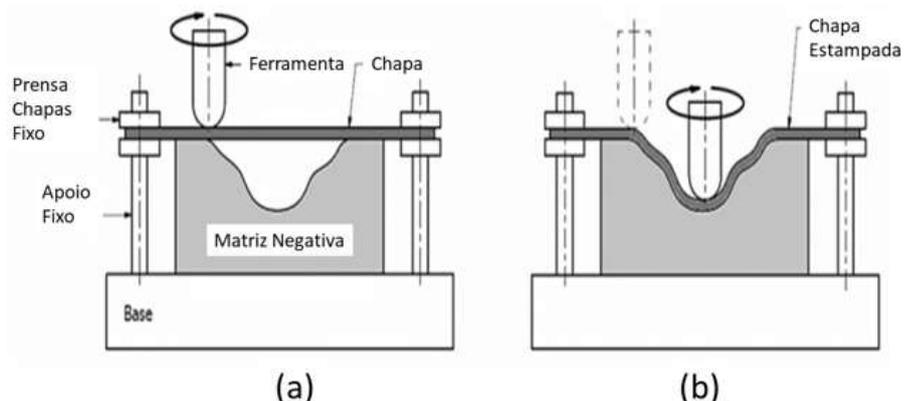
Figura 10: TPIF com matriz positiva: Situação inicial (a); Situação final (b)



Fonte: [40]

No processo TPIF com matriz dedicada negativa, que já possui o perfil desejado atuando como molde, não é necessário utilizar guias deslizantes. Pode-se empregar apoio e prensa-chapas fixos, conforme ilustrado na Figura 11 (a) que representa a situação inicial do processo e na Figura 11 (b) que representa a situação final do processo [40] [45].

Figura 11: TPIF com matriz negativa: Situação inicial (a); Situação final (b)



Fonte: Adaptado de [40]

Apesar do processo TPIF com matriz positiva demandar ferramental de maior complexidade incluindo partes móveis em comparação com o processo com matriz negativa, esse processo necessita de menor força para realizar a estampagem. Essa característica gera menores tensões residuais na chapa e, conseqüentemente menor retorno elástico [50].

## 2.4 PARÂMETROS DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

No processo de Estampagem Incremental diversos fatores como a velocidade de avanço ( $F_R$ ), a velocidade de rotação ( $N$ ), o incremento vertical ( $\Delta_z$ ), o raio da ferramenta ( $R_f$ ) e o tipo de lubrificante aplicado, exercem influência direta no processo, na capacidade de estampagem do material e na precisão dimensional do produto final.

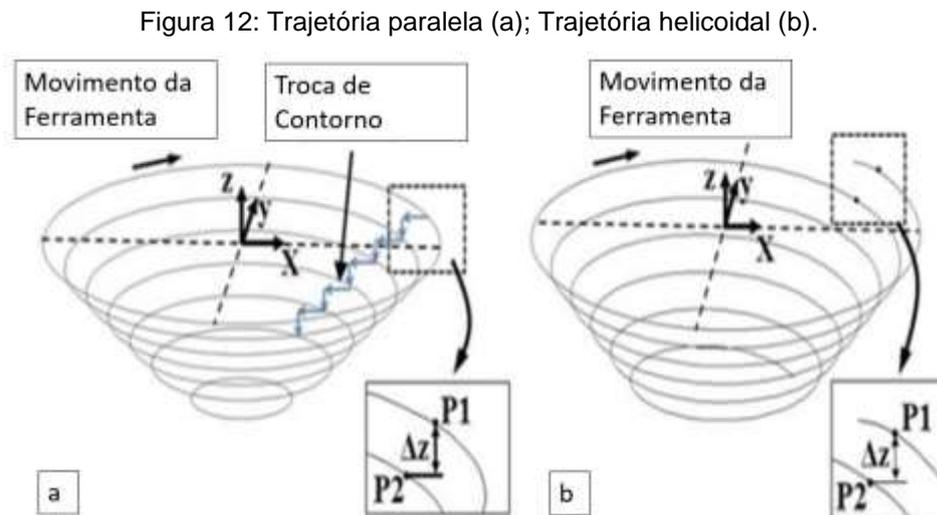
### 2.4.1 Trajetória da Ferramenta

Conforme apontado por Furlanetti (2014) [51], a Estampagem Incremental é um processo no qual a trajetória da ferramenta é pré-definida, resultando em deslocamentos graduais e localizados sobre a superfície de uma chapa. De acordo com Yamauchi (2019), [52], a deformação local na chapa metálica é induzida por uma ferramenta de geometria simples, podendo ser esférica ou semiesférica. No decorrer do processo, a ferramenta é fixada em uma máquina CNC, apresentando três ou mais graus de liberdade (eixos X, Y e Z), que executa movimentos específicos percorrendo um caminho predefinido ao longo da chapa com avanço incremental para realizar a conformação desejada. [53].

A maioria dos aplicativos de software disponíveis no mercado, projetados para gerar programas CNC para fresamento, também pode ser aplicada na geração de caminhos de ferramenta para a Estampagem Incremental [54]. O processo de preparação para iniciar a produção envolve a montagem do molde sobre a mesa de uma máquina CNC, em seguida a chapa é fixada ao longo de suas bordas por meio de uma estrutura de fixação (prensa-chapa). Uma placa de apoio é essencial para proporcionar uma mudança de ângulo na região de fixação e reduzir os efeitos de retorno elástico durante o avanço da conformação [1] [55].

A trajetória a ser executada pela ferramenta é determinada por programação *off-line* no ambiente CAD. Geralmente, a escolha recai sobre uma trajetória em espiral com avanço de profundidade. Em situações em que a geometria da peça é complexa, ferramentas de suporte ou moldes são empregados sob a chapa [36] [56].

O trajeto da ferramenta pode ser definido em paralelo e helicoidal. O contorno pré-programado na Figura 12(a) podemos visualizar a trajetória paralela de descida, a qual consiste em realizar o incremento de uma única vez na vertical e o deslocamento lateral ocorre sempre na mesma profundidade. No entanto na Figura 12(b) a ferramenta desloca-se gradualmente para baixo e completa o movimento descendente equivalente à profundidade incremental, com estratégia helicoidal, que é definida pelo movimento em hélice [36] [55].



Fonte: Adaptado de [55]

#### 2.4.2 Ferramenta para Estampagem Incremental

Para definir a ferramenta de conformação mais apropriada para o trabalho, é indispensável determinar o diâmetro ideal da esfera da ferramenta, sendo essencial conhecer a geometria, o tipo de material e a profundidade de conformação da chapa, no qual a esfera da extremidade da ferramenta irá percorrer [47].

O diâmetro da ponta da ferramenta pode variar conforme a aplicação. Diâmetros maiores são necessários para peças maiores, o que demanda mais força na máquina devido à maior área de contato. Além disso, o diâmetro influencia diretamente na qualidade da superfície, podendo resultar em ondulações dependendo do incremento utilizado [57].

A Figura 13 ilustra os dois principais tipos de ferramentas utilizadas na estampagem incremental. O primeiro tipo é uma ferramenta semiesfera, na qual o formato arredondado é integrado ao corpo da ferramenta. O segundo tipo é uma ferramenta esférica, similar a uma ponta de caneta, onde uma esfera de aço mais dura é montada na ponta da ferramenta e pode girar livremente. Em experimentos, constatou-se que a ferramenta com ponta esférica proporciona um acabamento de superfície de melhor qualidade. Isso ocorre porque a esfera pode girar com menos atrito em comparação com a ponta semiesfera [52].

Figura 13: Tipos de ferramentas: (a) Ferramenta rígida; (b) Ferramenta vertical rolante; (c) Ferramenta oblíqua rolante.



Fonte: [58]

O diâmetro da ponta da ferramenta, pode variar de acordo com a aplicação específica. Ferramentas com diâmetros maiores são geralmente utilizadas para a conformação de peças de dimensões mais amplas, exigindo maior força da máquina devido ao aumento da área de contato. Além disso, o diâmetro da ferramenta afeta diretamente a qualidade da superfície da peça, podendo gerar ondulações, dependendo do incremento adotado. De acordo com Jeswiet et al. [25], os diâmetros mais comuns estão próximos de 12 mm.

Estudos conduzidos sobre o tipo de ferramenta utilizada e como ela influencia os parâmetros do processo, foi realizado por [57], no qual ele comparou a influência de uma ferramenta elíptica com uma ferramenta semiesfera padrão em alumínio AA 5754, resultando uma redução de rugosidade superficial e à melhoria no acabamento final da peça com a ferramenta elíptica.

Geralmente, fresadoras utilizam ferramentas rotativas, enquanto outras máquinas usam ferramentas estáticas que não giram. O uso de ferramentas não

rotativas tem efeitos significativos nas condições de fricção em comparação com ferramentas rotativas. Para reduzir o atrito, costuma-se aplicar lubrificante na conformação a frio na superfície da chapa [54].

### **2.4.3 Lubrificação**

A lubrificação é um fator importante na Estampagem Incremental, esses tem a função de diminuir o atrito entre a ferramenta e a peça a ser estampada e ainda diminuir a rugosidade do produto final, ajuda também a resfriar a ferramenta e a peça e reduzir o desgaste dos mesmos diminuindo a força excedida pela ferramenta [31] [59] [46].

Vários estudos foram realizados para diminuir a rugosidade da superfície do metal estampado. Em chapas de aço DP780, Azevedo [60] conseguiu alcançar a menor rugosidade através do óleo Finarol B5746 e graxa AS-40 e em Alumínio AA1050 pelo óleo SAE 30 e graxa AL-M na qualidade de superfícies acabadas.

Nos estudos em chapas de cobre, Jawale [61] conseguiu a menor rugosidade da peça estampada com o uso do óleo mineral Castrol Magnaglide D68 comparado com as graxas Copaslip, AS40, Weicon Ni Special, Weicon montage.

### **2.4.4 Máquinas para Estampagem Incremental**

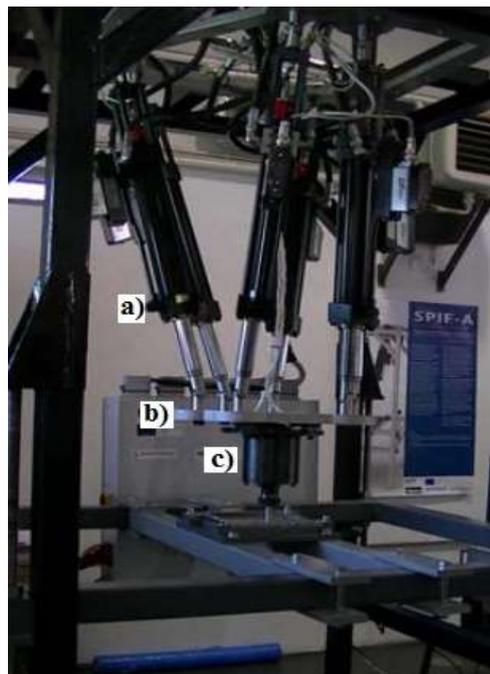
Estudos mostram que diferentes tipos de máquinas podem ser empregados no processo de Estampagem Incremental, cada uma adequada a variáveis específicas como disponibilidade, velocidade, volume de trabalho, rigidez e custos. Entre os principais tipos de máquinas destacam-se os robôs industriais e as fresadoras CNC [54] [62].

Diversas pesquisas têm explorado o uso de robôs no processo de Estampagem Incremental. Storkle (2018) [63] investigou a influência da força de suporte e do ângulo de inclinação da ferramenta na precisão geométrica utilizando dois robôs industriais. Belchior (2014) [64] aplicou a análise por elementos finitos para examinar as forças na interface entre a ferramenta e a chapa durante a Estampagem Incremental, com o objetivo de aprimorar a precisão da peça conformada por robôs. Linnemann (2019) [65] propôs dois conceitos inovadores que combinam tecnologias de conformação de alta velocidade, como conformação

eletro-hidráulica e eletromagnética, com uma abordagem incremental. Ele também detalhou as configurações necessárias para executar movimentos incrementais em sistemas que utilizam trilhos-guia e robôs industriais. Essas pesquisas evidenciam a relevância dos robôs no aprimoramento da precisão e eficiência dos processos de conformação incremental.

Uma máquina foi desenvolvida no departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro em Portugal, conhecida como SPIF-A (*Single Point Incremental Forming – Aveiro*) para atender à necessidade de conformação de materiais mais duros e espessos, exigindo maiores cargas admissíveis. Baseada em uma plataforma de Stewart com cinemática paralela e seis graus de liberdade, a máquina utiliza atuadores hidráulicos para proporcionar maior precisão e reduzir forças laterais durante o processo de conformação. A Figura 14 ilustra as partes da máquina e seu eixo principal (*Spindle*) é projetado para girar por atrito, sem acionamento direto, conferindo maior rigidez estrutural. A SPIF-A permite movimentos simultâneos de translação e rotação, ampliando sua eficiência e precisão no processo de estampagem incremental, tornando-a uma alternativa avançada para aplicações que demandam alta resistência mecânica [66].

Figura 14: Máquina SPIF-A: a) Atuadores Cinemáticos; b) Base Móvel da Plataforma Stewart; c) Conjunto do Spindle



Fonte: [66]

Os robôs industriais são amplamente utilizados na Estampagem Incremental devido à sua flexibilidade e capacidade de operação em múltiplos eixos. Diferente das máquinas CNC tradicionais, os robôs possuem articulações que permitem uma maior liberdade de movimento, sendo capazes de trabalhar em geometrias complexas e em diferentes ângulos de abordagem [67].

A fresadora CNC é uma máquina-ferramenta amplamente utilizada na indústria para usinagem de peças complexas. No contexto da estampagem incremental, se destaca pela sua capacidade de controlar com precisão os movimentos da ferramenta em múltiplos eixos (X, Y e Z), permitindo que a ferramenta de conformação siga trajetórias detalhadas e complexas na chapa metálica garantindo uma alta qualidade no acabamento das peças e uma maior consistência na produção de lotes [63].

Além disso, as fresadoras CNC permitem uma programação *off-line* das trajetórias da ferramenta através de software CAD/CAM, o que facilita ajustes rápidos e econômicos no design da peça sem a necessidade de grandes alterações no setup da máquina. Isso torna as fresadoras CNC ideais para prototipagem rápida e para a fabricação de peças personalizadas ou em pequenos lotes. Outra vantagem importante é a capacidade de operação contínua e automatizada, reduzindo o tempo de operação e aumentando a eficiência do processo de Estampagem Incremental [68].

Castelan (2007) [69] destaca, em seu estudo, a utilização de máquinas CNC como equipamentos fundamentais para a execução da Estampagem Incremental em suas diferentes modalidades. Sena (2009) [37], por sua vez, reforça a aplicação desse processo em máquinas de comando numérico tridimensionais, enfatizando a integração entre hardware e software das fresadoras CNC como o principal meio de viabilizar a conformação incremental. Complementarmente, Sy (2009) [70] descreve, em sua tese, o emprego de máquinas CNC de três eixos em experimentos com chapas metálicas, destacando sua relevância prática, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15: Máquina CNC ROMI DISCOVERY 760 de três eixos utilizada na estampagem incremental de chapas.



Fonte: [71]

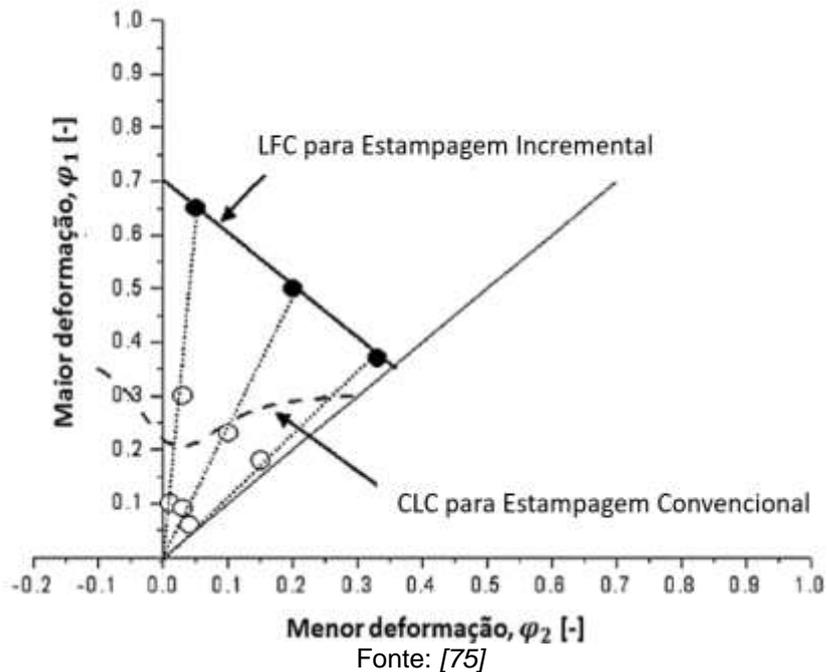
Para a fixação da chapa para estampagem incremental em robôs e centros de usinagem CNC é uma etapa essencial no processo de Estampagem Incremental, pois assegura que a chapa metálica permaneça estável e corretamente posicionada durante toda a operação de conformação [54] [72].

Geralmente, o sistema de fixação envolve uma estrutura de moldura ou uma placa de prensa que segura a chapa ao longo de suas bordas. Esse sistema de fixação é projetado para aplicar uma pressão uniforme, garantindo que a chapa não se mova durante o processo, mesmo quando submetida às forças de conformação aplicadas pela ferramenta de estampagem, diminuindo o tempo de setup para fixação da chapa [73] [74].

## 2.5 LIMITES DE ESTAMPABILIDADE

No processo de Estampagem Incremental, os limites de deformação diferem dos apresentados pela Curva Limite de Conformação (CLC), exibindo uma maior estampabilidade em comparação à Estampagem Convencional. Nesse contexto, a estampabilidade de um material na Estampagem Incremental é melhor descrita pela Linha de Fratura na Conformação (LFC), que varia de acordo com parâmetros do processo, como o diâmetro da ferramenta e o incremento vertical [75]. A Figura 16 mostra a comparação entre a CLC e a LFC para um determinado material.

Figura 16: Comparação entre a CLC e a LFC.

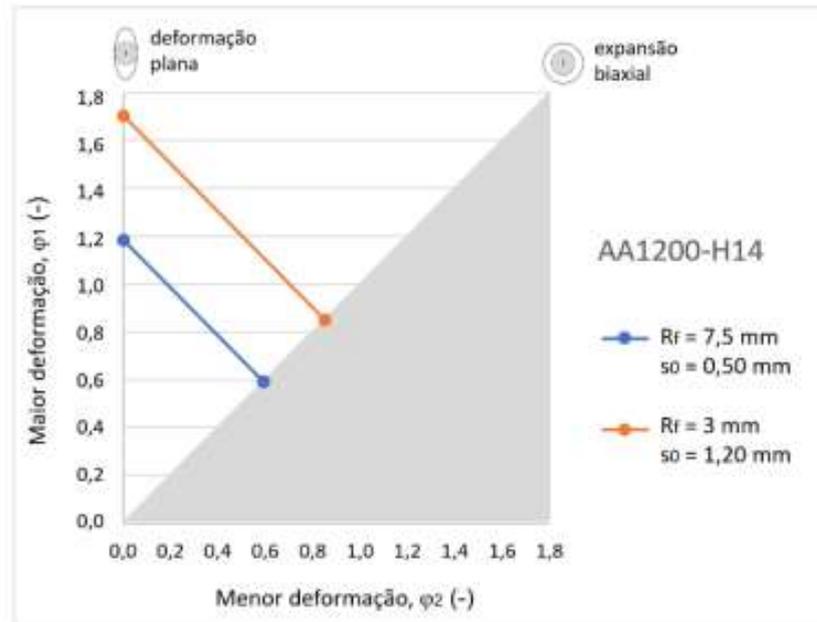


Conforme ilustrado na Figura 16 a LFC apresenta limites de conformação superiores aos da CLC. A LFC é definida como uma linha reta com inclinação na região positiva da menor deformação,  $\varphi_2$ . Observa-se também que, no estado plano de deformação (quando  $\varphi_2 = 0$ ), a estampabilidade é consideravelmente elevada.

A LFC pode ser determinada experimentalmente no processo de Estampagem Incremental até que ocorra a fratura na peça, utilizando chapas gravadas por processo eletroquímico de círculos. Após a deformação, os círculos se transformam em elipses, e a elipse próxima à trinca é utilizada para determinar as deformações  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$ , que servem como base para o primeiro ponto de referência na LFC [76].

Segundo [46], na Figura 17 apresenta o Diagrama Limite de Conformação (DLC) para o alumínio 1200 H14, obtidas por um método analítico que considera o raio da ferramenta ( $R_f$ ) e a espessura inicial da chapa ( $s_0$ ). Com um coeficiente angular de -1, a deformação na espessura ( $\varphi_3$ ) é constante. Em deformação plana ( $\varphi_2 = 0$ ) e expansão biaxial ( $\varphi_1 = \varphi_2$ ), as curvas refletem a influência dos parâmetros sobre a conformação, evidenciando diferentes comportamentos conforme variam o raio da ferramenta e a espessura.

Figura 17: DLC obtido pelo método analítico para o alumínio 1200 H14.



Fonte: Adaptado de Schreiber (2022) [46]

Com base na Lei de Conservação de Volume, é possível determinar a deformação na espessura da chapa  $\varphi_3$ . Essa lei afirma que, para um material que se deforma plasticamente, o volume permanece constante durante o processo de conformação. Assim, a relação entre as deformações nas direções longitudinal, largura e espessura da chapa pode ser expressa pela Equação (2) como:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad [-] \quad (2)$$

Onde:

$\varphi_1$  = deformação verdadeira no comprimento [-]

$\varphi_2$  = deformação verdadeira na largura [-]

$\varphi_3$  = deformação verdadeira na espessura [-]

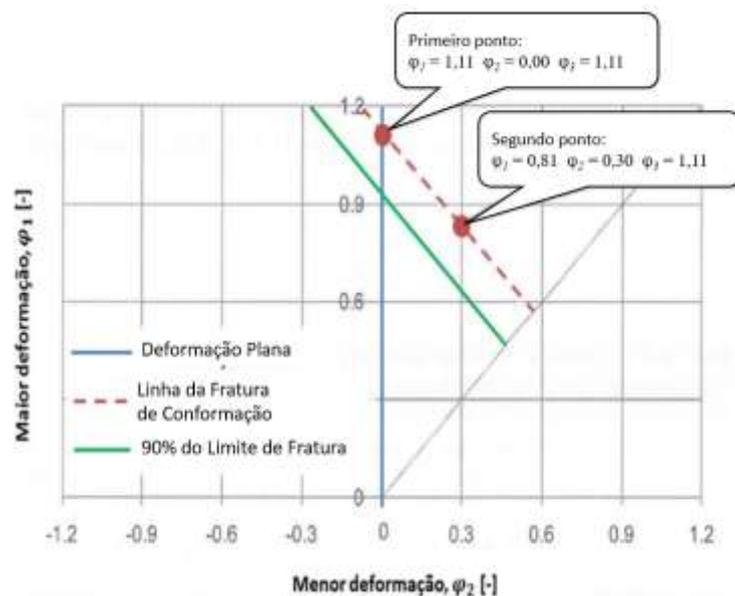
Assim, a deformação na espessura  $\varphi_3$  pode ser isolada e calculada levando em consideração as deformações nas outras direções. Essa deformação está relacionada à espessura crítica, que representa a menor espessura possível para o processo de Estampagem Incremental, conforme indicado na Equação (3). É importante ressaltar que essa deformação mantém o mesmo valor,

independentemente do tipo de deformação ao qual a chapa é submetida durante o processo [77].

