



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



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

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL E SOLDAGEM FSW
PARA FABRICAÇÃO DE COLETOR SOLAR**

Rafael Gustavo Schreiber

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre
2018

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

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL E SOLDAGEM FSW
PARA FABRICAÇÃO DE COLETOR SOLAR**

Rafael Gustavo Schreiber
Engenheiro Mecânico

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

Área de concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2018

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

Orientador: Prof. Dr. Lirio Schaeffer
PPGE3M/UFRGS

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler – Faculdade SATC

Prof. Dr. Anderson Daleffe – Faculdade SATC

Prof. Dr. Vinicius Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense (IFSul)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

*Aos meus pais
Sergio Roberto Schreiber (in memoriam)
e Zenilda da Rosa Schreiber.*

AGRADECIMENTOS

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

À minha esposa, Camila Schreiber, por sua compreensão, sua companhia e seu incentivo em todos os dias e noites de estudo.

Ao Felipe Brandão e à toda a equipe da Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico (Sedetec) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pelo apoio e orientação quanto ao registro da patente deste trabalho no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) sob o código BR 10 2017 024107 6.

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

Ao colega Juliano Boeira Ercolani pelo auxílio na realização do ensaio uniaxial de tração e, à colega Camila Lisboa pelo auxílio no desenvolvimento do ensaio Nakajima no Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS.

SUMÁRIO

| | |
|--|-------------|
| LISTA DE FIGURAS | VII |
| LISTA DE TABELAS | XI |
| LISTA DE ABREVIATURAS..... | XII |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XIII |
| RESUMO..... | XV |
| ABSTRACT | XVI |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 17 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA | 20 |
| 1.2 OBJETIVO GERAL..... | 22 |
| 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 22 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA..... | 23 |
| 2.1 SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR | 23 |
| 2.2 CARACTERIZAÇÃO DE CHAPAS | 30 |
| 2.2.1 ENSAIO DE TRAÇÃO | 31 |
| 2.2.2 ENSAIO NAKAJIMA | 35 |
| 2.2.3 RETA LIMITE DE FRATURA..... | 38 |
| 2.3 ESTAMPAGEM INCREMENTAL | 43 |
| 2.3.1 Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF)..... | 44 |
| 2.3.2 Estampagem Incremental por Dois Pontos (TPIF)..... | 46 |
| 2.3.3 Estampagem Incremental de Múltiplos Passes..... | 50 |
| 2.4 SOLDAGEM FSW | 52 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 59 |
| 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL..... | 60 |
| 3.2 EXPERIMENTOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL | 61 |
| 3.3 EXPERIMENTOS DE SOLDAGEM FSW | 68 |
| 4 ANÁLISE EXPERIMENTAL..... | 75 |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL..... | 75 |
| 4.2 EXPERIMENTOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL | 78 |
| 4.3 EXPERIMENTOS DE SOLDAGEM FSW | 91 |
| 5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS..... | 97 |
| 6 CONCLUSÕES..... | 99 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 101 |
| 8 | REFERÊNCIAS | 102 |
| | ANEXOS..... | 108 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Geração de energia elétrica no mundo por fonte de 1971 a 2015 | 17 |
| Figura 2: Emissões de CO ₂ por combustível no mundo de 1971 a 2015 | 18 |
| Figura 3: Geração de energia elétrica no Brasil (Jan a Dez/2017) - Participação por fonte | 18 |
| Figura 4: Países com maior capacidade instalada de coletores solares | 19 |
| Figura 5: Irradiação Global Horizontal (GHI): (a) no Brasil e (b) na Alemanha..... | 20 |
| Figura 6: Novo modelo de coletor solar: (a) Vista explodida e (b) Detalhe de montagem da placa absorvedora | 21 |
| Figura 7: Funcionamento do SAS Termossifão | 24 |
| Figura 8: Funcionamento do SAS Bombeado | 25 |
| Figura 9: Coletor plano fechado: (a) Principais componentes e (b) Instalação..... | 26 |
| Figura 10: Funcionamento do coletor plano fechado..... | 27 |
| Figura 11: Inclinação e orientação do coletor solar instalado no hemisfério sul | 28 |
| Figura 12: Coletor solar com tubo evacuado: (a) Funcionamento e (b) Instalação .. | 28 |
| Figura 13: Reservatório Térmico: (a) Modelo comercial e (b) Funcionamento | 29 |
| Figura 14: Coletor plano aberto: (a) Modelo comercial e (b) Instalação para aquecimento de água de piscina | 30 |
| Figura 15: Máquina de ensaio de tração | 31 |
| Figura 16: Corpo de prova de seção retangular para ensaio de tração: (a) Antes do ensaio e (b) Após o ensaio | 31 |
| Figura 17: Curva de engenharia “Tensão x Deformação” | 33 |
| Figura 18: Curva de engenharia, curva verdadeira e curva corrigida para ensaio de tração | 34 |
| Figura 19: Corpos de prova utilizados no ensaio Nakajima..... | 35 |
| Figura 20: Representação do círculo gravado na chapa e a elipse formada após a deformação..... | 36 |
| Figura 21: CLC de Alumínio, Aço e Latão | 37 |
| Figura 22: Comparação entre a CLC e a RLF | 38 |
| Figura 23: Exemplo de RLF..... | 40 |

| | |
|--|----|
| Figura 24: Relação entre as tensões no local de fratura por Estampagem Incremental, para um estado plano de tensões e de deformações | 43 |
| Figura 25: Máquina de Estampagem Incremental AMINO | 44 |
| Figura 26: Representação do processo de SPIF | 45 |
| Figura 27: TPIF com matriz positiva: (a) Situação inicial e (b) Situação final | 47 |
| Figura 28: TPIF com matriz negativa: (a) Situação inicial e (b) Situação final..... | 47 |
| Figura 29: TPIF com matriz parcial: (a) Situação inicial e (b) Situação final..... | 48 |
| Figura 30: Equipamento F3T dedicado ao processo TPIF com apoio móvel | 49 |
| Figura 31: TPIF com apoio móvel: (a) Posicionamento dos robôs e (b) Posicionamento das ferramentas | 49 |
| Figura 32: Processo MSPIF e o efeito de encruamento da chapa a cada passe | 50 |
| Figura 33: Estampagem Incremental de Múltiplos Passes com TPIF: (a) Estágios do processo e (b) Pré-forma e forma final do componente estampado..... | 51 |
| Figura 34: Processo de Soldagem FSW: (a) Função da ferramenta e (b) Partes da ferramenta | 52 |
| Figura 35: Etapas do processo de Soldagem FSW | 55 |
| Figura 36: Processo de Soldagem FSW com ferramenta acionada por braço robótico: (a) Braço robótico realizando a soldagem e (b) Detalhe ampliado da ferramenta e dos dispositivos de fixação..... | 55 |
| Figura 37: Macroestrutura da Soldagem FSW | 56 |
| Figura 38: Junta sobreposta de alumínio AA 1100 soldada pelo processo FSW: (a) Vista superior e (b) Vista frontal | 57 |
| Figura 39: Junta de topo de alumínio AA 5182-O soldada pelo processo FSW com diferentes velocidades de avanço (a) submetida ao ensaio de tração | 58 |
| Figura 40: Detalhamento da placa absorvedora..... | 59 |
| Figura 41: Diagrama de blocos para o desenvolvimento dos experimentos | 60 |
| Figura 42: Ferramentas para Estampagem Incremental: (a) Aplicada aos canais de diâmetro 9,5 mm e (b) Aplicada aos canais de diâmetro 22 mm..... | 62 |
| Figura 43: Experimento para análise de parâmetros de Estampagem Incremental . | 63 |
| Figura 44: Trajetória da ferramenta nos experimentos para análise de parâmetros em Estampagem Incremental..... | 63 |
| Figura 45: Estampagem Incremental de canal de diâmetro 9,5 mm sendo realizado no centro de usinagem CNC | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 46: Estampagem Incremental de canal de diâmetro 22 mm sendo realizado no centro de usinagem CNC | 65 |
| Figura 47: Local de medição da elipse para determinação das deformações | 65 |
| Figura 48: Variação de dimensões dos círculos gravados na chapa e sentido das tensões | 66 |
| Figura 49: Vista explodida do dispositivo de Estampagem Incremental | 67 |
| Figura 50: Etapas de Estampagem Incremental da chapa | 67 |
| Figura 51: Estampagem Incremental da chapa | 68 |
| Figura 52: Projeto da ferramenta de Soldagem FSW | 69 |
| Figura 53: Ferramenta de Soldagem FSW | 69 |
| Figura 54: Detalhe do dispositivo de Soldagem FSW | 70 |
| Figura 55: Corpos de prova para os experimentos de Soldagem FSW | 70 |
| Figura 56: Corpo de prova soldado para o ensaio de dobramento | 71 |
| Figura 57: Ensaio de dobramento na junta soldada: (a) Máquina de ensaios e (b) Detalhe dos elementos do dispositivo usado nos ensaios | 71 |
| Figura 58: Métodos de dobra: (a) Dobra na face da solda e (b) Dobra na raiz da solda | 72 |
| Figura 59: Corpo de prova soldado para ensaio de tração | 72 |
| Figura 60: Corpo de prova para ensaio de tração de junta sobreposta com Soldagem FSW | 73 |
| Figura 61: Ensaio de tração na junta soldada: (a) Máquina de ensaios e (b) Região da solda durante a realização do ensaio | 73 |
| Figura 62: Soldagem FSW da placa absorvedora | 74 |
| Figura 63: Curva de engenharia “Tensão x Deformação” para alumínio AA1200-H14 para ensaio de tração | 75 |
| Figura 64: Curva de escoamento para alumínio AA1200-H14 | 76 |
| Figura 65: Corpos de prova após realização do ensaio Nakajima | 77 |
| Figura 66: Local da fratura e da elipse para determinação das deformações | 77 |
| Figura 67: CLC para alumínio AA1200-H14 | 78 |
| Figura 68: Variação de espessura na chapa estampada | 80 |
| Figura 69: Início da trinca nos ensaios 1 a 4 com ferramenta de diâmetro $df = 9,5$ mm | 80 |
| Figura 70: Início da trinca nos ensaios 5 a 16 com ferramenta de diâmetro $df = 9,5$ mm | 81 |

| | |
|--|----|
| Figura 71: Relação de profundidade sem trinca (h) e rotação (N) nos ensaios com ferramenta diâmetro $df = 9,5$ mm | 82 |
| Figura 72: Relação de profundidade sem trinca (h) e incremento vertical (Δz) nos ensaios com ferramenta de diâmetro $df = 9,5$ mm | 83 |
| Figura 73: Comparação das deformações obtidas na CLC para AA1200-H14 e na Estampagem Incremental com ferramenta de diâmetro $df = 9,5$ mm | 83 |
| Figura 74: RLF para os 16 experimentos com ferramenta de diâmetro $df = 9,5$ mm | 84 |
| Figura 75: Início da trinca nos ensaios com ferramenta de diâmetro $df = 22$ mm | 87 |
| Figura 76: Relação de profundidade sem trinca (h) e incremento vertical (Δz) nos ensaios com ferramenta de diâmetro $df = 22$ mm | 87 |
| Figura 77: RLF para os experimentos com ferramenta de diâmetro $df = 22$ mm | 88 |
| Figura 78: Maior deformação (φ_1) em função do incremento vertical (Δz) com rotação 50 rpm e com ferramenta de diâmetro $df = 9,5$ mm e de diâmetro $df = 22$ mm..... | 88 |
| Figura 79: Chapa estampada | 89 |
| Figura 80: Deformação relativa em espessura nos canais estampados do protótipo: (a) Canal com diâmetro 9,5 mm e (b) Canal com diâmetro 22 mm | 90 |
| Figura 81: Realização dos experimentos de Soldagem FSW | 91 |
| Figura 82: Corpos de prova após ensaio de dobramento na raiz da solda e na face da solda | 92 |
| Figura 83: Dobra na raiz da solda: (a) Região interna da dobra e (b) Região externa da dobra | 92 |
| Figura 84: Dobra na face da solda: (a) Região interna da dobra e (b) Região externa da dobra | 93 |
| Figura 85: Corpos de prova após ensaio de tração..... | 93 |
| Figura 86: Região da fratura nos ensaios de tração..... | 94 |
| Figura 87: Curva Tensão x Deformação para os corpos de prova soldados com diferentes velocidades de avanço da ferramenta: (a) 100 mm/min, (b) 200 mm/min, (c) 300 mm/min e (d) 400 mm/min..... | 94 |
| Figura 88: Placa absorvedora após a soldagem | 95 |
| Figura 89: Placa absorvedora do coletor solar: (a) Indicação das juntas soldadas e (b) Indicação dos locais de passagem de água..... | 96 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Modelos de ferramentas aplicadas ao processo FSW..... | 53 |
| Tabela 2: Tipo de juntas aplicadas ao processo de Soldagem FSW..... | 54 |
| Tabela 3: Análise de estampabilidade na Estampagem Incremental de AA1200-H14 para ferramenta de diâmetro $df = 9,5$ mm | 79 |
| Tabela 4: Análise de temperatura na Estampagem Incremental de AA1200-H14.... | 85 |
| Tabela 5: Análise de estampabilidade na Estampagem Incremental de AA1200-H14 para ferramenta de diâmetro $df = 22$ mm | 86 |
| Tabela 6: Variação de espessura dos canais estampados no protótipo..... | 90 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de normas Técnica; |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica; |
| ANVISA | Agência Nacional de Vigilância Sanitária; |
| CDT | Controlador Diferencial de Temperatura; |
| CLC | Curva Limite de Conformação; |
| CNC | Comando Numérico Computadorizado; |
| F3T | Tecnologia Ford de Fabricação de Formas Livres (<i>Ford Freeform Fabrication Technology</i>); |
| FSW | Soldagem por Fricção (<i>Friction Stir Welding</i>); |
| HRC | Dureza Rockwell C (<i>Hard Rockwell C</i>); |
| HSS | Aço Rápido (<i>High Speed Steel</i>); |
| IEA | Agência Internacional de Energia (<i>International Energy Agency</i>); |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade industrial; |
| INPI | Instituto Nacional da Propriedade Industrial; |
| ISO | Organização Internacional para Padronização (<i>International Organization for Standardization</i>); |
| MSPIF | Estampagem Incremental de Ponto Único por Múltiplos Passes (<i>Multi Single Point Incremental Forming</i>); |
| NBR | Norma Brasileira; |
| PPGE3M | Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais |
| PROCEL | Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica; |
| RDC | Resolução da Diretoria Colegiada; |
| RLF | Reta Limite de Fratura; |
| SAE | Sociedade dos Engenheiros Automotivos (<i>Society of Automotive Engineers</i>); |
| SAS | Sistemas de Aquecimento Solar; |
| Sedetec | Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; |
| SPIF | Estampagem Incremental de Ponto Único (<i>Single Point Incremental Forming</i>); |
| TPIF | Estampagem Incremental por Dois Pontos (<i>Two Points Incremental Forming</i>); |
| UFRGS | Universidade Federal do Rio Grande do Sul; |
| ZCIT | Zona de Convergência Intertropical; |
| ZTA | Zona Termicamente Afetada; |
| ZTMA | Zona Termo Mecanicamente Afetada. |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|-------|---|-----------------------|
| a | Velocidade de avanço da ferramenta | (mm/min) |
| A_0 | Área inicial da seção transversal do corpo de prova para ensaio de tração | (mm ²) |
| A_1 | Área instantânea da seção transversal do corpo de prova para ensaio de tração | (mm ²) |
| b_0 | Largura inicial do corpo de prova para o ensaio de tração | (mm) |
| d | Diâmetro do círculo gravado na chapa - para análise das deformações | (mm) |
| d_1 | Comprimento da elipse - obtida pela deformação do círculo gravado na chapa para análise das deformações | (mm) |
| d_2 | Largura da elipse - obtida pela deformação do círculo gravado na chapa para análise das deformações | (mm) |
| d_f | Diâmetro da ferramenta de Estampagem Incremental | (mm) |
| d_m | Distância de medição | (mm) |
| F | Força | (N) |
| GHI | Irradiação Global Horizontal (<i>Global Horizontal Irradiance</i>) | (kWh/m ²) |
| h | Profundidade estampada sem trinca | (mm) |
| h' | Profundidade estampada em que ocorre a trinca | (mm) |
| k_f | Tensão verdadeira | (N/mm ²) |
| L | Latitude | (°) |
| l_0 | Comprimento inicial do corpo de prova para o ensaio de tração | (mm) |
| l_1 | Comprimento final do corpo de prova para o ensaio de tração | (mm) |
| l_c | Comprimento paralelo do corpo de prova para o ensaio de tração | (mm) |
| l_t | Comprimento total do corpo de prova para o ensaio de tração | (mm) |
| N | Rotação da ferramenta | (rpm) |
| R_c | Raio crítico da ferramenta de Estampagem Incremental | (mm) |
| s_0 | Espessura inicial da chapa | (mm) |
| s_1 | Espessura final da chapa | (mm) |
| v | Velocidade de avanço na máquina de ensaio de tração | (mm/s) |
| V_0 | Volume inicial | (mm ³) |
| V_1 | Volume final | (mm ³) |

Símbolos gregos:

| | | |
|------------------------|---|----------------------|
| α | Razão de tensões principais | (-) |
| β | Razão de deformações principais | (-) |
| θ | Ângulo de inclinação do coletor solar | (°) |
| γ | Espessura média da solda | (m) |
| ΔT | Variação de temperatura | (°C) |
| Δz | Incremento vertical da ferramenta | (mm) |
| ε | Deformação relativa | (%) |
| ε_s | Deformação relativa de espessura | (%) |
| φ | Deformação verdadeira | (-) |
| φ_1 | Deformação verdadeira no comprimento | (-) |
| φ_2 | Deformação verdadeira na largura | (-) |
| φ_3 | Deformação verdadeira na espessura | (-) |
| φ_{eq} | Deformação verdadeira equivalente | (-) |
| λ | Ângulo de parede de chapa com o eixo vertical | (°) |
| Ψ | Ângulo de parede de chapa com o eixo horizontal | (°) |
| Ψ' | Ângulo inicial de parede de chapa com o eixo horizontal | (°) |
| σ | Tensão de engenharia | (N/mm ²) |
| $\sigma_{0,2}$ | Tensão de escoamento | (N/mm ²) |
| σ_1 | Maior tensão aplicada no plano | (N/mm ²) |
| σ_2 | Menor tensão aplicada no plano | (N/mm ²) |
| σ_3 | Tensão aplicada no eixo Z | (N/mm ²) |
| σ_{eq} | Tensão equivalente | (N/mm ²) |
| $\sigma_{m\acute{a}x}$ | Tensão máxima admissível | (N/mm ²) |
| θ | Ângulo de inclinação do coletor solar | (°) |

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo inovador de coletor solar plano, com placa absorvedora fabricada por Estampagem Incremental e Soldagem FSW (*Friction Stir Welding*). Esta placa absorvedora é constituída de duas chapas de alumínio AA1200-H14 com espessura de 1 mm, estampadas e soldadas em simetria, a fim de que na união das chapas sejam deixados canais para passagem de água. Neste estudo foi realizada a caracterização do material por Ensaio de Tração e Ensaio Nakajima. Para determinação dos parâmetros de Estampagem Incremental foram realizados 16 experimentos com ferramenta de diâmetro $d_f = 9,5$ mm, variando a rotação de $N = 50$ rpm a 800 rpm e o incremento vertical de $\Delta z = 2$ mm a 0,2 mm, mantendo o avanço em $a = 250$ mm/min. E também foram realizados 3 experimentos com ferramenta $d_f = 22$ mm, variando o incremento vertical de $\Delta z = 2$ mm a 0,5 mm, mantendo a rotação em $N = 50$ rpm e o avanço em $a = 250$ mm/min. Para determinação dos parâmetros de Soldagem FSW foram realizados 4 experimentos com ferramenta de ombro de diâmetro 8 mm e pino roscado M3x0,5, mantendo a rotação em $N = 1500$ rpm e variando o avanço entre $a = 100$ mm/min a 400 mm/min. Em seguida foi fabricado um protótipo de placa absorvedora de coletor solar com área de 0,12 m². Nos experimentos realizados foi constatado que é possível obter maiores deformações na Estampagem Incremental do que na Estampagem Convencional e que as deformações são mais elevadas quando se utiliza menores diâmetros, maiores rotações e menores incrementos verticais da ferramenta. Na Soldagem FSW não foi constatada influência na qualidade do cordão de solda em relação à variação do avanço da ferramenta. Neste estudo também se verificou que é possível fabricar protótipos de placas absorvedoras de coletores solares pelos processos de Estampagem Incremental e Soldagem FSW. No entanto, para coletores em tamanho comercial, novos estudos são necessários para melhorar a forma de fixação das chapas durante a Soldagem FSW.

Palavras chaves: Coletor Solar Plano, Estampagem Incremental, Soldagem FSW (*Friction Stir Welding*), Alumínio.

ABSTRACT

This work presents an innovative model of flat plate solar collector, with absorber plate manufactured using Incremental Sheet Forming (ISF) and Friction Stir Welding (FSW). This absorber plate consists of two AA1200-H14 aluminum sheets with a thickness of 1 mm, stamped and welded in symmetry, in order to leave channels for the passage of water. In this study the characterization of the material by Nakajima Test and Traction Test was performed. In order to determine the parameters of ISF, 16 experiments were performed with a tool of diameter $d_f = 9.5$ mm, varying the rotation speed of $N = 50$ rpm at 800 rpm and the step down of $\Delta z = 2$ mm to 0.2 mm, maintaining the feed rate at $a = 250$ mm/min. Also, 3 experiments with tool $d_f = 22$ mm were performed, varying the step down of $\Delta z = 2$ mm to 0.5 mm, maintaining the rotation speed at $N = 50$ rpm and the feed rate at $a = 250$ mm/min. For determination of FSW parameters, 4 experiments with 8 mm diameter shoulder tool and M3x0.5 pin were performed, maintaining the rotation speed at $N = 1500$ rpm and varying the feed rate from $a = 100$ mm/min to 400 mm/min. A prototype solar collector absorber plate with a 0.12 m² area was then manufactured. In the experiments carried out, it was found that it is possible to obtain greater deformations in the ISF than in the Conventional Stamping and that the deformations are higher when using smaller diameters, higher rotations and smaller step downs of the tool. In FSW, no influence was observed in the quality of the weld bead in relation to the variation of the tool feed rate. In this study it was also verified that it is possible to manufacture prototypes of solar collector absorber plates by the processes of ISF and FSW. However, for commercial size collectors, further studies are needed to improve the way the plates are fixed during FSW.

Key words: Flat Plate Solar Collector, Incremental Sheet Forming (ISF), Friction Stir Welding (FSW), Aluminum.

1 INTRODUÇÃO

À medida que ocorrem avanços tecnológicos, crescimento da economia e aumento populacional em todo o mundo, também ocorre um aumento na demanda e no consumo de energia elétrica. Mesmo que o aumento no consumo de energia possa indicar maior conforto e qualidade de vida para a sociedade é importante observar que a geração de energia elétrica através de combustíveis fósseis traz como consequência impacto ambiental, devido aos altos índices de emissão de gases de efeito estufa, provenientes da queima destes combustíveis (ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

De 1971 a 2015 houve significativo aumento na geração e no consumo de energia elétrica no mundo, conforme indicado na Figura 1. No entanto, os combustíveis fósseis ainda são as fontes mais significativas de geração, enquanto outras (geotérmica, solar, eólica, etc.) começaram a ter alguma representatividade mundial somente nos últimos anos (IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017).

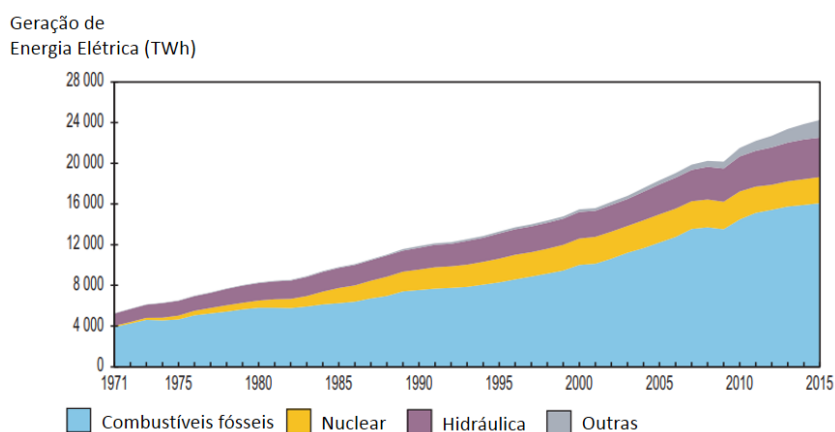


Figura 1: Geração de energia elétrica no mundo por fonte de 1971 a 2015

Fonte: IEA – International Energy Agency, 2017

Em virtude do aumento no consumo de energia proveniente de combustíveis fósseis (carvão, óleo e gás natural) também aumentaram significativamente as emissões de CO₂ em todo o mundo. Conforme indicado na Figura 2, as emissões passaram de 15.458 Mt de CO₂ em 1971 para 32.294 Mt de CO₂ em 2015, ou seja, mais do que o dobro de emissões por ano (IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017).

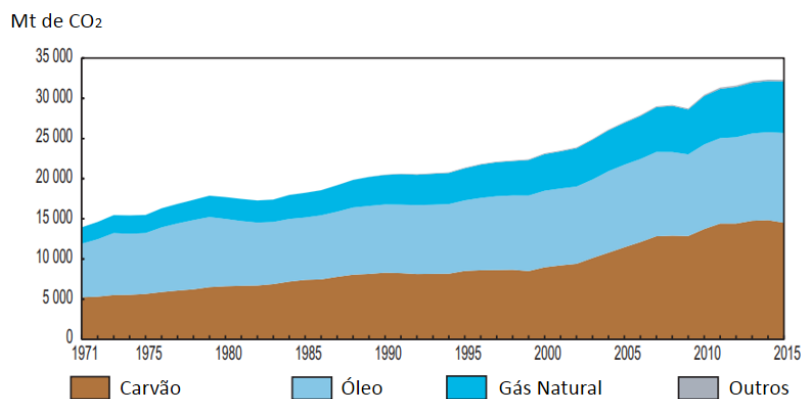


Figura 2: Emissões de CO₂ por combustível no mundo de 1971 a 2015

Fonte: Adaptado de IEA – International Energy Agency, 2017

A matriz energética brasileira possui em sua maioria a participação de fontes renováveis. A energia hidráulica é a principal fonte para geração de energia elétrica no Brasil com 72% de participação na matriz energética, depois está a energia eólica (com contribuição de 7,2%) e a biomassa (com contribuição de 1,7%). Somadas estas três correspondem a 80,9% de toda a matriz energética do país para a geração de energia elétrica, contra 19,1% de participação de fontes não renováveis, conforme indicado na Figura 3 (ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017).

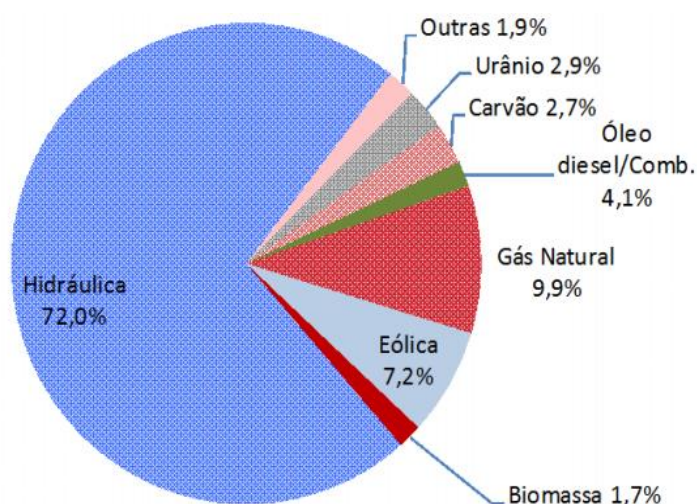


Figura 3: Geração de energia elétrica no Brasil (Jan a Dez/2017) - Participação por fonte

Fontes: ANEEL, 2017

Dentre as fontes não renováveis estão os combustíveis fósseis (gás natural, óleo e carvão) com contribuição de 16,7% sendo fontes geradoras de gases de

efeito estufa. A energia nuclear participa com 2,9% e, apesar das grandes reservas de urânio no Brasil e mesmo que esta fonte de energia não provoque a emissão de gases de efeito estufa, não tem sido bem aceita pela opinião pública devido aos riscos associados a ela, além do problema em armazenar os rejeitos radioativos (PEREIRA *et al.*, 2006).

O Brasil possui grande potencial para utilização de energia solar devido aos altos valores de radiação solar global média incidente sobre o país, podendo ser aplicado na geração de energia solar fotovoltaica ou na economia de energia elétrica através da instalação de sistemas de aquecimento solar (uso da energia solar térmica). Estima-se que 25% do consumo de energia elétrica consumida nas residências do país seja aplicada ao aquecimento de água com chuveiro elétrico, por este fato a utilização de sistemas de aquecimento solar para banho é uma opção com alto potencial de eficiência energética no Brasil (PEREIRA *et al.*, 2006).

Na área de aquecimento solar o Brasil já ocupa a quinta posição no *ranking* mundial, com sua produção principal proveniente da instalação de coletores planos fechados, conforme indicado na Figura 4 (MAUTHNER; WEISS; SPÖRK-DÜR, 2017).

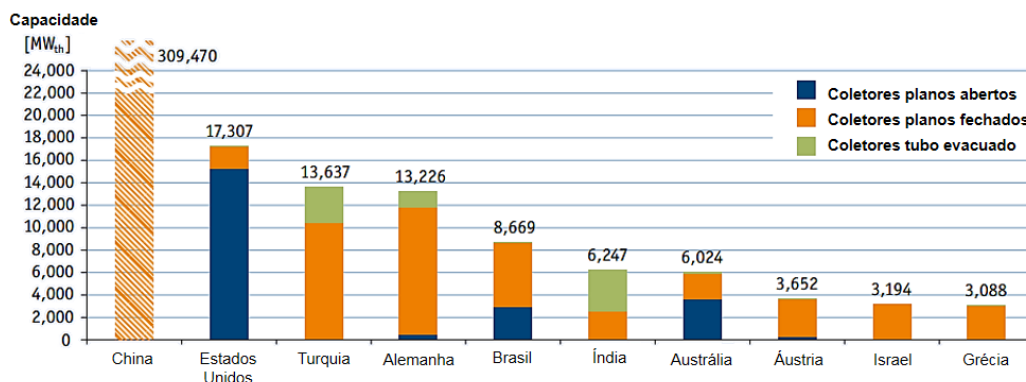


Figura 4: Países com maior capacidade instalada de coletores solares

Fonte: Adaptado de MAUTHNER, WEISS, SPÖRK-DÜR, 2017

À frente do Brasil no *ranking* mundial estão a China, os Estados Unidos, a Alemanha e a Turquia. Sendo que a China (1º lugar) possui capacidade instalada cerca de 18 vezes maior em relação aos Estados Unidos (2º lugar).

Outro fator de destaque neste *ranking* na área de sistemas de aquecimento solar é a disparidade entre Brasil e Alemanha. Mesmo com valores de radiação solar global de 1000 kWh/m² a 1200 kWh/m², a Alemanha apresenta quase o dobro da

capacidade de coletores solares instalados que o Brasil, que possui maior radiação solar global (1534 kWh/m² a 2264 kWh/m²) e maior área geográfica (SOLARGIS, 2016; SOLARGIS, 2017). A Figura 5(a) apresenta valores de Irradiação Global Horizontal (GHI) no Brasil e a Figura 5(b) apresenta os valores de GHI na Alemanha.

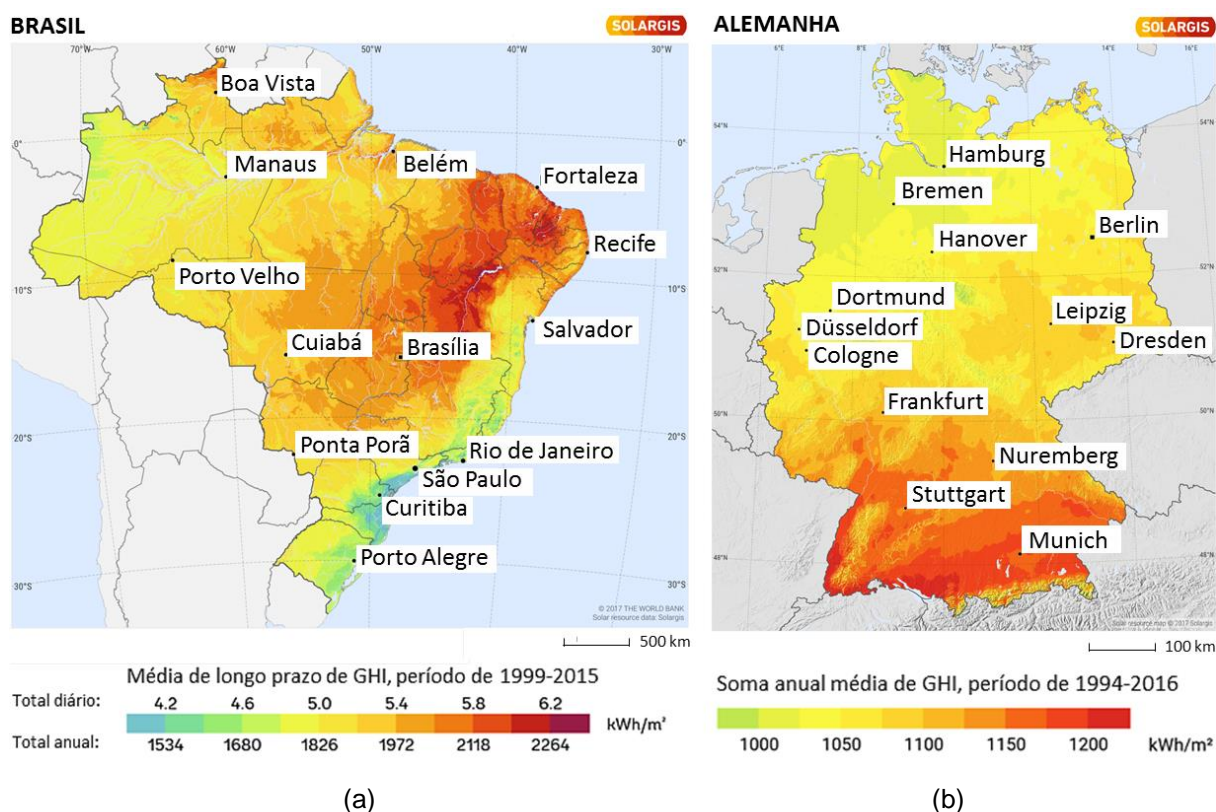


Figura 5: Irradiação Global Horizontal (GHI): (a) no Brasil e (b) na Alemanha

Fonte: SOLARGIS, 2016; SOLARGIS, 2017

1.1 JUSTIFICATIVA

O Brasil possui um alto potencial para geração de energia por meio de Sistemas de Aquecimento Solar. Em virtude do consumo destes produtos no mercado brasileiro, fica clara a importância do desenvolvimento de coletores solares de fabricação mais rápida e com menor custo.

Este trabalho de pesquisa apresenta uma nova alternativa para a fabricação da placa absorvedora de um Coletor Plano Fechado, elemento principal do Sistema de Aquecimento Solar. Este modelo teve seu depósito de patente de invenção no

Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), com título “Coletor Solar e Processo de Fabricação de Coletor Solar” sob número BR 10 2017 024107 6 no dia 09/11/2017.

Os coletores solares mais difundidos no Brasil possuem serpentina fabricada por tubos de cobre soldados (por onde circula a água a ser aquecida) cobertos por várias aletas encaixadas sobre os tubos. As aletas têm a função de absorver a radiação solar e conduzi-la para os tubos.

Pelo fato da soldagem oxiacetilênica da serpentina ser um processo de fabricação manual e relativamente lento, a alternativa apresentada neste trabalho consiste em uma proposta de coletor constituído pela união de duas chapas estampadas, formando uma placa absorvedora com canais estampados, de forma que a passagem de água se dê nos canais formados entre elas sem a necessidade da utilização de tubos soldados. Nesta proposta, por se tratar de um protótipo, as chapas estampadas são conformadas pelo processo de Estampagem Incremental e soldadas pelo processo FSW. Na Figura 6(a) é apresentada uma vista explodida da proposta de coletor estampado com seus principais componentes, e na Figura 6(b), é apresentada a placa absorvedora indicando por onde ocorre a passagem de água e os locais em que é aplicada a soldagem FSW para união das chapas.

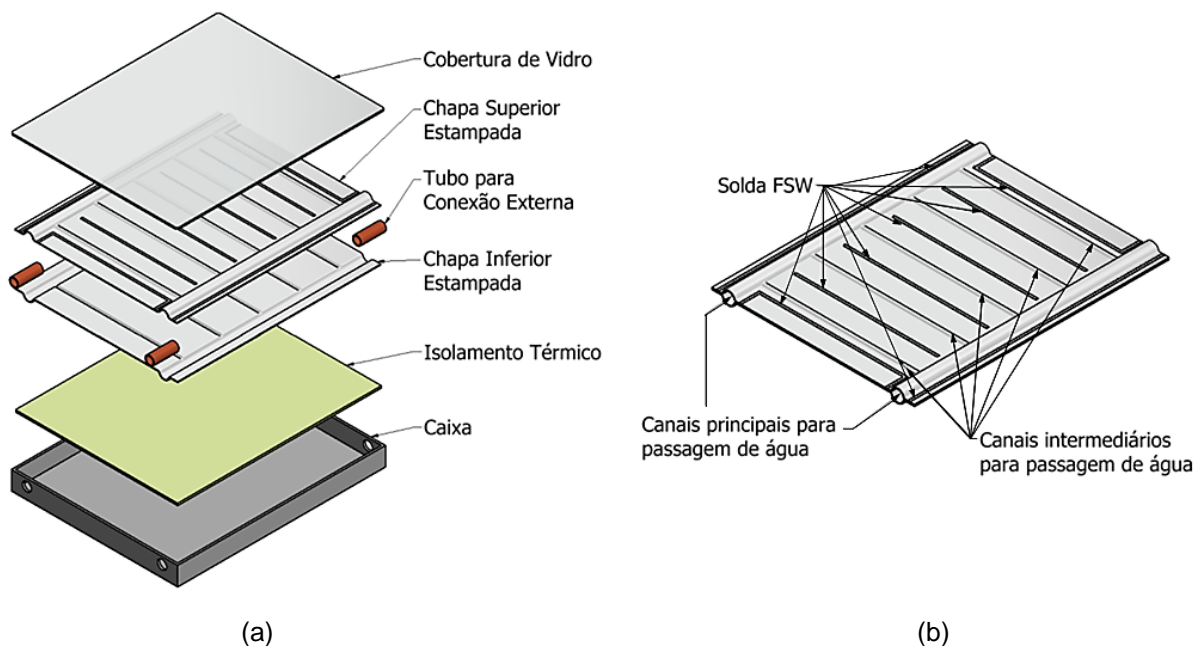


Figura 6: Novo modelo de coletor solar: (a) Vista explodida e (b) Detalhe de montagem da placa absorvedora

1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma alternativa de fabricação de placa absorvedora para coletores solares planos que seja rápida e com menor custo que os modelos comerciais. Desta forma, foi fabricado um protótipo constituído de duas chapas conformadas por Estampagem Incremental montadas em simetria e unidas através de Soldagem FSW, de forma que a passagem de água ocorra nos canais estampados entre as duas chapas.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho, aplicados na fabricação de um novo modelo de placa absorvedora para coletores solares, estão relacionados a seguir:

- Realizar caracterização de chapas de alumínio AA1200–H14 por Ensaio Uniaxial de Tração e Ensaio Nakajima;
- Definir os parâmetros de Estampagem Incremental para conformação dos canais das chapas;
- Definir os parâmetros do processo de Soldagem FSW para união das chapas;
- Montar um protótipo de placa absorvedora para coletor solar plano, através de Estampagem Incremental e Soldagem FSW, com área coletora 0,12 m²;

2 REVISÃO DE LITERATURA

Para o desenvolvimento do protótipo de placa absorvedora para coletor solar foi necessário realizar revisão de literatura sobre os sistemas de aquecimento solar, relacionando os tipos de instalações, principais componentes e, de forma mais específica, os tipos de coletores solares e a suas formas construtivas. Também foram relacionadas técnicas de caracterização de chapas, bem como os conceitos e as características dos processos de Estampagem Incremental e Soldagem FSW.

2.1 SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR

A utilização de Sistemas de Aquecimento Solar (SAS) no mundo teve início em 1970, com incentivo de programas governamentais para reduzir a demanda energética, como consequência da crise do petróleo. Posteriormente outras motivações como a diminuição dos picos de consumo nos sistemas elétricos e a redução da emissão de gases de efeito estufa foram sendo cada vez mais discutidas no mundo, estimulando o uso de energias renováveis (LIMBERGER; VASCONCELLOS; COUTO, 2012).

A aplicação dos SAS é destinada ao aquecimento de água para residências (como aquecimento de água para banho em chuveiro ou em piscinas), no setor de serviços (hotéis, escolas, hospitais, etc) e em processos industriais (onde normalmente se exige aquecimento a temperaturas elevadas).

Os SAS são compostos por coletor(es) solar(es), reservatório(s) térmico(s), aquecimento auxiliar, acessórios e interligações hidráulicas. O sistema pode funcionar por Termossifão (com circulação natural) ou Bombeado (com circulação forçada). O SAS Termossifão é aplicado em instalações de pequeno porte (com volume de armazenamento de até mil litros de água), nele a água flui pela força criada devido as diferenças de temperatura no sistema (PROCOBRE, 2009), conforme indicado na Figura 7.

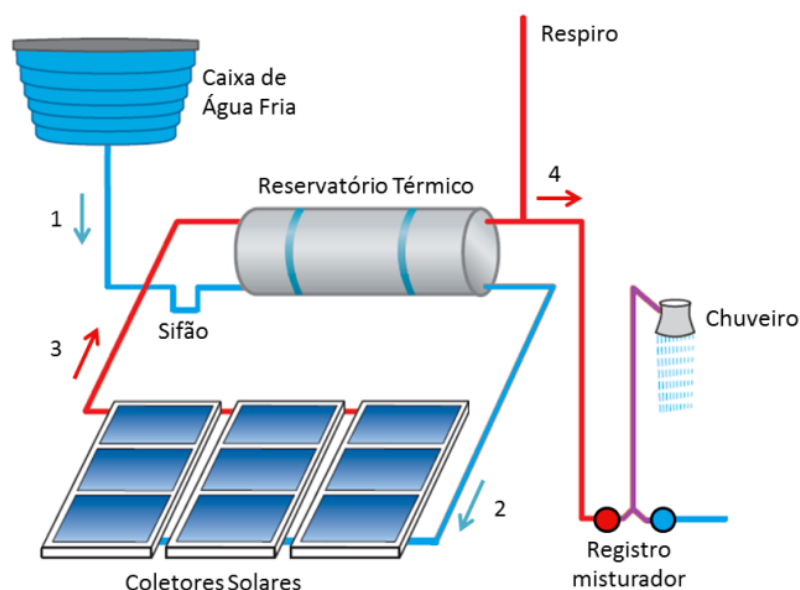


Figura 7: Funcionamento do SAS Termossifão

Fonte: Adaptado de PROCOBRE, 2009

De acordo com a Figura 7 no SAS Termossifão a água fria proveniente da caixa d'água abastece a parte inferior do reservatório térmico (1), em seguida o reservatório abastece a parte inferior dos coletores solares (2). Este abastecimento de água fria se dá por diferença de nível, sendo que a caixa de água fria ocupa o local mais elevado e os coletores solares o local mais baixo. À medida que ocorre a incidência de radiação solar sobre os coletores solares, a água dentro deles é aquecida tornando-se menos densa e sendo empurrada pela água fria (que é mais densa). Desta maneira a água quente flui da parte superior dos coletores solares para a parte superior do reservatório térmico (3) e é direcionada para o local de consumo (4), onde normalmente é utilizado um registro misturador para ajuste da temperatura da água do chuveiro pelo usuário, através da mistura da água aquecida pelo SAS e a água fria.

No SAS Termossifão é recomendável utilizar um sifão com no mínimo 30 cm de altura na alimentação de água fria proveniente da caixa d'água para evitar que água quente do reservatório retorne para a caixa de água fria. Também é recomendável a utilização de um respiro com 30 cm de altura acima da caixa d'água para aliviar as pressões no sistema, evitando o rompimento do reservatório. Para atender a demanda de água quente em períodos chuvosos, de baixa radiação solar ou períodos com consumo acima do dimensionado utiliza-se um equipamento de aquecimento auxiliar que pode ser uma resistência elétrica instalada dentro do

reservatório, um sistema de aquecimento a gás na alimentação do chuveiro ou a utilização de um chuveiro elétrico (PROCOBRE, 2009).

Em sistemas que requerem instalação no mesmo nível entre os coletores e o reservatório, ou em aplicações de grande porte (com volume de armazenamento com mais de mil litros de água) como por exemplo em hotéis e hospitais é necessário utilizar o SAS Bombeado. As diferenças no SAS Bombeado em relação ao SAS Termossifão estão na utilização de uma bomba hidráulica acionada por um Controlador Diferencial de Temperatura (CDT) para realizar a circulação da água no sistema. O CDT é conectado a um sensor na saída inferior do reservatório térmico (água fria) e outro na saída superior dos coletores solares (água quente) a fim de controlar o momento ideal para acionamento da bomba. Neste sistema também se utiliza uma válvula de retenção, no lugar do sifão, no abastecimento de água fria da caixa d'água para o reservatório, para evitar retrocesso de água aquecida para a caixa d'água. O sistema de aquecimento auxiliar neste sistema é normalmente a gás e a saída de consumo é ramificada em várias direções a fim de atender toda demanda de água quente do local (PROCOBRE, 2009), conforme Figura 8.

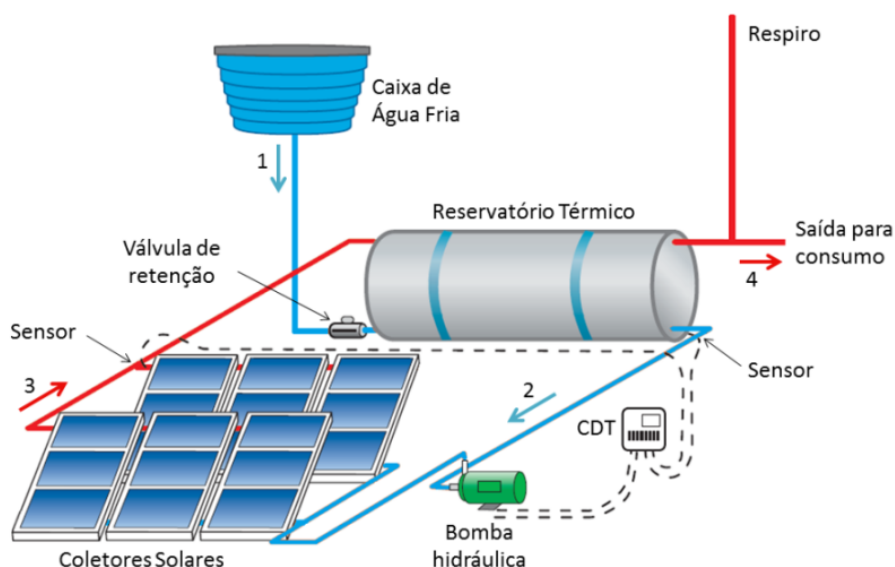


Figura 8: Funcionamento do SAS Bombeado

Fonte: Adaptado de PROCOBRE, 2009

Diversos tipos de coletores solares podem ser aplicados em SAS, os modelos mais comuns são o Coletor Plano Aberto, o Coletor Plano Fechado e o Coletor Tubo Evacuado (MAUTHNER; WEISS; SPÖRK-DÜR, 2017).

O Coletor Plano Fechado é o modelo mais utilizado no Brasil e no mundo (MAUTHNER; WEISS; SPÖRK-DÜR, 2017) e destinam-se a aquecimento de água para banho, podendo atingir temperaturas entre 30 e 80 °C (KALOGIROU, 2014). Estes coletores são formados por uma serpentina com tubos de cobre soldados, cobertos por aletas de alumínio em uma caixa fechada com isolamento térmico e sobre ela uma cobertura de vidro (SOLETROL, 2016). A Figura 9(a) apresenta um modelo de coletor plano fechado e a Figura 9(b) apresenta a aplicação deste tipo de coletor no aquecimento de água para banho.

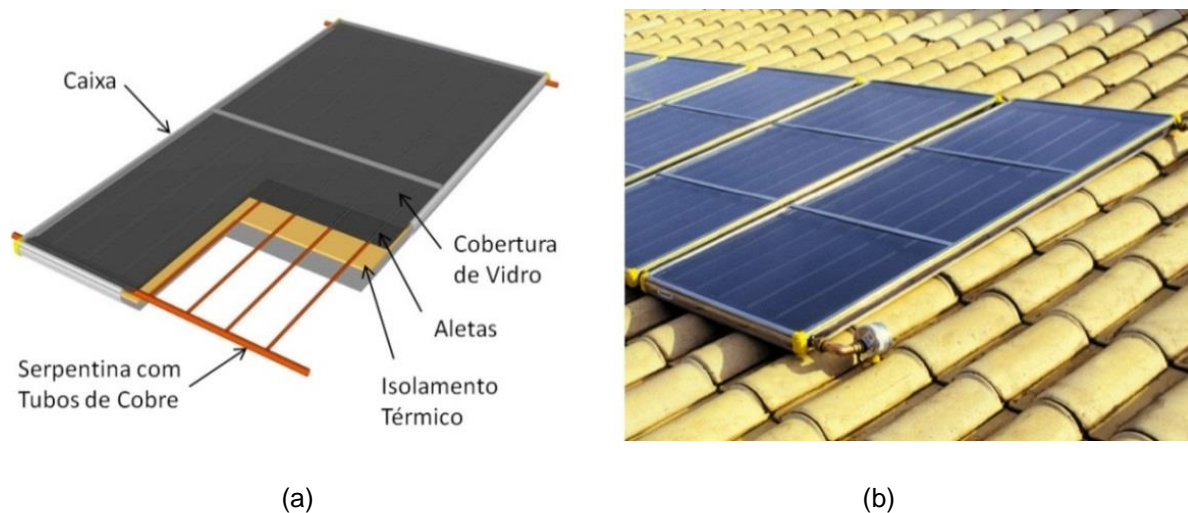


Figura 9: Coletor plano fechado: (a) Principais componentes e (b) Instalação

Fonte: Adaptado de SOLETROL, 2016

No coletor plano fechado quanto maior a transmissividade do vidro utilizado na cobertura maior radiação solar entra no coletor. O vidro tem a propriedade de ser transparente para a radiação incidente do sol com curto comprimento de onda ($0,5 \mu\text{m}$), ao atingir a superfície da aleta parte dessa radiação é absorvida e o restante é refletido em direção ao vidro. No entanto a radiação refletida possui maior comprimento de onda (aproximadamente $6,5 \mu\text{m}$) e o vidro é praticamente opaco para esse comprimento de onda. Essa radiação refletida provoca o efeito estufa dentro do coletor, concentrando o calor dentro dele (EKOS BRASIL; VITAE CIVILIS, 2010). A Figura 10 representa esse processo de transmissividade do vidro para a onda curta e a formação da onda longa refletida, para o qual o vidro é opaco.

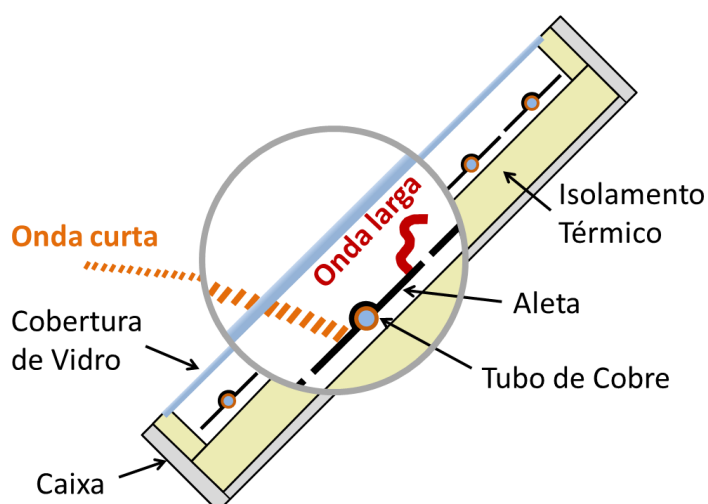


Figura 10: Funcionamento do coletor plano fechado
 Fonte: Adaptado de EKOS BRASIL; VITAE CIVILIS, 2010

A caixa é formada por perfis de alumínio nas laterais e uma chapa plana no fundo, sua função é apoiar os demais elementos. O isolamento térmico (em poliuretano expandido, lã de rocha ou lã de vidro) tem a função de diminuir as perdas térmicas no sistema. As aletas montadas sobre os tubos de cobre (normalmente fabricadas em alumínio) tem a função de absorver a radiação solar que é transmitida pelo vidro e conduzi-la para os tubos de cobre e, por este motivo as aletas são pintadas com tinta preta fosca (para absorver ao máximo essa radiação). A serpentina de tubos de cobre conduz a água da caixa de água fria para o reservatório térmico.

O coletor deve ser instalado voltado para o norte geográfico (orientação na qual ocorre maior incidência de radiação durante o ano para países no hemisfério sul) com inclinação θ . Como regra prática considera-se que a inclinação do coletor deve ser igual à latitude geográfica (L) somada ao ângulo de 10° , a fim de beneficiar a radiação solar no coletor durante as estações do ano em que ele será mais solicitado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), conforme indicado na Equação 1.

$$\theta = L + 10^\circ \quad (1)$$

Onde:

θ = ângulo de inclinação do coletor solar ($^\circ$);

L = latitude ($^\circ$).

A Figura 11 indica a orientação do coletor solar (voltado para o norte geográfico) e sua inclinação θ para uma instalação no hemisfério sul. Na Figura 11 também é possível verificar que o coletor foi inclinado de forma a beneficiar o inverno de acordo com o posicionamento do sol em relação à terra nestas estações.

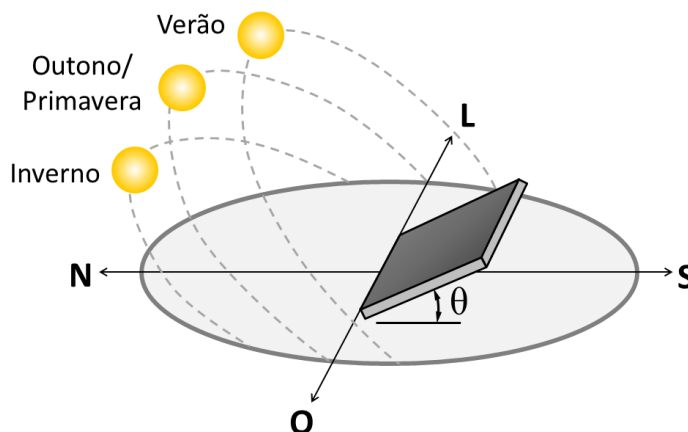


Figura 11: Inclinação e orientação do coletor solar instalado no hemisfério sul

Fonte: Adaptado de KALOGIROU, 2014

O coletor tubo evacuado é recomendado para regiões com pouca radiação solar, em locais com clima frio ou quando há necessidade de atingir temperaturas altas (entre 50 e 200 °C) como em aplicações industriais. Esse coletor é formado por um conjunto de tubos verticais ligados na parte superior do coletor. A água ou o fluido determinado circulam por esse conjunto de tubos e transferem o calor à água que circula na parte superior do coletor (KALOGIROU, 2004; WESTEC, 2017). A Figura 12(a) apresenta o princípio de funcionamento do tubo evacuado e a Figura 12(b) apresenta um exemplo de instalação.