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (3)$$

O segundo ponto para definição da LFC é obtido mantendo constante o valor da deformação  $\varphi_3$  e escolhendo um valor arbitrário para a deformação  $\varphi_2$ . Dessa forma é possível calcular a deformação  $\varphi_1$  para o segundo ponto da LFC pela lei de constância de volume. A Figura 18 apresenta um exemplo de LFC, na qual foram definidas as deformações  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  para o primeiro ponto, por meio de medição da elipse gravada na chapa estampada. E após o cálculo da deformação  $\varphi_3$  (constante para o material ensaiado) foi arbitrariamente definida a deformação  $\varphi_2$  e calculada a deformação  $\varphi_1$  para esta nova condição. Assim é estabelecida a LFC ligando estes dois pontos [46].

Figura 18: Linha de Fratura de Conformação.



Fonte: Adaptado de Gouveia (2011) [77]; Schreiber (2022) [46].

A espessura crítica para o processo de Estampagem Incremental também pode ser determinada a partir da deformação na espessura  $\varphi_3$ , que é obtida pelo logaritmo natural da razão entre a espessura final e a espessura inicial da chapa, conforme descrito na Equação (4) [76].

$$\varphi_3 = \ln \frac{s_1}{s_0} [-] \quad (4)$$

Onde:

$s_0$  = espessura inicial da chapa [mm];

$s_1$  = espessura final da chapa [mm];

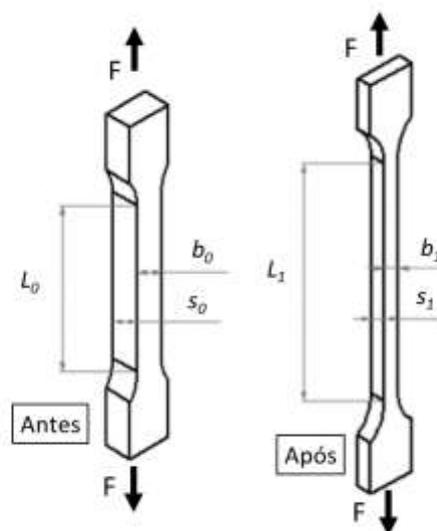
Ao isolar a espessura final  $s_1$ , é possível calcular o valor menor da espessura que a chapa pode atingir na Estampagem Incremental (variando apenas se forem alterados os parâmetros do processo), como indicado na Equação (5) [46].

$$s_1 = s_0 \cdot e^{\varphi_3} \text{ [mm]} \quad (5)$$

### 2.5.1 Deformações no Processo de Estampagem

O processo de conformação mecânica visa deformar plasticamente o material para obter a geometria desejada, aplicando forças que modificam sua forma. As deformações podem ser classificadas como absoluta, relativa ou verdadeira [78] e seus cálculos são baseados em ensaios de tração convencional. A Figura 19 apresenta as geometrias principais usadas para definir essas deformações.

Figura 19: Dimensões esquemáticas antes e após ensaio de tração.



Fonte: Adaptado de [79]

A deformação absoluta no comprimento  $\Delta l$  é definida pela Equação (6):

$$\Delta l = l_1 - l_0 \text{ [mm]} \quad (6)$$

A deformação absoluta na largura  $\Delta b$  é definida pela Equação (7):

$$\Delta b = b_1 - b_0 \text{ [mm]} \quad (7)$$

A deformação absoluta na espessura  $\Delta s$  é definida pela Equação (8):

$$\Delta s = s_1 - s_0 \text{ [mm]} \quad (8)$$

A deformação relativa no comprimento  $\varepsilon_l$  é definida pela Equação (9):

$$\varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (9)$$

A deformação relativa na largura  $\varepsilon_b$  é definida pela Equação (10):

$$\varepsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (10)$$

A deformação relativa na espessura  $\varepsilon_s$  é definida pela Equação (11):

$$\varepsilon_s = \frac{s_1 - s_0}{s_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (11)$$

*Onde:*

$\varepsilon_l$  = Deformação relativa no comprimento [%]

$\varepsilon_b$  = Deformação relativa na largura [%]

$\varepsilon_s$  = Deformação relativa de espessura [%].

$B_0$  = Largura Inicial [mm]

$b_1$  = Largura fina [mm]

Todas as dimensões utilizadas nas Equações (8) a (11) podem ser vistas na Figura 19.

As deformações verdadeiras são parâmetros fundamentais para a análise de processos de conformação de chapas metálicas. Compreender as deformações que ocorrem durante o processo é essencial, pois fornece informações valiosas sobre o estado das tensões internas do material, além de permitir a identificação de oportunidades para otimizar o processo, como a redução do número de etapas necessárias. Além disso, esse conhecimento é importante para determinar o limite máximo de deformação que o material pode suportar sem comprometer sua integridade estrutural [79].

A deformação verdadeira no comprimento  $\varphi_1$  é definida pela Equação (12):

$$\varphi_1 = \ln \left( \frac{l_1}{l_0} \right) [-] \quad (12)$$

Onde:

$l_0$  = Comprimento inicial [mm]

$l_1$  = Comprimento final [mm]

A deformação verdadeira na largura  $\varphi_2$  é definida pela Equação (13):

$$\varphi_2 = \ln \left( \frac{b_1}{b_0} \right) [-] \quad (13)$$

A deformação verdadeira na espessura  $\varphi_3$  é definida pela Equação (14):

$$\varphi_3 = \ln \left( \frac{s_1}{s_0} \right) \quad (14)$$

As deformações em um componente estampado diferem de um ponto para outro. Essas variações podem ser analisadas por meio de gravações eletroquímicas circular na superfície da peça antes da estampagem. Na Figura 20, é possível observar a gravação eletroquímica em uma peça, evidenciando as deformações resultantes do processo de estampagem [68].

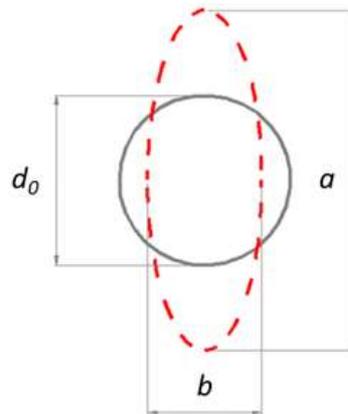
Figura 20: Exemplo de deformações representadas pela gravação eletroquímica de círculos na peça.



Fonte: [80]

Após o processo de estampagem, as deformações dos círculos da gravação eletroquímica são avaliadas, fornecendo informações essenciais sobre as regiões críticas. A Figura 21 ilustra um círculo esquemático, onde a elipse representa a forma medida após a estampagem. A espessura da chapa é representada por  $s_0$  antes da estampagem e  $s_1$  após o processo [79].

Figura 21: Medição prática da deformação do círculo inicial e da elipse após a deformação.



Fonte: Adaptado de [79]

As três deformações principais são calculadas pelas Equações (15), (16) e (17):

$$\varphi_1 = \ln \left( \frac{a}{d_0} \right) \quad (15)$$

$$\varphi_2 = \ln\left(\frac{b}{d_0}\right) \quad (16)$$

$$\varphi_3 = \ln\left(\frac{s_1}{s_0}\right) \quad (17)$$

Onde:

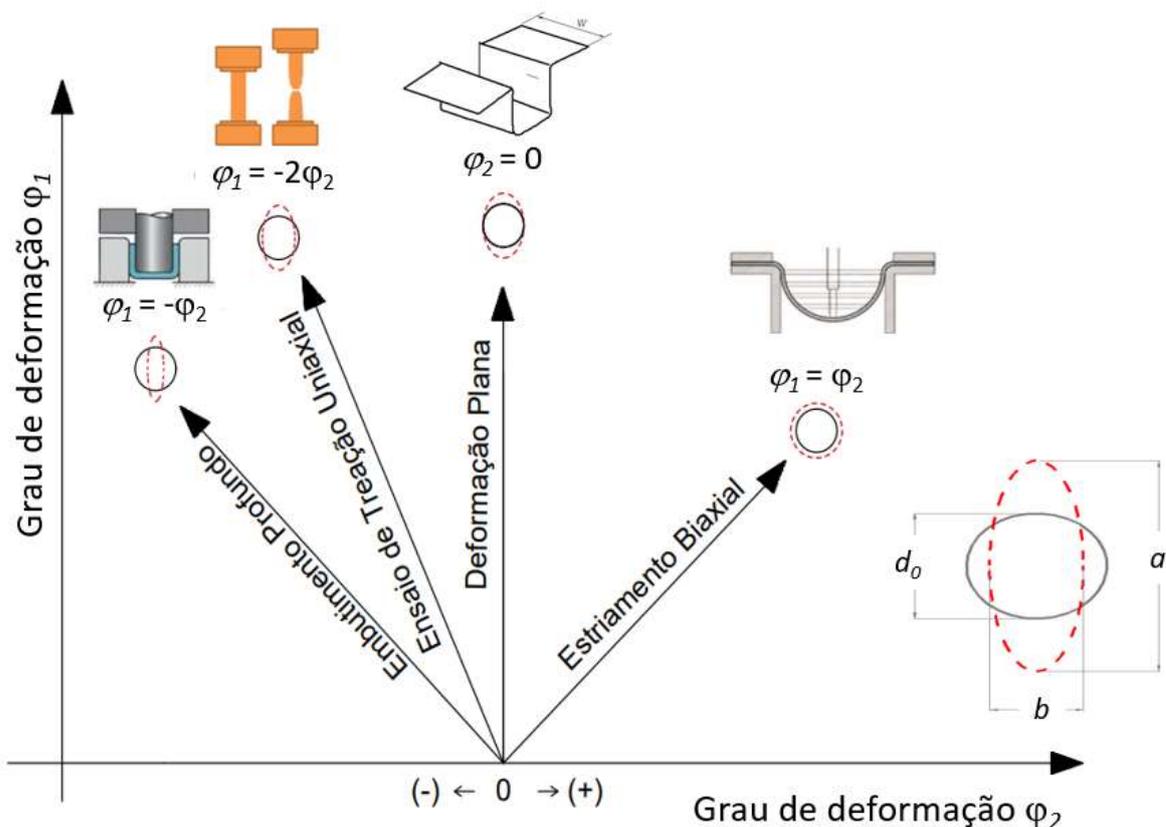
a = Comprimento do eixo maior da elipse [mm]

b = Comprimento de eixo menor da elipse [mm]

$d_0$  = Diâmetro inicial [mm]

As medições dos círculos deformado resultam em uma relação entre as deformações presentes na peça. A Figura 22 ilustra como as deformações podem ser classificadas com base nas solicitações que ocorrem durante o processo de estampagem, permitindo uma análise detalhada do comportamento do material sob diferentes condições de esforço [68].

Figura 22: Tipos de deformação em chapas metálicas.



Fonte: Adaptado de [79]; [36].

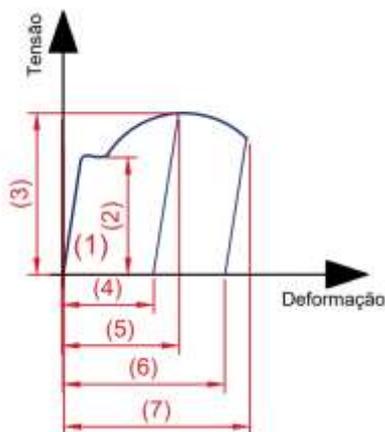
## 2.5.2 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é usado para caracterizar propriedades mecânicas de materiais, é considerado como um ensaio universal devido sua simplicidade, rapidez na execução e capacidade de fornecer informações como [81] [82]:

- Módulo de Elasticidade ( $E$ ) [GPa];
- Tensão de Escoamento Convencional ( $\sigma_{0,2}$ ) ou ( $\sigma_e$ ) [MPa];
- Limite de Resistência ou Tensão Máxima ( $\sigma_B$ ) [MPa];
- Limite de Ruptura ( $\sigma_R$ ) [MPa];
- Alongamento ( $\delta$ ) [%]
- Grau de encruamento ( $n$ )
- Índice de anisotropia  $\textcircled{R}$

A Figura 23 apresenta o diagrama convencional de Tensão x Deformação Relativa, que demonstra o comportamento do material durante o ensaio de tração. Observa-se que os resultados desse tipo de ensaio são fortemente influenciados por fatores como temperatura, velocidade de deformação, tamanho de grão, porcentagem de impurezas e anisotropia ( $r$ ) do material [83].

Figura 23: Diagrama convencional Tensão x Deformação Relativa.



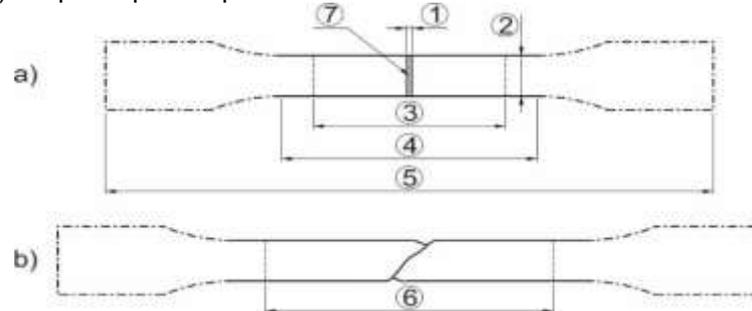
1. Módulo de Elasticidade (Lei de Hooke) ( $E$ );
2. Tensão de Escoamento ( $\sigma_e$ );
3. Limite de Resistência ( $\sigma_B$ );
4. Alongamento na Força Máxima (alongamento uniforme)
5. Alongamento total na Força Máxima
6. Alongamento de Ruptura
7. Alongamento Total de Ruptura ( $\delta_{Rupt}$ )

Fonte: Adaptado de [81]

O ensaio de tração, conforme estabelecido pela norma ABNT 6152, envolve a fixação de um corpo de prova nas garras de uma máquina, garantindo que ele seja submetido a um estado uniaxial de tensões. Durante o teste, o corpo de prova é tracionado a uma velocidade constante até ocorrer a ruptura, enquanto são

registrados a força aplicada ( $F$ ) e o comprimento instantâneo ( $l$ ) [84]. A Figura 24 ilustra o formato típico dos corpos de prova confeccionados com seção retangular, e a Tabela 1 apresenta os detalhes dimensionais desses corpos de prova.

Figura 24: Corpos de prova usinados de seção retangular para ensaio de tração. a) Corpo de prova antes do ensaio. b) Corpo de prova após o ensaio.



Fonte: [85]

Tabela 1: Terminologias da geometria dos corpos de prova usinados de seção retangular para ensaio de tração.

Número de referência	Símbolo	Unidade	Designação
1	$s_0$	mm	Espessura de um corpo de prova plano.
2	$b_0$	mm	Largura do comprimento paralelo do corpo de prova plano.
3	$l_0$	mm	Comprimento de medida original.
4	$l_c$	mm	Comprimento paralelo.
5	$l_t$	mm	Comprimento total do corpo de prova.
6	$l_f$	mm	Comprimento de medida final após ruptura.
7	$A_0$	mm <sup>2</sup>	Área da seção transversal original do comprimento paralelo

Fonte: [85]

Onde:

$A_0$  = Área inicial [mm<sup>2</sup>]

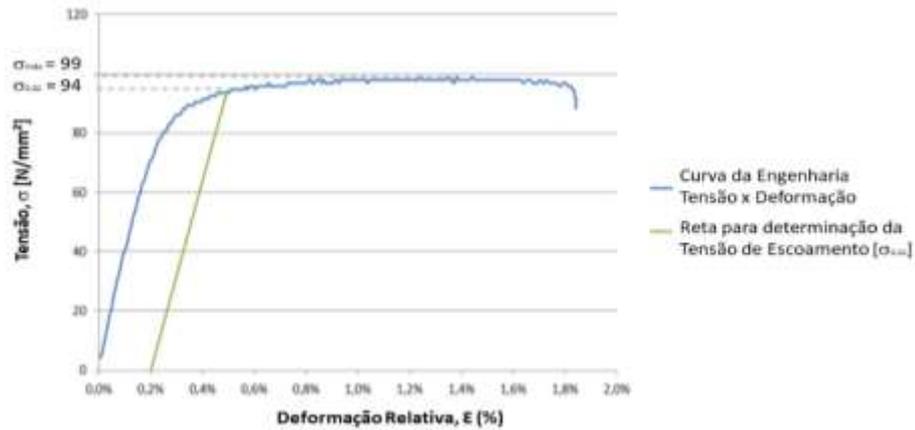
Para elaborar a Curva Tensão ( $\sigma$ ) x Deformação Relativa ( $\epsilon$ ), é necessário calcular a tensão ( $\sigma$ ) dividindo a força medida ( $F$ ) pela área inicial ( $A_0$ ) da seção transversal do corpo de prova, conforme indicado na Equação (18):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (18)$$

Conforme definido por Schreiber (2018) [76], a curva de engenharia "Tensão x Deformação" para o alumínio 1200 H14 foi estabelecida a partir dos ensaios de tração, apresentando uma tensão de escoamento  $\sigma_{0,2\%}$  de 94 N/mm<sup>2</sup>, tensão

máxima  $\sigma_{\text{máx}}$  de 99 N/mm<sup>2</sup> e uma deformação relativa  $\epsilon$  de 1,8%, conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25: Curva de engenharia "Tensão x Deformação" alumínio 1200 H14 para ensaio de tração.



Fonte: Schreiber [76]

Para determinar a deformação relativa ( $\epsilon$ ) em cada instante do ensaio, calcula-se a deformação absoluta no comprimento da chapa ( $\Delta l$ ) dividindo-a pelo comprimento inicial ( $l_0$ ). A deformação absoluta ( $\Delta l$ ) é a diferença entre o comprimento instantâneo e o comprimento inicial da chapa durante o ensaio [85]. Assim, a deformação relativa é dada pela equação 19:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \therefore \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100 \text{ [%]} \quad (19)$$

Quanto a deformação verdadeira representada em ensaios de tração, é calculada considerando a relação entre a variação de comprimento da amostra e seu comprimento instantâneo, utilizando a equação (20):

$$\epsilon_{\text{verdadeira}} = \ln(1 + \epsilon_{\text{engenharia}}) \quad (20)$$

### 2.5.3 Curva de Escoamento

Em um ensaio de tração uniaxial, a tensão de escoamento ( $k_f$ ) é a Tensão Limite de Escoamento ( $\sigma_e$ ) que corresponde ao início do escoamento do material, ou

seja, ao ponto em que a deformação plástica se inicia. A partir desse ponto, o material continua a se deformar até atingir a tensão máxima ( $\sigma_B$ ).

As curvas de escoamento, referente a orientação do corpo de prova do sentido de laminação no processo de deformação a frio. Conforme Schaeffer [86], na equação (21) é utilizada para descrever esse comportamento:

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (21)$$

Onde:

C = uma constante do material, para  $\varphi = 1$  [MPa]

n = índice de encruamento do material [-]

Os demais dados necessários para a determinação algébrica da curva de escoamento são:

- A deformação relativa ( $\mathcal{E}$ ) no instante de tensão máxima ( $\sigma_B$ );
- Para o instante da tensão máxima ( $\sigma_B$ ), tem-se que a deformação ( $\varphi$ ) é igual ao coeficiente de encruamento ( $n$ ).

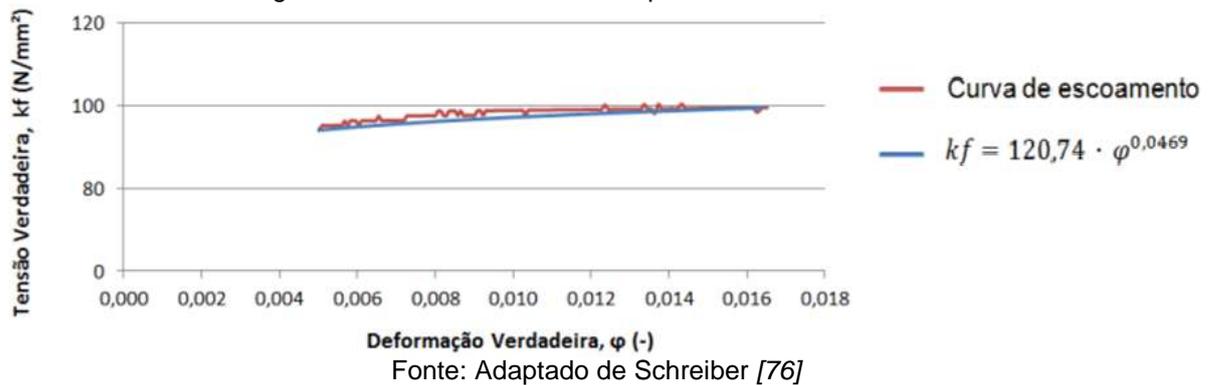
$$\varphi = n \quad (22)$$

- A deformação verdadeira ( $\varphi$ ) correspondente à tensão máxima ( $\sigma_B$ ) é calculada com o valor da deformação relativa ( $\mathcal{E}$ ) no instante de tensão máxima ( $\sigma_B$ ) retirado do ensaio de tração.

$$\varphi = \ln(1 + \mathcal{E}) \quad (23)$$

A curva da Figura 26, representa a relação entre a tensão de escoamento e a deformação do material, fornecendo informações essenciais sobre o comportamento mecânico do alumínio 1200 H14 durante o processo de conformação [76].