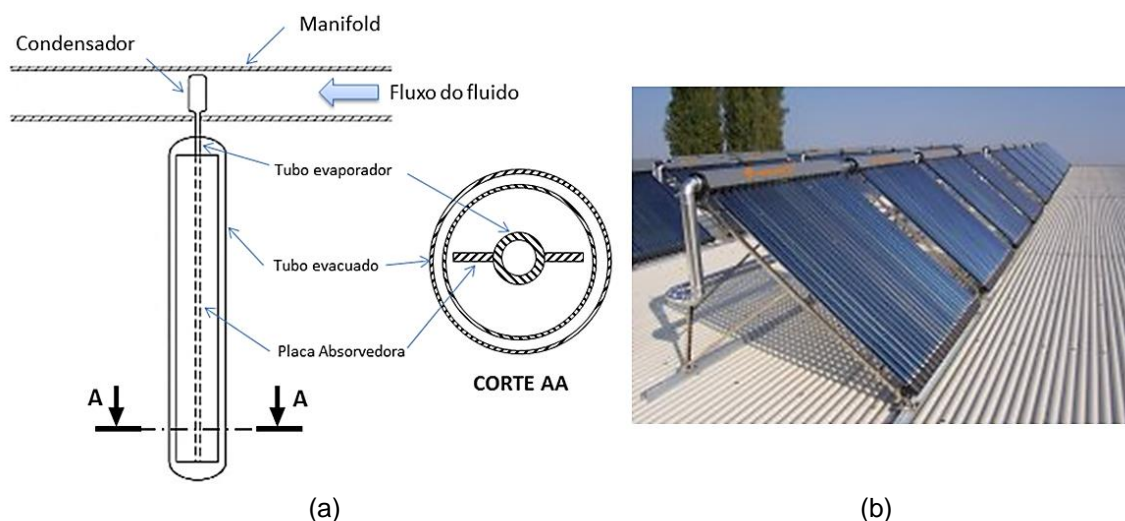


Figura 12: Coletor solar com tubo evacuado: (a) Funcionamento e (b) Instalação

Fonte: Adaptado de KALOGIROU, 2004 e WESTEC, 2017

Conforme indicado na Figura 12(a) o coletor tubo evacuado possui um tubo de vidro que absorve a energia solar e o vácuo entre as duas camadas de vidro evita a perda de calor. Dentro do tubo evacuado há um tubo de cobre (tubo evaporador) que conduz a água a ser aquecida (ou fluido específico) e uma aleta ou placa absorvedora de alumínio é fixada ao tubo a fim de lhe transferir calor. À medida que ocorre passagem do fluido pelo *Manifold*, este é aquecido ao entrar em contato com o condensador (KALOGIROU, 2014). Esses coletores são bastante utilizados na China e nos Estados Unidos, no entanto no Brasil são os menos utilizados (MAUTHNER; WEISS; SPÖRK-DÜR, 2017).

O coletor plano fechado e o coletor tubo evacuado são instalados em conjunto com reservatório térmico. A função do reservatório térmico consiste em armazenar e manter aquecida a água proveniente dos coletores solares. O armazenamento de água quente se faz necessário porque a maior incidência de radiação solar ocorre ao meio dia, enquanto que a maior utilização da água quente em residências ocorre pela manhã e à noite. O volume do reservatório é dimensionado de acordo com a demanda de água quente da casa ou do edifício e pode ser instalado em posição horizontal ou vertical, aplicado a baixa ou alta pressão. A Figura 13(a) apresenta um modelo de reservatório térmico, enquanto a Figura 13(b) representa os principais componentes de um reservatório em corte (PROCOBRE, 2009).

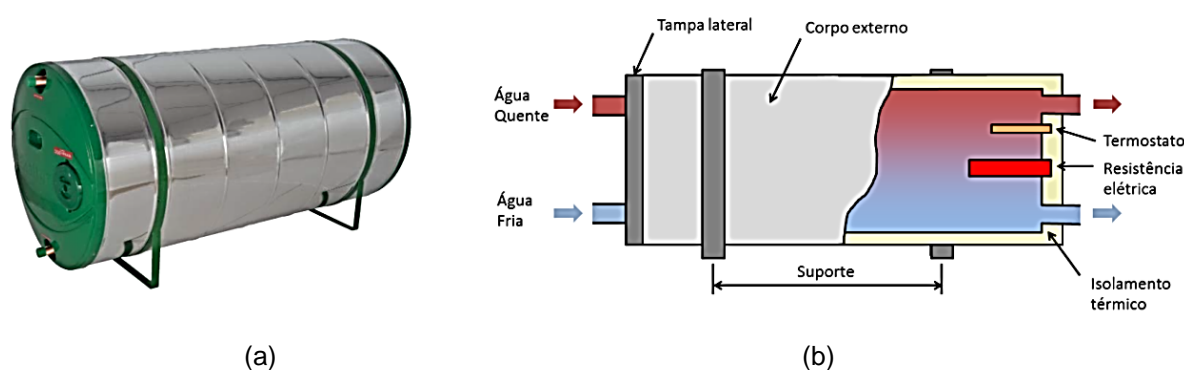


Figura 13: Reservatório Térmico: (a) Modelo comercial e (b) Funcionamento

Fonte: Adaptado de PROCOBRE, 2009

A entrada e saída de água fria ficam na parte inferior do reservatório, enquanto a entrada e saída de água quente ficam na parte superior. O reservatório possui corpo externo de metal, tampas laterais e suporte para instalação.

Internamente ele possui isolamento térmico e sistema de aquecimento auxiliar (resistência elétrica e termostato).

O Coletor Plano Aberto é usado para o aquecimento de piscinas, com temperatura de aquecimento de no máximo 40°C, e consiste em uma sequência de tubos de material polimérico por onde circula a água da piscina, além disso, o coletor não possui nenhuma cobertura de vidro (por isso o nome “aberto”). Estes coletores são eficazes no aquecimento de grandes volumes de água com pequeno aumento de temperatura (EKOS BRASIL; VITAE CIVILIS, 2010; APRICUS, 2017) e sua instalação não requer o uso de reservatório térmico, pois água aquecida circula por meio de bomba hidráulica diretamente para piscina com auxílio de um CDT (SOLETROL, 2017). A Figura 14(a) apresenta um modelo de coletor plano aberto e a Figura 14(b) apresenta a aplicação deste tipo de coletor no aquecimento de água de piscina.

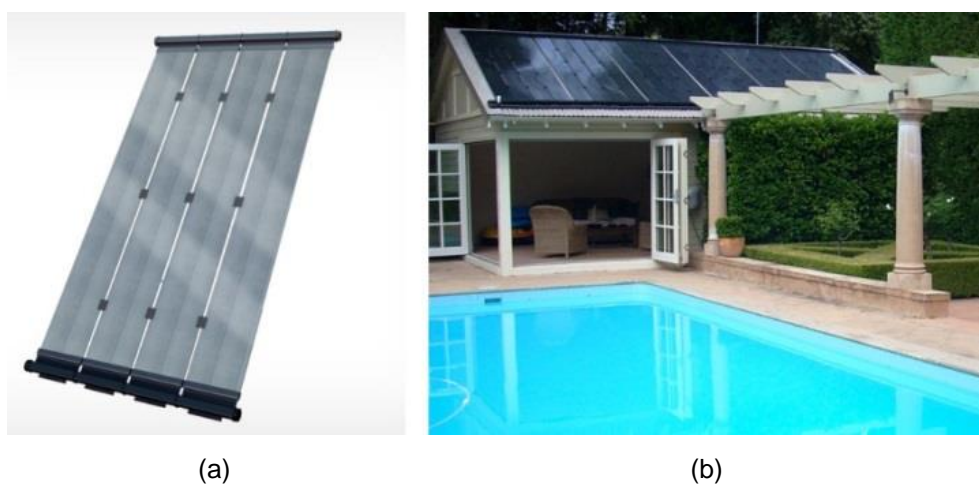


Figura 14: Coletor plano aberto: (a) Modelo comercial e (b) Instalação para aquecimento de água de piscina

Fonte: Adaptado de SOLETROL, 2017

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE CHAPAS

Esta seção apresenta técnicas utilizadas para caracterização de chapas, como ensaio uniaxial de tração, ensaio Nakajima (para determinação da Curva Limite de Conformação) e o procedimento para determinação da Reta Limite de Fratura.

2.2.1 Ensaio de Tração

O ensaio uniaxial de tração em temperatura ambiente pode ser utilizado para construção da curva de escoamento de um determinado material metálico. No ensaio, o corpo de prova é fixado em suas extremidades e tracionado (em velocidade constante) por um travessão móvel até sua ruptura. A força aplicada no ensaio é medida por uma célula de carga, sendo o comprimento deslocado medido por um extensômetro (CALLISTER; RETHWISH, 2016). A Figura 15 apresenta os principais elementos da máquina de ensaio de tração.

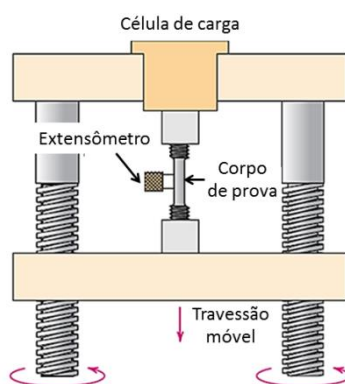


Figura 15: Máquina de ensaio de tração

Fonte: CALLISTER; RETHWISH, 2016

As dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração são determinados em norma, variando de acordo com o formato do material a ser ensaiado. A Figura 16(a) e a Figura 16(b) mostram o formato típico dos corpos de prova de seção retangular antes e após o ensaio de tração, respectivamente.

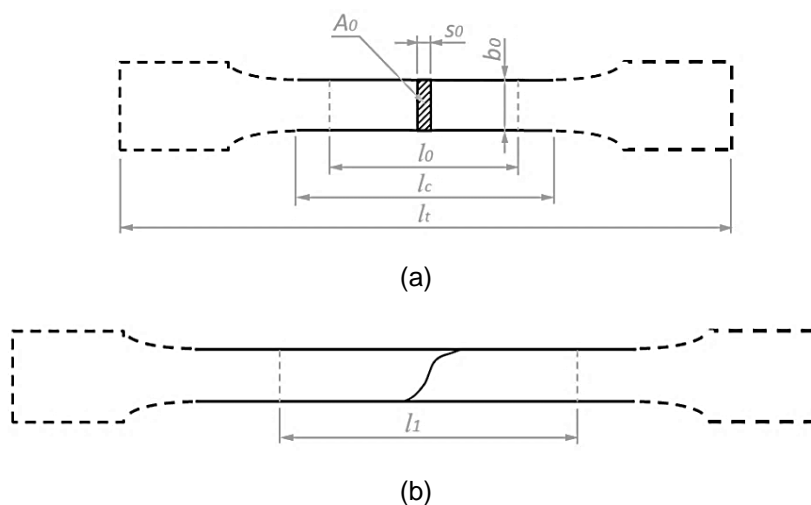


Figura 16: Corpo de prova de seção retangular para ensaio de tração: (a) Antes do ensaio e (b) Após o ensaio

A Figura 16(a) apresenta as dimensões principais dos corpos de prova para ensaio de tração, onde s_0 corresponde à espessura inicial, b_0 à largura inicial, l_0 ao comprimento inicial e A_0 à área inicial da seção transversal do corpo de prova, enquanto que l_c corresponde ao comprimento paralelo do corpo de prova e l_t ao comprimento total. Após a realização do ensaio de tração o valor do comprimento final l_1 , indicado na Figura 16(b), é utilizado para determinar a deformação relativa ε , conforme Equação 2.

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

ε = Deformação relativa (%);

l_0 = Comprimento de medida inicial (mm);

l_1 = Comprimento de medida final (mm).

A tensão (σ) no ensaio de tração é calculada pela razão entre a força medida pela célula de carga e a área inicial da seção transversal do corpo de prova, conforme Equação 3.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3)$$

Onde:

σ = Tensão (N/mm²)

F = Força (N)

A_0 = Área inicial do corpo de prova (mm²)

A partir dos valores de tensão e deformação desde o início do ensaio até o momento da ruptura do corpo de prova é possível determinar a curva de engenharia “Tensão x Deformação” conforme Figura 17.

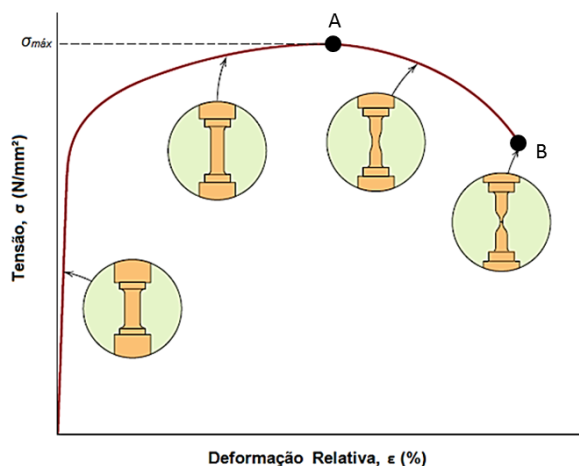


Figura 17: Curva de engenharia “Tensão x Deformação”

Fonte: CALLISTER; RETHWISH, 2016

Na Figura 17 verifica-se que a região inicial do ensaio (representada por uma linha reta) refere-se ao regime elástico do material. Nesta região, se o ensaio for interrompido ocorre recuperação elástica do corpo de prova. A segunda região (a partir do início da curvatura) indica o regime plástico caracterizado por deformações permanentes no material. No ponto A ocorre a aplicação da tensão máxima admissível $\sigma_{máx}$ e após esse ponto ocorre o fenômeno da estrição, ou seja, a formação de um pescoço no corpo de prova, que diminui sua seção até a fratura no ponto B.

No entanto, a tensão baseada na área inicial do corpo de prova não indica com precisão a deformação do material no regime plástico, pois à medida que o material é tracionado sua área diminui. Sendo assim, principalmente para aplicação nos processos de conformação mecânica é mais eficiente utilizar a tensão de escoamento verdadeira, baseada na área instantânea, conforme Equação 4.

$$k_f = \frac{F}{A_1} \quad (4)$$

Onde:

k_f = Tensão verdadeira (N/mm²)

A_1 = Área instantânea da seção transversal do corpo de prova (mm²)

A área do corpo de prova em cada instante durante o ensaio pode ser obtida pela lei da constância de volume, que estabelece que na conformação o

volume inicial (V_0) é igual ao volume final (V_1), ou seja, $V_0 = V_1$, a partir desta definição é possível deduzir a Equação 5.

$$A_1 = \frac{A_0 \cdot s_0}{l_1} \quad (5)$$

Principalmente para cálculos na área de conformação mecânica também é usual utilizar a deformação verdadeira (φ), calculada a partir da Equação 6, ao invés da utilização da deformação relativa.

$$\varphi = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \quad (6)$$

Onde:

φ = Deformação verdadeira (-)

A Figura 18 indica uma comparação entre a curvas de engenharia, a curva verdadeira e a curva corrigida. Na curva de engenharia o ponto A indica a tensão máxima, onde ocorre a estrição no corpo de prova, enquanto que na curva verdadeira esse mesmo instante é indicado pelo ponto A'. A curva corrigida leva em consideração o complexo estado de tensões na região da estrição.

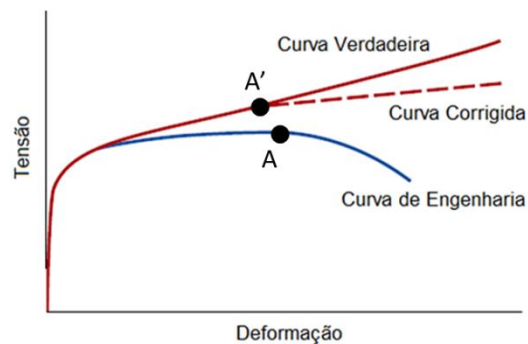


Figura 18: Curva de engenharia, curva verdadeira e curva corrigida para ensaio de tração

Fonte: CALLISTER; RETHWISH, 2016

A partir da curva verdadeira é possível obter os valores de tensão necessários para cada deformação aplicada no material. Em casos de deformações múltiplas (várias etapas de conformação) é possível determinar a tensão necessária

em cada estágio considerando o encruamento do material de acordo com a Equação 7 (Equação de Hollomon).

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (7)$$

Onde:

C = Coeficiente de resistência (-)

n = Coeficiente de encruamento (-)

2.2.2 Ensaio Nakajima

O Ensaio Nakajima é utilizado para determinação da Curva Limite de Conformação (CLC), que estabelece o limite máximo de deformação para a chapa metálica ensaiada. Sendo esta informação utilizada como referência nos processos de Estampagem Convencional. Para realização do ensaio são cortados corpos de prova de chapas na espessura desejada com dimensões padronizadas, conforme indicado na Figura 19.

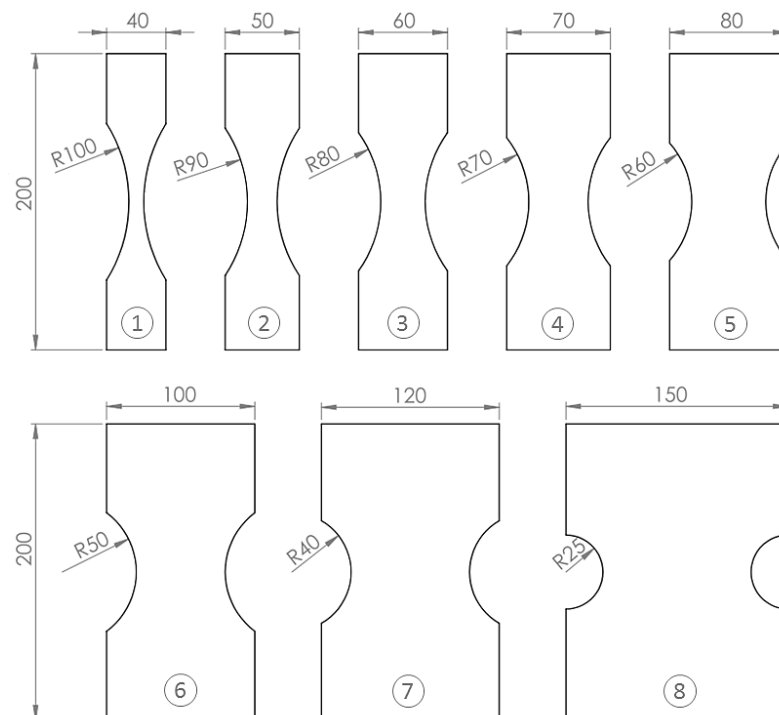


Figura 19: Corpos de prova utilizados no ensaio Nakajima

Fonte: SCHAEFFER, 2016

Os corpos de prova para ensaio Nakajima são cortados com diferentes tamanhos a fim de apresentar diferentes estados de tensão ao serem conformados (FRITZEN, 2016). Estes corpos são marcados por gravação eletroquímica com uma grade de círculos. Cada corpo de prova é deformado em uma prensa por um punção semiesférico até que ocorra o início da trinca no material. Devido à deformação da chapa, os círculos gravados transformam-se em elipses, e a partir da medição destas, logo ao lado de cada trinca, é possível obter a maior deformação φ_1 e a menor deformação φ_2 (SCHAEFFER, 2016). A Figura 20 apresenta o diâmetro do círculo gravado na chapa d , assim como o comprimento da elipse d_1 e a largura da elipse d_2 .

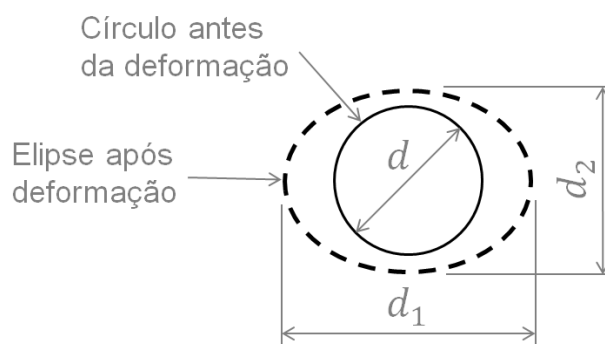


Figura 20: Representação do círculo gravado na chapa e a elipse formada após a deformação

A maior deformação φ_1 (deformação verdadeira no comprimento) é determinada pelo logaritmo natural da razão do comprimento da elipse pelo diâmetro do círculo gravado na chapa, conforme apresentado na Equação 8.

$$\varphi_1 = \ln \frac{d_1}{d} \quad (8)$$

Onde:

φ_1 = deformação verdadeira no comprimento (-);

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

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

Enquanto que a menor deformação φ_2 (deformação verdadeira na largura) é determinada pelo logaritmo natural da razão da largura da elipse pelo diâmetro do círculo gravado na chapa, conforme Equação 9.

$$\varphi_2 = \ln \frac{d_2}{d} \quad (9)$$

Onde:

φ_2 = deformação verdadeira na largura (-);

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

Pela determinação das deformações φ_1 e φ_2 em cada corpo de prova é gerada a CLC, apresentando os limites de deformação para cada estado de tensão no material. Qualquer deformação da chapa localizada abaixo da CLC pode ser suportada pelo material sem que ocorram trincas, enquanto que qualquer deformação acima não poderá ser suportada pelo material. A Figura 21 apresenta Curvas Limite de Conformação para diferentes materiais (alumínio, aço e latão) obtidas nos experimentos de Ali e Edrees (2007).

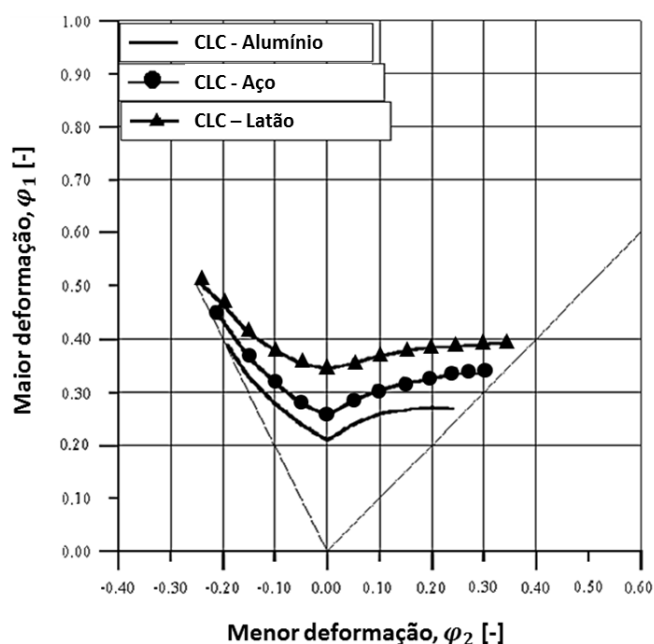


Figura 21: CLC de Alumínio, Aço e Latão

Fonte: ALI; EDREES, 2007

2.2.3 Reta Limite de Fratura

No processo de Estampagem Incremental os limites de deformação são diferentes dos expressos na CLC, apresentando uma maior estampabilidade comparada à Estampagem Convencional. De forma que a estampabilidade de um material na Estampagem Incremental é melhor descrita pela Reta Limite de Fratura (RLF), que varia de acordo com os parâmetros utilizados no processo, como por exemplo, diâmetro de ferramenta e incremento vertical (PARK; KIM, 2003). A Figura 22 apresenta uma comparação entre a CLC e a RLF para um dado material.

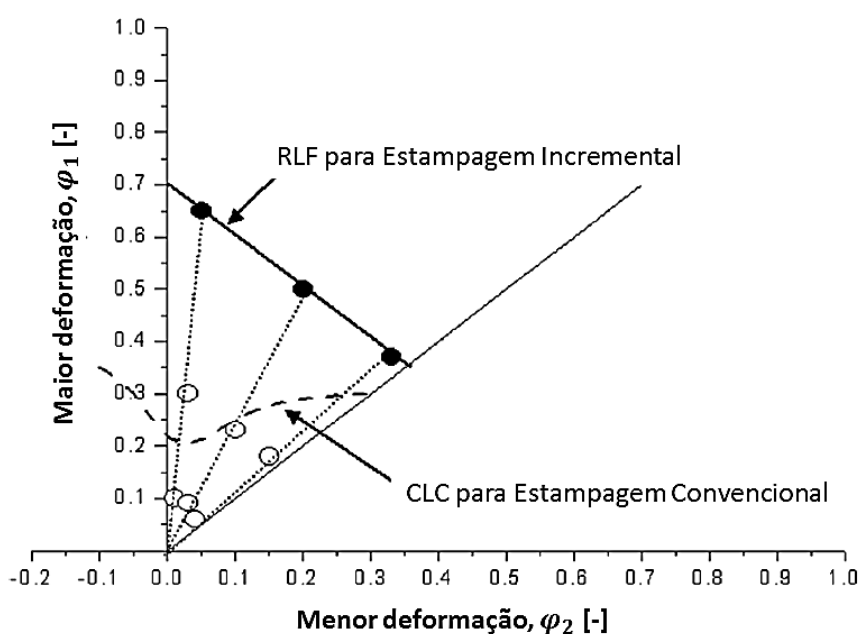


Figura 22: Comparação entre a CLC e a RLF

Fonte: PARK; KIM, 2003

Conforme indicado na Figura 22, a RLF apresenta limites de conformação superiores aos exibidos na CLC. Sendo que a RLF é definida como uma linha reta com declive na região positiva da menor deformação φ_2 . Também se verifica que no caso de estado plano de deformação (quando $\varphi_2 = 0$) a estampabilidade é extremamente elevada.

A RLF pode ser determinada experimentalmente na Estampagem Incremental até que ocorra a trinca na peça, utilizando chapas gravadas pelo processo

eletroquímico com uma grade de círculos. Após deformação os círculos serão transformados em elipses, e a elipse logo ao lado da trinca é utilizada para determinação das deformações φ_1 e φ_2 . Sendo estas deformações usadas para definição do primeiro ponto de referência na RLC.

Em seguida, com base na lei de constância de volume, expressa na Equação 10, pode ser determinada a deformação na espessura da chapa (φ_3), conforme indicado na Equação 11.

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (10)$$

Onde:

φ_3 = deformação verdadeira na espessura (-).

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (11)$$

A deformação na espessura φ_3 , obtida na Equação 11, está relacionada com a espessura crítica (a menor espessura possível) para o processo de Estampagem Incremental. Esta deformação apresenta o mesmo valor, independente do tipo de deformação à qual a chapa for submetida neste processo (GOUVEIA; RODRIGUES; MARTINS, 2011).

O segundo ponto para definição da RLF é obtido mantendo constante o valor da deformação φ_3 e escolhendo um valor arbitrário para a deformação φ_2 . Dessa forma é possível calcular a deformação φ_1 para o segundo ponto da RLF pela lei de constância de volume.

A Figura 23 apresenta um exemplo de RLF, na qual foram definidas as deformações φ_1 e φ_2 para o primeiro ponto, por meio de medição da elipse gravada na chapa estampada. E após o cálculo da deformação φ_3 (constante para o material ensaiado) foi arbitrariamente definida a deformação φ_2 e calculada a deformação φ_1 para esta nova condição. Assim é estabelecida a RLF ligando estes dois pontos.