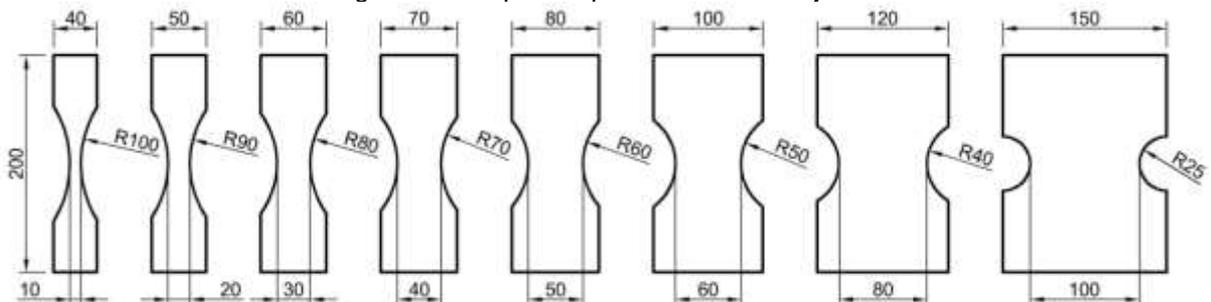
Figura 26: Curva de escoamento para alumínio 1200 H14.



### 2.5.4 Ensaio de Nakajima

O Ensaio Nakajima é empregado para determinar a CLC, que define o limite máximo de deformação que a chapa metálica pode suportar sem falhar. Essa informação serve como referência essencial nos processos de Estampagem Convencional. Para a realização do ensaio, são confeccionados corpos de prova a partir de chapas na espessura especificada, com dimensões padronizadas, conforme Figura 27.

Figura 27: Corpos de prova ensaio Nakajima.



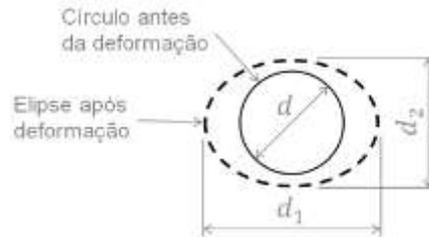
Fonte: [76]; [87]

A diferença na geometria dos corpos de prova gera os diferentes estados de deformação na chapa. Estes corpos de prova recebem gravação eletroquímica com uma grade de círculos [87]

Cada corpo de prova é deformado em uma prensa por meio de um punção semiesférico até que o material comece a apresentar trincas. Durante a deformação da chapa, os círculos previamente gravados se transformam em elipses. A partir das medições dessas elipses, realizadas próximo às trincas, é possível determinar a maior deformação  $\varphi_1$  e a menor deformação  $\varphi_2$  sofridas pelo material [88]. A Figura

28 ilustra o diâmetro do círculo gravado na chapa, representado por  $d$ , além do comprimento da elipse, indicado por  $d_1$ , e a largura da elipse, indicada por  $d_2$ .

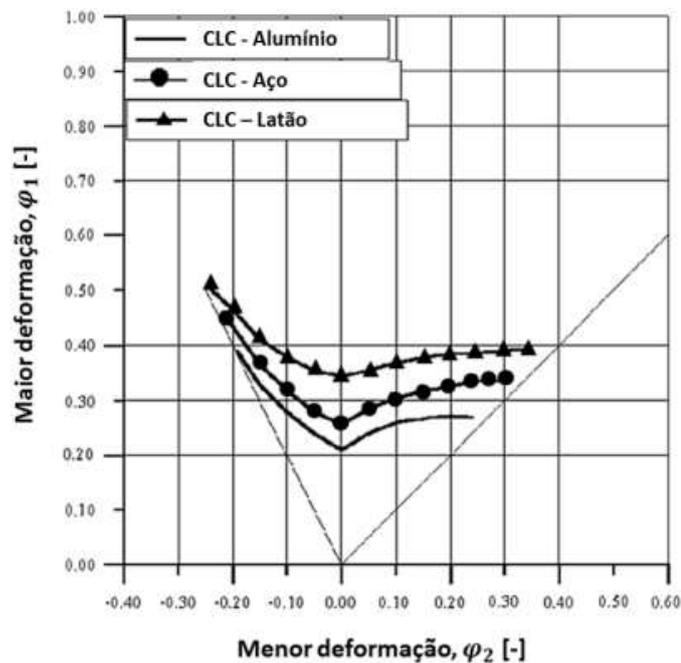
Figura 28: Representação do círculo gravado na chapa e a elipse formada após a deformação.



Fonte: [76]

A partir da determinação das deformações  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  das equações 14 e 15 respectivamente, em cada corpo de prova, é possível gerar a CLC, que define os limites de deformação que o material pode suportar para diferentes estados de tensão. De acordo com a CLC, qualquer deformação localizada abaixo da curva indica que o material pode suportar o processo de conformação sem que ocorram trincas. Por outro lado, deformações que ultrapassam a CLC indicam que o material não será capaz de resistir e, portanto, trincas e falhas podem ocorrer. A Figura 29 ilustra as CLC obtidas para diferentes materiais, como alumínio, aço e latão, com base nos resultados experimentais [89].

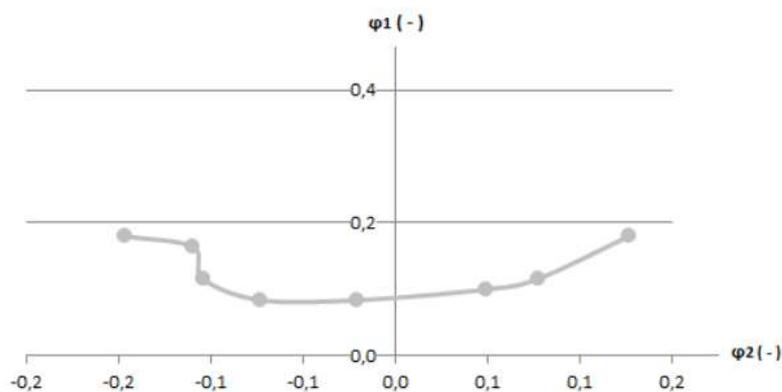
Figura 29: CLC de Alumínio, Aço e Latão.



Fonte: [89]

Na Figura 30, representa a CLC do alumínio 1200 H14 submetido ao ensaio de Nakajima conforme [76], a qual define os limites de deformação durante ao processo de estampagem convencional.

Figura 30: CLC para alumínio 1200 H14.



Fonte: [76]

### 2.5.5 Limites de Conformação da Peça

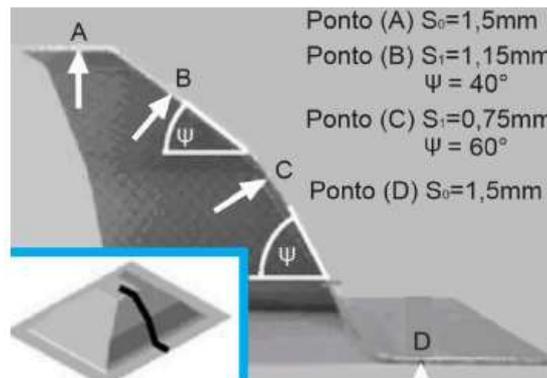
Os processos de conformação, como forjamento e estampagem convencional, apresentam limitações quanto aos ângulos máximos permitidos para a manufatura das peças. Esses limites definem as regiões viáveis para a fabricação, garantindo que a peça possa ser conformada sem gerar defeitos, como fraturas ou deformações indesejadas. Pesquisas apontam que o ângulo máximo da parede da chapa na estampagem incremental é de  $65^\circ$ . 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. [53] [80].

Na conformação assimétrica, o controle rigoroso do ângulo da parede durante o processo de Estampagem Incremental é de fundamental importância. Portanto, o projetista deve atentar-se cuidadosamente ao desenvolver o produto no software CAD, assegurando que o ângulo da parede da peça projetada esteja dentro dos limites permitidos pelas propriedades do material da chapa, de forma a evitar falhas ou deformações inadequadas durante o processo de conformação [37] [47].

A espessura da chapa está diretamente relacionada à preservação do volume e ao ângulo da parede, conforme ilustrado na Figura 31. Essa relação evidencia falhas ou redução da espessura da parede quando são aplicados ângulos

maiores que os permitidos, especialmente em um único passe durante o processo de conformação [80].

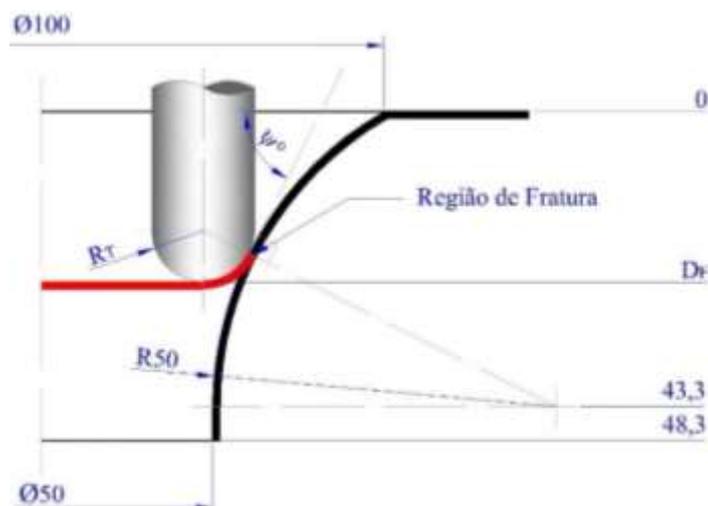
Figura 31: Redução da espessura de parede.



Fonte: [59]

De acordo com o estudo realizado por Rodrigues et al. [82], a região típica de fratura é identificada como a área onde uma linha reta traçada a partir do centro da ferramenta de estampagem que intercepta perpendicularmente a superfície de contato da chapa, conforme ilustrado na Figura 32. Para determinar o ângulo da parede ( $\Psi$ ), é necessário traçar uma nova linha perpendicular à anterior. O ângulo formado entre essa nova linha e a linha horizontal correspondente ao plano inicial de estampagem do *blank* que define o ângulo de parede ( $\Psi$ ).

Figura 32: Método geométrico para determinação do ângulo de parede ( $\Psi$ ).



Fonte: Rodrigues (2010) [82]; [87]

O ângulo máximo na Estampagem Incremental é determinado pela relação entre a espessura da chapa e seu ângulo de conformação, conforme descrito pela equação matemática conhecida como "lei dos senos" [36] [50]; representada na Equação (24):

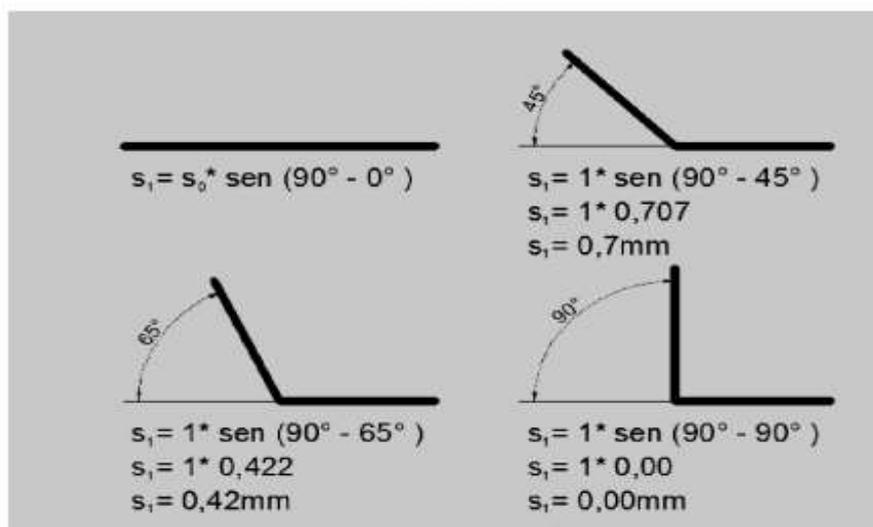
$$s_1 = s_0 * \text{sen}(90 - \Psi) [^\circ] \quad (24)$$

Onde:

$\Psi$  = ângulo de parede da peça estampada [°].

A lei dos senos não prevê diretamente como ocorre a variação de espessura durante o processo de Estampagem Incremental. Para a maioria dos materiais, o ângulo de inclinação ideal é de 45°, pois permite a conformação sem causar um afinamento excessivo das paredes. No entanto, ângulos mais elevados, próximos de 90°, tendem a gerar seções extremamente finas quando a conformação é realizada em um único passe, o que pode resultar em problemas de ruptura do material. A relação entre o ângulo de inclinação da parede da chapa (cerca de 65°) e a redução de espessura é um fator crítico a ser considerado para evitar falhas durante o processo, conforme mostra a Figura 33, [53]. Apud [80].

Figura 33: Relação entre ângulo de parede e a espessura da chapa no processo de estampagem incremental



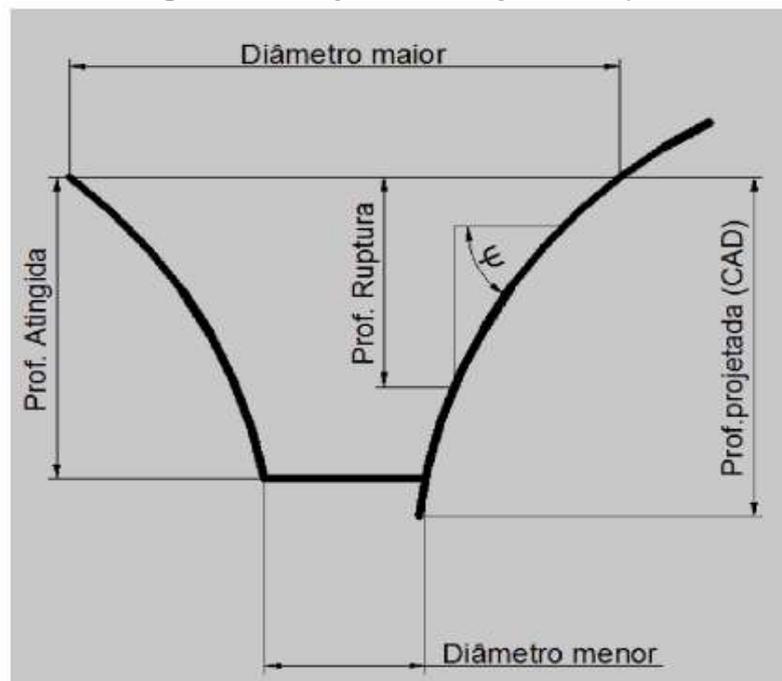
Fonte: [53]. Apud [80]

Segundo pesquisas de [73] Apud [80] sobre o limite de conformação de chapas de alumínio na indústria automobilística identificaram dois parâmetros importantes:

- Limite de espessura
- Ângulo limite de estampagem

Esses estudos revelaram que, ao variar a inclinação da chapa ao longo da profundidade do processo, é possível alcançar uma maior capacidade de estampagem do que ao manter uma inclinação constante. Durante os testes de Estampagem Incremental, observou-se que o ângulo de parede ( $\Psi$ ) aumentava gradativamente conforme a profundidade de estampagem também se expandia. Isso sugere que ajustes na inclinação podem ser uma estratégia eficaz para melhorar a conformabilidade do material conforme Figura 34 [73].

Figura 34: Variação da inclinação da chapa.



Fonte: Adaptado de [90].

### 2.5.6 Discrepância Geométrica

Durante o processo de Estampagem Incremental, além da deformação plástica desejada, ocorre também uma deformação elástica que afeta diretamente a qualidade e a precisão geométrica da peça, que ao ser liberada, provoca pequenas

variações na forma final da peça em comparação com o modelo original projetado no CAD. Essas diferenças geométricas podem comprometer a precisão do produto acabado, exigindo ajustes adicionais no processo para minimizar o efeito do retorno elástico e garantir a conformidade dimensional [80].

Uma alternativa para identificar a discrepância geométrica é utilizar uma máquina de medição tridimensional para medir a peça acabada. Esse equipamento realiza a captura precisa de pontos na superfície da peça, permitindo uma comparação direta com o modelo CAD original. Dessa forma, é possível calcular o desvio entre o modelo teórico e as variações resultantes do retorno elástico da chapa.

## 2.6 ALUMÍNIO 1200 H14

O alumínio é dos metais não ferrosos mais consumido na indústria, juntamente com o ferro/aço. Descoberto em 1809 pelo Sir Humphrey Davy, porém seu processamento em escala industrial, pela primeira vez, foi em 1886. Este elemento é encontrado em abundância no Brasil, principalmente na forma de minério de bauxita. Com o minério de bauxita é extraída a alumina, para obtenção do alumínio [91].

O alumínio possui alta condutividade térmica e elétrica e é considerado como material dúctil, sendo conhecido pela sua boa conformabilidade. Além disso, na presença do ar cobre-se de uma fina camada de óxido de alumínio que o protege contra a corrosão [92].

### 2.6.1 Características das Ligas de Alumínio 1200 H14

O alumínio tem se mostrado uma alternativa viável para redução de massa de equipamentos na indústria aeroespacial e automotiva nos últimos anos para melhora na performance e redução na emissão de poluentes.

A série 1xxx das ligas de alumínio indica o alumínio sem elemento de liga, e o segundo dígito (2) indica o nível de impureza tolerável, nesse caso de 1%. Na Tabela 2 está a composição aceitável para essa liga pela classificação da ABNT/ASTM [91]; [8]

Tabela 2: Composição química do alumínio 1200 H14.

<b>Composição Química do Alumínio 1200 H14</b>						
Al (%)	Si + Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Zn (%)	Ti (%)	Outros (%)
99,00	1,00	0,05	0,05	0,10	0,05	0,20

Fonte: Adaptado de [8]

A indicação de tratamento é representada pela letra H, que significa grau de deformação plástica a frio, seguido de dois dígitos que o número 1 indica somente encruamento e o número 4 indica encruamento meio duro.

A liga de alumínio 1200 H14, utilizada neste estudo, é amplamente disponível no mercado e é comumente empregada na fabricação de peças estampadas. Este material é frequentemente utilizado em diversas aplicações, como painéis decorativos, etiquetas metálicas, refletores e utensílios domésticos, devido à sua boa conformabilidade e resistência à corrosão. Essa liga apresenta limite de resistência ( $\sigma_B$ ) de 110 a 145 MPa, limite de escoamento ( $\sigma_{0,2\%}$ ) de 95 MPa e um alongamento ( $\delta$ ) de aproximadamente 5%. Seu módulo de elasticidade ( $E$ ) está entre 64 e 69GPa, atinge o ponto de fusão a 660°C e apresenta uma condutibilidade térmica de aproximadamente 0,52-0,54 cal/cms°C [8]; [93].

Comparativamente, a liga de cobre, amplamente utilizada em tubulações e sistema de condução elétrica, apresenta limite de resistência de ( $\sigma_B$ ) 215 a 372 MPa, limite de escoamento ( $\sigma_{0,2\%}$ ) 343 MPa e um alongamento ( $\delta$ ) de 6 a 45%. Seu módulo de elasticidade ( $E$ ) é de 117 MPa, com ponto de fusão de 1093°C e condutibilidade térmica de aproximadamente 0,81 cal/cms °C. Adaptado de Coppermetal [94].

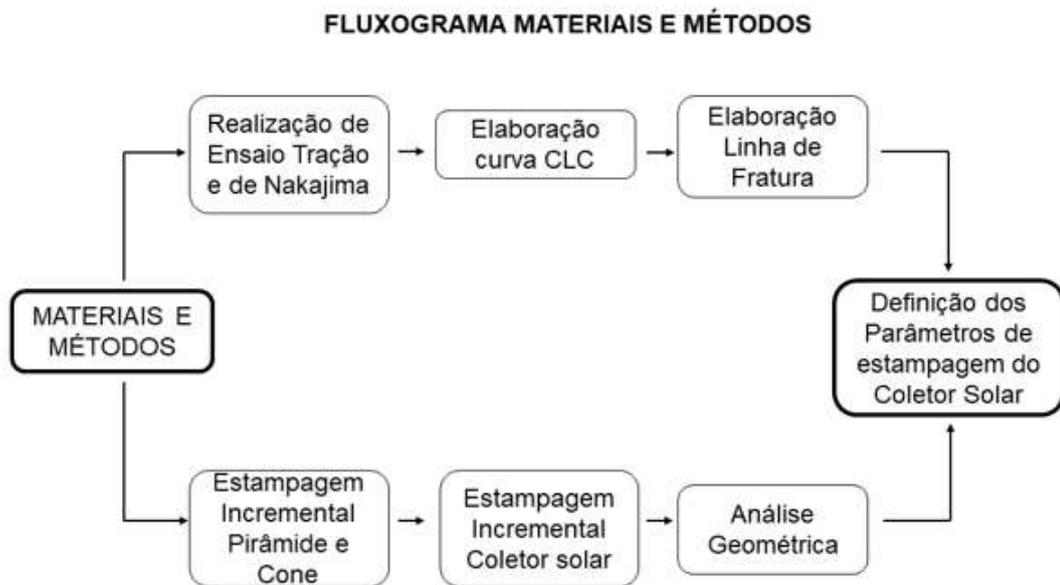
Oliveira [95] explica em sua pesquisa que além da condutibilidade térmica ser de 2 a 8 vezes maior que outros materiais empregados para a construção de coletores solares, o cobre não requer manutenção por muitos anos. Quanto ao alumínio, o autor menciona sua durabilidade e resistência a corrosão.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo foi usada chapa da liga de alumínio ASTM/ABNT 1200 H14, com espessura de 1,5 mm. As análises referentes ao comportamento mecânico e estampabilidade do material estudado foram feitas através de ensaios realizados nos laboratórios de Engenharia Mecânica do Centro Universitário UNISATC.

Todos os detalhes de cada ensaio realizado estão detalhados nas sessões seguintes conforme o fluxograma na Figura 35.

Figura 35: Fluxograma dos experimentos realizados



Fonte: Do autor

#### 3.1 ANÁLISE QUÍMICA

Para a análise da composição química da liga de alumínio 1200 H14, foram cortadas através de guilhotina do tamanho de 10 x 10mm. Posteriormente, foi realizado uma espectrometria de emissão óptica, em um Espectrômetro de marca BRUKER modelo Q2 Ion, permitindo identificar os valores percentuais de cada elemento presente na chapa.