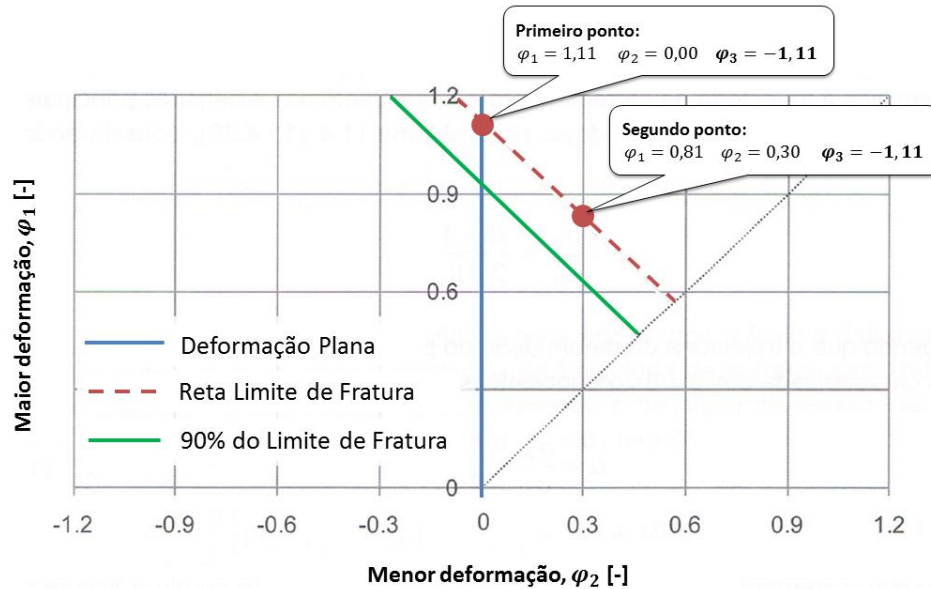


Figura 23: Exemplo de RLF

Fonte: GOUVEIA; RODRIGUES; MARTINS, 2011

Também é possível determinar a espessura crítica para o processo de Estampagem Incremental a partir da deformação na espessura φ_3 , obtida pelo logaritmo natural da razão entre a espessura final e a espessura inicial da chapa, conforme Equação 12. E isolando a espessura final é possível obter seu valor conforme indicado na Equação 13.

$$\varphi_3 = \ln \frac{s_1}{s_0} \quad (12)$$

$$s_1 = s_0 \cdot e^{\varphi_3} \quad (13)$$

Neste caso a espessura final s_1 , é a menor espessura que a chapa pode atingir na Estampagem Incremental (variando apenas se forem alterados os parâmetros do processo). E a deformação relativa de espessura (ε_s) neste caso é definida na Equação 14.

$$\varepsilon_s = \frac{s_0 - s_1}{s_0} \cdot 100 \quad (14)$$

Onde:

ε_s = deformação relativa de espessura (%).

As tensões aplicadas no momento da fratura na Estampagem Incremental podem ser determinadas a partir da deformação equivalente, conforme indicado na Equação 15.

$$\varphi_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_1 - \varphi_3)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Onde:

φ_{eq} = deformação equivalente (-).

Com base na deformação equivalente é possível calcular a tensão equivalente ($\sigma_{eq} = kf$) através da equação de escoamento do material analisado, conforme Equação 16.

$$\sigma_{eq} = kf = C \cdot \varphi_{eq}^n \quad (16)$$

Onde:

σ_{eq} = tensão equivalente (N/mm²).

A fim de determinar as demais tensões atuantes no local em que surgiu a fratura na chapa são determinadas a razão de deformações principais (β) e a razão de tensões principais (α), conforme Equação 17 e Equação 18.

$$\beta = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (17)$$

Onde:

β = razão de deformações principais (-);

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{2 \cdot \beta + 1}{2 + \beta} \quad (18)$$

Onde:

α = razão de tensões principais (-);

σ_1 = maior tensão aplicada no plano (N/mm²);

σ_2 = menor tensão aplicada no plano (N/mm²).

Considerando um caso de estado plano de deformações (com $\varphi_2 = 0$) e estado plano de tensões (com $\sigma_3 = 0$), como o apresentado no primeiro ponto da Figura 23, determina-se a razão de deformações principais $\beta = 0$ e nessa condição a razão de tensões principais é $\alpha = 1/2$. E isolando a tensão σ_2 na Equação 18 é obtida a relação entre esta e a tensão σ_1 , conforme indicado na Equação 19.

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_1 \quad (19)$$

Com base na Equação 20, para determinação da tensão equivalente, pode-se substituir a tensão σ_2 por $1/2 \sigma_1$ e σ_3 por 0, conforme indicado na Equação 21, obtendo-se assim a Equação 22, que apresenta apenas a tensão equivalente e a tensão máxima como incógnitas.

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{1/2} \quad (20)$$

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[\left(\sigma_1 - \frac{1}{2} \sigma_1 \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sigma_1 \right)^2 + (\sigma_1)^2 \right]^{1/2} \quad (21)$$

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sigma_1 \quad (22)$$

Isolando a tensão σ_1 na Equação 22 se obtém a Equação 23. Substituindo a incógnita σ_{eq} (definida anteriormente na Equação 16) é determinada a tensão máxima no experimento.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{eq} \cdot 2}{\sqrt{3}} \quad (23)$$

A partir da relação expressa na Equação 23 pode-se determinar também a menor tensão no plano da chapa σ_2 .

As tensões σ_1 , σ_2 , σ_3 e σ_{eq} , bem como a relação de tensões expressa pelo vetor α , atuantes no local de fratura por Estampagem Incremental, para um estado plano de tensões e de deformações é apresentada na Figura 24.

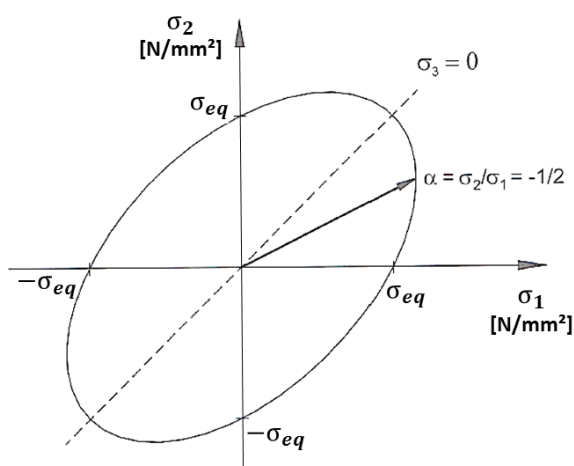


Figura 24: Relação entre as tensões no local de fratura por Estampagem Incremental, para um estado plano de tensões e de deformações

2.3 ESTAMPAGEM INCREMENTAL

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

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

A primeira máquina específica para Estampagem Incremental foi desenvolvida em 1996 no Japão pela *AMINO Corporation*, que depois passou a fornecer equipamentos para a indústria neste seguimento com abrangência mundial

(AMINO *et al.*, 2014). Na Figura 25 é apresentada a máquina de Estampagem Incremental desenvolvida pela *AMINO Corporation*.



Figura 25: Máquina de Estampagem Incremental AMINO

Fonte: AMINO *et al.*, 2014

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

2.3.1 Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF)

A Estampagem Incremental de Ponto Único, também designada pela sigla SPIF (*Single Point Incremental Forming*), conforme indicado na Figura 26, consiste na estampagem progressiva de uma chapa plana de espessura inicial s_0 , pela penetração vertical de uma ferramenta de conformação com ponta esférica e diâmetro d_f . A chapa é apoiada entre o prensa chapas e a placa de apoio. A abertura da placa de apoio determina a área de trabalho da ferramenta de conformação sem haver nenhuma matriz na parte inferior do dispositivo. À medida que a ferramenta de conformação, com velocidade de rotação (N), penetra verticalmente sobre a chapa é realizado um incremento de estampagem na peça (Δz). Durante o processo são realizados diversos incrementos até que a chapa obtenha o formato desejado, sendo

as trajetórias da ferramenta normalmente realizadas em um centro de usinagem com Comando Numérico Computadorizado (CNC) (MARTINS *et al.*, 2008).

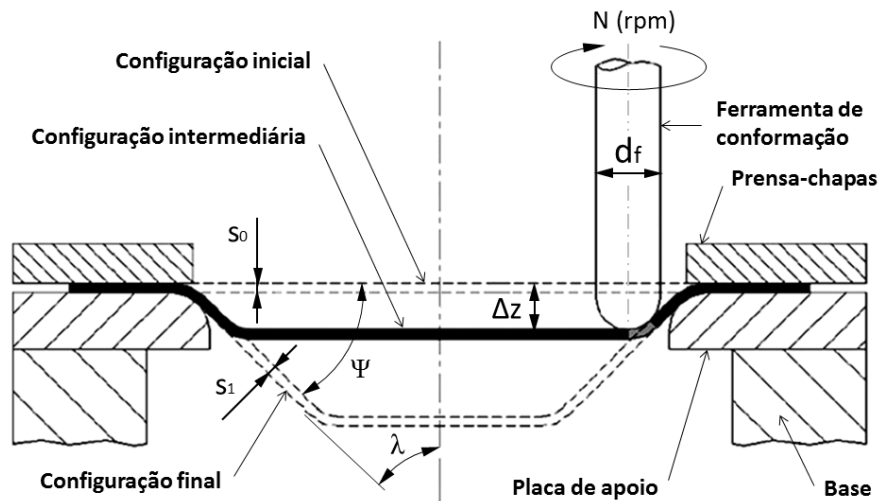


Figura 26: Representação do processo de SPIF

Fonte: Adaptado de MARTINS, 2008.

Pelo incremento da ferramenta sobre a chapa é formado o ângulo ψ com o eixo horizontal e o ângulo λ com o eixo vertical. Quanto maior o ângulo ψ , menor será o ângulo λ e menor será a espessura da parede da peça estampada (s_1). Pela constância de volume é possível estabelecer uma relação direta entre o ângulo ψ e a espessura da final da parede da chapa, esta relação é denominada “lei do seno” (ARAGHI *et al.*, 2011), conforme indicado na Equação 24.

$$s_1 = s_0 \cdot \text{sen} (90 - \psi) \quad (24)$$

Onde:

s_1 = espessura final da chapa (mm);

s_0 = espessura inicial da chapa (mm);

Ψ = ângulo de parede de chapa com o eixo horizontal ($^\circ$).

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

Segundo Hamilton e Jeswiet (2010) a Estampagem Incremental utilizando valores altos de avanço combinados com altas rotações influencia pouco no acabamento superficial das peças estampadas. Todavia, quanto menor o incremento vertical (penetração da ferramenta a cada passe de estampagem) menor será a rugosidade e também se obterá maior a estampabilidade da chapa.

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

Quanto ao diâmetro da ferramenta, quanto maior seu valor, menor será a rugosidade da peça estampada (BHATTACHARYA *et al.*, 2011). No estudo de Al-Ghamdi e Hussain foi determinado um raio limite para ferramenta de Estampagem Incremental. Neste estudo foi verificado que o valor do raio da ferramenta influencia na estampabilidade da chapa no processo de Estampagem Incremental e que seu valor não depende do tipo de material ou propriedades mecânicas da chapa, mas sim da espessura inicial da chapa, de forma que o raio crítico para estampagem com ângulo máximo de parede, com melhor estampabilidade pode ser obtido pela relação $R_c \approx 2,2 \cdot s_0$, onde R_c é o raio crítico da ferramenta correspondente a $d_f/2$ e s_0 é a espessura inicial da chapa. À medida que o valor do raio da ferramenta se distancia desta relação se torna mais iminente a ruptura da chapa (AL-GHAMDI; HUSSAIN, 2015).

Quanto ao lubrificante utilizado no processo, conforme o estudo de Azevedo *et al.* (2015) que comparou a qualidade superficial das peças de alumínio AA1050 e aço DP780 obtidas pelo processo SPIF, concluiu que se pode estabelecer uma relação entre a dureza do material estampado e a viscosidade do lubrificante recomendado, de forma que quanto maior a dureza do material a ser conformado, menor a viscosidade necessária.

2.3.2 Estampagem Incremental por Dois Pontos (TPIF)

A Estampagem Incremental por Dois Pontos, designada pela sigla TPIF (*Two Points Incremental Forming*), utiliza além da ferramenta de conformação um apoio na parte inferior da chapa, a fim de conferir melhor precisão dimensional à peça

estampada. O processo TPIF pode ser realizado com matriz dedicada (positiva ou negativa) ou ainda com matriz parcial (fixa ou móvel).

No processo TPIF com matriz dedicada positiva, à medida que a chapa é conformada pela ferramenta ocorre o deslocamento do prensa chapas através das guias deslizantes do dispositivo de fixação. A matriz possui o perfil da peça que se deseja conformar e gera uma força de apoio à medida que a ferramenta executa a conformação (CASTELAN, 2010), conforme indicado na Figura 27(a) que indica a situação inicial do processo e na Figura 27(b) que indica a situação final do processo.

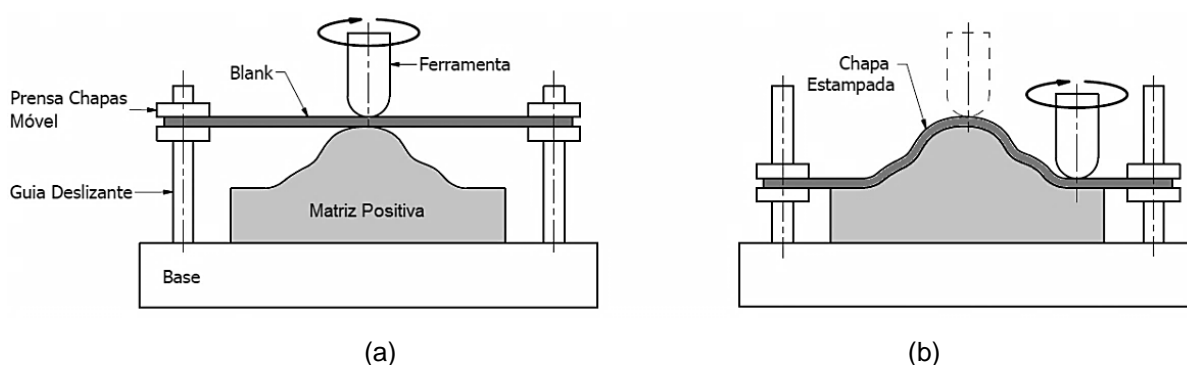


Figura 27: TPIF com matriz positiva: (a) Situação inicial e (b) Situação final

Fonte: Adaptado de CASTELAN, 2010

O processo TPIF com matriz dedicada negativa também possui uma matriz com o perfil da peça, no entanto, como a matriz negativa possui perfil não há necessidade de utilizar guias deslizantes, podendo ser utilizado apoio e prensa chapas fixos, conforme indicado na Figura 28(a) que indica a situação inicial do processo e na Figura 28(b) que indica a situação final do processo (CASTELAN, 2010).

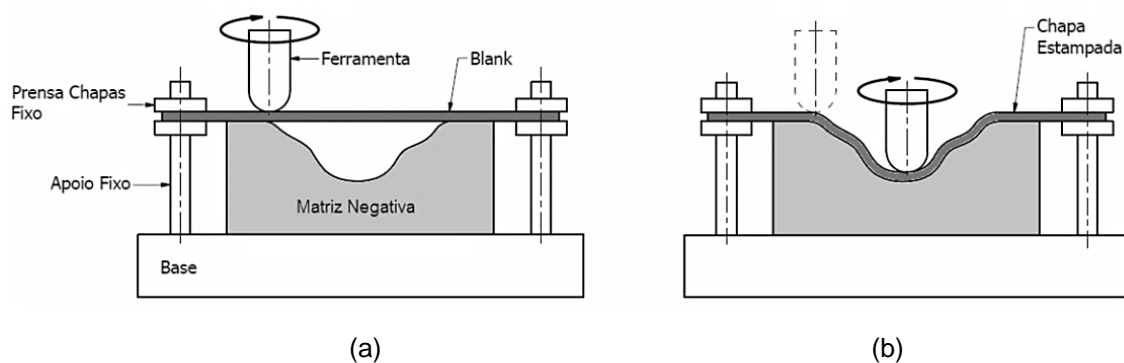


Figura 28: TPIF com matriz negativa: (a) Situação inicial e (b) Situação final

Fonte: Adaptado de CASTELAN, 2010

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

No processo TPIF com matriz parcial fixa à medida que a chapa é conformada pela ferramenta ocorre o deslocamento do prensa chapas através das guias deslizantes do dispositivo de fixação, semelhante ao processo com matriz dedicada positiva. A matriz parcial fixa (com perfil genérico) gera uma força de apoio à medida que a ferramenta executa a conformação e também auxilia na determinação do perfil geométrico final da chapa estampada (MAXIMILIANO, 2016), conforme indicado na Figura 29(a) que apresenta a situação inicial do processo e a Figura 29(b) que apresenta a situação final. Como nesse processo a matriz não possui exatamente o perfil da peça que se deseja conformar, em comparação com o processo de matriz dedicada positiva, este apresenta um apoio de menor complexidade, no entanto com menor precisão dimensional, já que o apoio não se estende por toda região de conformação.

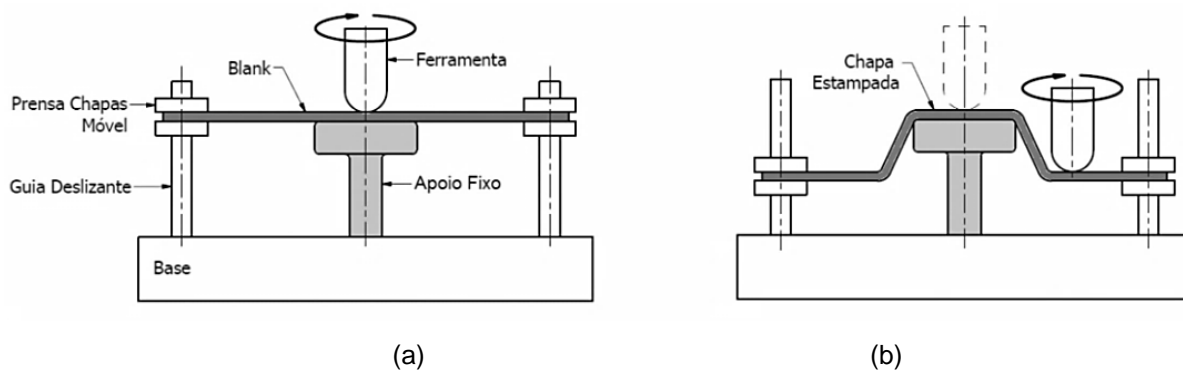


Figura 29: TPIF com matriz parcial: (a) Situação inicial e (b) Situação final

Fonte: Adaptado de MAXIMILIANO, 2016

O processo TPIF também pode ser realizado com um apoio móvel, que se desloca por toda a área de conformação, a fim de conferir maior precisão ao produto estampado, quando comparado ao processo TPIF com matriz parcial. No entanto, há a necessidade de um equipamento dedicado à essa aplicação, diferente dos processos apresentados anteriormente que podem ser realizados em centros de usinagem CNC. Um exemplo de equipamento utilizado para aplicação deste processo é o F3T (Tecnologia Ford de Fabricação de Formas Livres - *Ford Freeform*

Fabrication Technology), conforme indicado na Figura 30. O F3T trata-se de um equipamento com um cabeçote superior movimentando a ferramenta de conformação sobre a chapa metálica e um cabeçote inferior posicionando um apoio móvel (PONTICEL, 2016).

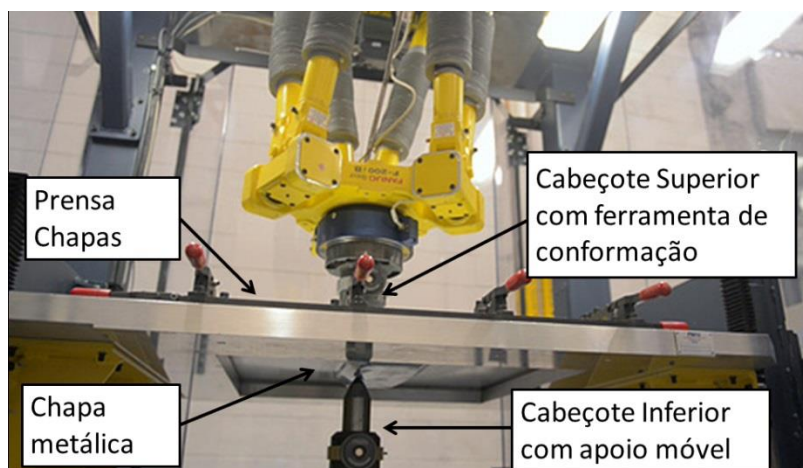


Figura 30: Equipamento F3T dedicado ao processo TPIF com apoio móvel
Fonte: PONTICEL, 2016

Outro exemplo de aplicação de TPIF com apoio móvel envolve utilização de braços robóticos industriais, conforme indicado na Figura 31(a). Neste processo enquanto um braço robótico conduz um punção, o outro braço conduz o apoio móvel de forma sincronizada, conforme indicado na Figura 31(b) (MEIER; MAGNUS; SMUKALA, 2011).

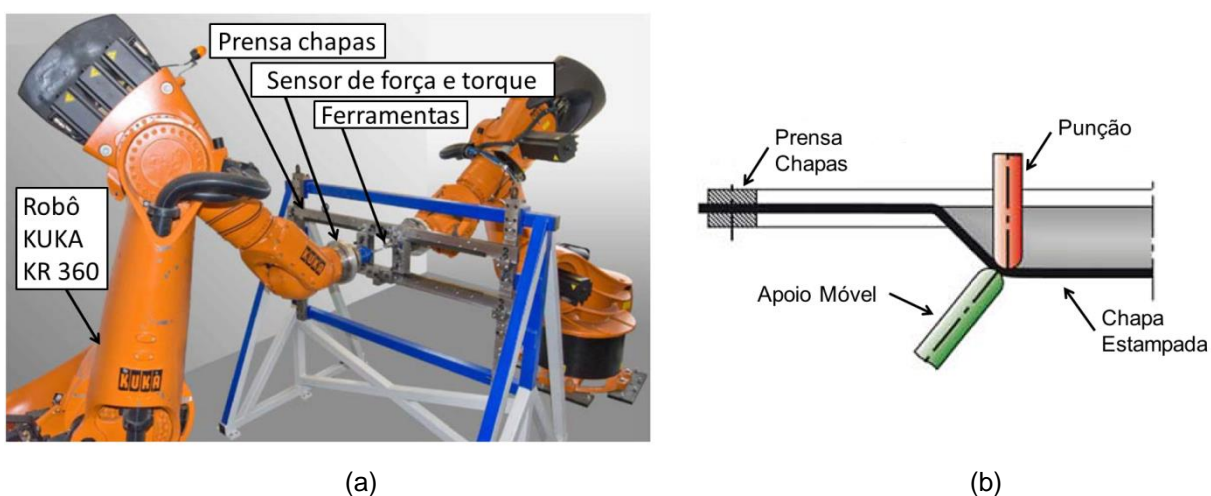


Figura 31: TPIF com apoio móvel: (a) Posicionamento dos robôs e (b) Posicionamento das ferramentas

Fonte: Adaptado de MEIER, MAGNUS, SMUKALA, 2011

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

2.3.3 Estampagem Incremental de Múltiplos Passes

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

A Figura 32 apresenta de forma esquemática o processo MSPIF, onde no primeiro estágio é aplicado um incremento na ferramenta com ângulo de parede inicial (ψ') a fim de se obter um perfil intermediário diferente do perfil final. Em seguida são aplicados novos incrementos a fim de se obter no quarto estágio o perfil desejado e o ângulo final de parede (ψ). No final do processo a espessura final (s_1) é menor que a espessura inicial (s_0). Conseqüentemente o encruamento da chapa aumenta a cada passe, bem como a força necessária para realização da estampagem, conforme indicado no detalhe A da Figura 32 (CASTELAN, 2010).

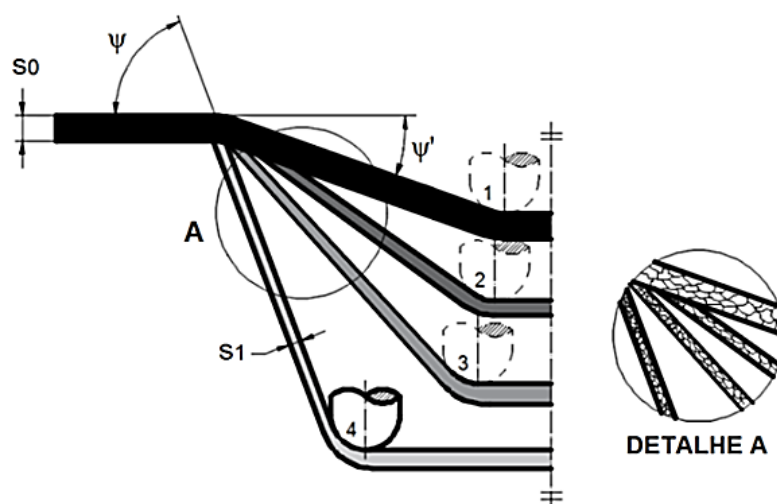


Figura 32: Processo MSPIF e o efeito de encruamento da chapa a cada passe

Fonte: Adaptado de CASTELAN, 2010

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

A Figura 33(a) mostra a aplicação de múltiplos passes em um processo com TPIF (utilizando prensa chapas móvel e matriz parcial), em que no primeiro estágio foi realizada a obtenção de uma pré-forma com ângulo inicial ψ' e trajetória descendente da ferramenta. No segundo estágio é realizada uma trajetória ascendente e na terceira etapa uma nova trajetória descendente obtendo a forma final com o ângulo final desejado. Na Figura 33(b) é apresentado o desenho da pré-forma e da forma final da peça estampada neste experimento (pirâmide com quatro lados e ângulo de parede $\psi = 81^\circ$).

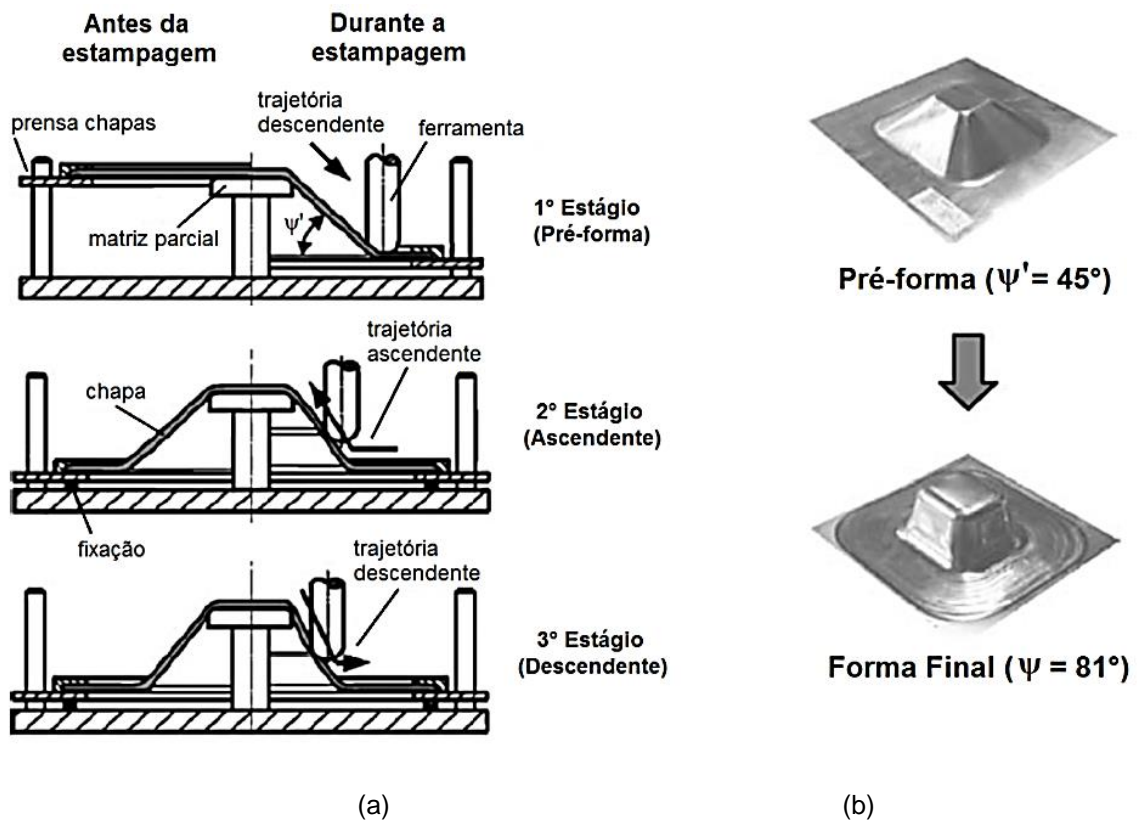


Figura 33: Estampagem Incremental de Múltiplos Passes com TPIF: (a) Estágios do processo e (b) Pré-forma e forma final do componente estampado

Fonte: Adaptado de HIRT, 2004

2.4 SOLDAGEM FSW

O processo *Friction Stir Welding* (FSW) foi patenteado em 1991 (THOMAS *et al.*, 1991) e desde então tem sido aperfeiçoado e aplicado a uma série de materiais como alumínio, latão, cobre, titânio, magnésio, zinco e chumbo, com aplicação na indústria automobilística, ferroviária, marítima, aeronáutica e aeroespacial (KUKA, 2016; PTG, 2018; THOMAS; NICHOLAS, 1997).