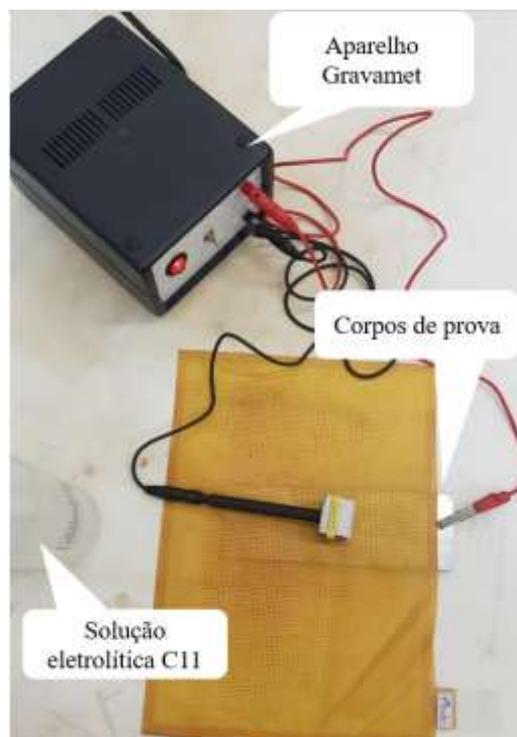
### 3.2 GRAVAÇÃO ELETROQUÍMICA

A análise das deformações nas chapas metálicas estampadas decorre primordialmente com a marcação eletroquímica de elementos geométricos (pontos, círculos, quadrados) com dimensões padronizadas na superfície plana das chapas, antes de serem estampadas.

Desta forma, nesta pesquisa todos os corpos de prova depois de serem cortados nas dimensões necessárias, passaram pelo processo de gravação eletroquímica, aplicando-se uma malha de círculos com  $\varnothing 2,5$  mm.

O procedimento de gravação inicia-se com a limpeza do corpo de prova. Em seguida, utilizando o aparelho Gravamet modelo Ônix, a peça é posicionada sob a malha, onde a tensão e a corrente são ajustadas. A marcação é programada aplicando uma solução eletrolítica C11, (cloreto de sódio, nitrato de sódio, ácido nítrico e água destilada), sobre a tela, e um bastão de aço é movido sobre ela. Durante esse processo, uma corrente elétrica é aplicada, o que promove o ataque químico necessário para realizar a gravação na superfície da peça conforme ilustrado na Figura 36.

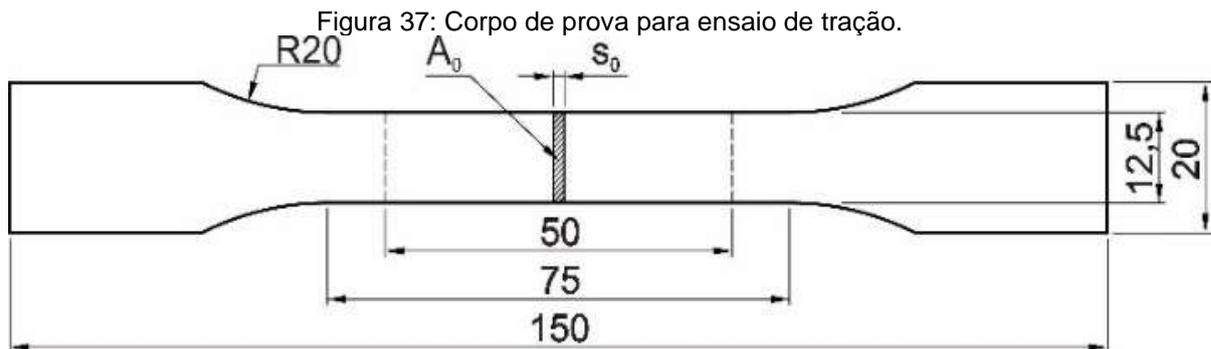
Figura 36: Gravação eletroquímica.



Fonte: Do autor

### 3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Para os ensaios de tração uniaxial foram retirados três corpos de prova para cada sentido de laminação ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ), confeccionados conforme o formato padronizado pela ABNT 6152 Figura 37.



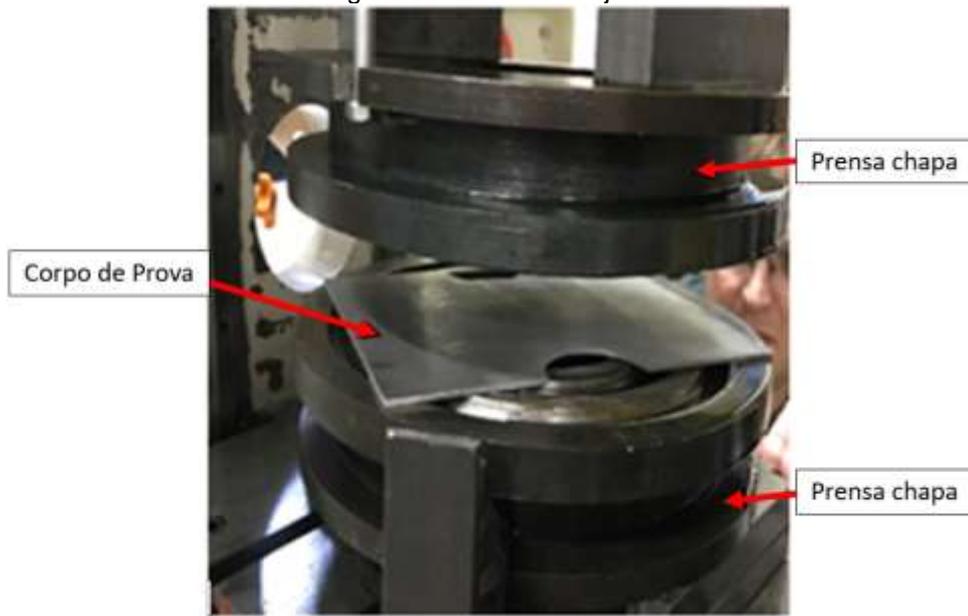
Os ensaios de tração foram realizados no equipamento de marca EMIC modelo DL-10000, com capacidade de 100 KN. Após os ensaios os corpos de prova foram medidos manualmente para obtenção dos valores de alongamento.

### 3.4 ENSAIO DE NAKAJIMA

Para a realização do ensaio foram confeccionados um jogo de corpos de prova, cortados na máquina de plasma CNC, os corpos têm 200mm de comprimento e sua largura varia de 40mm à 150mm conforme Figura 27 representada no item 2.5.4.

O ensaio realizado no estudo é um ensaio de Nakajima adaptado, pois o punção utilizado de 50mm é semiesférico, acoplado a uma prensa hidráulica de duplo efeito com capacidade de 25 toneladas no punção e 30 toneladas no cilindro prensa chapas, conforme Figura 38. A prensa tem dois manômetros para controle da força, possibilitando a parada no momento do início do rompimento do corpo de prova.

Figura 38: Ensaio Nakajima.



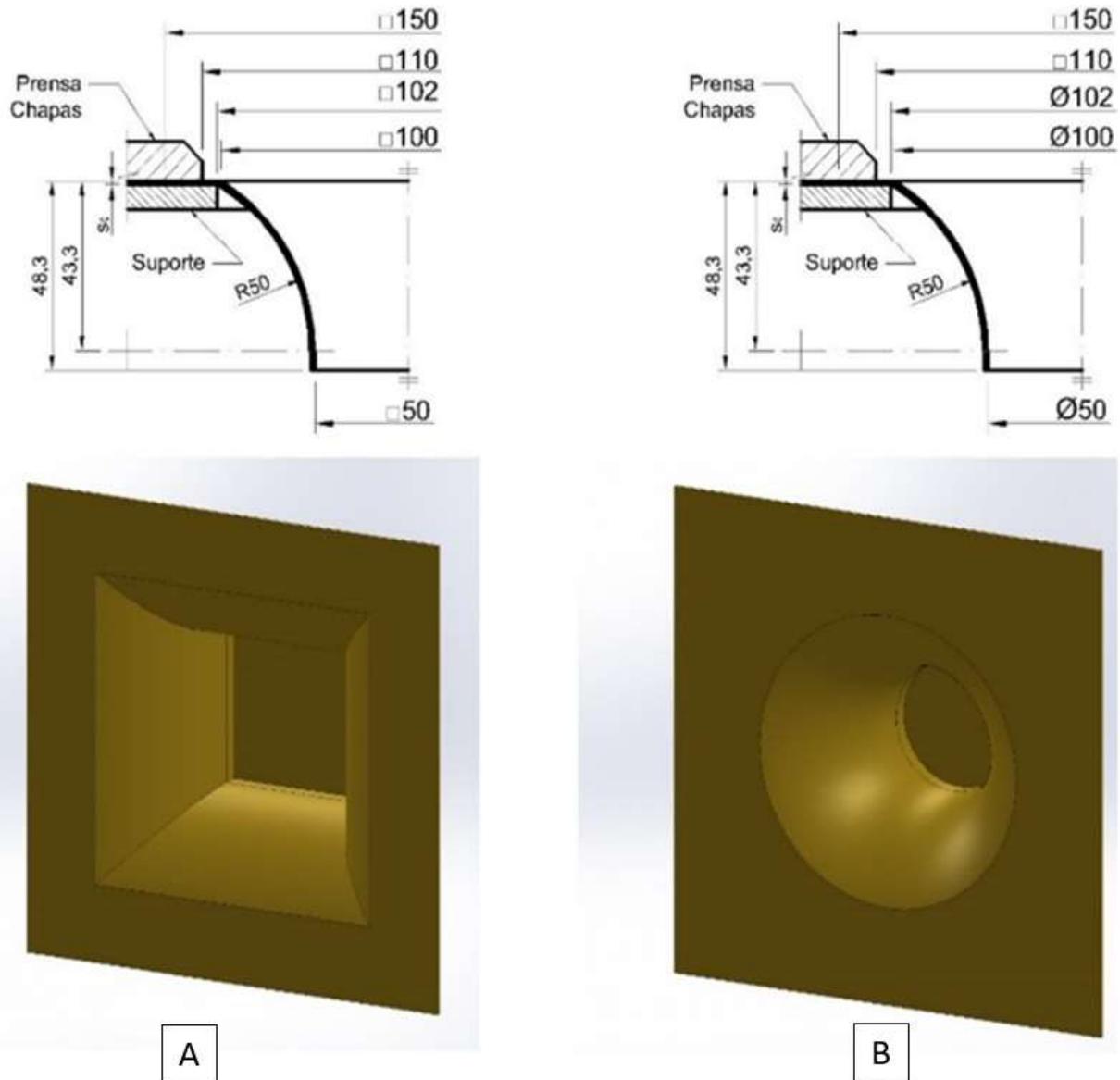
Fonte: Do autor

### 3.5 ENSAIO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Para a análise das deformações da chapa no processo de estampagem incremental, foram definidos dois modelos geométricos para obtenção do ângulo máximo de conformação ( $\Psi$ ), ambos com perfil de parede radial, sendo estes em formato de pirâmide e cone, já utilizados na literatura, segundo apresentado por Fritzen [87]. Foram realizados seis experimentos para cada formato, totalizando doze corpos de prova. Para cada formato de pirâmide e cone, foram utilizados três corpos de prova com incremento de 0,2 mm e três com incremento de 0,5 mm, permitindo a análise comparativa entre diferentes parâmetros de conformação.

Sendo assim, para a criação dos formatos 3D a serem estampados pelo centro de usinagem CNC, utilizou-se o software de CAD 3D SolidWorks®, seguindo as especificações da Figura 39.

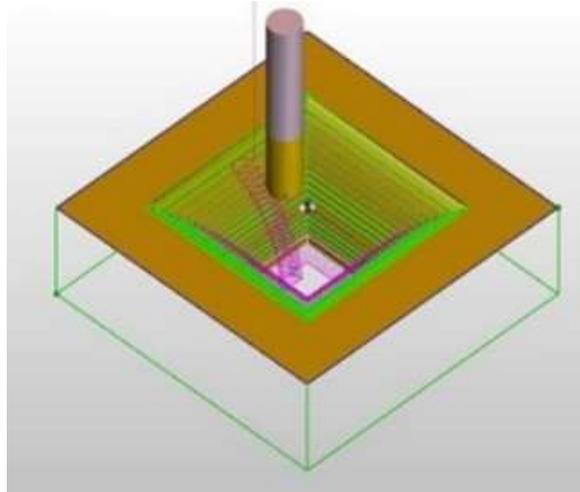
Figura 39: Desenho para estampagem incremental: (a) modelo pirâmide; (b) modelo cone.



Fonte: Adaptado de [87]

Posteriormente, o código de programação para o CNC foi gerado utilizando o software de CAM EdgeCam®. Nesse software, foi definida uma estratégia de ferramenta do tipo "paralela," que permite a decomposição do incremento vertical ( $\Delta z$ ) em valores de 0,2 mm e 0,5 mm ao longo de todo o contorno da peça. Essa abordagem foi aplicada tanto em peças com geometria do tipo pirâmide quanto em peças do tipo cone, conforme ilustrado na Figura 40. A escolha dessa estratégia de movimentação garante uma conformação gradual e precisa, adaptando-se às variações de forma e permitindo um controle eficiente do processo de estampagem incremental.

Figura 40: Estratégia da ferramenta.



Fonte: Do autor

Os parâmetros do processo da SPIF utilizados no Centro de Usinagem CNC estão descritos na Tabela 3:

Tabela 3: Parâmetros SPIF cone e pirâmide.

Descrição	Valor
Incremento Vertical ( $\Delta_z$ )	0,2 e 0,5mm
Velocidade de Avanço ( $f$ )	1.000mm/min
Rotação da ferramenta ( $N$ )	Livre
Perfil da geometria da parede: Circular	50mm

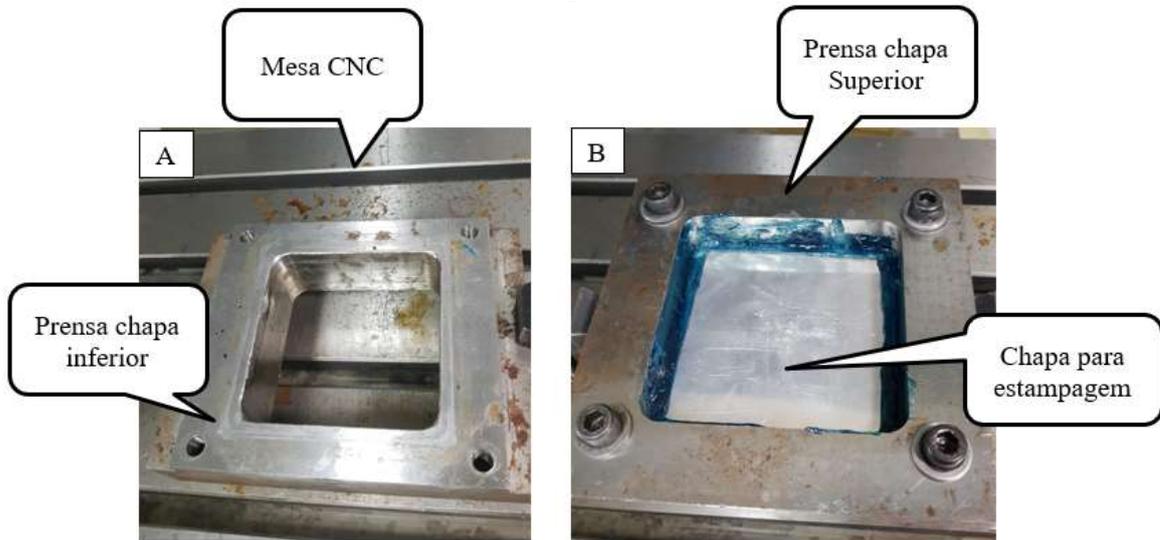
Fonte: Do autor

A máquina utilizada para os experimentos SPIF foi o Centro de Usinagem de marca Romi modelo D600 comando Fanuc, com curso longitudinal de 450 mm, curso transversal de 310 mm e curso vertical de 410 mm.

A fixação da prensa chapas no centro de usinagem foi firmemente instalada por grampos de fixação na mesa da máquina CNC, eliminando quaisquer movimentos indesejados que possam comprometer a qualidade do processo. Após isso, a chapa para estampagem é posicionada sobre a matriz e presa de forma segura por meio de uma moldura de fixação (prensa chapa superior), que aplica pressão uniforme nas bordas, impedindo deslocamentos durante a operação, conforme Figura 41. Essa configuração permite que a ferramenta de estampagem se mova com precisão, realizando a conformação gradual da chapa conforme o

caminho programado no sistema CAD/CAM, garantindo que o resultado final esteja de acordo com as especificações do modelo CAD.

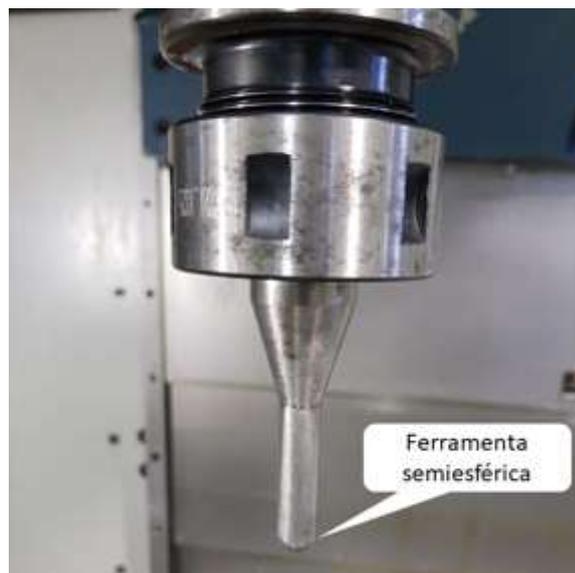
Figura 41: Preparação da SPIF: (A) Prensa chapa fixado na mesa CNC; (B) Prensa chapa pronto para estampagem incremental.



Fonte: Do autor

Para conformação das chapas foi utilizada uma ferramenta semiesférica, ilustrado na Figura 42, com diâmetro de 10mm fabricada em aço SAE1045 e para minimizar o atrito e o desgaste entre a chapa e a ferramenta, foi utilizado o lubrificante mineral pastoso (graxa) a base de lítio, Unilit Blue, durante o processo.

Figura 42: Ferramenta com ponta semiesférica de 10mm de diâmetro.



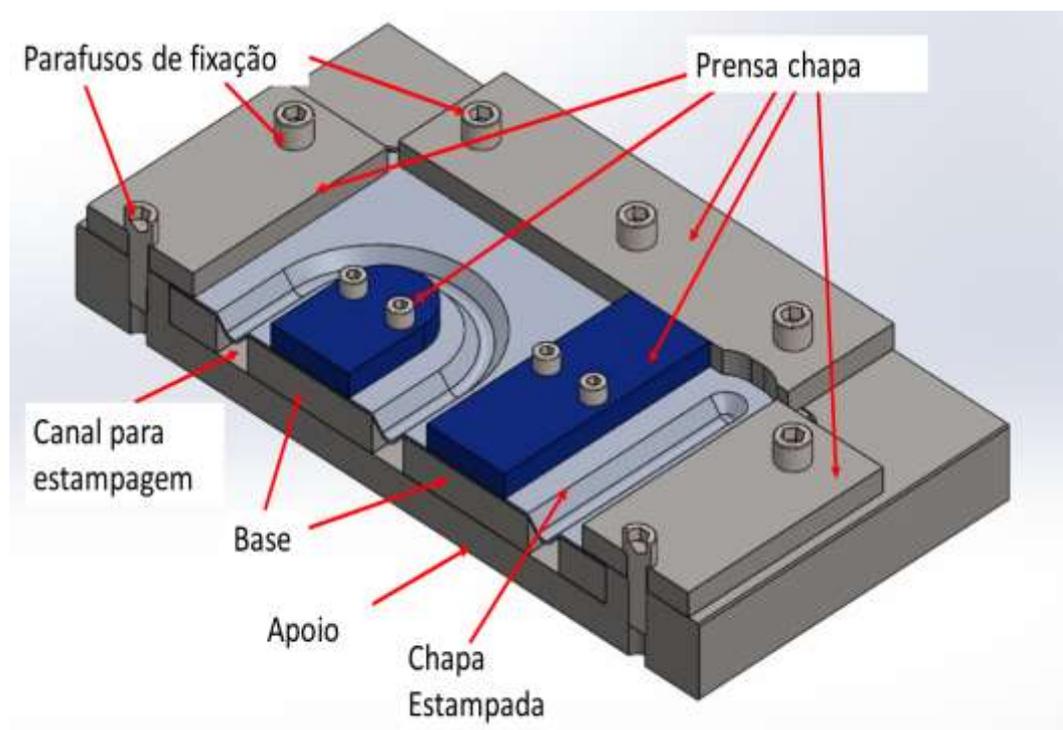
Fonte: Do autor

### 3.6 FABRICAÇÃO DAS PLACAS DO COLETOR SOLAR POR SPIF

Os corpos de prova para a estampagem SPIF da placa de coletor solar foram cortados na guilhotina com dimensões de 1,5 x 280 x 280mm e realizada a furação para fixação da prensa chapa superior.

Para fixação da chapa, foi utilizada uma prensa chapas com canais usinados com dimensões de 20mm de profundidade e 20mm de largura na base inferior e prensa chapa parafusados na base superior para sustentação da chapa conforme a necessidade da curvatura dos canais ilustrado na Figura 43

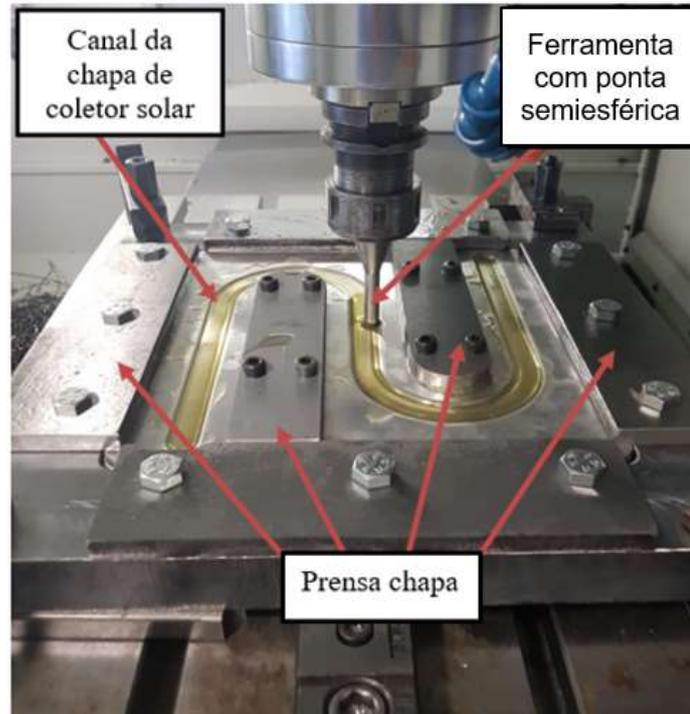
Figura 43: Desenho da matriz para estampagem de canais de coletor solar



Fonte: Do autor

A ferramenta para a conformação dos canais foi utilizada a mesma no procedimento de conformação do tipo pirâmide e cone juntamente com lubrificante líquido VG 68 para diminuir o atrito entre a ferramenta e a peça a conformar conforme Figura 44.

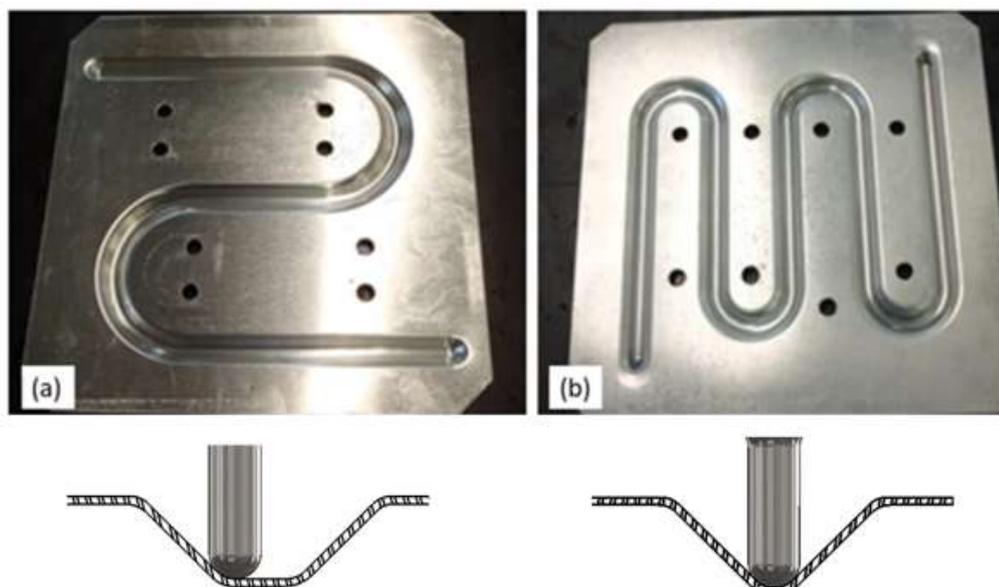
Figura 44: Conformação chapa coletor solar.



Fonte: Do autor

Foram estabelecidas duas configurações de canais na placa, a primeira com três canais e a segunda com cinco canais, retos e paralelos entre si, para aumentar a eficiência do coletor, com diferentes estratégias de tipo contorno e central conforme representados na Figura 45.

Figura 45: Configuração de diferentes canais: Três canais retos de contorno (a); Cinco canais retos no centro(b).



Fonte: Do autor

Os parâmetros utilizados no processo de estampagem incremental envolvem a definição de uma estratégia de incremento vertical ( $\Delta_z$ ) do tipo "paralela", com valores específicos de 0,5 mm, ao longo de toda trajetória da ferramenta sobre a peça.

Essa abordagem foi aplicada no centro e contorno do canal com de 10mm de profundidade para conformação dos canais, sendo necessário um controle preciso para garantir a conformidade geométrica e a integridade estrutural do material. Ajustando esses incrementos verticais, o processo assegura uma deformação gradual e uniforme, os parâmetros utilizados na máquina estão despostos na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetro estampagem canal.

Descrição	Valor
Incremento Vertical ( $\Delta_z$ )	0,5 mm
Velocidade de Avanço ( $f$ )	1.000 mm/min
Rotação da ferramenta ( $N$ )	Livre
Profundidade do canal da peça (centro e contorno)	10 mm

Fonte: Do autor

Para analisar a resistência do material na estampagem incremental dos canais, a repetição do incremento vertical ( $\Delta_z$ ) foi feita até se atingir o rompimento peça.

### 3.7 MEDIÇÃO DAS ELIPSES

Ao término do ensaio de Nakajima e da Estampagem Incremental SPIF, foram realizadas as medições das elipses dos corpos de prova. com o auxílio do microscópio digital da marca ROHS, que conta com seu próprio software, possibilitando o aumento de 40x conforme Figura 46.

Figura 46: Medição das elipses com microscópio digital.



Fonte: Do autor

Inicialmente o diâmetro de 2,5mm do círculo foi gravado na chapa antes da realização dos testes. Foi traçado uma linha perto da ruptura nos corpos, para medição das elipses e obtenção das deformações  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$ . Foram retiradas medições dos corpos estampados com geometria de pirâmide e cone e nos corpos de prova do ensaio de Nakajima foram retiradas medições próximas da ruptura.

Para a medição dos corpos de prova estampados com canais, foi utilizado a régua flexível transparente, as medições foram retiradas onde ocorreu a maior deformação. Depois do levantamento de todas as medidas dos corpos de prova, foram elaborados os cálculos em planilha do Excel para geração dos gráficos para se obter a deformação sofrida em cada experimento.

### 3.8 MEDIÇÃO TRIDIMENSIONAL DA GEOMETRIA

Para a realização das comparações dimensionais, foi utilizada uma máquina de medição tridimensional Hexagon Tesa, Modelo 454 Micro Hite 3D, com capacidades de medição nos eixos X (400 mm), Y (500 mm) e Z (400 mm). Durante as medições, a chapa foi fixada em um dispositivo para assegurar o paralelismo da peça e sua fixação adequada. Dessa forma, a máquina tridimensional pôde realizar as medições com precisão, permitindo a análise comparativa dos resultados obtidos nos diferentes experimentos conforme Figura 47.

Figura 47: Medição tridimensional da peça estampada.



Fonte: Do autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os resultados da caracterização do material e do processo de estampagem, com o objetivo de avaliar os parâmetros aplicados na Estampagem Incremental.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE ALUMÍNIO AA120 H14

Os valores percentuais dos elementos químicos encontrados na chapa de alumínio 1200 H14 por análise de espectrometria está exemplificado na Tabela 5 abaixo, sendo que a concentração de alumínio (Al) puro ficou 0,28% abaixo conforme Tabela 2 representado no item 2.6.1, sendo notável que houve uma maior concentração de chumbo (Pb), resultado de uma possível contaminação ou variação no método de análise.

Tabela 5: Análise química do alumínio 1200 H14.

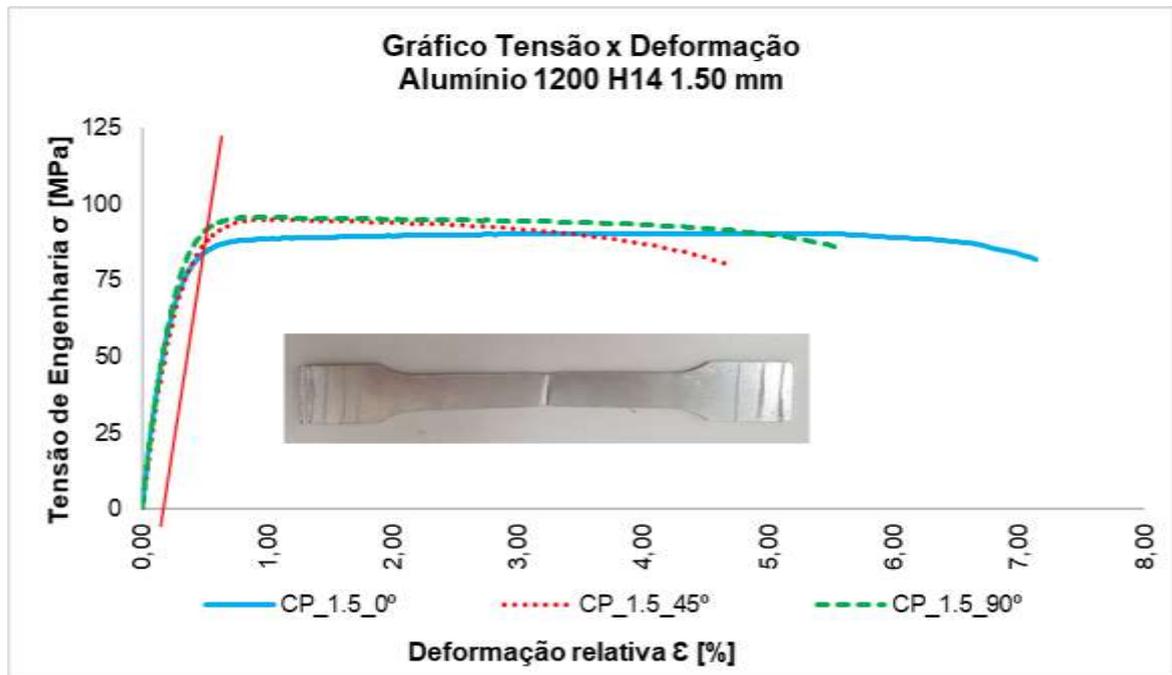
<b>Composição Química do Alumínio 1200 H14</b>								
Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Zn (%)	Mn (%)	Cu (%)	Ti (%)	Pb (%)	Outros (%)
98,72	0,497	0,291	0,0039	0,002	0,128	0,01	0,194	0,1541

Fonte: Do autor

### 4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Com os parâmetros previamente estabelecidos, foram realizados os ensaios de tração para obter as curvas tensão x deformação. Para cada direção foram utilizados 3 corpos de prova (0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação), foram gerados gráficos específicos. A Figura 48 apresenta a média das curvas correspondente aos corpos de prova.

Figura 48: Curva Tensão x Deformação média para os corpos de prova a 0°, 45° e 90° ao sentido de laminação.



Fonte: Do autor

Os resultados das curvas tensão x deformação para as três direções (0°, 45° e 90°) indicam variações significativas no comportamento mecânico do material.

A transição do regime elástico para o regime plástico de cada direção dos corpos de prova é determinada traçando-se uma linha reta paralela à região elástica das curvas, em 0,2% na deformação relativa ( $\epsilon$ ). O ponto de interseção dessa linha com a curva indica a tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ) para cada direção do material.

Os ensaios de tração realizados permitiram obter os valores de deformação relativa ( $\epsilon$ ), alongamento ( $\delta$ ), tensão máxima ( $\sigma_B$ ) e a curva de escoamento do material conforme Tabela 6.

Os valores de alongamento ( $\delta$ ) e área inicial ( $s_0$ ) foram obtidos por medição na chapa, antes e depois de rompida.

Tabela 6: Dados dos ensaios de tração 0°, 45° e 90° obtidos do alumínio 1200 H14 com espessura de 1,5mm.

Orientação do corpo de prova	$\sigma_B$ [MPa]	$\sigma_{e,0,2}$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	$\delta$ [mm]
0°	90,48	85,09	7,1	5,71
45°	95,15	89,79	4,6	3,72
90°	95,84	92,75	5,6	4,48

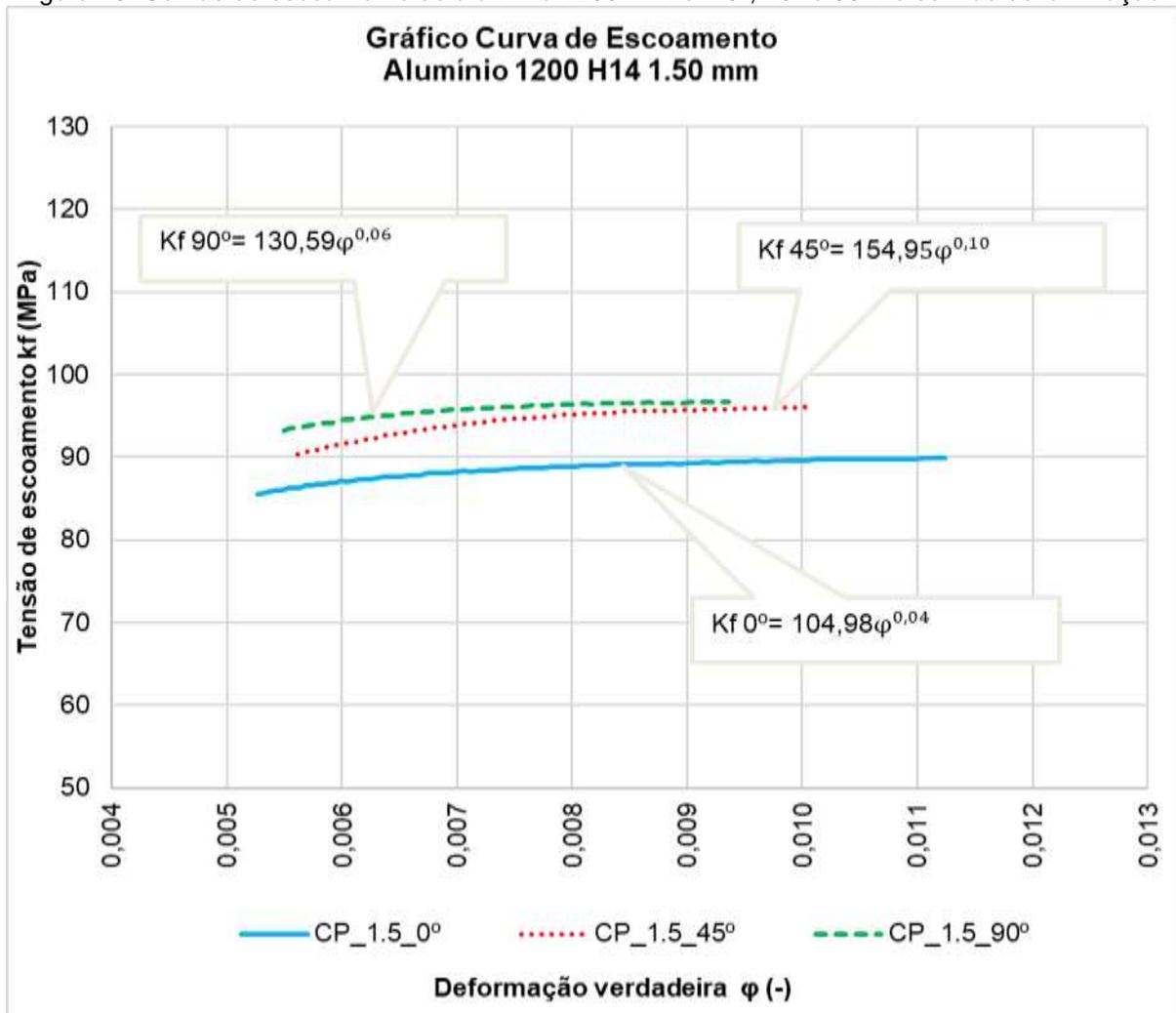
Fonte: Do Autor

Observa-se que a maior deformação ocorre na direção de laminação, corroborando os dados apresentados por Teixeira [59] e CBA [8]. Esses resultados destacam a influência significativa da orientação da laminação na resistência e na deformação do material, tornando esse fator importante para a otimização do processo de estampagem incremental.

#### 4.2.1 Curva de Escoamento

A Figura 49 representa a curva de escoamento do alumínio 1200 H14 com 1,5mm de espessura, nos diferentes sentidos de laminação da chapa: 0°, 45° e 90°.

Figura 49: Curvas de escoamento do alumínio 1200 H14 em 0°, 45° e 90° no sentido de laminação.



Fonte: Do autor

Os valores de tensão de escoamento ( $K_f$ ) apresentados na Figura 49 estão detalhados na Tabela 7 relacionado ao sentido de laminação do alumínio 1200 H14, com espessura inicial de 1,50 mm. A média dos resultados obtidos para as diferentes direções de laminação é de  $K_f = 130,17\varphi^{0.07}$ , indicando uma resposta relativamente estável dentro das faixas de deformação analisadas. Esses dados são essenciais para prever o desempenho do material em aplicações industriais, possibilitando um maior controle dos parâmetros de processo e garantindo a qualidade final das peças conformadas. Além disso, a tabela também apresenta os valores iniciais de tensão de escoamento ( $K_{f0}$ ) e o coeficiente de encruamento ( $n$ ) para cada orientação analisada, fornecendo uma visão mais abrangente do comportamento mecânico do material.

Tabela 7: Propriedades mecânicas dos corpos de prova de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  no sentido de laminação obtidas do alumínio 1200 H14 com  $s_0 = 1,50$  mm.

Orientação do corpo de prova	$K_f$ [MPa]	$K_{f0}$ [MPa]	$n$
$0^\circ$	104,98	85,4	0,04
$45^\circ$	154,95	90,29	0,10
$90^\circ$	130,59	93,26	0,06

Fonte: Do Autor

Conforme Schreiber [76], a curva de escoamento do material apresenta resultados consistentes, independentemente da orientação de laminação dos corpos de prova, com valores próximos aos obtidos nos ensaios realizados. Entretanto, os resultados apresentados no gráfico evidenciam diferenças significativas entre as orientações analisadas, destacando a relevância de considerar as propriedades anisotrópicas do material em aplicações específicas.

### 4.3 ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES

Com os resultados dos valores das elipses de todos os corpos de prova, tornou-se possível a plotagem das *FLC* da estampagem incremental das pirâmides, cones e das placas coletoras e *CLC* do ensaio de Nakajima.

### 4.3.1 Linha de Fratura da Conformação Pirâmide e Cone

A LFC é elaborada a partir das medições das elipses próximas a região de fratura geradas pela deformação de  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  após a estampagem incremental dos experimentos em forma de pirâmide e cone conforme Figura 50 abaixo.

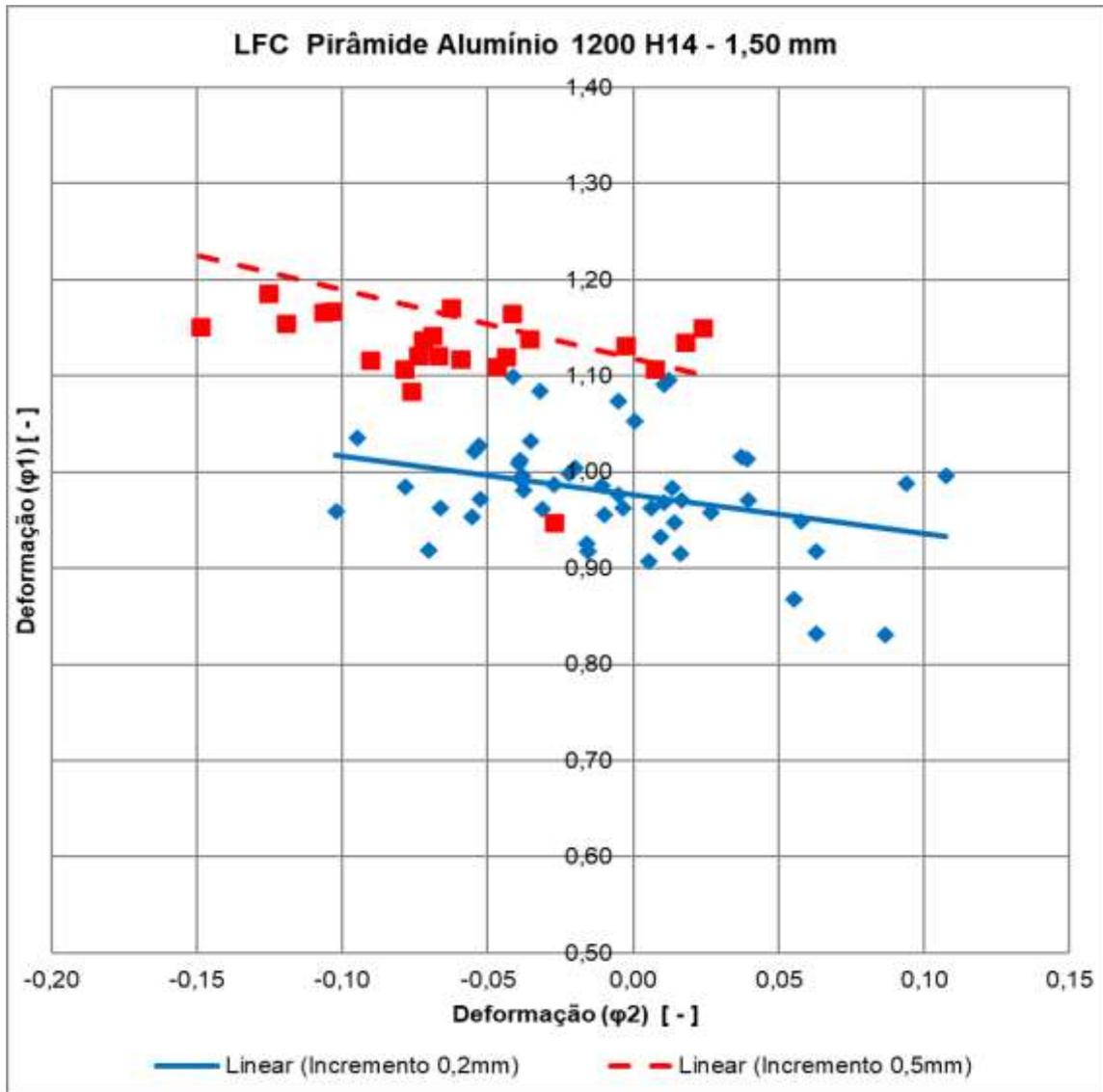
Figura 50: Peça estampada com geometria de pirâmide e cone.



Fonte: Do Autor

A Figura 51 ilustra o limite de deformação das medições analisadas pelo experimento SPIF no incremento vertical ( $\Delta z$ ) de 0,2mm e 0,5mm para pirâmide.

Figura 51: LFC Alumínio 1200 H14 Pirâmide.