A Soldagem FSW é um processo de união de metais em estado sólido, no qual uma ferramenta rotativa, constituída de um ombro cilíndrico e um pino roscado, penetra na junta e se desloca ao longo dela realizando a soldagem. A Figura 34(a) apresenta a função da ferramenta durante a realização do processo de Soldagem FSW e a Figura 34(b) apresentada as partes da ferramenta.

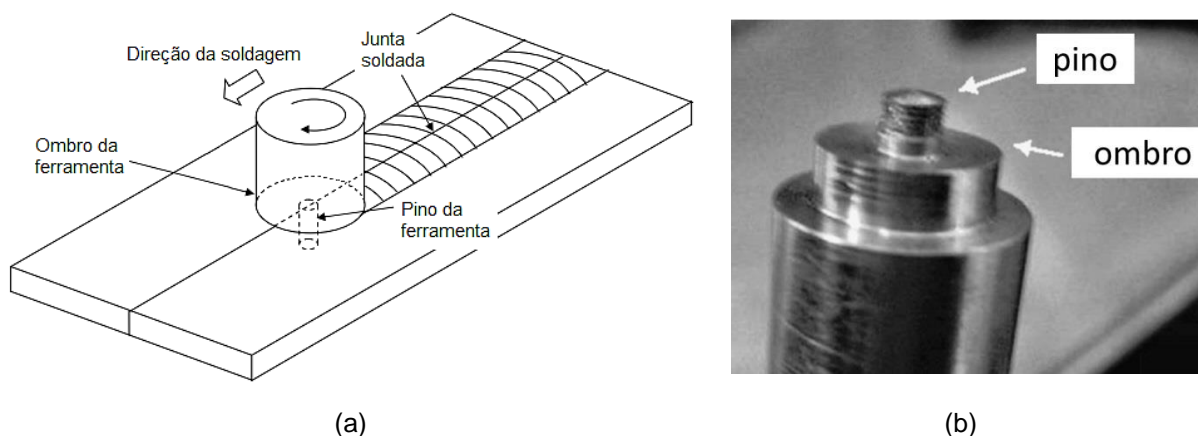


Figura 34: Processo de Soldagem FSW: (a) Função da ferramenta e (b) Partes da ferramenta

Fonte: NANDAN; DEBROY; BHADESHIA, 2008




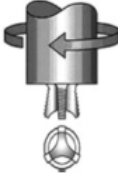
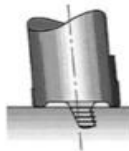

O ombro da ferramenta tem a função de manter o contato firme da junta soldada durante o processo, enquanto o pino roscado gera deformação plástica na junta e realiza o fluxo do material deformado. O calor é gerado pelo atrito entre a ferramenta e as peças devido à deformação plástica (NANDAN; DEBROY; BHADESHIA, 2008).

É recomendado que a Soldagem FSW seja realizada com penetração do ombro sobre a junta com profundidade de 0,1 mm a 0,25 mm, sendo que o excesso de profundidade produz rebarba em excesso (MISHRA; MAHONEY, 2007).

Também é recomendável utilizar pino com diâmetro ligeiramente menor que a espessura das chapas a serem soldadas, assim como ombro com diâmetro cerca de três vezes maior que o diâmetro do pino (CAPELARI, 2006).

O formato da ferramenta de soldagem tem influência na geração de calor, no fluxo do material, bem como na potência e na qualidade da junta soldada. No entanto a maior parte do calor é gerado pelo atrito da peça com o ombro da ferramenta, que também tem a função de impedir que o material plastificado seja expulso da região do cordão de solda. A Tabela 1 apresenta diversos modelos de ferramentas aplicadas ao processo de Soldagem FSW.

Tabela 1: Modelos de ferramentas aplicadas ao processo FSW

| Ferramenta | Cilíndrica | Whorl™ | MX triflute™ | Flared triflute™ | A-skew™ | Re-stir™ |
|--|--|--|--|---|--|--|
| Representação |  |  |  |  |  |  |
| Forma do pino da ferramenta | Cilíndrica roscada | Cônica roscada | Cônica roscada com três canais helicoidais | Roscada com três canais e pontas inclinadas para fora | Cilíndrica roscada com inclinação | Cônica roscada com canais retos |
| Relação entre o volume do pino e o volume do pino cilíndrico | 1 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 1 | 0,4 |
| Volume movimentado em relação ao volume do pino | 1,1 | 1,8 | 2,6 | 2,6 | Depende do ângulo do pino | 1,8 |
| Rotação reversa | Não | Não | Não | Não | Não | Sim |
| Aplicação | Juntas de canto; Falha em juntas sobrepostas | Juntas de canto com baixo torque na soldagem | Juntas de canto com baixo torque na soldagem | Juntas sobrepostas com menor desbaste da chapa superior | Juntas sobrepostas com menor desbaste da chapa superior | Quando se deseja obter mínima assimetria nas propriedades da solda |


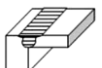
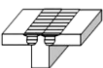
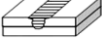
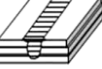
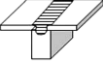
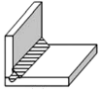
Fonte: Adaptado de NANDAN; DEBROY; BHADSHIA, 2008, *apud* MISHRA; MA, 2005 e THOMAS; JOHNSON; WIESNER, 2003

Conforme indicado na Tabela 1, a ferramenta com pino cilíndrico é a que gera o menor volume de material movimentado em relação ao volume do pino, com aplicação principalmente nas juntas de canto, podendo apresentar falha na

soldagem de juntas sobrepostas. No caso das ferramentas MX trifluteTM e Flared trifluteTM, mesmo possuindo pino com menor volume que o pino cilíndrico, permitem alto volume de material movimentado no processo de soldagem. A ferramenta RestirTM possui reversão periódica no movimento de rotação a fim de diminuir problemas nas propriedades da solda relacionados com a assimetria do cordão. (NANDAN; DEBROY; BHADESHIA, 2008, *apud* MISHRA, R. S.; MA, 2005 e THOMAS, Wayne M.; JOHNSON; WIESNER, 2003).

É possível aplicar a Soldagem FSW às juntas de topo, juntas sobrepostas e juntas de filete, conforme indicado na Tabela 2 (MISHRA; DE PARTHA; KUMAR, 2014).

Tabela 2: Tipo de juntas aplicadas ao processo de Soldagem FSW

| Tipo | Representação e Denominação | | |
|-------------------------|---|---|--|
| Junta de Topo |  Topo Simples |  Topo em L |  Topo em T |
| Junta Sobreposta |  Sobreposta Simples |  Sobreposta Dupla |  Sobreposta em T |
| Junta de Filete |  Junta de Filete | | |

Fonte: Adaptado de MISHRA; DE PARTHA; KUMAR, 2014

O processo FSW pode ser dividido em cinco etapas, conforme indicado na Figura 35. A primeira etapa consiste no acionamento do movimento rotativo da ferramenta e o segundo na penetração (ou mergulho) da ferramenta na junta a ser soldada. Após o mergulho da ferramenta é necessário cumprir um tempo de permanência da ferramenta em movimento rotativo para pré-aquecimento da junta a fim de aumentar a plasticidade do material, diminuindo as cargas de flexão aplicadas no pino da ferramenta. Na terceira etapa ocorre o avanço da ferramenta sobre a junta a fim de executar a solda, na quarta etapa ocorre o recuo da ferramenta e na quinta etapa a sua parada, finalizando o processo (ADAMOWSKI *et al.*, 2007).

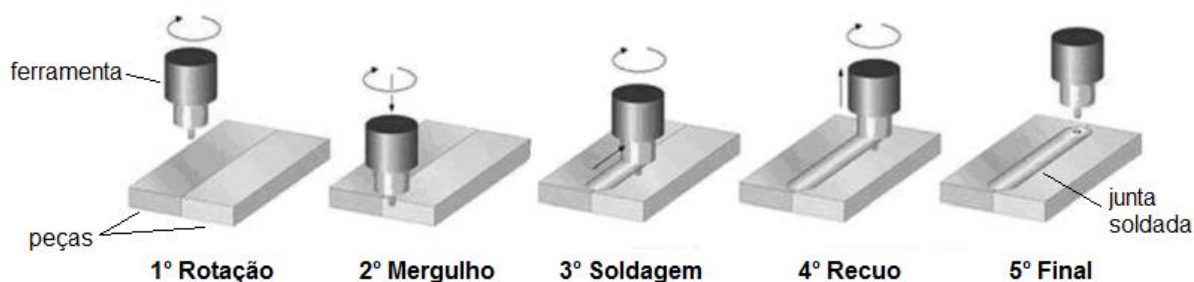


Figura 35: Etapas do processo de Soldagem FSW

Fonte: Adaptado de ADAMOWSKI, 2007

Atualmente há máquinas de Soldagem FSW com capacidade de suportar altas cargas aplicadas na soldagem, com controle preciso de força e posição, bem como registro dos parâmetros aplicados no processo (PTG, 2018). A Soldagem FSW também pode ser aplicada utilizando braços robóticos, que devido a sua flexibilidade para realização dos movimentos, possibilita a realização de complexos contornos 3D nos perfis de soldagem (KUKA, 2016). A Figura 36(a) apresenta um exemplo de aplicação de braço robótico para o processo FSW, enquanto a Figura 36(b) apresenta um detalhe ampliado da ferramenta de soldagem e dos dispositivos de fixação.



(a)



(b)

Figura 36: Processo de Soldagem FSW com ferramenta acionada por braço robótico: (a) Braço robótico realizando a soldagem e (b) Detalhe ampliado da ferramenta e dos dispositivos de fixação

Fonte: Adaptado de KUKA, 2017

Em vários estudos foram adaptados centros de usinagem CNC para realização deste tipo de soldagem, alcançando resultados satisfatórios (ALMEIDA, 2015; ARRUDA, 2010).

Entre os benefícios do processo FSW pode-se citar a baixa distorção das peças soldadas, conferindo boa estabilidade dimensional ao produto final, maior resistência à fadiga que juntas soldadas pelos processos MIG e Laser, tensão residual muito menor do que nos processos de soldagem por fusão, além de não requerer gás de proteção nem acabamento na superfície na maioria dos casos (MISHRA; MA, 2005).

A seção transversal típica da junta soldada pelo processo FSW é constituída de várias zonas, conforme indicado na Figura 37. A Zona Termicamente Afetada (ZTA) é semelhante à das juntas soldadas convencionais, embora que no processo FSW a temperatura máxima atingida seja significativamente menor do que a temperatura obtida nos processos de soldagem por fusão, cerca de 75% a 80% da temperatura de fusão (SUBRAMANYA *et al.*, 2015). A região do núcleo central contém a aparência de "anéis de cebola" (*onion rings*) e é a que apresenta maior deformação devido à forma como o pino roscado movimenta o material, fazendo com que ocorra conformação mecânica e refinamento de grão. A Zona Termo Mecanicamente Afetada (ZTMA) situada entre a ZTA e o núcleo da solda, possui grãos semelhantes à microestrutura original, muitas vezes em um estado deformado.

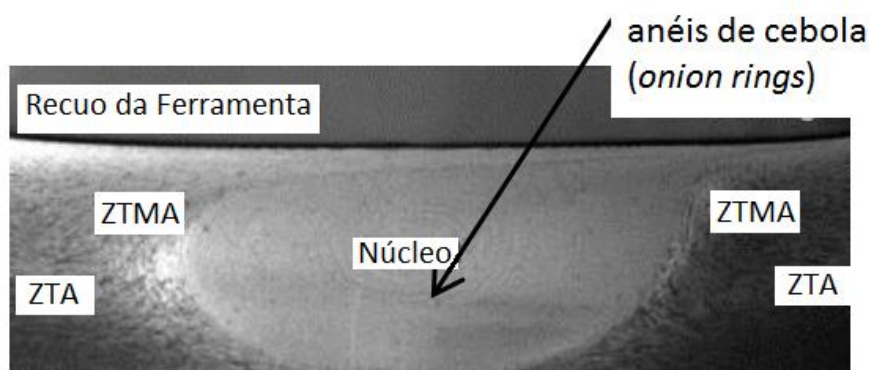


Figura 37: Macroestrutura da Soldagem FSW

Fonte: SUBRAMANYA *et al.*, 2015

Diversos parâmetros têm grande influência sobre o processo de soldagem FSW. A respeito do avanço e da rotação da ferramenta, é possível afirmar que a

combinação de baixa velocidade de avanço com alta velocidade de rotação resulta em alto aquecimento da junta durante o processo (OLIVIECKI; BESKOW, 2013).

Para avaliar a qualidade da junta soldada é fundamental a realização de ensaios, para detectar defeitos de vazio na soldagem FSW é comum o uso de ensaios não destrutivos de raios-X convencional ou ultrassom, enquanto que para detectar defeitos na raiz da junta soldada é recomendado o ensaio destrutivo de dobramento (ALMEIDA, 2015).

No estudo de Arruda (2010), aplicado a fabricação de um protótipo de coletor solar, foram feitos experimentos para soldagem de juntas sobrepostas em chapas de alumínio AA1100 e espessura 1 mm, utilizando um centro de usinagem CNC três eixos. Neste estudo foi utilizada uma ferramenta com pino cilíndrico roscado sem inclinação, variando o seu diâmetro entre 2 mm, 2,5 mm e 3 mm, com velocidades de avanço a entre 120 e 240 mm/min. Neste estudo o cordão de solda com melhor aspecto visual foi obtido na configuração com pino de 2 mm, avanço $a = 120$ mm/min e rotação $N = 1400$ rpm, conforme indicado na Figura 38(a). Esse corpo de prova apresentou uma região com falta de preenchimento, conforme indicado na Figura 38(b). Mesmo assim não foram observados vazamentos ao longo dos canais de passagem de água do protótipo, atendendo o objetivo do projeto.

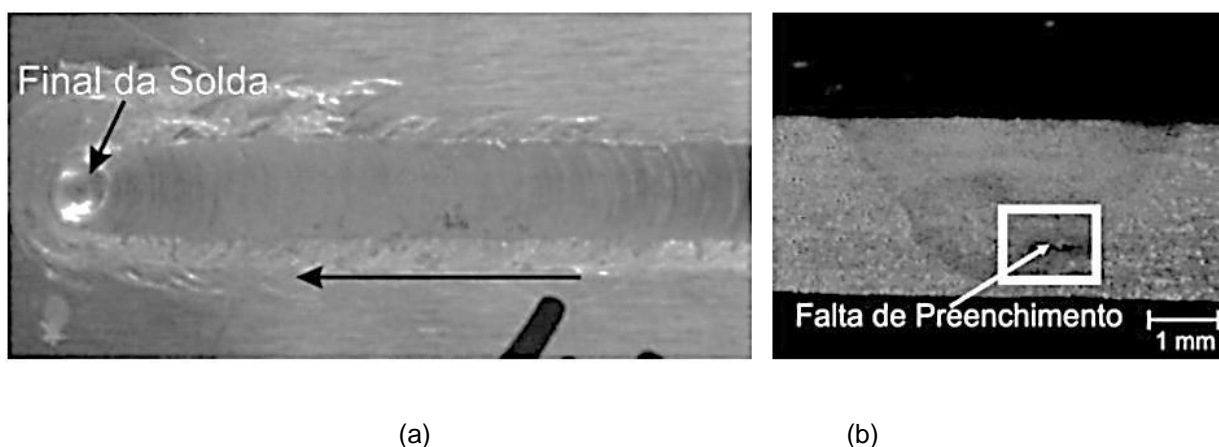


Figura 38: Junta sobreposta de alumínio AA 1100 soldada pelo processo FSW: (a) Vista superior e (b) Vista frontal

Fonte: Adaptado de ARRUDA, 2010

No estudo de Almeida (2015) foi realizado o processo FSW em uma junta de canto com chapas de alumínio AA 5182-O, espessura 3,25 mm em um centro de usinagem CNC cinco eixos adaptado para o processo. Neste estudo foi utilizada

uma ferramenta de aço VF800 AT com pino cilíndrico roscado, inclinada 1° , com penetração do ombro de 0,3 mm e um tempo de permanência no início do cordão de 10 s. Esse estudo produziu soldas com mistura homogênea e sem defeitos em velocidades de avanço de $a = 50$ a 250 mm/min, sendo que as juntas soldadas com velocidade de avanço $a = 50$ mm/min apresentaram descontinuidades volumétricas, conforme verificado em inspeção por microtomografia de raios X. A Figura 39 apresenta os corpos de prova do material base e das juntas soldadas com diferentes velocidades de avanço (a) submetidos a ensaio de tração.

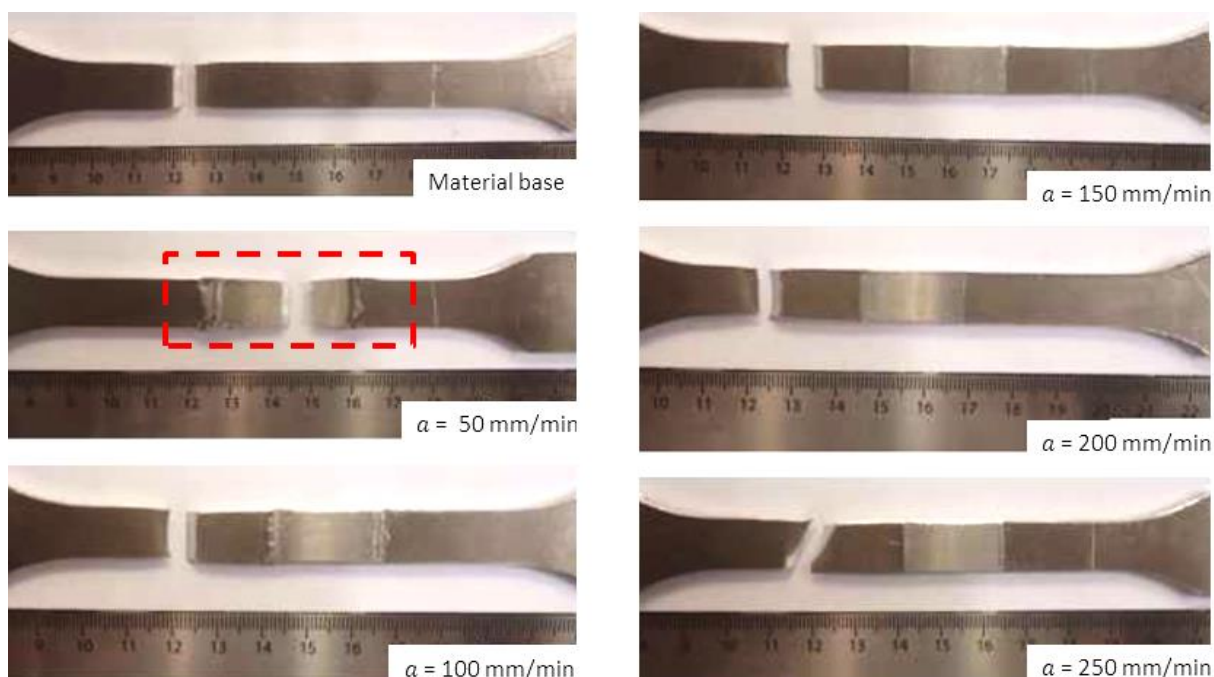


Figura 39: Junta de topo de alumínio AA 5182-O soldada pelo processo FSW com diferentes velocidades de avanço (a) submetida ao ensaio de tração

Fonte: Adaptado de ALMEIDA, 2015

A Figura 39 apresenta os corpos de prova de juntas soldadas pelo processo FSW após ensaio de tração, realizado no estudo de Almeida (2015), onde pode-se verificar que a ruptura do corpo de prova ocorre na região do cordão de solda somente quando foi utilizado o avanço da ferramenta de $a = 50$ mm/min, indicando defeito na soldagem. Enquanto que nos demais experimentos a ruptura ocorreu no material base, indicando que usando avanço entre $a = 100$ mm/min a 250 mm/min não houveram descontinuidades nos cordões de solda.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O protótipo de placa absorvedora de coletor solar foi dimensionado a partir de especificações de tubos para coletores comerciais, com tubos de conexão externa com diâmetro 22 mm e tubos intermediários com com diâmetro 9,5 mm. A Figura 40 apresenta o detalhamento da placa absorvedora, composta por duas chapas conformadas pelo processo de Estampagem Incremental e soldadas pelo processo FSW.

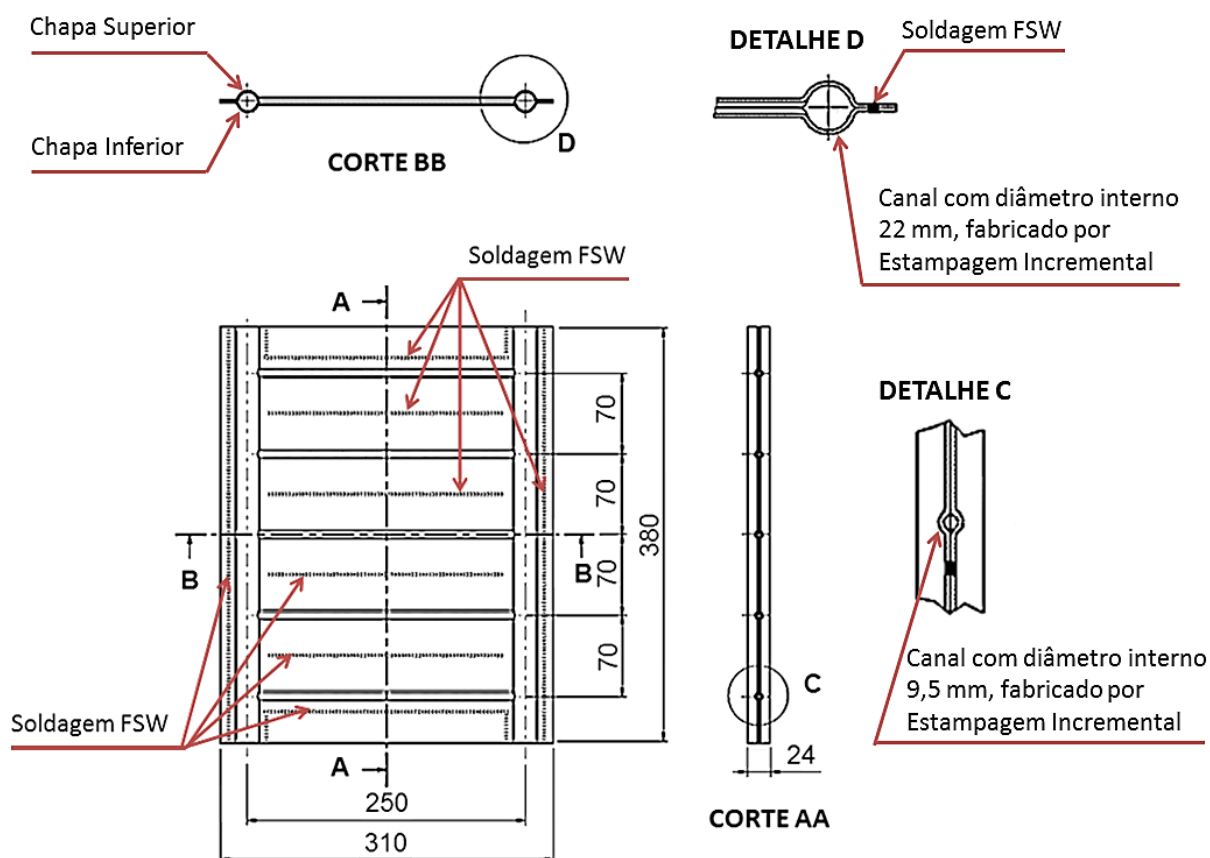


Figura 40: Detalhamento da placa absorvedora

As distâncias entre centros e demais dimensões para estampagem e soldagem das chapas foram determinadas de acordo com o curso dos eixos do Centro de Usinagem CNC selecionado. De forma que as dimensões máximas do protótipo de placa absorvedora foram definidas em 24 x 310 x 380 mm.

Para fabricação do protótipo foi primeiramente realizada a caracterização do material (chapa de alumínio AA1200-H14 com 1 mm de espessura) por meio de ensaio de tração e ensaio Nakajima. Também foram realizados 19 experimentos para definição dos parâmetros de Estampagem Incremental com ferramentas de diâmetro 9,5 mm e 22 mm. Em seguida foram realizados 4 experimentos para definição dos parâmetros de Soldagem FSW. Após a definição dos parâmetros de cada processo foi realizada a Estampagem Incremental, a Soldagem FSW, assim como seu corte e sua pintura, conforme indicado na Figura 41, que apresenta o diagrama de blocos com as etapas para o desenvolvimento dos experimentos.

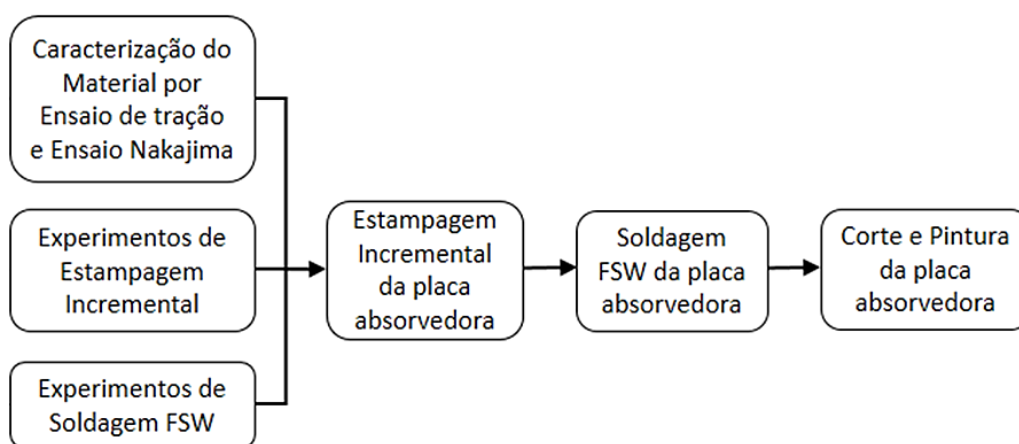


Figura 41: Diagrama de blocos para o desenvolvimento dos experimentos

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

O material definido para estampagem da placa absorvedora foi o alumínio comercialmente puro AA1200-H14. Este é o material normalmente utilizado em embalagens de alimentos por não oferecer riscos à saúde (por apresentar alto nível de pureza da liga), o que é fundamental em um coletor solar por onde circula a água do banho e a água utilizada para lavar e cozinhar alimentos.

Conforme Regulamento Técnico sobre Disposições para Embalagens, Revestimentos, Utensílios, Tampas e Equipamentos Metálicos em Contato com Alimentos, disposto na Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) n° 20/2007 emitido pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) os materiais metálicos em

contato com alimentos não devem conter mais do que 1% de impurezas constituídas por chumbo, arsênio, cádmio, mercúrio, antimônio e cobre considerados em conjunto. Sendo que o limite individual de arsênio, mercúrio e chumbo não devem ser superiores que 0,01% (BRASIL, 2007).

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

O Ensaio de Tração foi realizado na Máquina de Ensaio marca INSTRON/EMIC modelo EMIC 23-600, com capacidade de 600 kN, disponível no Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS.

Após o ensaio de tração foi realizado o ensaio Nakajima para obtenção da Curva Limite de Conformação. O ensaio foi realizado em uma prensa hidráulica de duplo efeito com capacidade de 20 toneladas e marca Dan-Press.

Para o ensaio Nakajima foram cortados a plasma três conjuntos de corpos de prova (com 8 peças), cada conjunto apresentando variação dimensional de largura e raio, sendo todos os corpos de prova submetidos à gravação eletroquímica. O ensaio foi realizado com velocidade de atuação do punção controlada em 1 mm/s a fim de que este pudesse ser interrompido no momento em que fosse iniciada a trinca no corpo de prova.

3.2 EXPERIMENTOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Para realização do processo de Estampagem Incremental da placa absorvedora foi necessário definir a máquina para o processo, o tipo de lubrificante, além das ferramentas e do dispositivo de fixação da chapa.