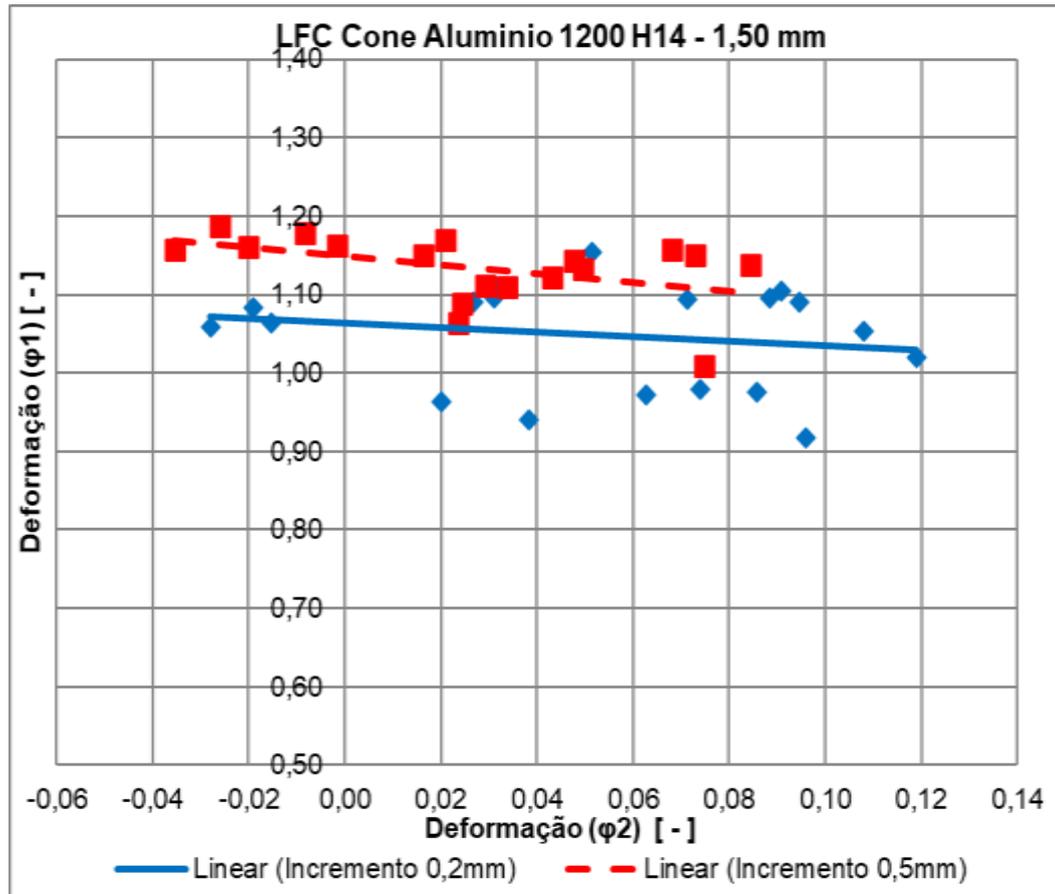
Fonte: Do autor

O comportamento da linha de fratura da pirâmide para incremento vertical ( $\Delta z$ ) 0,2mm demonstra que o material resiste melhor à deformação antes da ruptura comparado a incremento ( $\Delta z$ ) 0,5mm.

Os processos que utilizam incrementos menores tendem a ser mais precisos, com menor risco de falha, enquanto incrementos maiores são menos estáveis, mas podem ser vantajosos para maior produtividade em situações específicas.

A Figura 52 ilustra o limite de deformação das medições analisadas pelo experimento SPIF no incremento vertical ( $\Delta z$ ) de 0,2mm e 0,5mm para cone.

Figura 52: LFC Alumínio 1200 H14 Cone.



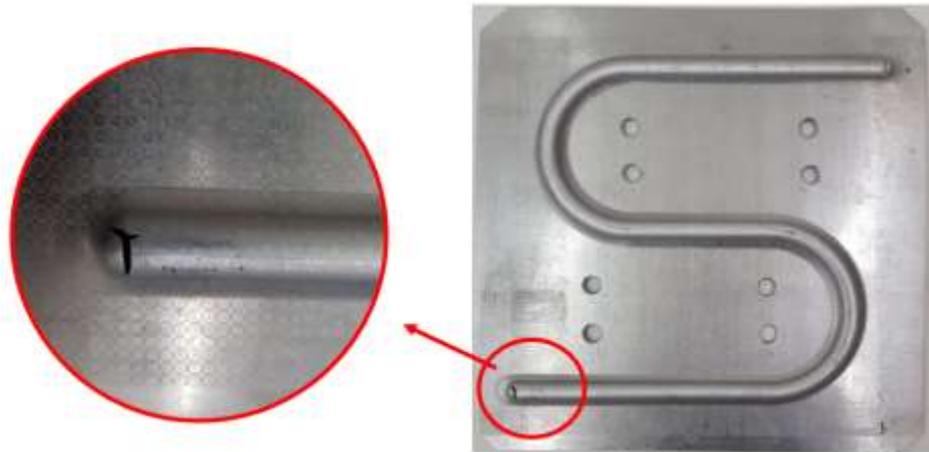
Fonte: Do autor

Uma análise comparativa dos resultados do processo de conformação incremental nos formatos de pirâmide e cone para a determinação da linha de fratura indica diferenças mínimas na distribuição de tensões em  $\phi_1$ , com ambos apresentando comportamentos semelhantes durante a deformação do material. No entanto, em relação à distribuição de tensões em  $\phi_2$ , o formato em cone demonstra uma leve predominância de deformação biaxial, ligeiramente maior do que no formato pirâmide, demonstrando uma diferença sutil na resposta do material à conformação incremental entre os dois formatos.

#### 4.3.2 Linha de Fratura de Conformação do Coletor Solar

As medições realizadas nos corpos de prova durante o ensaio de Estampagem Incremental das placas do coletor solar, conforme ilustrado na Figura 53, revelam o limite de fratura do material.

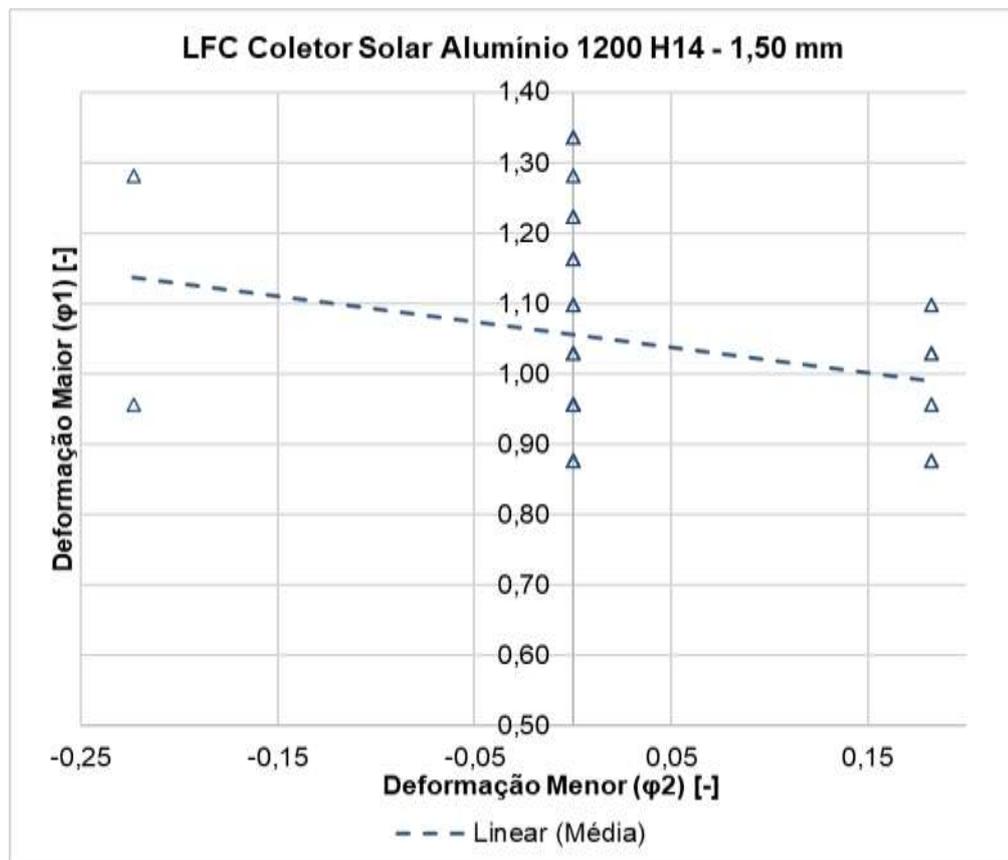
Figura 53: Placa absorvedora estampada.



Fonte: Do autor

A Figura 54 ilustra o limite de deformação das medições analisadas pelo experimento SPIF no incremento vertical ( $\Delta z$ ) de 0,5mm para coletor solar.

Figura 54: LFC Alumínio 1200 H14 placa absorvedora.



Fonte: Do autor

A linha de fratura do coletor solar, indica que o material apresenta uma semelhança entre os experimentos analisados do tipo pirâmide e cone, resultados

de  $\varphi_1$  maiores de 1 que indicam o alumínio 1200 H14 é capaz de suportar deformações significativas antes de atingir o limite de fratura, isso ocorre devido a distribuição uniforme das tensões e menor concentração de esforços críticos. Esse comportamento está associado a maiores níveis de conformação, indicando que o material tem maior resistência à fratura.

#### 4.3.3 Curva limite de conformação ensaio Nakajima

A Figura 55 apresenta o conjunto de corpos de prova de alumínio 1200 H14 após a realização da deformação, que foi mantida até o surgimento de trinca em cada corpo de prova.

Figura 55: Corpos rompidos no ensaio Nakajima.



Fonte: Do autor

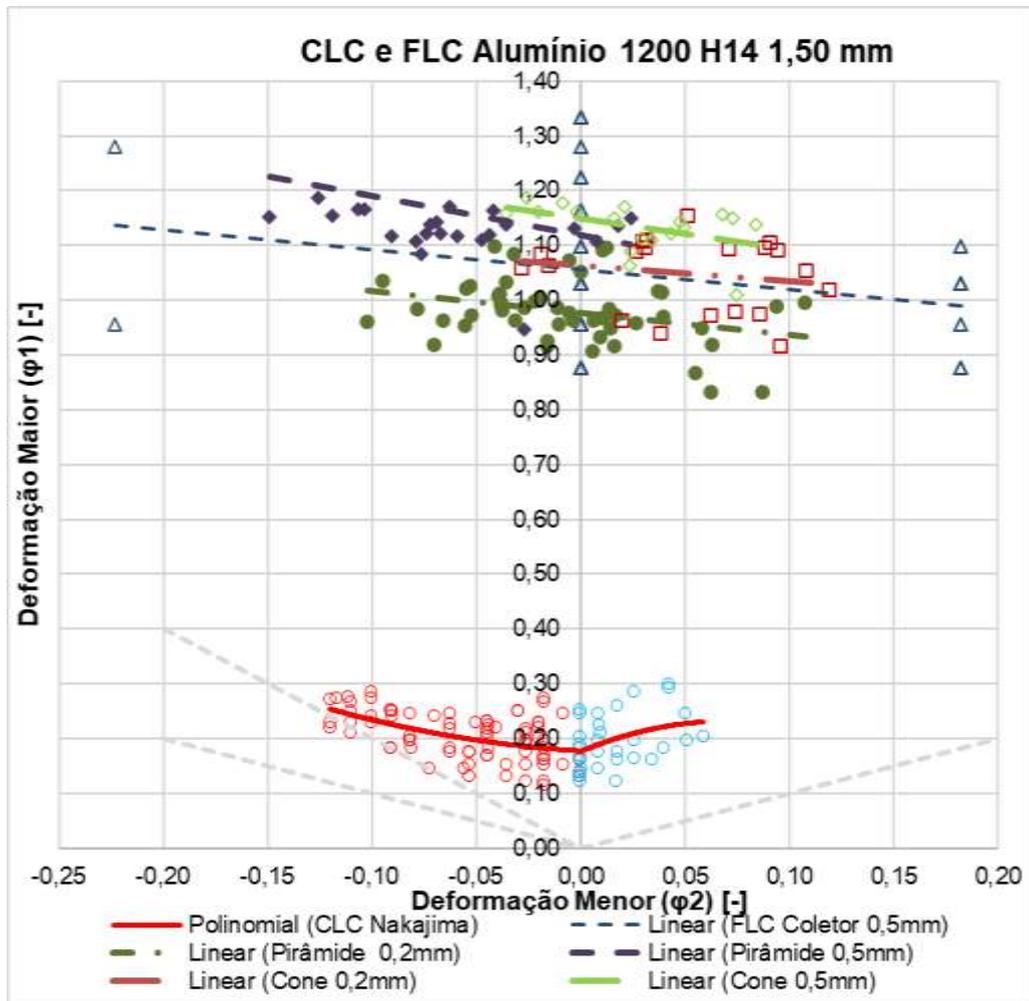
Os diferentes níveis de deformação atingidos pelo ensaio, se dá pela variação da largura do corpo de prova, durante o embutimento profundo, na medida em que ocorre a redução da largura dos corpos de prova, tende-se a ter uma deformação da chapa, por ocorrência da diminuição da ação de fixação do material em torno do punção. Os corpos mais estreitos tendem a alongar antes da deformação, por terem uma menor área, gerando um maior alongamento dos corpos, resultando em valores maiores de  $\varphi_1$  e valores negativos de  $\varphi_2$ .

As áreas de deformação, obtidas a partir das elipses ao redor da trinca em cada corpo de prova, foram digitalizadas e inseridas em planilha eletrônica. A análise desses dados permitiu determinar o limite de deformação, traçando um

gráfico com a deformação no comprimento ( $\varphi_2$ ) em função da deformação na largura ( $\varphi_1$ ).

Como pode-se observar na Figura 56, os pontos medidos dos 8 corpos de prova do ensaio de Nakajima geram, conseqüentemente, uma nuvem de pontos, formados pela deformação principal  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  para cada um dos oito corpos de prova analisados. Interligando esses pontos se determina a CLC do material, que indica a deformação para o processo de estampagem convencional do material como deformação plana e extremamente biaxial.

Figura 56: Curva CLC e FLC do alumínio 1200 H14 1,5mm.



Fonte: Do autor

A CLC do Alumínio 1200 H14 1,50mm representado no gráfico apresenta os limites máximos de deformação antes da fratura, e FLC da deformação próximo a fratura. O material apresentou valores médios de deformação em  $\varphi_1$  próximos a 0,18 na região crítica da CLC.

As deformações na região de  $\varphi_2$  próxima de 0, observa-se o limite de deformação para o estado de tração uniaxial, valores negativos de  $\varphi_2$ , a deformação se refere a condições de tração biaxial com predomínio de alongamento e para  $\varphi_2$  positivos o material demonstra o estriamento biaxial.

Os resultados obtidos destacam a semelhança com os valores relatados por Schreiber [75], validando o comportamento típico da estampagem convencional.

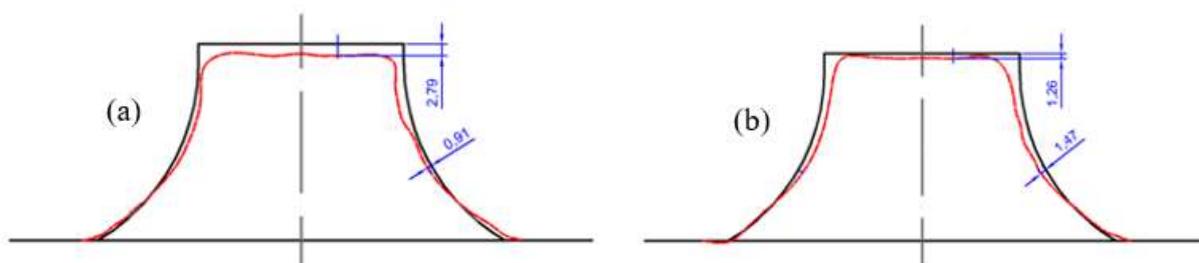
A CLC representa o limite seguro de deformação plástica resultando o início do comportamento crítico do alumínio 1200 H14 1,50mm antes de ocorrer a instabilidade, enquanto as FLC indicam o ponto crítico de ruptura final do material, essencial para o controle de processo de conformação.

A comparação entre os resultados FLC e a CLC apresenta comportamento superior à deformação limite prevista para processos de estampagem convencional conforme descreve Park (2003) [75]. Enquanto a CLC geralmente delimita o ponto crítico de fratura em condições de deformação plana e biaxial, os resultados da análise mostram que o material pode atingir valores de  $\varphi_1$  superiores a 1 antes de fraturar, sugerindo que o alumínio 1200 H14 é capaz de suportar deformações maiores do que aquelas estabelecidas na CLC.

#### 4.3.4 Análise Geométrica

A análise do perfil geométrico das peças é essencial para avaliar a influência do retorno elástico no formato final. A comparação do perfil geométrico obtido com o modelo teórico do processo SPIF permite identificar discrepâncias causadas por deformações elásticas. A Figura 57 ilustra o processo de medição tridimensional de um experimento SPIF.

Figura 57: Comparação geometria da peça desenhada e medição peça estampada em máquina Tridimensional: Incremento de 0,2mm (a); incremento 0,5mm (b).



Fonte: Do Autor

Os resultados obtidos na medição tridimensional do perfil das peças do processo SPIF indicaram que o retorno elástico com incremento vertical ( $\Delta z$ ) de 0,2mm foram maiores em relação aos corpos de prova com incremento vertical ( $\Delta z$ ) de 0,5mm. Essa diferença ocorre devido ao menor nível de deformação plástica acumulada no incremento ( $\Delta z$ ) de 0,2 mm, o que resulta em maior recuperação elástica após a liberação das tensões residuais, essas diferenças geométricas semelham-se com a citação de Allwood [1].

As medições realizadas com a máquina de medição tridimensional permitiram identificar com precisão as variações geométricas em relação ao modelo CAD, evidenciando que, para o incremento menor, o desvio médio foi mais acentuado, comprometendo a precisão dimensional final da peça.

Os resultados do ângulo parede ( $\Psi$ ) expressos na Tabela 8, resulta na profundidade do processo de estampagem incremental através de uma reta traçada perpendicular à reta que liga o centro da ferramenta até a superfície de contato com a chapa, de modo que, o ângulo formado entre ela e a reta horizontal do plano inicial de estampagem da prensa chapa, resulta no ângulo parede ( $\Psi$ ).

Tabela 8: Ângulo de parede da estampagem incremental cone e pirâmide

<b>Tipo</b>	<b>Incremento [mm]</b>	<b>Profundidade [mm]</b>	<b>Ângulo [°]</b>	<b>s<sub>0</sub> [mm]</b>	<b>s<sub>1</sub> [mm]</b>
<b>Cone</b>	0,20	46,54	88,17	1,50	0,04790
<b>Cone</b>	0,50	46,21	87,82	1,50	0,05706
<b>Pirâmide</b>	0,20	45,37	86,95	1,50	0,07981
<b>Pirâmide</b>	0,50	47,24	88,90	1,50	0,02880

Fonte: Do autor

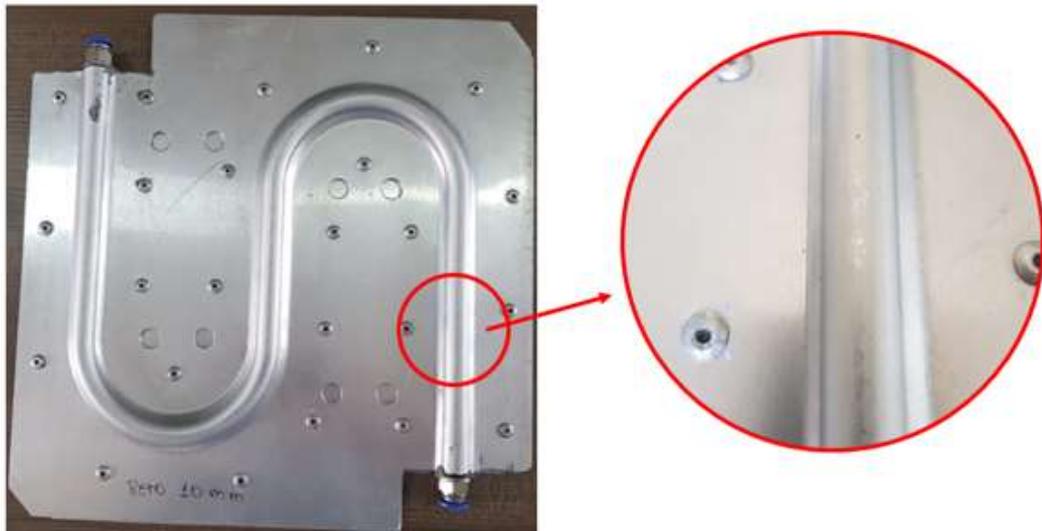
A determinação precisa do ângulo de parede possibilita avaliar o limite de conformação do material, permitindo otimizações no processo para minimizar o retorno elástico e melhorar a precisão geométrica das peças estampadas.

Os resultados obtidos neste estudo, comparados aos de Teixeira [59], apresentaram uma boa concordância na análise geométrica, permanecendo dentro das tolerâncias aceitáveis. Essa consistência reforça a confiabilidade do método empregado e a adequação dos parâmetros utilizados, evidenciando que as variações observadas estão alinhadas às margens de tolerância previamente estabelecidas.

#### 4.4 ANÁLISE E VALIDAÇÃO DO COLETOR SOLAR

Os resultados após a estampagem incremental e da definição da trajetória da ferramenta no formato de estratégia central, a Figura 58 ilustra uma seção com formato cônico.

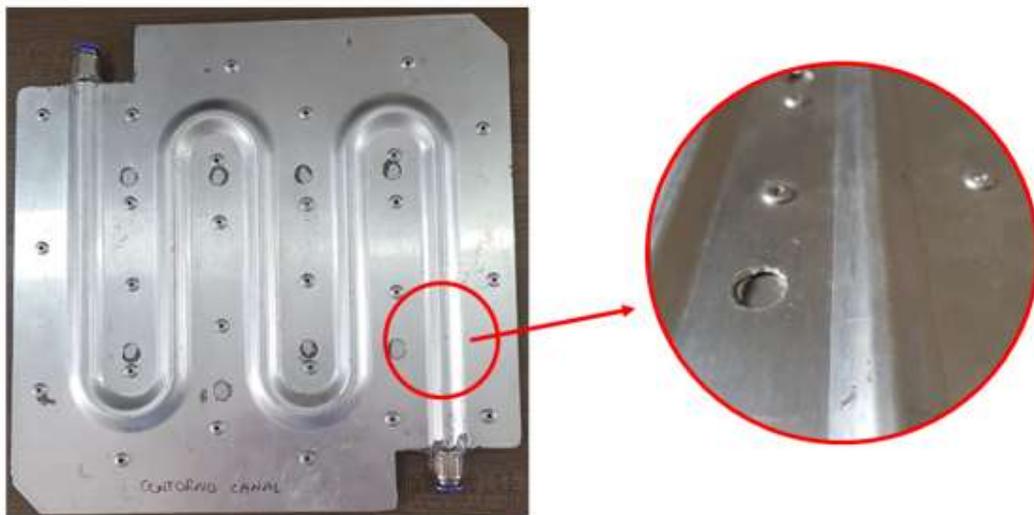
Figura 58: Formato da geometria do canal central.



Fonte: Do autor.

Enquanto na Figura 59 a estratégia de contorno, o movimento da ferramenta resulta em uma geometria trapezoidal.

Figura 59: Formato geometria do canal tipo contorno.



Fonte: Do autor.