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

Para seleção do lubrificante para Estampagem Incremental foi consultado o Regulamento Técnico sobre Disposições para Embalagens, Revestimentos, Utensílios, Tampas e Equipamentos Metálicos em Contato com Alimentos, que indica uma série de lubrificantes que são permitidos na fabricação de embalagens. No caso dos óleos minerais seu uso é permitido desde que sua concentração não exceda 3,2 mg/dm² na superfície do produto acabado (BRASIL, 2007).

No estudo de Azevedo *et al.* (2015) foi realizada a comparação entre diversos lubrificantes para Estampagem Incremental, sendo concluído que na Estampagem Incremental de alumínio AA1050 os menores valores de rugosidade e força foram obtidos pelo óleo mineral SAE 30 e pela graxa AL-M. Como neste trabalho foi selecionado um material muito semelhante (AA1200-H14) optou-se pela utilização de óleo ISO VG 100 (equivalente ao óleo SAE 30) para fabricação do protótipo.

Para a Estampagem Incremental do protótipo de placa absorvedora foram definidas duas ferramentas, uma para cada tamanho de canal estampado. A escolha dos diâmetros das ferramentas foi baseado nos diâmetros das tubulações de coletores solares comerciais. As ferramentas foram fabricadas em aço rápido (HSS) temperado e revenido com dureza 65 HRC, a primeira conforme Figura 42(a) e a segunda conforme Figura 42(b), destinadas à estampagem do canal de diâmetro 9,5 mm e de diâmetro 22 mm respectivamente. A usinagem das pontas semiesféricas das duas ferramentas foi realizada em um torno CNC ROMI GL 240.

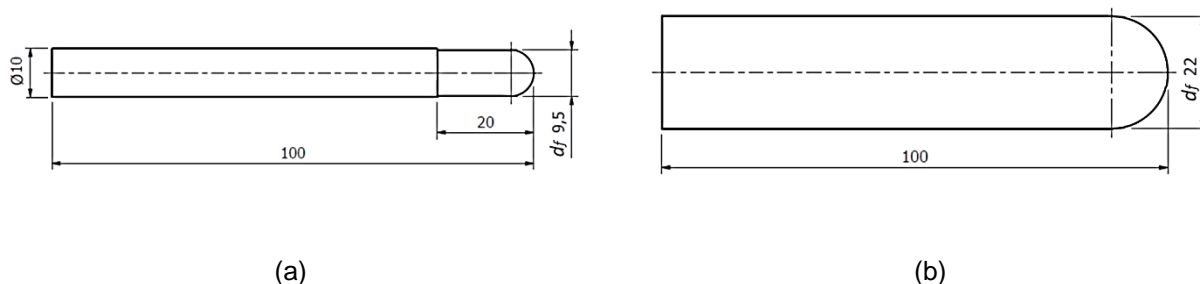


Figura 42: Ferramentas para Estampagem Incremental: (a) Aplicada aos canais de diâmetro 9,5 mm e (b) Aplicada aos canais de diâmetro 22 mm

Para definição dos parâmetros do processo de Estampagem Incremental foram realizadas duas séries de experimentos, a primeira destinada à ferramenta de diâmetro 9,5 mm e a segunda destinada à ferramenta de diâmetro 22 mm.

Todos os experimentos foram realizados até que ocorresse a primeira trinca no material, considerando o valor de profundidade no instante em que ocorreu a

trinca como h' e a profundidade sem trincas sendo h . utilizando matriz parcial. O material selecionado para os experimentos foi chapa de alumínio AA1200-H14 com dimensões 1 x 60 x 160 mm, esta foi fixada entre uma matriz parcial e um prensa-chapas, conforme indicado na Figura 43. O objetivo da utilização de matriz parcial é garantir a precisão do canal restringindo sua geometria, o que caracteriza um processo de Estampagem Incremental por Dois Pontos.

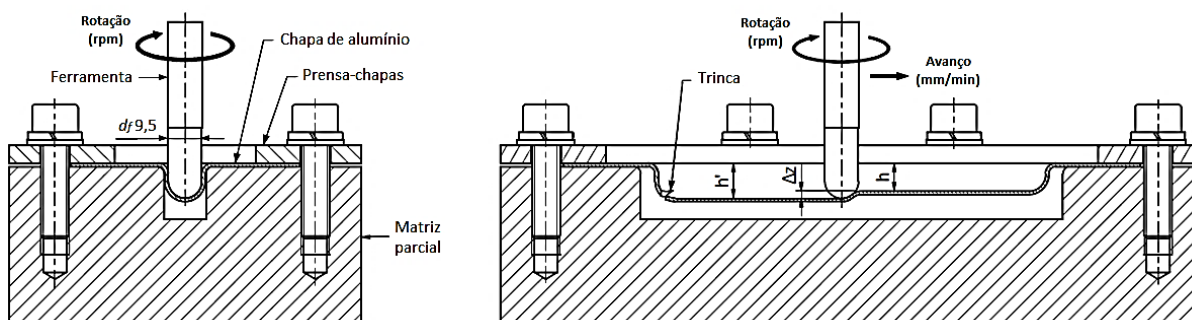


Figura 43: Experimento para análise de parâmetros de Estampagem Incremental

Para a ferramenta de conformação foi definida uma trajetória simples por programação em *software* CAM, através da qual foram executados movimentos nos eixos Z e X conforme indicado na Figura 44. Desta forma, após cada incremento vertical a ferramenta foi deslocada longitudinalmente (em um percurso de 100 mm) até que no lado oposto foi realizado novo incremento vertical, sendo que após a verificação de trinca da chapa o experimento foi interrompido.

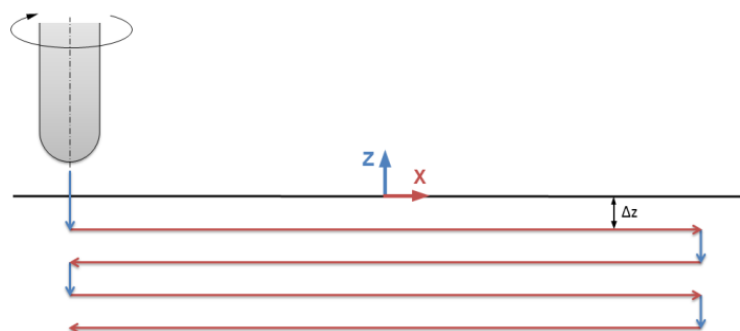


Figura 44: Trajetória da ferramenta nos experimentos para análise de parâmetros em Estampagem Incremental

Na primeira série de experimentos foi analisada a influência dos parâmetros de rotação e incremento vertical no processo através de 16 ensaios, com ferramenta semiesférica de diâmetro 9,5 mm.

Nestes experimentos foram selecionados os valores de rotação $N = 50$ rpm, 200 rpm, 400 rpm e 800 rpm e os valores de incremento vertical de $\Delta z = 2$ mm, 1 mm, 0,5 mm e 0,2 mm, totalizando 16 ensaios. O valor de avanço foi mantido em $a = 250$ mm/min tanto para deslocamento no eixo X quanto no eixo Z , devido ao fato de que este parâmetro apresenta pouca influência na estampabilidade e na rugosidade (AMBROGIO; FILICE; GAGLIARDI, 2012; BARUAH; PANDIVELAN; JEEVANANTHAM, 2017).

Os parâmetros de saída analisados, além das profundidades h e h' foram a espessura final da chapa, as deformações verdadeiras, as tensões aplicadas e a temperatura durante o processo (medida com pirômetro óptico). Em todos os corpos de prova foi realizada gravação eletroquímica de círculos com diâmetro $d = 2,5$ mm para análise das deformações após a estampagem. A Figura 45 apresenta o processo de Estampagem Incremental sendo realizado no centro de usinagem CNC, nesta primeira série de experimentos.

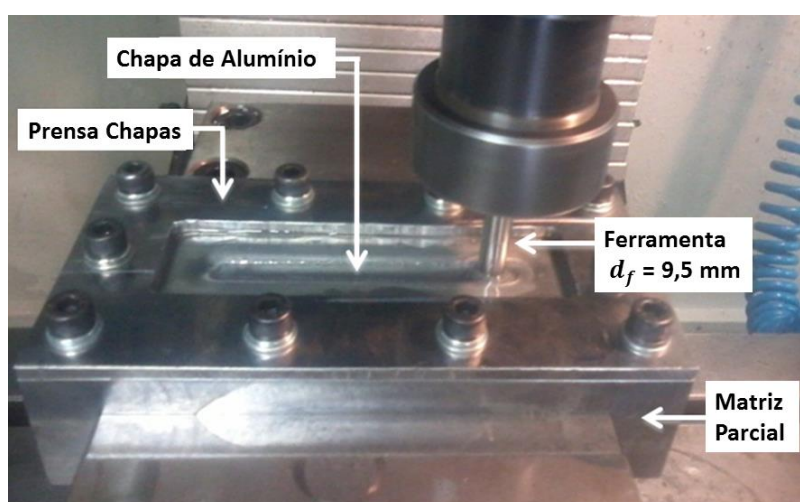


Figura 45: Estampagem Incremental de canal de diâmetro 9,5 mm sendo realizado no centro de usinagem CNC

Na segunda série, com ferramenta de diâmetro 22 mm, foram realizados 3 experimentos, selecionando os parâmetros que apresentaram melhores resultados na primeira série de experimentos. Sendo mantida a rotação $N = 50$ rpm, o avanço $a = 250$ mm/min e variados os parâmetros de incremento vertical entre $\Delta z = 2$ mm, 1 mm e 0,5 mm. Nesta série foram analisados os parâmetros de saída de profundidade h e h' , espessura final da chapa, deformações verdadeiras e tensões aplicadas. A Figura 46 apresenta esta segunda série de experimentos de Estampagem Incremental sendo realizados no centro de usinagem CNC.

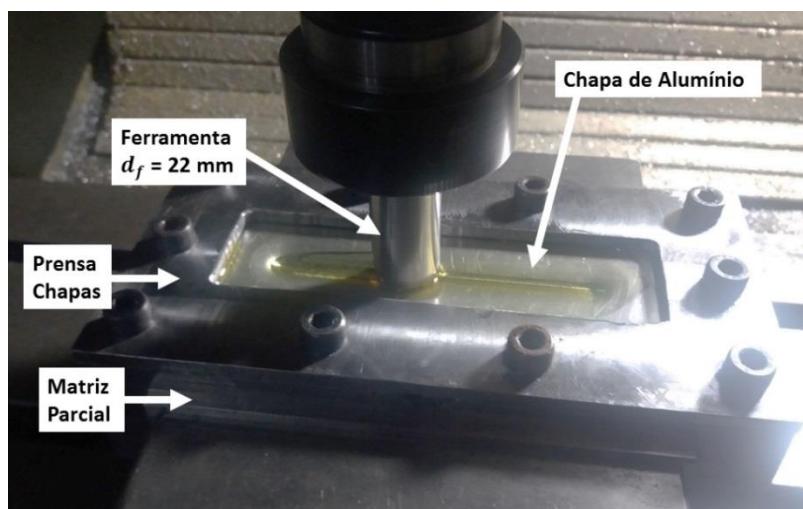


Figura 46: Estampagem Incremental de canal de diâmetro 22 mm sendo realizado no centro de usinagem CNC

Optou-se pela estampagem dos canais de diâmetro 22 mm com ferramenta de mesmo diâmetro ao invés da utilização da ferramenta menor (com estratégia de contorno), a fim de realizar o processo no menor período de tempo possível.

Em todos experimentos as deformações principais foram obtidas pela medição dos círculos gravados nas chapas por meio do processo eletroquímico, que após conformação se tornaram elipses. Estas foram medidas logo ao lado do local onde ocorreu a trinca, conforme indicado na Figura 47.

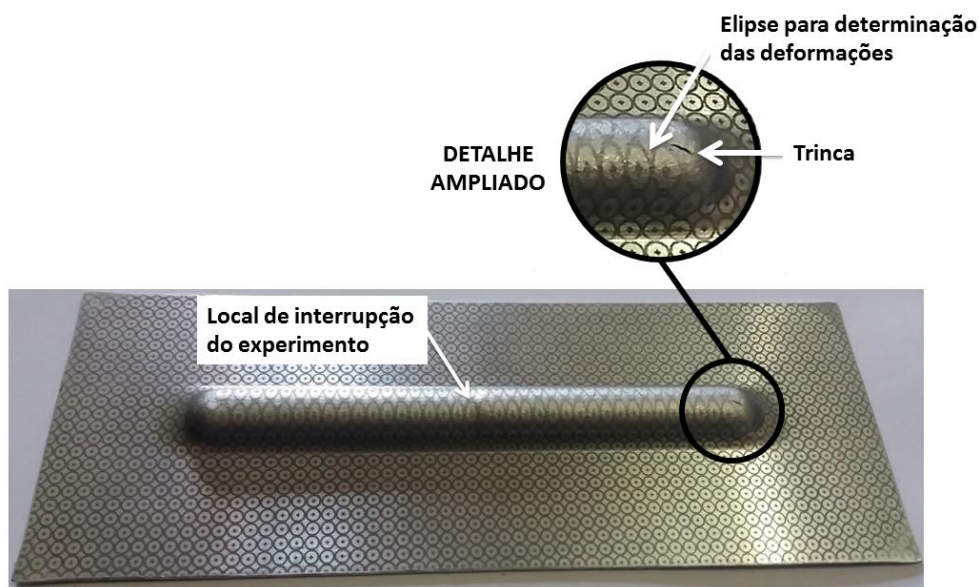


Figura 47: Local de medição da elipse para determinação das deformações

A Figura 48 apresenta a região indeformada da chapa com espessura inicial da chapa $s_0 = 1$ mm e o diâmetro do círculo gravado na chapa $d = 2,5$ mm, bem

como a região deformada por Estampagem Incremental com indicação da espessura final da chapa (s_1), o comprimento da elipse (d_1) e a largura da elipse (d_2). Sendo que a elipse foi obtida pela deformação do círculo após a deformação e a espessura final em cada experimente foi determinada por cálculo, a partir da lei da constância de volume, relacionado as máximas deformações obtidas.

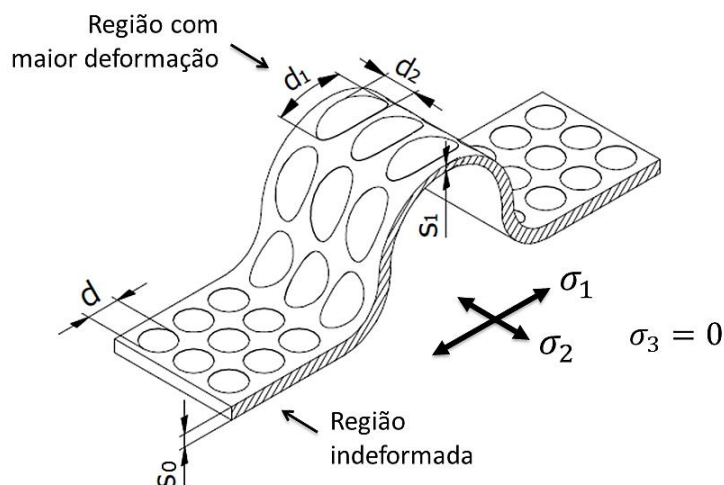


Figura 48: Variação de dimensões dos círculos gravados na chapa e sentido das tensões

Na Figura 48 também são indicadas as tensões σ_1 e σ_2 , aplicadas o plano da chapa, bem como a tensão σ_3 , que neste caso é nula. As tensões no momento em que ocorreu a trinca em cada experimento foram determinadas por cálculo, a partir das deformações medidas e da equação de escoamento do material (obtida no ensaio de tração).

Em todos os experimentos a deformação obtida pelo incremento vertical da ferramenta de Estampagem Incremental sobre a chapa, resultou na formação de um canal com mesmo diâmetro da ferramenta. A elipse com maior deformação em todos os casos indicou deformação plana, ou seja, com deformação no comprimento d_1 , sendo que a largura da elipse se manteve indeformada ($d_2 = d$).

Para execução da Estampagem Incremental de cada chapa do protótipo foi utilizado um dispositivo constituído por uma matriz de material polimérico (poliacetal) e prensa chapas em aço SAE 1020. Também foi necessário utilizar calços de poliacetal e suportes em aço para evitar empenamento da chapa durante o processo. A Figura 49 apresenta a vista explodida do dispositivo utilizado na Estampagem Incremental.

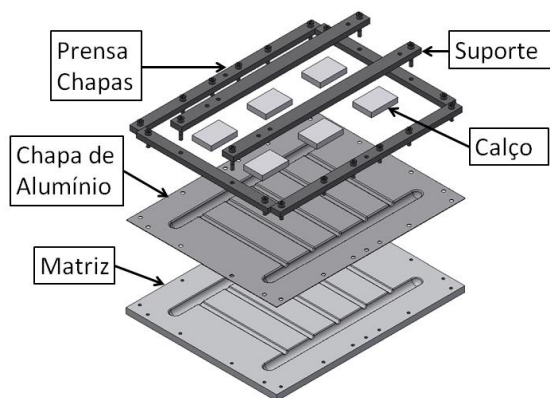


Figura 49: Vista explodida do dispositivo de Estampagem Incremental

Devido à utilização dos calços e suportes, foi preciso trabalhar em três etapas de estampagem de acordo com os canais a serem estampados. A Figura 50 ilustra as três etapas de Estampagem Incremental, sendo que na primeira etapa foi utilizada a ferramenta com diâmetro 22 mm para realização dos canais maiores. Na segunda etapa foi utilizada a ferramenta com diâmetro 9,5 mm para estampagem dos canais menores, com exceção do canal central. Na terceira etapa, substituindo os locais dos calços e suportes e com a mesma ferramenta com diâmetro 9,5 mm foi estampado o canal central.

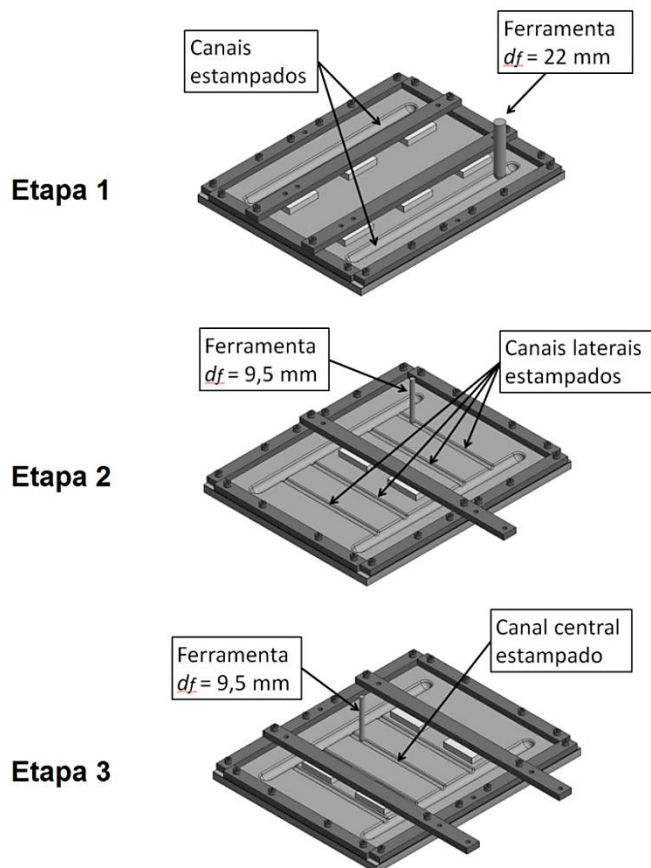


Figura 50: Etapas de Estampagem Incremental da chapa

A Figura 52 apresenta o processo de Estampagem Incremental da chapa da placa absorvedora sendo realizada no centro de usinagem CNC. Nesta etapa já haviam sido estampados os canais maiores (com a ferramenta de diâmetro 22 mm) e estavam sendo estampados os canais menores (com a ferramenta de diâmetro 9,5 mm), com montagem dos calços e suporte no centro do dispositivo.

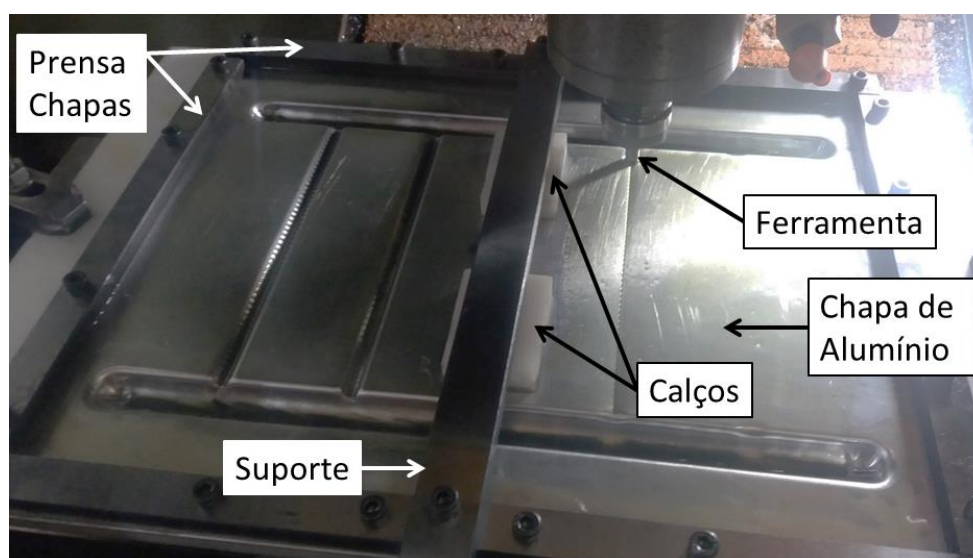


Figura 51: Estampagem Incremental da chapa

Após a estampagem foi realizado o corte e a medição de uma amostra de chapa com os canais estampados. Foram marcados 7 pontos ao longo de cada canal, e a espessura final s_1 foi medida nestes pontos por meio de um paquímetro digital da marca COSA com resolução 0,01 mm.

A profundidade de cada canal estampado no protótipo também foi medida, a fim de avaliar a precisão do produto final. Para isso foi utilizado um relógio comparador da marca DIGIMESS, com resolução 0,01 mm e curso 25 mm.

3.3 EXPERIMENTOS DE SOLDAGEM FSW

Para realização da soldagem do protótipo foi determinada a ferramenta, os dispositivos e a máquina utilizada para definição dos parâmetros de Soldagem FSW.

A máquina selecionada para o processo foi um centro de Usinagem da marca ROMI, modelo Discovery 4022 com comando MACH9, o mesmo utilizado para Estampagem Incremental.

Foi projetada uma ferramenta de soldagem fabricada em VC 131, composta de um ombro com diâmetro 8 mm e pino roscado M3x0,5, conforme indicado na Figura 52.

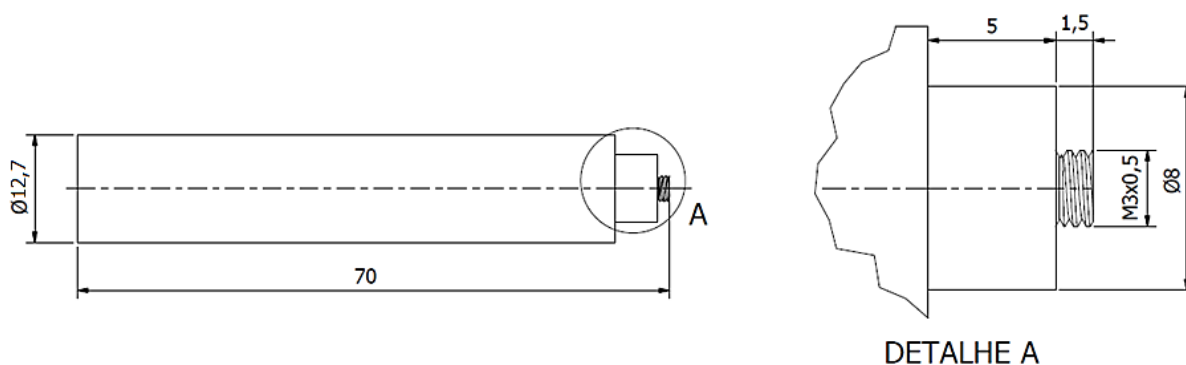


Figura 52: Projeto da ferramenta de Soldagem FSW

A Figura 53 apresenta a ferramenta FSW após usinagem e tratamentos térmicos de têmpera e revenido.



Figura 53: Ferramenta de Soldagem FSW

Com o objetivo de analisar a influência do parâmetro de avanço no processo de Soldagem FSW foram propostos quatro experimentos em juntas sobrepostas de alumínio AA1200-H14, com duas chapas de dimensões 1 x 250 x 360 mm.

Nos ensaios as chapas sobrepostas de alumínio foram posicionadas sobre uma base e fixadas por meio de um prensa chapas. O ombro da ferramenta foi penetrado 0,2 mm sobre a junta, a fim de garantir perfeita fixação. A distância entre os pontos de fixação também foram mantidos próximos, conforme indicado na Figura 54, para evitar defeitos decorrentes da fixação inadequada na soldagem.

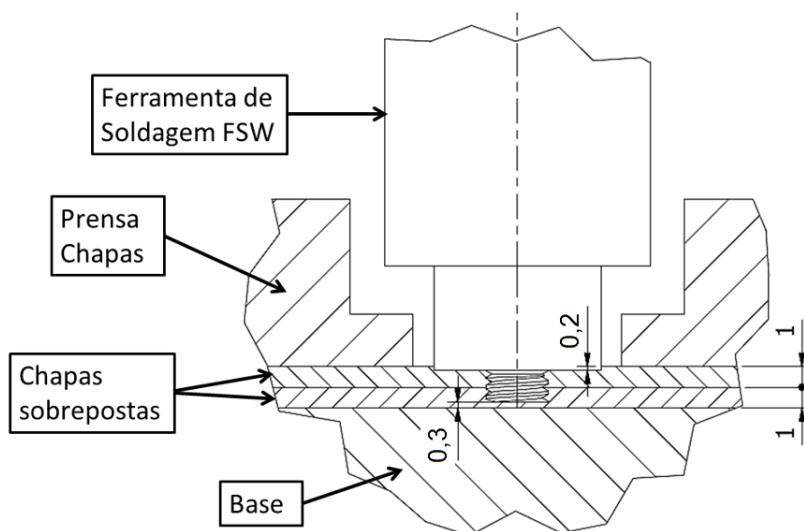


Figura 54: Detalhe do dispositivo de Soldagem FSW

Os experimentos de soldagem foram realizados variando o parâmetro de avanço em $a = 100$ mm/min, 200 mm/min, 300 mm/min e 400 mm/min, mantendo a rotação constante em $N = 1500$ rpm.

Após a soldagem em cada experimento foram cortados três corpos de prova para ensaio de tração e quatro para ensaio de dobramento (dois para dobramento na raiz da solda e dois para dobramento na face da solda), conforme indicado na Figura 55.

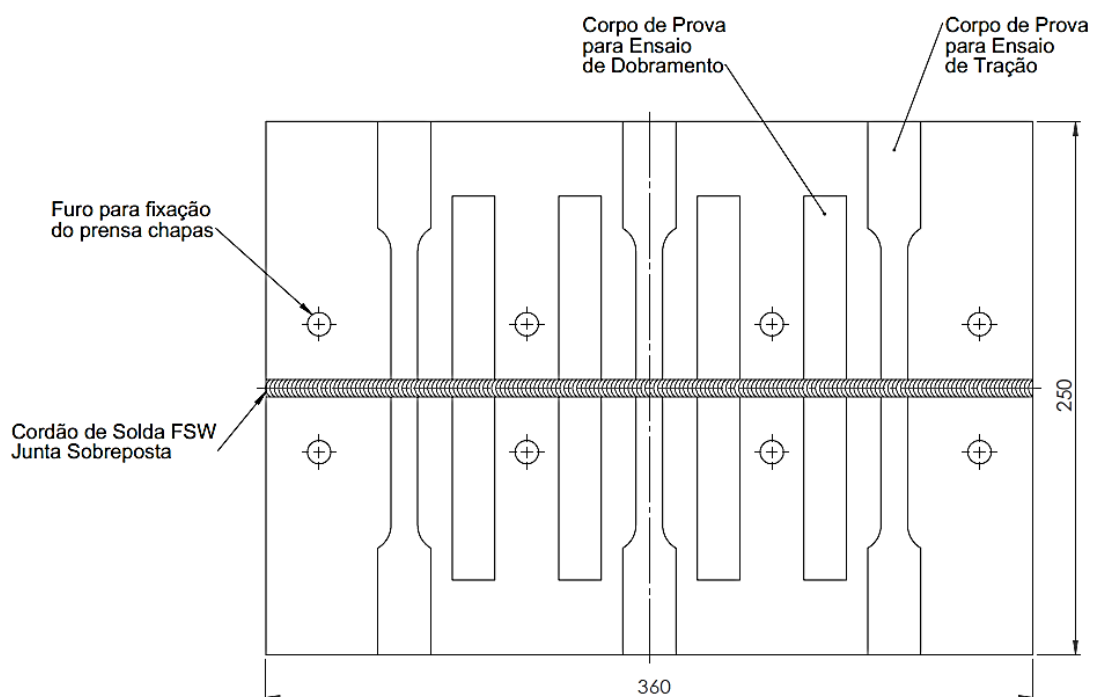


Figura 55: Corpos de prova para os experimentos de Soldagem FSW

Seguindo recomendação da norma ISO/DIS 25239-4: *Friction stir welding – Aluminium – Part 4: Specification and qualification of welding procedures* (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2007), nos quatro experimentos foram desconsiderados os 50 mm iniciais e finais da região soldada. Os ensaios de tração e dobramento foram realizados do Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS através da Máquina de Ensaio marca INSTRON/EMIC modelo EMIC 23-600, com capacidade de 600 kN.

O ensaio de dobramento foi realizado até o ângulo de 180° e, conforme norma NBR ISO 7438: Materiais metálicos - Ensaio de dobramento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016). A Figura 56 apresenta as dimensões dos corpos de prova soldados, utilizados nos ensaios de dobramento.

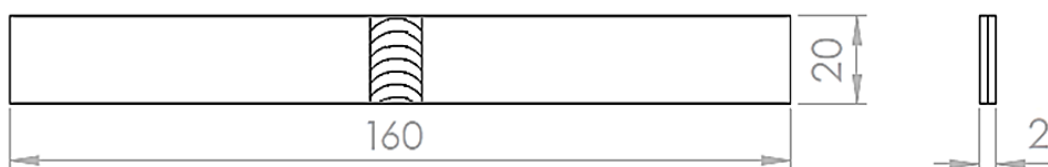


Figura 56: Corpo de prova soldado para o ensaio de dobramento

O ensaio de dobramento foi realizado com um cutelo de raio 10 mm e uma base com cavidade de 26 mm. A Figura 57(a) apresenta o início da realização do dobramento na máquina de ensaios e na Figura 57(b) são indicadas as partes do dispositivo (cutelo e base) no momento da dobra do corpo de prova soldado.

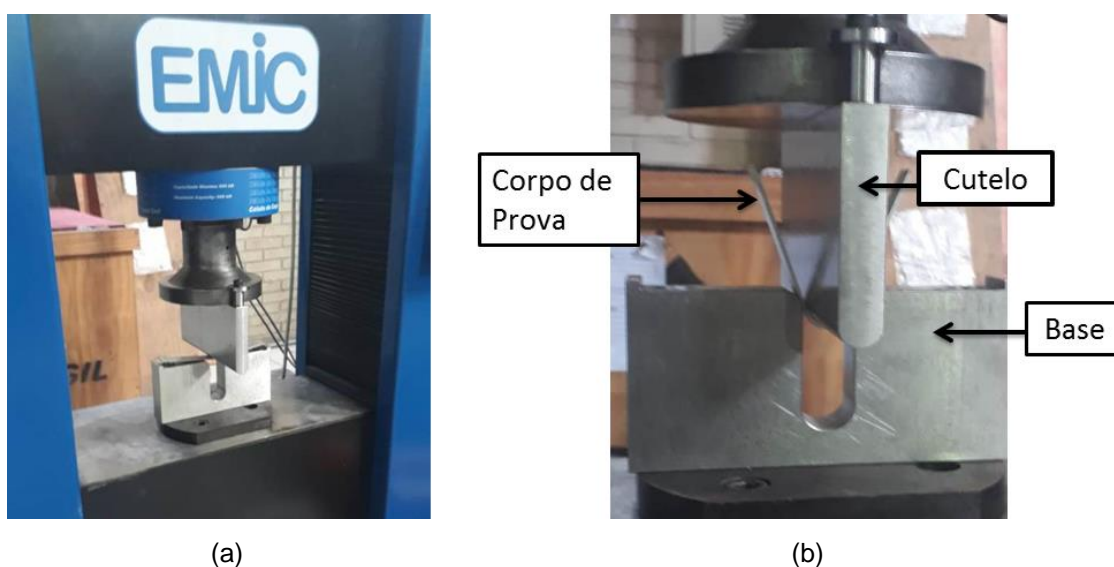


Figura 57: Ensaio de dobramento na junta soldada: (a) Máquina de ensaios e (b) Detalhe dos elementos do dispositivo usado nos ensaios

Para avaliação da resistência ao dobramento da solda foi realizada dobra na face da solda e dobra na raiz da solda, conforme indicado na Figura 58(a) e na Figura 58(b), respectivamente. Foram realizadas duas dobras de raiz e duas dobras de face para cada velocidade de avanço de ferramenta utilizada na soldagem.

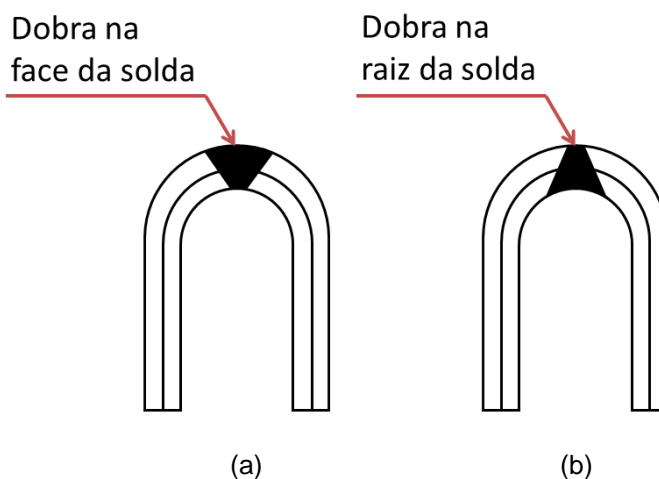


Figura 58: Métodos de dobra: (a) Dobra na face da solda e (b) Dobra na raiz da solda

Após o ensaio de dobramento, foi realizado o ensaio de tração, conforme norma NBR ISO 6892-1: Materiais metálicos - Ensaio de Tração - Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Foram realizadas três ensaios de tração para cada velocidade de avanço de ferramenta utilizada na soldagem. A Figura 59 apresenta as dimensões dos corpos de prova soldados, utilizados nos ensaios de tração.

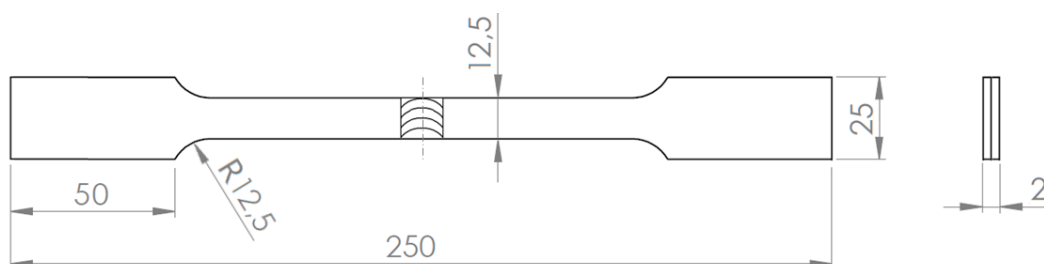


Figura 59: Corpo de prova soldado para ensaio de tração

Assim como no trabalho de Arruda (2010) e no trabalho de Wan e Huang (2017), nos quais foi realizada Soldagem FSW de chapas sobrepostas, para o ensaio de tração foi necessário preparar o corpo de prova com apoios para fixação nas garras de tração da máquina de ensaios.

Os apoios têm a função de garantir o alinhamento do corpo de prova ao ser tracionado e foram fabricados com chapas do mesmo material do corpo de prova (AA 1200-H14 com 1 mm de espessura). A Figura 60 apresenta o corpo de prova de tração com o posicionamento dos apoios e indica a região do cordão de solda.

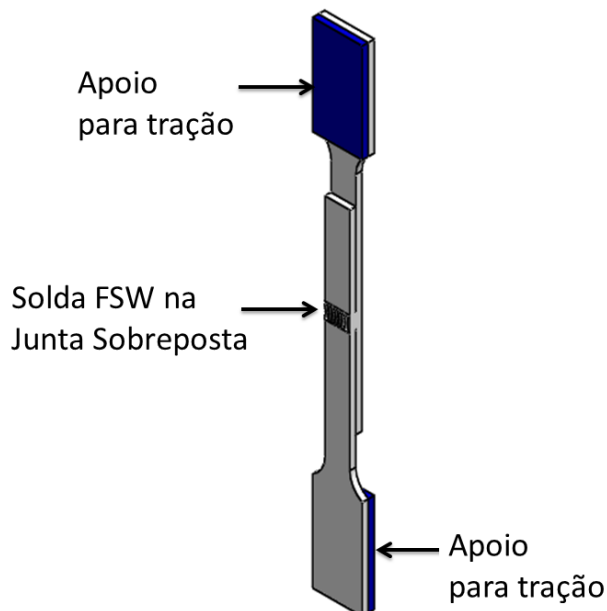


Figura 60: Corpo de prova para ensaio de tração de junta sobreposta com Soldagem FSW

O ensaio de tração foi realizado com velocidade de avanço na máquina mantida em $v = 2$ mm/s até que ocorresse a ruptura de cada corpo de prova. A Figura 61(a) apresenta o início da realização do ensaio de tração na máquina de ensaios e a Figura 61(b) indica a região da solda, que se manteve intacta após a realização do ensaio.

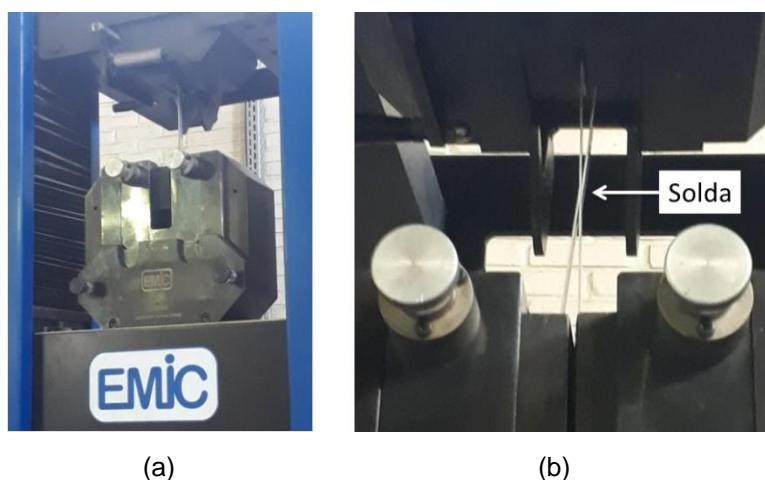


Figura 61: Ensaio de tração na junta soldada: (a) Máquina de ensaios e (b) Região da solda durante a realização do ensaio

Para realização do processo de Soldagem FSW da placa absorvedora do coletor foi necessário utilizar suportes e calços para auxiliar na fixação das chapas, da mesma forma que no processo de Estampagem Incremental. A Figura 62 apresenta o processo de Soldagem FSW sendo realizado com auxílio dos calços e dos suportes intermediários.

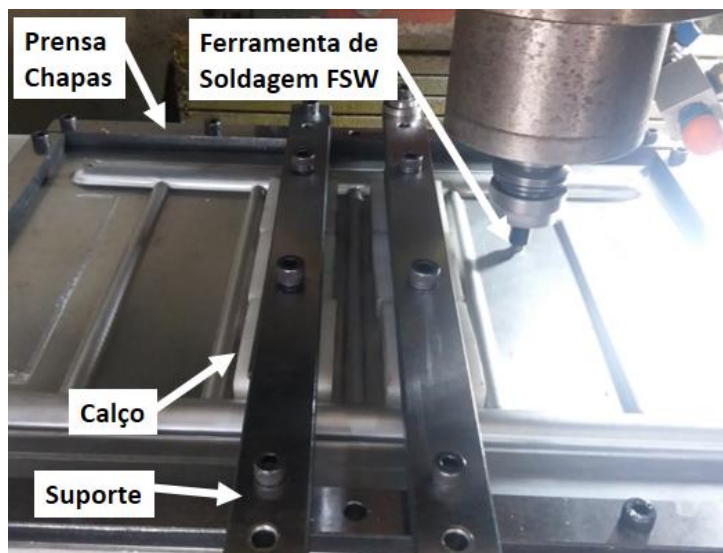


Figura 62: Soldagem FSW da placa absorvedora

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta a análise dos experimentos de Estampagem Incremental e Soldagem FSW, assim como a avaliação do protótipo de placa absorvedora de coletor solar após sua fabricação.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Através do ensaio de tração foi definida a curva de engenharia “Tensão x Deformação” para o alumínio AA1200-H14, com tensão de escoamento $\sigma_{0,2} = 94$ N/mm², tensão máxima $\sigma_{m\acute{a}x} = 99$ N/mm² e deformação relativa $\epsilon = 1,8$ %, conforme indicado na Figura 63.

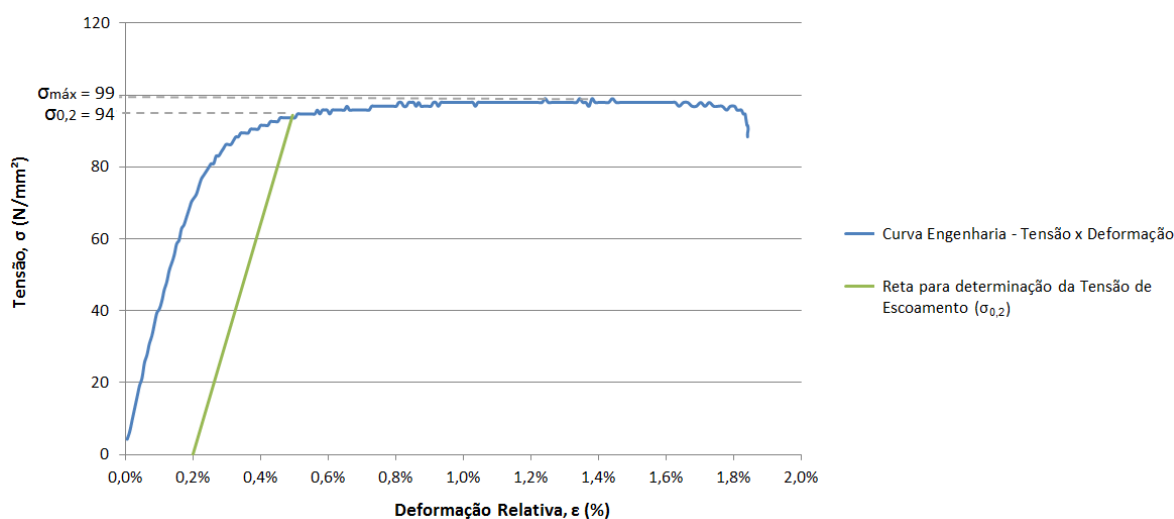


Figura 63: Curva de engenharia “Tensão x Deformação” para alumínio AA1200-H14 para ensaio de tração

Comparando os valores obtidos no ensaio de tração com os valores apresentados na especificação técnica do fabricante (conforme documento em anexo), verifica-se que a deformação relativa apresentada no ensaio de tração $\epsilon = 1,8$ % está dentro da faixa estabelecida pelo fornecedor ($\epsilon = 1$ a 3 %) e que a tensão

de escoamento é praticamente a mesma ($\sigma_{0,2} = 95 \text{ N/mm}^2$). No entanto, a tensão máxima admissível obtida no ensaio ($\sigma_{\text{máx}} = 99 \text{ N/mm}^2$) é 10% menor que o limite inferior estabelecido pelo fornecedor ($\sigma_{\text{máx}} = 110 \text{ N/mm}^2$).

A partir dos resultados obtidos no ensaio de tração foi determinada a curva de escoamento para o alumínio AA1200-H14 conforme indicado na Equação 25 e também na Figura 64.

$$kf = 120,74 \cdot \varphi^{0,0469} \quad (25)$$

Onde:

kf = tensão verdadeira (N/mm^2);

φ = deformação verdadeira (-).

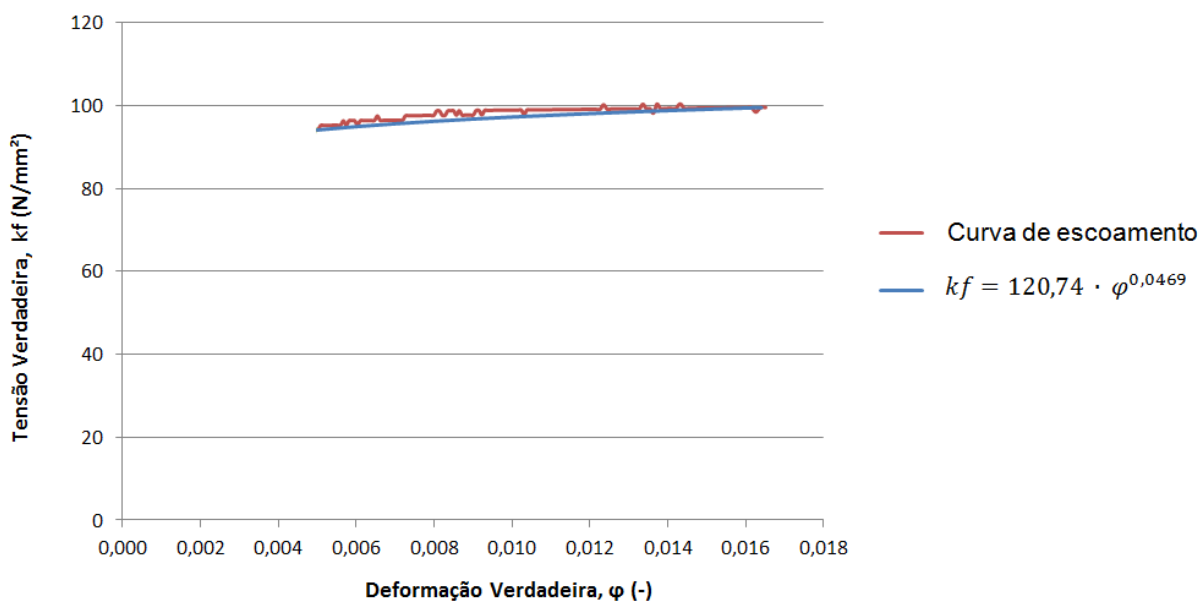


Figura 64: Curva de escoamento para alumínio AA1200-H14

Após o ensaio de tração foi realizado o ensaio Nakajima. A Figura 65 apresenta o conjunto de corpos de prova de alumínio AA 1200-H14 após a realização da deformação, que foi mantida até o surgimento de trinca em cada corpo de prova.

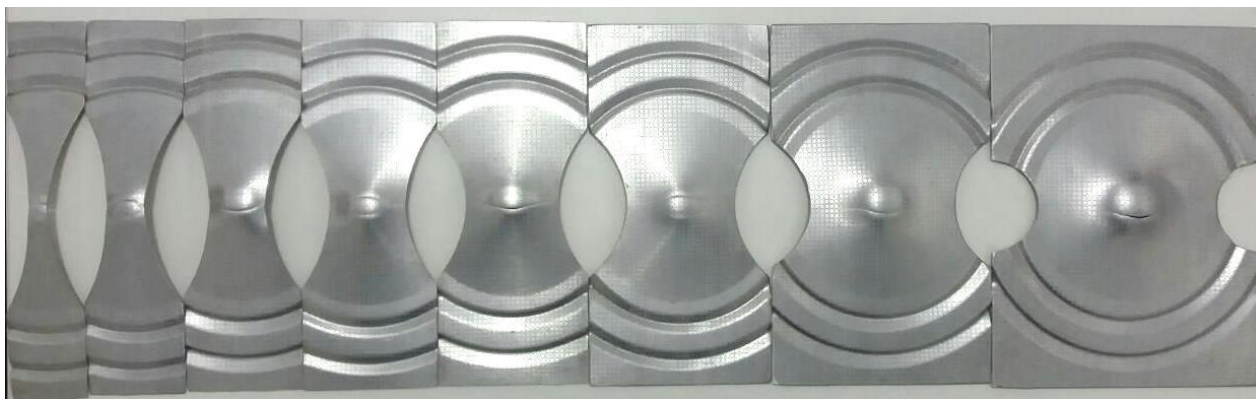


Figura 65: Corpos de prova após realização do ensaio Nakajima

Ao lado da trinca de cada corpo de prova foi selecionada a elipse (formada pela deformação dos círculos marcados por gravação eletroquímica) e, pela medição da largura e do comprimento dessas elipses, foram determinadas as deformações φ_1 e φ_2 , conforme indicado na Figura 66.

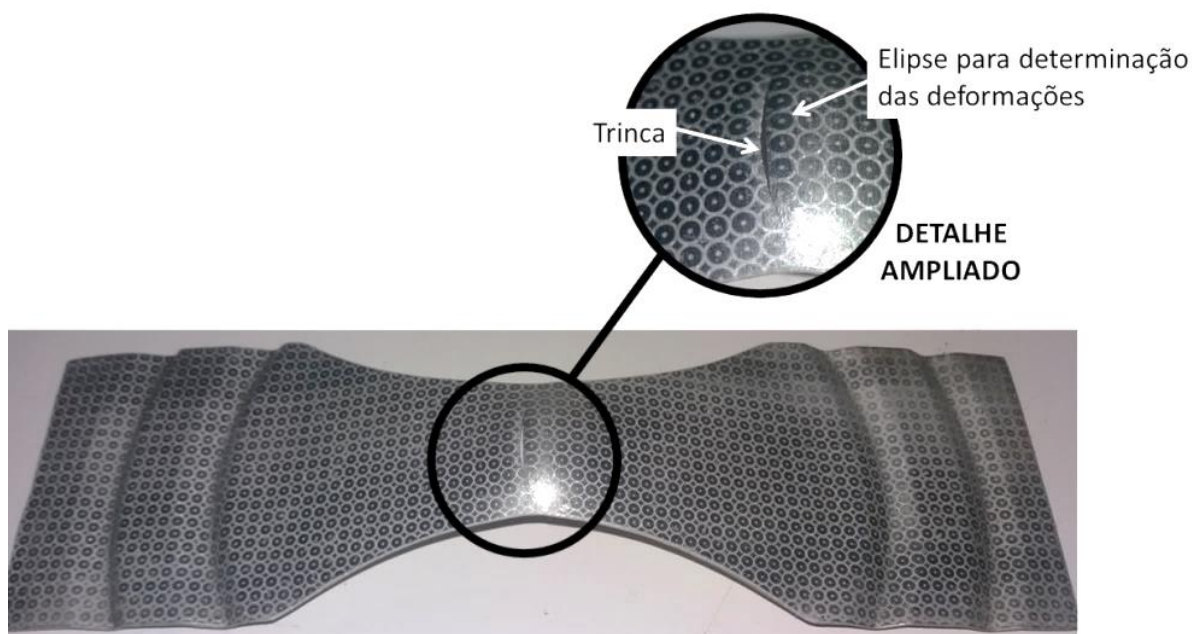


Figura 66: Local da fratura e da elipse para determinação das deformações

A partir dos valores calculados para as deformações principais foi construída a CLC para alumínio AA1200-H14, conforme indicado na Figura 67.

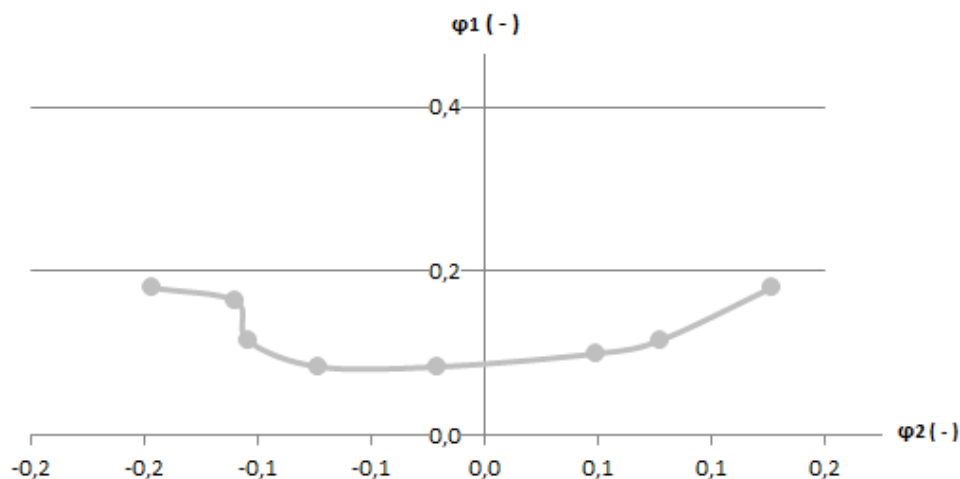


Figura 67: CLC para alumínio AA1200-H14

Na Figura 67 são indicados os pontos correspondentes às deformações principais φ_1 e φ_2 para cada um dos oito corpos de prova analisados pelo Ensaio Nakajima. Interligando esses pontos é determinada CLC para o material analisado, que indica os limites de deformação para o processo de Estampagem Convencional.

4.2 EXPERIMENTOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Com base na primeira série de experimentos de Estampagem Incremental, realizada com ferramenta de diâmetro 9,5 mm foi elaborada a Tabela 3, onde foram comparados os parâmetros de entrada (o incremento vertical Δz e a rotação N) com os parâmetros de saída (profundidade estampada sem trinca h , profundidade estampada em que ocorre a trinca h' , espessura final da chapa s_1 , deformação relativa de espessura ε_s , deformação verdadeira no comprimento φ_1 , deformação verdadeira na largura φ_2 , deformação verdadeira na espessura φ_3 , deformação equivalente φ_{eq} , maior tensão aplicada σ_1 , menor tensão aplicada σ_2 e tensão equivalente σ_{eq}).