Para a determinação do ângulo de parede na estampagem incremental destinada à fabricação do coletor solar, no formato do canal do tipo contorno, adotou-se um ângulo reduzido de  $45^\circ$ , em comparação aos formatos piramidal e cônico. Essa escolha visa garantir um processo de conformação mais seguro e eficiente, reduzindo o risco de falhas indesejadas. A definição desse parâmetro possibilita a fabricação do coletor com maior estabilidade geométrica, assegurando a qualidade do produto final.

Após o processo de estampagem, a montagem do coletor solar exigiu a união de uma placa lisa na base, fixada com rebites e selada com silicone poliuretano, resultando em uma configuração final com formato semicircular do canal. A Figura 60 ilustra a montagem dos coletores solares das diferentes estratégias de Estampagem Incremental.

Figura 60: Coletores finalizados com diferentes estratégias.



Fonte: Do autor.

#### 4.4.1 Custo de Fabricação

O custo de fabricação do coletor solar por meio da Estampagem Incremental é uma alternativa viável devido à sua flexibilidade e menor necessidade de ferramentas específicas. Esse processo permite a produção de geometrias complexas sem a exigência de moldes, reduzindo significativamente os custos iniciais de fabricação. Além disso, a Estampagem Incremental possibilita a otimização do uso de material, minimizando desperdícios e tornando o processo mais eficiente.

Os valores estimados para fabricação da placa com três canais estão descritos na Tabela 9 abaixo:

Tabela 9 Valor estimado do coletor com 3 canais retos.

Item	Unidade	Custo Unitário (R\$)	Quantidade	Custo Total (R\$)
<b>Matéria-prima (Alumínio 1200 - chapa 1,5mm)</b>	2,0m <sup>2</sup>	434,00	0,0784 m <sup>2</sup>	17,00
<b>Valor da hora Máquina para Estampagem Incremental</b>	1,0 hora	250,00	30 min	125,00
<b>Rebites</b>	1.000	0,053	24	1,27
<b>Silicone PU</b>	1,0	40,90	1/2	20,45
<b>Conexão Pneumática</b>	1,0	7,08	2	14,16
<b>Mão de obra para montagem</b>	220h	3.750,00	1 h	17,05
<b>Custo total estimado</b>	-	-	-	<b>194,93</b>

Fonte: Do autor.

Esses valores representam os principais fatores que impactam o custo de fabricação da chapa do coletor solar. Como o processo de montagem é totalmente manual, o volume de produção e as otimizações no processo podem influenciar significativamente a variação dos custos.

O valor estimado para a fabricação do coletor, utilizando o processo de estampagem e incorporando um tubo de cobre interno para a passagem de água, está apresentado na Tabela 10 abaixo.

Tabela 10: Valor estimado do coletor com 3 canais retos com tubo de cobre.

Item	Unidade	Custo Unitário (R\$)	Quantidade	Custo Total (R\$)
<b>Matéria-prima (Alumínio 1200 - chapa 1,5mm)</b>	2,0m <sup>2</sup>	434,00	0,0784 m <sup>2</sup>	17,00
<b>Valor da hora Máquina para Estampagem Incremental</b>	1,0 hora	250,00	30 min	125,00
<b>Rebites</b>	1.000	0,053	24	1,27
<b>Conexão tubo de cobre com espigão</b>	1	15,99	2	31,98
<b>Abraçadeira</b>	1	2,37	2	4,74
<b>Tubo de Cobre 3/8"</b>	1.000 mm	27,71	560 mm	15,51
<b>Mão de obra para montagem</b>	44 h	3.750,00	1,5	25,57
<b>Custo total estimado</b>	-	-	-	<b>220,07</b>

Fonte: Do autor.

Os valores apresentados na Tabela 10 indicam um custo mais elevado devido à adição da tubulação de cobre, além de um maior tempo de montagem em razão da necessidade de conformação e curvatura do tubo.

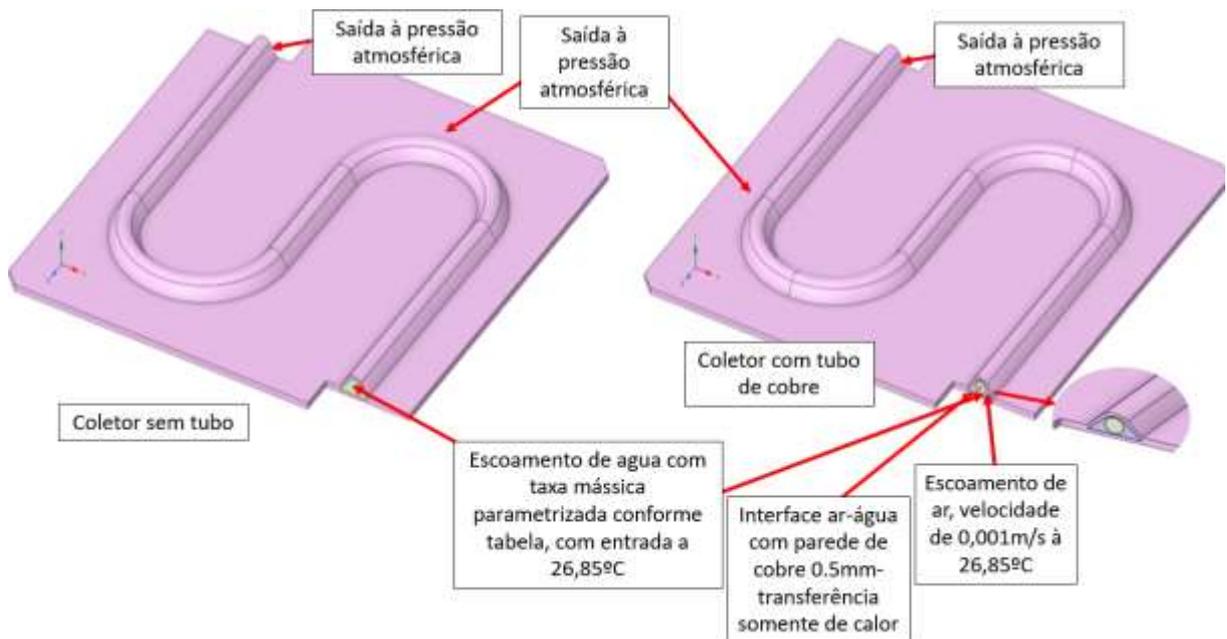
#### 4.4.2 Eficiência térmica

Os resultados para a eficiência térmica foram realizados através de simulação numérica, por meio software Ansys ®. Foi considerada a radiação solar sobre a placa de 1.000W/m<sup>2</sup> com uma área de 0,0784 m<sup>2</sup>, correspondente ao tamanho da placa fabricada pelo processo de estampagem incremental.

A Figura 61 representa o escoamento de água em um coletor solar com e sem tubo de cobre interno, com condições específicas de operação. A água entra no sistema a uma temperatura de 26,85°C e escoar com uma taxa mássica parametrizada conforme os valores apresentados na Tabela 11. No coletor representado com tubo interno, a passagem de ar e a água é representada por uma parede de cobre com espessura de 0,5 mm, onde ocorre transferência de calor exclusivamente por condução. Além disso, o ar escoar entre o tubo de cobre que não

está em contato com o canal estampado, a uma velocidade de 0,001 m/s, mantendo a mesma temperatura de entrada da água. A saída do sistema ocorre à pressão atmosférica, indicando que o coletor opera em condições ambientais padrão. Essa representação é fundamental para compreender a dinâmica térmica e fluidodinâmica do coletor solar, auxiliando na análise da eficiência térmica e na otimização do projeto.

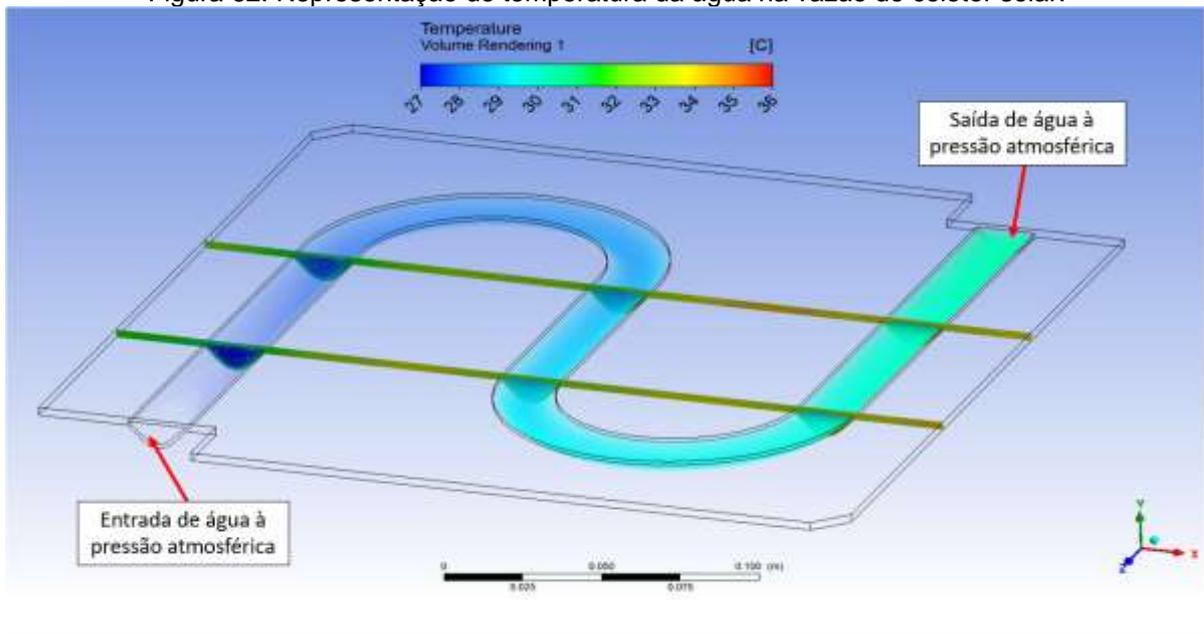
Figura 61: Representação do coletor solar sem e com tubo de cobre interno para passagem de água.



Fonte: Do autor.

A Figura 62 apresenta uma visualização volumétrica da distribuição de temperatura da água ao longo do coletor solar. A água entra no sistema à pressão atmosférica e sua temperatura é mapeada ao longo da passagem do coletor solar. A renderização permite observar gradientes de temperatura e identificar áreas com maior ou menor transferência de calor, fornecendo informações sobre a eficiência térmica do coletor.

Figura 62: Representação de temperatura da água na vazão do coletor solar.



Fonte: Do autor.

A Tabela 11 apresenta os valores de taxa mássica, taxa volumétrica, temperatura de saída, calor absorvido e a eficiência em um coletor solar operando em diferentes condições de fluxo. Os dados foram coletados para duas configurações distintas: canal sem tubo (s/tubo) e canal com tubo (c/tubo).

Tabela 11: Dados para simulação da eficiência do coletor solar.

Taxa mássica (Canal s/tubo)	Taxa volumétrica	T_Saída (Canal s/tubo)	T_Saída (Canal c/tubo)	Q <sub>u</sub> (Canal s/tubo)	Q <sub>u</sub> (Canal c/tubo)	Eficiência s/tubo	Eficiência c/ tubo
kg/s	L/min	°C	°C	W	W	%	%
0,005	0,3	30,56	28,52	74,48	31,82	95,00	40,59
0,007	0,42	29,56	28,07	75,07	31,36	95,76	40,01
0,009	0,54	29,03	27,83	76,44	31,08	97,51	39,65
0,011	0,66	28,68	27,67	77,39	30,86	98,72	39,37
0,013	0,78	28,44	27,56	78,11	30,68	99,64	39,14
0,015	0,9	28,25	27,49	78,70	30,52	100,39	38,94
<b>Média= 0,010</b>	<b>0,600</b>	<b>29,08</b>	<b>27,85</b>	<b>76,70</b>	<b>31,05</b>	<b>97,83</b>	<b>39,61</b>

Fonte: Do autor.

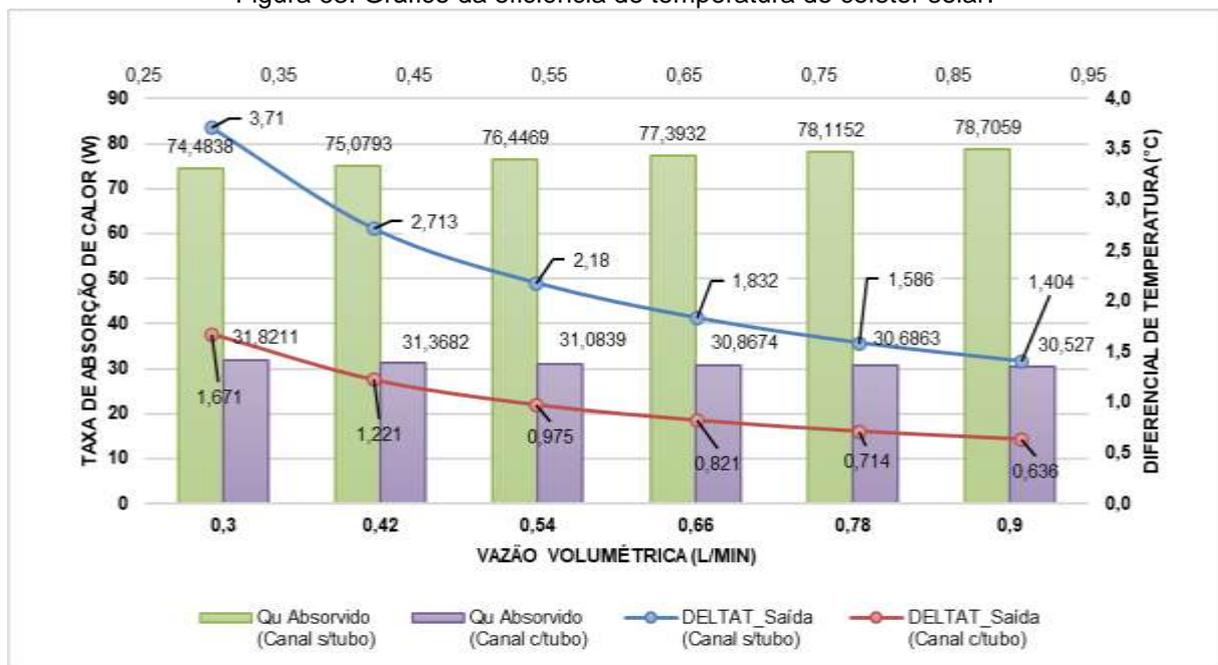
Observa-se que, a temperatura de saída diminui à medida que a taxa de fluxo aumenta para ambos os coletores solares. O calor absorvido (Q<sub>u</sub>) apresenta comportamento distinto para as duas configurações. No canal sem tubo, os valores de energia absorvida indicam um ligeiro aumento com o crescimento da vazão. Já

no canal com tubo de cobre, a absorção de calor é menor, apresentando uma tendência de queda conforme a vazão aumenta.

Esses resultados representam que o canal sem tubo apresenta uma maior eficiência térmica em comparação ao canal com tubo, o que pode estar relacionado a uma maior área de contato e melhor absorção da radiação solar. A relação entre a vazão do fluido e a eficiência térmica do coletor solar deve ser considerada no dimensionamento de sistemas de aquecimento solar para otimizar a transferência de calor.

A Figura 63 apresenta a relação entre a vazão volumétrica (L/min) e os parâmetros de calor absorvido ( $Q_u$ ) e variação de temperatura ( $\Delta T$ ) para dois cenários: Canal com e sem tubo de cobre.

Figura 63: Gráfico da eficiência de temperatura do coletor solar.



Fonte: Do autor.

Observa-se que, à medida que a vazão volumétrica aumenta, o calor absorvido no canal sem tubo cresce de 74,48 W para 78,71 W, enquanto no canal com tubo ele diminui de 31,82 W para 30,53 W. Além disso, a variação de temperatura ( $\Delta T$ ) no canal sem tubo reduz-se de 3,71 °C para 1,40 °C, enquanto no canal com tubo essa variação é ainda menor, variando de 1,67 °C a 0,63 °C. Esses resultados indicam que o canal sem tubo é mais eficiente na absorção de calor, mas com maior perda térmica, enquanto o canal com tubo apresenta menor eficiência

térmica, possivelmente devido ao isolamento proporcionado pelo tubo. Essas informações são essenciais para otimizar o design do coletor solar, visando maximizar a eficiência térmica e reduzir perdas.

## 5 CONCLUSÃO

A condução desta pesquisa evidenciou que o processo de Estampagem Incremental apresenta uma ampla gama de aplicações que se estendem por setores como a indústria automotiva, aeroespacial, náutica e de eletrodomésticos, destacando-se como uma tecnologia valiosa para a produção de peças únicas e protótipos. Além disso, sua versatilidade é evidenciada por aplicações em campos como a arquitetura e a área da saúde, especialmente na fabricação de próteses.

O referencial bibliográfico analisado neste trabalho demonstra que as pesquisas sobre ISF ainda se concentram principalmente em materiais clássicos da indústria, como ligas de aço, alumínio, latão e titânio, evidenciando tanto o potencial quanto as limitações atuais no desenvolvimento da tecnologia.

Os resultados do ensaio de tração demonstram um comportamento com uma fase elástica consistente até o limite de escoamento, seguido por um alongamento médio, característico de materiais dúcteis. Esses achados destacam a influência significativa da orientação da laminação nas propriedades mecânicas do material, especialmente na resistência e deformação, ressaltando sua importância para a otimização de processos como a estampagem incremental. Isso demonstra que a análise da orientação da laminação pode ser decisiva no desenvolvimento de soluções mais eficientes e direcionadas às aplicações industriais.

Os resultados obtidos no ensaio de Nakajima, aplicado à estampagem convencional, evidenciam a predominância da deformação plana e biaxial do material, com destaque para os comportamentos específicos observados em  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$ . Esses dados ressaltam a relevância de compreender o comportamento anisotrópico do material, contribuindo para a otimização dos processos de conformação e para a previsão de sua resposta em diferentes condições de carregamento.

Uma análise comparativa dos resultados da FLC nos formatos de pirâmide e cone revela diferenças mínimas na distribuição de deformações em  $\varphi_1$ , com ambos os formatos apresentando comportamentos semelhantes durante a deformação. Contudo, no que diz respeito a  $\varphi_2$ , o formato em cone evidencia uma leve predominância de deformação biaxial em relação ao formato pirâmide, indicando uma resposta diferenciada do material, sugerindo que variações no design geométrico da peça pode influenciar de forma sutil os resultados do processo.

Em comparação aos resultados da CLC representam o limite seguro de deformação plástica resultando o início do comportamento crítico antes de ocorrer a instabilidade, enquanto as FLC indicam o ponto crítico de ruptura final do material, essencial para o controle de processo de conformação.

A análise da FLC do coletor solar revela semelhanças entre os experimentos com formatos de pirâmide e cone. Neste caso, fica claro que o comportamento das deformações para o alumínio 1200 H14 com 1,5 mm de espessura está relacionado ao processo de estampagem incremental, e não a geometria analisada. Os resultados indicam valores de  $\varphi_1$  superiores a 1, evidenciando que o alumínio 1200 H14 é capaz de suportar deformações significativas antes de atingir o limite de fratura.

A comparação entre os resultados FLC e a CLC apresenta comportamento superior à deformação limite prevista para processos de estampagem convencional. Isso se deve à distribuição uniforme das tensões durante o processo de estampagem incremental, reduzindo a concentração de esforços críticos e, conseqüentemente, ampliando a resistência à fratura em comparação com os limites estabelecidos para estampagem convencional. Dessa forma, o processo de estampagem incremental permite explorar uma margem maior de deformação antes de atingir o limite de fratura, diferentemente dos limites impostos pela CLC convencional.

De acordo com os experimentos realizados, mostraram que o ângulo máximo ( $\Psi$ ) no processo de Estampagem Incremental, a geometria da peça cone ou pirâmide e o incremento vertical ( $\Delta z$ ) afetam diretamente a profundidade de conformação, a distribuição de tensões e a espessura final da chapa. O formato pirâmide apresentou maior capacidade de conformação em profundidade de aproximadamente 47,24mm e ângulo de parede ( $\Psi$ ) de 88,90°, enquanto o cone mostrou menor redução na espessura final ( $s_1$ ) de 0,04790mm, destacando-se pela deformação mais homogênea.

Em análise do perfil geométrico das peças dos resultados do processo SPIF evidenciaram que menores incrementos verticais ( $\Delta z$ ) aumentam o retorno elástico devido à menor deformação plástica acumulada, impactando na precisão geométrica. A análise do ângulo de parede destacou os limites de conformação do material e a necessidade de ajustes no processo para minimizar desvios. A boa concordância com estudos prévios valida a metodologia e reforça a confiabilidade do

processo, demonstrando o potencial da estampagem incremental para fabricar peças com alta precisão e geometrias complexas.

Na montagem do coletor solar independentemente do formato adotado, o resultado final demonstrou que o processo de estampagem incremental foi eficiente na conformação da chapa de alumínio, garantindo a integridade estrutural do coletor solar. A fixação com rebites e silicone poliuretano proporcionou uma união segura e selada, assegurando a funcionalidade e a estabilidade do produto final.

Em análise das diferenças do material comparado ao cobre, a liga de alumínio se destaca por sua leveza, boa condutibilidade térmica e resistência à corrosão, enquanto o cobre apresenta maior resistência mecânica, condutibilidade elétrica superior e melhor desempenho em aplicações que exigem alta resistência térmica. Apesar de seu menor limite de resistência e escoamento, o alumínio é amplamente utilizado em setores onde a redução de peso e a conformabilidade são essenciais, enquanto o cobre é preferido em sistemas elétricos e térmicos devido à sua excelente condutividade.

Na análise da viabilidade técnica de fabricação dos coletores solares avaliados, o modelo sem tubo de cobre demonstra um custo menor devido à sua simplicidade construtiva e à menor necessidade de materiais adicionais no processo. A ausência do tubo de cobre reduz os custos de matéria-prima e minimiza o tempo de montagem, tornando essa alternativa mais acessível, especialmente na fabricação em séries de baixa e média escala.

A análise da eficiência térmica, por meio da simulação numérica, do coletor evidencia que o canal sem tubo permite maior transferência de calor devido à maior área de contato com a água. Entretanto, apresenta maior perda térmica em função da menor proteção térmica. O canal com tubo, por outro lado, tem menor absorção de calor devido ao isolamento proporcionado entre o cobre e a chapa de alumínio conformada.

## 6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para futuras pesquisas no estudo de coletores solares podem envolver a aplicação de novos materiais utilizando o processo de Estampagem Incremental. A investigação em ligas de alumínio avançadas, compósitos ou materiais híbridos que apresentem propriedades superiores de condutividade térmica e resistência mecânica, fundamentais para melhorar a eficiência e durabilidade dos coletores solares.

Outra área promissora seria a análise detalhada do impacto do retorno elástico e da espessura final na eficiência do coletor, bem como o desenvolvimento de simulações computacionais avançadas para prever com maior precisão a distribuição de tensões e deformações durante a Estampagem Incremental.

Essas abordagens poderiam contribuir significativamente para a evolução tecnológica dos coletores solares, otimizando sua produção e eficiência energética.

## 7 REFERÊNCIAS

- [1] J. M. ALLWOOD, D. BRAUN e O. MUSIC, “The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, pp. 1501-1510, 2010.
- [2] M. Amino, M. Mizoguchi, Y. Terauchi e T. Maki, “Current Status of “Dieless” Amino’s Incremental Forming,” vol. 81, pp. 54 - 62, 2014.
- [3] Y. LI, Chen, Xiaoxiao, LIU, Zhaobing, JIE, Sol, F. LI, J. LI e G. ZHAO, “A review on the recent development of incremental sheet-forming process,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* , vol. 92, p. 2439–2462, 03 Abril 2017.
- [4] H. LU, H. LIU e C. WANG, “Review on strategies for geometric accuracy improvement in incremental sheet forming,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* , vol. 102, p. 3381–3417, 2019.
- [5] C. Jovani, L. SCHAEFFER , A. DALEFFE, D. FRITZEN, V. SALVARO e F. P. d. SILVA, “Manufacture of custom-made cranial implants from DICOM® images using 3D printing, CAD/CAM technology and incremental sheet forming,” *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, 2014.
- [6] R. P. D. ARRUDA, A. BARONI e L. SCHAEFFER, “Sheet metal forming: new technologies applied to the fabrication of solar energy collector panels,” *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, vol. 1 N°2/3, 2008.
- [7] R. ALUMÍNIO, “Especial Mineração de Bauxita: como é feita a extração e qual a importância da atividade para o Brasil,” 30 setembro 2019. [Online]. Available: <https://revistaaluminio.com.br/especial-mineracao-de-bauxita-como-e-feita-a-extracao-e-qual-a-importancia-da-atividade-para-o-brasil/>. [Acesso em 05 01 2024].
- [8] C. B. d. A. CBA, *Laminados de alumínio*, São Paulo: Votorantim, 2002.
- [9] J. P. P. LIMA, “ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGA DE ALUMÍNIO ASTM/ABNT 1200 EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SOLICITAÇÃO MECÂNICA,” *Trabalho de Conclusão de Curso*, p. 50, 2016.
- [10] R. C. PEREIRA, R. T. S. SHIOTA, S. F. M. MELLO, V. J. ASSIS e J. R. BARTOLI, “EFICIÊNCIA TÉRMICA DE COLETORES SOLARES DE BAIXO CUSTO - CSBC,” Novembro 2006.
- [11] I. N. d. P. E. INPE, *Atlas brasileiro de energia solar*, 2.ed ed., São José dos Campos - SP, 2017.
- [12] J. A. Duffie e W. A. Beckman, *Solar Engineering*, 4th Edition. ed., I. H. N. J. John Wiley & Sons, Ed., 2013.
- [13] L. d. O. TAVARES, V. V. Dimbarre, F. M. Biglia, F. B. C. Cruz, P. H. D. d. Santos e T. A. Alves, *Análise Experimental do Desempenho Térmico de um Coletor Solar do Tipo Placa Plana*, vol. 13º, Conbrepro - Congresso brasileiro de Engenharia de Produção, 2023.
- [14] T. s. GREENER, *ENERGIAS RENOVÁVEIS NO BRASIL E NO MUNDO*, vol. 001, E-Book, 2018.
- [15] F. PACHECO, “Energias Renováveis: breves,” *Conjuntura e Planejamento*, Salvador:, pp. 4-11, outubro 2006.
- [16] J. M. B. MAIA, B. G. PEREIRA e F. A. LORA, “Materiais como alternativa para uso

- em Coletores Solares / Materials as an alternative for use in Solar Collectors,” Brazilian Applied Science Review, vol. 04, pp. 2895-2903, 21 09 2020.
- [17] J.-M. S. LAFAY, “Análise energética de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás,” Porto Alegre, 2005.
- [18] W. Weiss e M. Spörk-Dür, “Global Market Development and Trends in 2020 Detailed Market Data 2019,” nº 2021, 2021.
- [19] G. H. M. MOURA, “ESTUDO DE UM COLETOR SOLAR PLANO DE BAIXO CUSTO PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA NO MUNICÍPIO DE CARAÚBAS-RN,” RN, 2019.
- [20] B. NORTON, Solar Energy Thermal Technology, 1992, p. 279.
- [21] J. M. D. M. LEITAO, MACAGNAN, Mario Henrique e ROCHA, Tatiana Louise Ávila de Campos, “ESTUDO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS PARA A APLICAÇÃO EM COLETORES SOLARES PLANOS,” VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS , Gramado- RS, 2018.
- [22] NETO, Miguel Cabral de Macedo, GOMES, Iverton Rodrigo Barbosa, SOUZA, Luiz Guilherme Meira de, JUNIOR, Zulmar Joffli dos Santos e E. V. d. OLIVEIRA, “APLICAÇÃO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA O USO DA ENERGIA SOLAR,” HOLOS, vol. 04, pp. 212-223, 2014.
- [23] R. P. d. ARRUDA, Estampagem incremental na Conformação de chapas para Fabricação de Coletores Solares Planos, 2010.
- [24] INMETRO, REGULAMENTO DE AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE PARA SISTEMAS E EQUIPAMENTOS PARA AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA, 2008.
- [25] J. JESWIET, F. Micari, G. Hirt , A. Bramley , J. Duflou e J. Allwood , “Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal,” Anais do CIRP, vol. 54, nº 2, 2005.
- [26] R. L. d. P. CAVALCANTE, “ESTUDO DE UM COLETOR SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA COM GRADE ABSORVEDORA EM DUAS CONFIGURAÇÕES: COM E SEM ALETAS,” Trabalho de Conclusão de Curso, 2023.
- [27] P. SCHOLZ, D. Weise, L. Schmidt, M. Dembski, A. Stahr, . M. Dix, F. Duminica, L. C. Craz e . J. Koziorek, Sheet Metal Design Approach for 3D Shaped Facade Elements with Integrated Solar Thermal Functionality, Solar, 2023.
- [28] D. FRITZEN, “Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapas de Latão 70/30,” 2012.
- [29] J. D. BRESSAN, PREVISÃO DA CURVA LIMITE DA ESTRICÇÃO LOCAL NA CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS, Minas Gerais: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2009.
- [30] K. SIEGERT, T. Altan e T. Nakagawa, “Development and Manufacture of Dies for Car Body Production,” CIRP Annals, vol. 46, pp. 535-543, 1997.
- [31] A. DALEFFE, “Estudo do Processo de Estampagem incremental em Chapa de Alumínio Puro,” 2008.
- [32] I. I. HÄRTER, “ESTUDO PARA DETERMINAÇÃO DOS PARAMETROS IDEAIS PARA SIMULAÇÃO DOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS GROSSAS,” 2013.
- [33] M. L. GIPIELA, “ESTUDO DA EXPANSÃO DE FUIROS E ESTAMPABILIDADE DE CHAPAS DE AÇO MULTIFÁSICO CPW800,” 2012.
- [34] L. SCHAEFFER, Conformação de Chapas Metálicas, Porto Alegre, 2004, p. 193.

- [35] F. A. Lora, "Avaliação do processo de estampagem Profunda de chapas de aço BH 180 e BH 220 utilizado na indústria automobilística," Dissertação de Mestrado, p. 65, 2009.
- [36] C. R. M. MARQUES, "Estudo do processo de estampagem incremental em chapas de titânio comercialmente puro ASTM F-67 grau 2," Criciúma, 2022.
- [37] J. I. V. d. SENA, "Estampagem incremental: Um novo conceito de produção," Universidade de Aveiro, 2009.
- [38] I. PETER, E. FRACCHIA, I. CANALE e R. MAIORANO, "Incremental sheet forming for prototyping automotive modules," *Procedia Manufacturing*, vol. 32, p. 50–58, 2019.
- [39] S. GATEA, H. Ou e G. McCartney, "Review on the influence of process parameters," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, p. 479–499, 23 Fevereiro 2016.
- [40] J. CASTELAN, "Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano," Universidade Federal de Rio Grande do Sul - UFRGS, 2010.
- [41] G. d. S. DE LUCCA, "Análise de forças durante o processo de estampagem incremental com auxílio de extensimetria," UFRGS, 2015.
- [42] P. MARTINS, N. BAY, M. SKJOEDT e . M. SILVA, *Theory of single point incremental forming*, 1 ed., vol. 57, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2008, pp. 247-252.
- [43] J. M. d. C. SOEIRO, "ENFORMABILIDADE EM ESTAMPAGEM INCREMENTAL," 2014.
- [44] J. M. ALLWOOD, A. N. BRAMLEY e A. R. MILEHAM, *A Novel Method for the Rapid Production of Inexpensive Dies and Moulds with Surfaces Made by Incremental Sheet Forming*, 2 ed., vol. 220, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 2006, pp. 323-327.
- [45] G. MAXIMILIANO, "ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE MULTIPLOS PASSES EM CHAPA DE LATÃO C268," UFRGS- UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2016.
- [46] R. G. SCHREIBER, MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE DEFORMAÇÃO NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE DIFERENTES MATERIAIS, Porto Alegre: UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2022.
- [47] J. JESWIET, F. MICARI, G. HIRT, A. N. BRAMLEY, J. DUFLOU e J. ALLWOOD, *Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal*, 2 ed., vol. 54, *CIRP Annals*, 2005, pp. 88-114.
- [48] K. JACKSON, "The Mechanics of Incremental Sheet Forming," University of Cambridge, 2008.
- [49] S. SCHEFFER, A. PIERER, P. SCHOLZ, S. MELZER, D. WEISE e Z. RAMBOUSEK, "Incremental sheet metal forming on the example of car exterior skin," 2019.
- [50] B. T. ARAGHI, G. L. MANCO, M. BAMBACH e G. HIRT, *Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming*, 1 ed., vol. 58, *CIRP Annals*, 2009, pp. 225-228.
- [51] M. FURLANETTI, "Estudo do comparativo das deformações em flanges obtidos pelo processo de estampagem incremental através de elementos finitos e projeto de um suporte modulae," 2014.

- [52] C. C. YAMAUCHI, “Estudo da Influência do Tratamento Térmico Prévio na Estampagem Incremental de Chapas de Alumínio AA7475,” UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2019.
- [53] J. KOPAC e Z. KAMPUS, Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool, Vols. %1 de %2162-163, Journal of Materials Processing Technology, 2005, pp. 622-628.
- [54] T. ALTAN e A. E. TEKKAYA, “Sheet Metal Forming - Processes and Applications,” ASM International, 2012.
- [55] J. I. V. d. SENA, “Metodologia avançada para simulação de processos de estampagem incremental,” Universidade de Aveiro, 2015.
- [56] U. KHARE e M. PANDAGALE, “A Review of Fundamentals and Advancement in Incremental Sheet Metal forming,” IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE).
- [57] H. VANHOVE e Y. C. J. R. DUFLOU, “An explorative study on, the influence of an elliptical tool on incremental forming,” Procedia Manufacturing 29 (2019) 74–79, Vols. %1 de %218th International Conference on Sheet Metal, SHEMET 2019, nº Procedia Manufacturing 29 (2019) 74–79, 2019.
- [58] B. LU, Y. FANG, D. XU, J. CHEN, H. OU, N. MOSER e J. CAO, Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool, vol. 85, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, pp. 14-29.
- [59] A. R. TEIXEIRA, ANÁLISE DE PARÂMETROS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL PARA ALUMÍNIO PURO, Porto Alegre: UFGS- Universidade Federal de Rio Grande de Sul, 2019.
- [60] N. G. AZEVEDO, J. S. FARIAS, R. PEREIRA, P. TEIXEIRA, J. P. DAVIM e R. J. A. d. SOUZA, Lubrication aspects during Single Point Incremental Forming for steel and aluminum materials, vol. 16, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, p. 589–595.
- [61] K. JAWALE, J. F. DUARTE, A. REIS e M. B. SILVA, “Microstructural investigation and lubrication study for single point incremental forming of copper,” International Journal of Solids and Structures, 15 10 2018.
- [62] J. DUFLOU, Y. TUNÇKOL, A. SZEKERES e P. VANHERCK, Experimental study on force measurements for single point incremental forming, 1-3 ed., vol. 189, Journal of Materials Processing Technology, 2007, pp. 65-72.
- [63] D. D. STORKLE, D. MOLLENSIEP, . L. THYSSEN e B. KUHNENKOTTER, Geometry-dependent parameterization of local support in robot-based incremental sheet forming, vol. 15, Procedia Manufacturing, 2018, pp. 1164-1169.
- [64] j. BELCHIOR, L. LEOTOING, D. GUINES e E. COURTEILLE, A Process/Machine coupling approach: Application to Robotized Incremental Sheet Forming, 8 ed., vol. 214, Journal of Materials Processing Technology, 2014, pp. 1605-1616.
- [65] M. LINNEMAN, V. PSYK, E. DJAKOW, R. SPIRINGER, W. HOMBERG e D. LANDGREBE, High-Speed Incremental Forming – New Technologies For Flexible Production Of Sheet Metal Parts, vol. 27, Procedia Manufacturing, 2019, pp. 21-26.
- [66] R. A. d. SOUZA, F. JAF, J. B. FARIAS, J. N. D. TORRÃO, D. AFONSO e M. A. B. E. MARTINS, SPIF-A: On the development of a new concept of incremental forming machine, 5 ed., vol. 49, STRUCTURAL ENGINEERING AND MECHANICS, 2014, pp. 1225-4568.

- [67] L. LAMMINEN, Incremental Sheet Forming with an Industrial Robot – Forming Limits and Their Effect on Component Design, Vols. %1 de %26-8, Advanced Materials Research, 2005, pp. 457-464.
- [68] L. C. CAVALER, “Parâmetros de conformação para a estampagem incremental de chapas de aço inoxidável AISI 304L,” Tese Doutorado, 2010.
- [69] J. Castelan, “Utilização das Tecnologias CAD/CAM para Estampagem Incremental do Alumínio Série 1000,” UFRGS, Porto Alegre, 2007.
- [70] L. V. SY, MODELING OF SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING PROCESS FOR METAL AND POLYMERIC SHEET, Padova: Tese de doutorado, 2009.
- [71] V. H. D. S. BARROS, FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS EM CHAPAS FINAS DE ALUMÍNIO COMERCIALMENTE PURO USANDO O MÉTODO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL, Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2019.
- [72] C. C. YAMAUCHI, “Estudo da Influência do Tratamento Térmico,” Dissertação de Mestrado, 2019.
- [73] G. HUSSAIN, L. GAO e Z. Y. ZHANG, “Formability evaluation of a pure titanium sheet in the cold incremental forming process,” vol. 37, p. 920–926, 2007.
- [74] J. DUFLOU, B. LAUWERS, J. VERBERT e F. GELAUDE, “Medical application of single point incremental forming: Cranial plate manufacturing,” 2005.
- [75] J.-J. PARK e Y.-H. KIM, “Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique,” pp. 447-453, 2003.
- [76] R. G. SCHREIBER, ESTAMPAGEM INCREMENTAL E SOLDAGEM FSW PARA FABRICAÇÃO DE COLETOR SOLAR, Porto Alegre, 2018.
- [77] B. GOUVEIA, J. RODRIGUES e P. MARTINS, “Tecnologia da Deformação Plástica – Vol. III – Exercícios Resolvidos,” Instituto Superior Técnico Lisboa, Portugal, 2011.
- [78] F. A. LORA, “Avaliação das deformações no aço DC04 quando submetido ao processo híbrido de estampagem incremental posterior ao processo convencional,” 2014.
- [79] L. SHAEFFER, “Conformação Mecânica,” Imprensa livre, 2004.
- [80] P. J. d. SILVA, Estampagem incremental utilizada para prototipagem de peças de aço ABNT 1008 e ABNT 304, Brasília - DF: Repositório Institucional da UnB, 2012.
- [81] L. SCHAEFFER, Conformação de Chapas Metálicas, Porto Alegre, RS: Imprensa Livre, 2004, p. 193.
- [82] J. M. d. C. RODRIGUES e P. A. F. MARTINS, Tecnologia Mecânica - Tecnologia da Deformação Plástica : Fundamentos Teóricos, vol. 1, Escolar Editora, 2010, p. 695.
- [83] A. Garcia, J. A. Spim e C. A. d. Santos, Ensaios dos Materiais, Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008, p. 247.
- [84] W. d. J. CALLISTER e D. G. RETHWISCH, Ciência e engenharia de materiais: uma introdução, LTC \_\_ Livros Técnicos e Científicos Editora, 2016.
- [85] J. MICHEL e P. PICART, Size effects on the constitutive behaviour for brass in sheet metal forming, 3 ed., vol. 141, Journal of Materials Processing Technology, 2003, pp. 439-446.
- [86] L. SCAEFFER e A. ROCHA, Conformação Mecânica: Calculos Aplicados em Processos de Fabricação, 2007, p. 243.
- [87] D. FRITZEN, “Estudo dos Parâmetros de Conformabilidade para o Processo de Estampagem Incremental.,” Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,

- Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- [88] L. SCHAEFFER, *Manufatura por Conformação Mecânica.*, Porto Alegre, 2016.
- [89] W. J. ALI e A. O. EDREES, Theoretical Determination of Forming Limit Diagram for Steel, Brass and Aluminum alloy sheets, vol. 15, *AL-Rafidain Engineering Journal (AREJ)*, 2007, pp. 40-55.
- [90] J. CASTELAN, *Utilização das tecnologias CAD/CAM para estampagem incremental do alumínio série 1000*, LUME - Repositório Digital UFRGS, 2007.
- [91] J. P. P. LIMA, *ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGA DE ALUMÍNIO ASTM/ABNT 1200 EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SOLICITAÇÃO MECÂNICA*, Belo Horizonte MG, 2016.
- [92] D. N. CARDOSO, *EFEITO DO CICLO TÉRMICO NO ENCRUAMENTO DE LIGAS METÁLICAS COM CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DISTINTAS*, Belo Horizonte MG, 2019.
- [93] I. D. METAIS, "ALUMÍNIO 1200," *IMPÉRIO DOS METAIS*, [Online]. Available: [https://www.imperiodosmetais.com.br/pdf/download\\_ficha\\_tecnica/aluminio/1200.pdf](https://www.imperiodosmetais.com.br/pdf/download_ficha_tecnica/aluminio/1200.pdf). [Acesso em 10 Junho 2024].
- [94] COPPERMETAL, "Catálogo-Cobre," [Online]. Available: <https://www.coppermetal.com.br/catalogos/catalogo-cobre.pdf>. [Acesso em 30 01 2025].
- [95] M. M. d. Oliveira, "Análise da Eficiência do Cobre, Alumínio e PVC como Condutores Hidráulicos em Aquecedores Solar," UNESP, Guaratinguetá, 2011.
- [96] A. N. 6152, "Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente, ABNT, 2002.
- [97] C. Suntaxi, W. Monar, C. Maigua e S. Velasteguí, "Aplicação do Processo de Deformação Incremental para a Conformação de Chapas de Alumínio 1200 H14," *Revista Politécnica*, vol. 44, nº 1, pp. 15-20, outubro 2019.
- [98] E. - E. d. P. E. Energética, "Mudanças climáticas e Transição energética," [Online]. Available: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/clima-e-energia>. [Acesso em 04 01 2024].
- [99] M. R. Esmailpour, "Finite Element Simulation of Single Point Incremental Sheet Forming with Barlat 2004 Yield Function, CPFEM, and 3D RVE," 2018.
- [100] R. MINATEL, *Um Estudo Comparativo sobre a Recristalização de chapas de alumínio AA1200 e AA3003 Obtidas por Lingotamento Contínuo (twin roll caster) e por Fundição de Placas (direct chill)*, Universidade de São Paulo, 2009.
- [101] G. D. E. SOLAR, "Colectores Solares térmicos."
- [102] F. a. LORA, J. M. BRITO e D. FRITZEN, *Estudo do processo de estampagem incremental para aplicação na fabricação de placas absorvedoras de calor*, SENAFOR, 2019.
- [103] F. A. LORA, *Avaliação do processo de estampagem profunda de chapas de aço BH 180 e BH 220 utilizado na indústria automobilística*, LUME -Repositório Digital, 2009.
- [104] M. B. SILVA, M. SKJOEDT, L. M. ALVES e M. L. ALVES, "Single point incremental forming of metal sheets: experimentation and theoretical interpretation," *Conference: XXVIII SENAFOR*, 2008.
- [105] A. S. f. T. a. M. ASTM, *Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal - Designation: E 517 – 00*.

- [106] J. Allwood, N. Houghton e K. Jackson, "The design of an incremental forming machine," Proceedings of the 11th Conference on Sheet Metal, pp. 471-478, 2005.
- [107] Y. Li, W. Daniel, Z. Liu, H. Lu e P. Meehan, "Deformation mechanics and efficient force prediction in single point incremental forming," Journal of Materials Processing Technology, vol. 221, pp. 100-111, 2015.
- [108] L. Lamminen, "Incremental Sheet Forming with an Industrial Robot – Forming Limits and Their Effect on Component Design," Trans Tech Publications - TTP, pp. 457-464, 2005.
- [109] H. Meier, B. Buff, R. Laurischkat e V. Smukala, "Increasing the part accuracy in dieless robot-based incremental sheet metal forming," CIRP Annals - Manufacturing Technology, pp. 233-238, 2009.
- [110] H. Meier, C. Magnus e V. Smukala, "Impact of superimposed pressure on dieless incremental sheet metal forming with two moving tools," CIRP Annals-Manufacturing Technology, p. 4, 2011.
- [111] V. S. LE, MODELING OF SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING PROCESS FOR METAL AND POLYMERIC SHEET, Itália: Tese de Doutorado, 2009.
- [112] J. M. d. C. Rodrigues e P. A. F. Martins, Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica, 2 ed., Vols. %1 de %2l - Fundamentos Teóricos, Lisboa: Escolar Editora, 2010, p. 695.
- [113] J. Allwood, D. Braun e O. Music, "The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming," Journal of Materials Processing Technology, p. 1501–1510, 2010.