Tabela 3: Análise de estampabilidade na Estampagem Incremental de AA1200-H14 para ferramenta de diâmetro $d_f = 9,5$ mm

| N° | Δz (mm) | N (rpm) | h (mm) | h' (mm) | s_1 (mm) | ε_s (%) | φ_1 (-) | φ_2 (-) | φ_3 (-) | φ_{eq} (-) | σ_1 (N/mm ²) | σ_2 (N/mm ²) | σ_{eq} (N/mm ²) |
|-----------|--------------------|--------------|-------------|--------------|---------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 2 | 50 | 6 | 8 | 0,50 | 50 | 0,69 | 0 | -0,69 | 0,80 | 137,9 | 69,0 | 119,5 |
| 2 | 2 | 200 | 6 | 8 | 0,50 | 50 | 0,69 | 0 | -0,69 | 0,80 | 137,9 | 69,0 | 119,5 |
| 3 | 2 | 400 | 6 | 8 | 0,50 | 50 | 0,69 | 0 | -0,69 | 0,80 | 137,9 | 69,0 | 119,5 |
| 4 | 2 | 800 | 6 | 8 | 0,50 | 50 | 0,69 | 0 | -0,69 | 0,80 | 137,9 | 69,0 | 119,5 |
| 5 | 1 | 50 | 6 | 7 | 0,45 | 55 | 0,79 | 0 | -0,79 | 0,91 | 138,8 | 69,4 | 120,2 |
| 6 | 1 | 200 | 6 | 7 | 0,45 | 55 | 0,79 | 0 | -0,79 | 0,91 | 138,8 | 69,4 | 120,2 |
| 7 | 1 | 400 | 6 | 7 | 0,45 | 55 | 0,79 | 0 | -0,79 | 0,91 | 138,8 | 69,4 | 120,2 |
| 8 | 1 | 800 | 6 | 7 | 0,45 | 55 | 0,79 | 0 | -0,79 | 0,91 | 138,8 | 69,4 | 120,2 |
| 9 | 0,5 | 50 | 6,5 | 7 | 0,41 | 59 | 0,88 | 0 | -0,88 | 1,02 | 139,5 | 69,8 | 120,8 |
| 10 | 0,5 | 200 | 6,5 | 7 | 0,41 | 59 | 0,88 | 0 | -0,88 | 1,02 | 139,5 | 69,8 | 120,8 |
| 11 | 0,5 | 400 | 6,5 | 7 | 0,41 | 59 | 0,88 | 0 | -0,88 | 1,02 | 139,5 | 69,8 | 120,8 |
| 12 | 0,5 | 800 | 7 | 7,5 | 0,40 | 60 | 0,92 | 0 | -0,92 | 1,06 | 139,8 | 69,9 | 121,1 |
| 13 | 0,2 | 50 | 6,6 | 6,8 | 0,44 | 56 | 0,83 | 0 | -0,83 | 0,96 | 139,1 | 69,6 | 120,5 |
| 14 | 0,2 | 200 | 6,8 | 7 | 0,41 | 59 | 0,88 | 0 | -0,88 | 1,02 | 139,5 | 69,8 | 120,8 |
| 15 | 0,2 | 400 | 7 | 7,2 | 0,40 | 60 | 0,92 | 0 | -0,92 | 1,06 | 139,8 | 69,9 | 121,1 |
| 16 | 0,2 | 800 | 7,6 | 7,8 | 0,38 | 62 | 0,96 | 0 | -0,96 | 1,11 | 140,1 | 70,0 | 121,3 |

A Tabela 3 indica que no primeiro experimento (com menor rotação e maior incremento) se obteve redução de espessura $\varepsilon_s = 50\%$, com maior deformação $\varphi_1 = 0,69$ e tensão máxima $\sigma_1 = 137,9$ N/mm². No 16° experimento (com menor incremento e maior rotação) se obteve redução de espessura $\varepsilon_s = 62\%$, com maior deformação $\varphi_1 = 0,96$ e tensão máxima $\sigma_1 = 140,1$ N/mm². Ainda que a redução de espessura tenha alcançado uma variação de 12%, a tensão máxima variou apenas 1,5%. Sendo que em todos os experimentos de Estampagem Incremental a tensão máxima foi muito maior superior à obtida no ensaio uniaxial de tensão ($\sigma_{m\acute{a}x} = 99$ N/mm²), mas manteve-se dentro dos limites estabelecidos pelo fornecedor ($\sigma_{m\acute{a}x} = 110$ N/mm² a 145 N/mm²).

Como esperado, a espessura inicial s_0 da chapa conformada pelo processo de Estampagem Incremental é reduzida para a espessura final s_1 . Estes parâmetros são apresentados na chapa cortada, indicada na Figura 68, onde foi considerada a profundidade em que não ocorreu a fratura h .

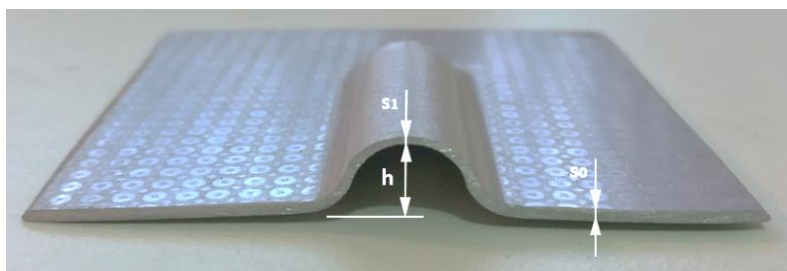


Figura 68: Variação de espessura na chapa estampada

As espessuras finais apresentaram valores (obtidos por cálculo) entre 0,38 mm e 0,50 mm, conforme indicado na Tabela 3. Essa variação é função da profundidade estampada (MARTINS *et al.*, 2008), ou seja, quanto maior a profundidade estampada, menor será a espessura final da chapa.

Nos primeiros quatro ensaios (com incremento vertical $\Delta z = 2$ mm e rotação variando de $N = 50$ rpm a 800 rpm) a região estampada não apresentou trincas até a profundidade de 6 mm, enquanto que no incremento seguinte (em 8 mm de profundidade) o surgimento da trinca ocorreu de forma catastrófica acompanhando o deslocamento da ferramenta até o local de interrupção do ensaio. Nestes ensaios as deformações obtidas indicam altos valores de deformação plana, com $\varphi_1 = 0,69$ e $\varphi_2 = 0$, medidas ao lado de cada trinca. Ainda que essas deformações possuam os mesmos valores nos quatro ensaios é possível observar que à medida que ocorre aumento de rotação a abertura da trinca diminui, conforme indicado na Figura 69.

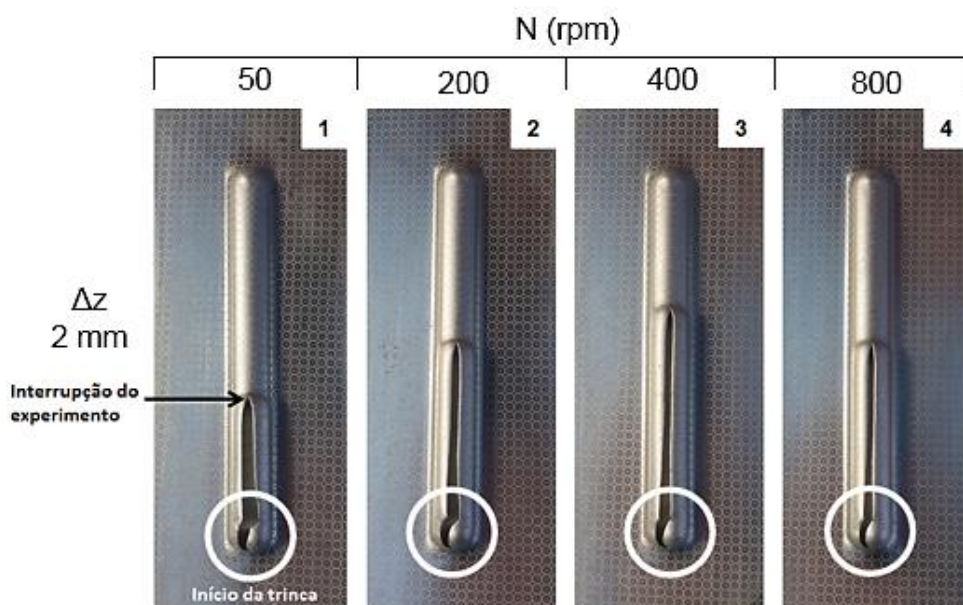


Figura 69: Início da trinca nos ensaios 1 a 4 com ferramenta de diâmetro $d_f = 9,5$ mm

Nos demais ensaios com incrementos verticais menores, ocorreram maiores deformações até o início da trinca (com valores φ_1 de 0,79 a 0,96) mantendo a deformação $\varphi_2 = 0$. Nos ensaios 5 a 16 as trincas são observadas apenas no local de penetração vertical da ferramenta. Também é possível observar que à medida que ocorre o aumento da rotação combinado à diminuição do incremento, maiores deformações são obtidas e menores são as trincas observadas, conforme indicado na Figura 70.

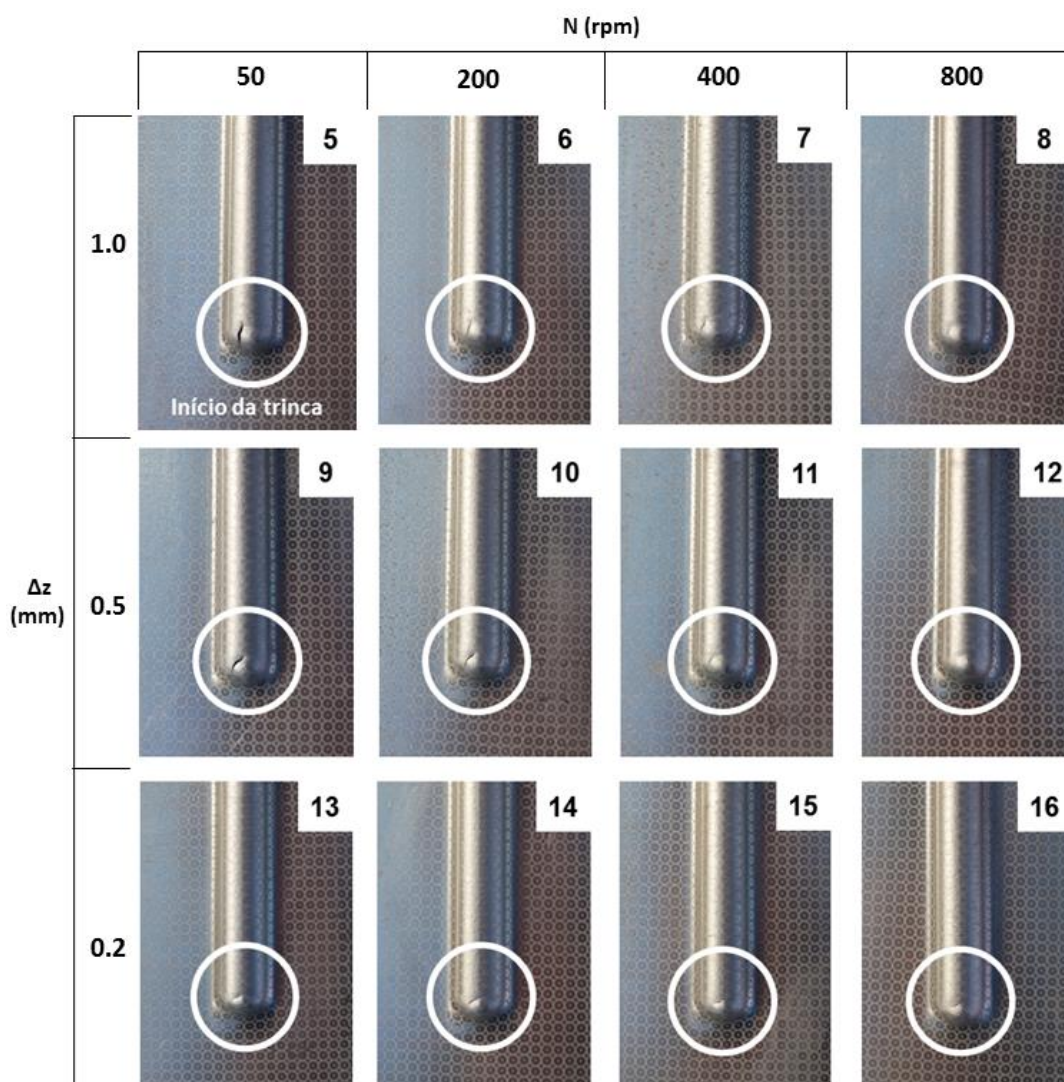


Figura 70: Início da trinca nos ensaios 5 a 16 com ferramenta de diâmetro $d_f = 9,5$ mm

A partir destes resultados é possível estabelecer uma relação entre a profundidade sem trinca (h) e a rotação (N) em cada ensaio, conforme indicado na Figura 71, na qual é possível verificar que em grandes incrementos ($\Delta z = 1$ mm e 2

mm) há pouca influência da rotação na profundidade sem trinca, enquanto que em pequenos incrementos ($\Delta z = 0,2$ mm e $0,5$ mm) essa influência passa a ser significativa. Sendo assim, verifica-se que quanto maior for a rotação da ferramenta utilizada no processo, maior será também a profundidade estampada sem trinca, do mesmo modo como apresentado no estudo de Xu *et al.* (2015). No entanto, considerando que há pouca variação nos resultados para este tipo de material, dependendo da profundidade do canal a ser estampado pode ser mais produtivo utilizar incrementos grandes e fabricar a peça em menor período de tempo.

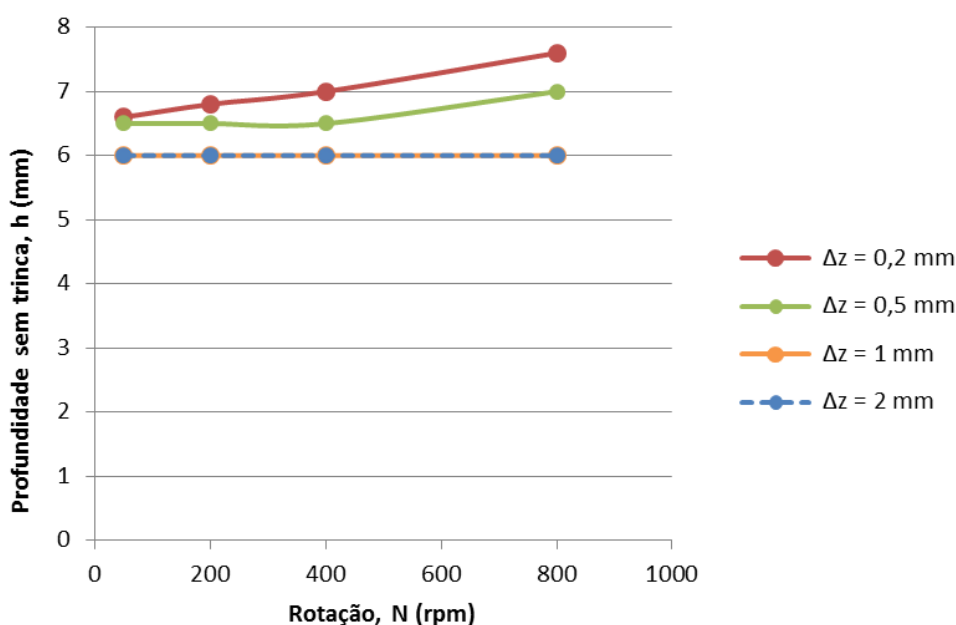


Figura 71: Relação de profundidade sem trinca (h) e rotação (N) nos ensaios com ferramenta diâmetro $d_f = 9,5$ mm

A Figura 72 indica a relação entre a profundidade sem trinca (h) e o incremento vertical (Δz) em cada ensaio, onde é possível observar que em todos os casos quanto maior o incremento, menor será a profundidade estampada sem trinca. Também é possível observar que a rotação só apresenta influência significativa combinada a pequenos valores de incremento vertical. No estudo de Bhattacharya *et al.* (2011) também é indicada a diminuição da estampabilidade da chapa (medida pelo ângulo da peça estampada) em virtude do aumento do incremento vertical.

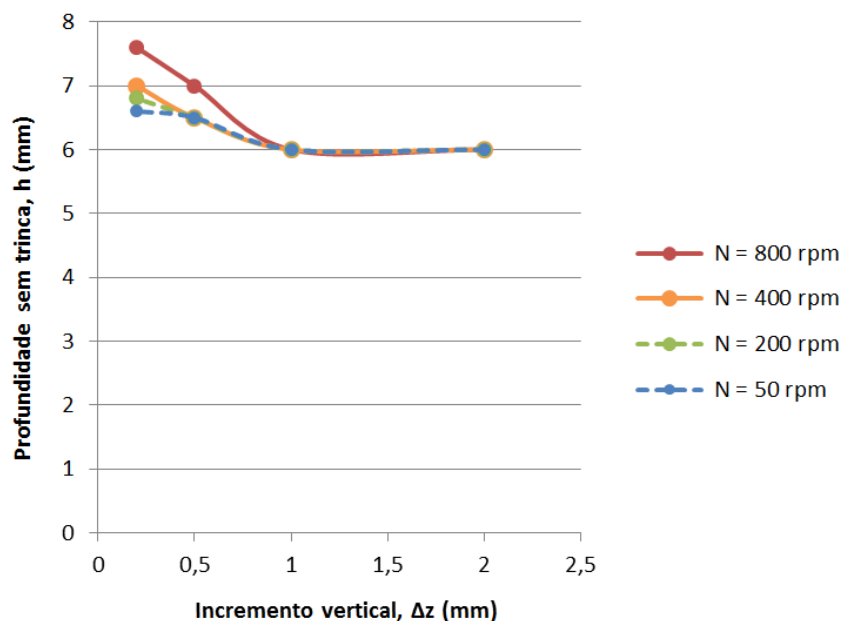


Figura 72: Relação de profundidade sem trinca (h) e incremento vertical (Δz) nos ensaios com ferramenta de diâmetro $d_f = 9,5$ mm

Com base nas deformações φ_1 e φ_2 de cada experimento é possível marcar sobre o gráfico apresentado na Figura 73, os pontos correspondentes de deformação plana (com $\varphi_2 = 0$) para a primeira série de experimentos.

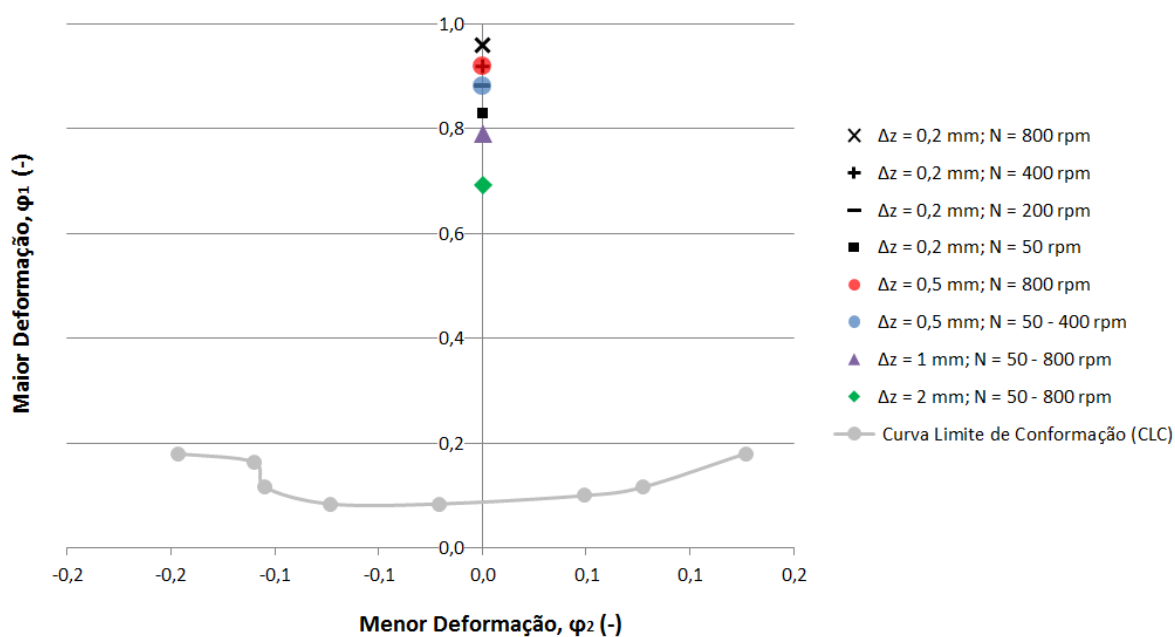


Figura 73: Comparação das deformações obtidas na CLC para AA1200-H14 e na Estampagem Incremental com ferramenta de diâmetro $d_f = 9,5$ mm

A Figura 73 indica que, assim como nos estudos de Park e Kim (2003), as deformações obtidas em todos os experimentos de Estampagem Incremental são muito maiores do que as obtidas pela CLC (que está relacionada à Estampagem Convencional).

Essa maior deformação obtida na Estampagem Incremental pode ser atribuída à forma como o processo ocorre, no qual a deformação plástica é realizada quando a ferramenta é forçada sobre a chapa, aplicando assim uma tensão concentrada em uma pequena área de contato (ARSHAD, 2012). A estampabilidade, no processo de Estampagem Incremental, também aumenta à medida que ocorre a diminuição do diâmetro da ferramenta ou a diminuição do incremento vertical (PARK; KIM, 2003). Estes parâmetros estão intimamente relacionados à velocidade de deformação, já que a estampabilidade aumenta conforme a velocidade de deformação diminui (SCHAEFFER, 2016).

A partir desse ponto foi estabelecida a RLF para cada combinação de parâmetros utilizada nestes 16 experimentos de Estampagem Incremental, conforme indicado na Figura 74.

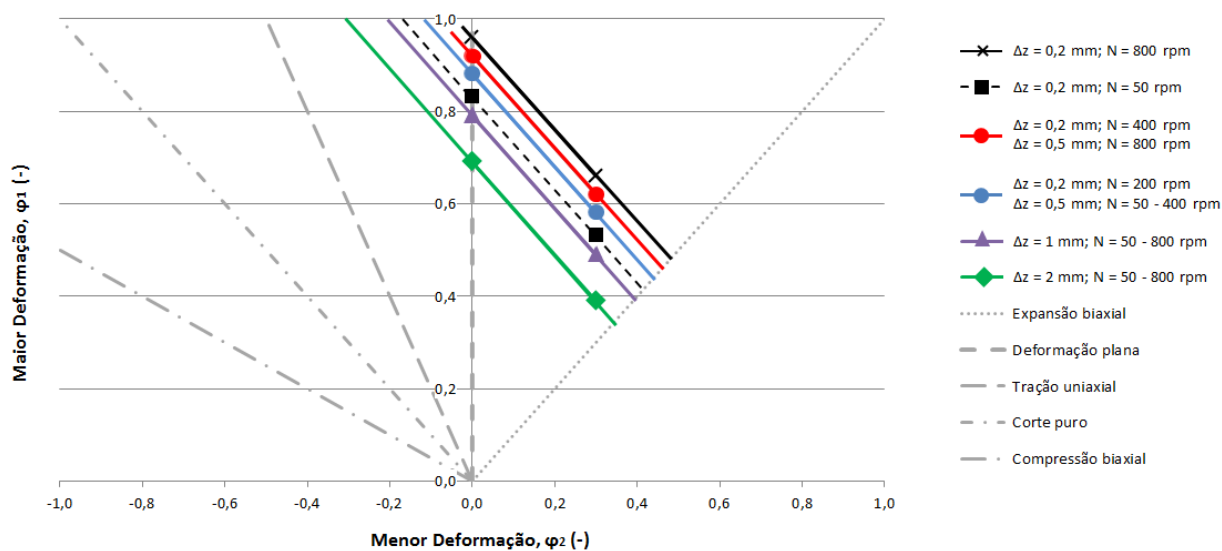


Figura 74: RLF para os 16 experimentos com ferramenta de diâmetro $d_f = 9,5$ mm

A RLF com maior deformação foi obtida com $\Delta z = 0,2$ mm e $N = 800$ rpm. Também é possível observar que com $\Delta z = 0,5$ mm e $N = 800$ rpm obteve-se a mesma deformação que com $\Delta z = 0,2$ mm e $N = 400$ rpm. Da mesma forma que os ensaios com $\Delta z = 0,5$ mm e $N = 50$ rpm a 400 rpm apresentaram a mesma deformação com $\Delta z = 0,2$ mm e $N = 200$ rpm. Sendo assim, pode-se verificar que é

mais produtivo utilizar $\Delta z = 0,5$ mm do que $\Delta z = 0,2$ mm, o que possibilita a conformação em menor período de tempo com as mesmas deformações e praticamente a mesma profundidade estampada até o surgimento da trinca. Por outro lado, as menores deformações foram obtidas com $\Delta z = 2$ mm e $\Delta z = 1$ mm, independente da rotação utilizada.

A Tabela 4 apresenta a variação de temperatura ΔT e se houve remoção de material no processo (em forma de limalha) em cada experimento.

Tabela 4: Análise de temperatura na Estampagem Incremental de AA1200-H14

| N° | Δz (mm) | N (rpm) | ΔT (°C) | Limalha? |
|----|--------------------|------------|--------------------|----------|
| 1 | 2 | 50 | 0,0 | Não |
| 2 | 2 | 200 | 1,1 | Não |
| 3 | 2 | 400 | 2,3 | Não |
| 4 | 2 | 800 | 3,6 | Sim |
| 5 | 1 | 50 | 0,1 | Não |
| 6 | 1 | 200 | 0,2 | Não |
| 7 | 1 | 400 | 3,2 | Não |
| 8 | 1 | 800 | 2,5 | Sim |
| 9 | 0,5 | 50 | 0,0 | Não |
| 10 | 0,5 | 200 | 0,7 | Não |
| 11 | 0,5 | 400 | 2,2 | Sim |
| 12 | 0,5 | 800 | 5,3 | Sim |
| 13 | 0,2 | 50 | 0,0 | Não |
| 14 | 0,2 | 200 | 1,2 | Sim |
| 15 | 0,2 | 400 | 3,1 | Sim |
| 16 | 0,2 | 800 | 4,3 | Sim |

Foi verificado que a variação de temperatura (medida com pirômetro óptico) na região de contato entre a chapa e a ferramenta de conformação foi praticamente nula nos experimentos realizados com rotação $N = 50$ rpm, e aumentou pouco à medida que a rotação foi aumentada e o incremento foi diminuído, chegando a uma variação máxima de $\Delta T = 4,3$ °C no 16° ensaio e $\Delta T = 5,3$ °C no 12° ensaio. Considerando a temperatura ambiente de 20 °C no local onde os ensaios foram realizados verifica-se que a máxima temperatura obtida é muito inferior à

temperatura de recristalização do material e por isso o fator temperatura é insignificante para influenciar a estampabilidade do material.

Também foi verificado, por inspeção visual, que à medida que é diminuído o incremento vertical e aumentada a rotação houve remoção de material no processo, o que pode indicar que o lubrificante não foi eficiente nestas condições. O material removido apresentou forma de limalha que se misturou no óleo lubrificante dificultando inclusive a visualização do momento em que ocorreu a trinca no experimento.

Com base na segunda série de experimentos, com ferramenta de diâmetro 22 mm, foram comparados os parâmetros de entrada (incremento vertical Δz e rotação N) com os parâmetros de saída (profundidade estampada sem trinca h , profundidade estampada em que ocorre a trinca h' , espessura final da chapa s_1 , deformação relativa de espessura ε_s , deformação verdadeira no comprimento φ_1 , deformação verdadeira na largura φ_2 , deformação verdadeira na espessura φ_3 , deformação equivalente φ_{eq} , maior tensão aplicada σ_1 , menor tensão aplicada σ_2 e tensão equivalente σ_{eq}), conforme indicado na Tabela 5.

Tabela 5: Análise de estampabilidade na Estampagem Incremental de AA1200-H14 para ferramenta de diâmetro $d_f = 22$ mm

| N° | Δz (mm) | N (rpm) | h (mm) | h' (mm) | s_1 (mm) | ε_s (%) | φ_1 (-) | φ_2 (-) | φ_3 (-) | φ_{eq} (-) | σ_1 (N/mm ²) | σ_2 (N/mm ²) | σ_{eq} (N/mm ²) |
|-----------|--------------------|--------------|-------------|--------------|---------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 2 | 50 | 8 | 10 | 0,59 | 41,14 | 0,53 | 0 | -0,53 | 0,61 | 136,2 | 68,1 | 118,0 |
| 2 | 1 | 50 | 9 | 10 | 0,53 | 47,27 | 0,64 | 0 | -0,64 | 0,74 | 137,5 | 68,7 | 118,0 |
| 3 | 0,5 | 50 | 9,5 | 10 | 0,53 | 47,27 | 0,64 | 0 | -0,64 | 0,74 | 137,5 | 68,7 | 119,0 |

As tensões variaram pouco entre estes experimentos e, assim como na primeira série de experimentos, também não apresentou variações significativas.

Conforme indicado na Figura 75, no primeiro experimento desta série, com incremento $\Delta z = 2$ mm, a trinca ocorreu de forma catastrófica em profundidade $h' = 10$ mm e se estendeu por todo o percurso da ferramenta, o que impediu a medição das deformações nessa região. Sendo medida a deformação somente na profundidade $h = 8$ mm, onde foi verificado o valor de $\varphi_1 = 0,53$. Nos outros dois ensaios, com incremento $\Delta z = 1$ mm e 0,5 mm, a trinca ocorreu na mesma profundidade $h' = 10$ mm, no entanto de forma localizada na região em que foi

realizada a penetração da ferramenta, possibilitando assim a medição da deformação nesta profundidade, no valor de $\varphi_1 = 0,64$.

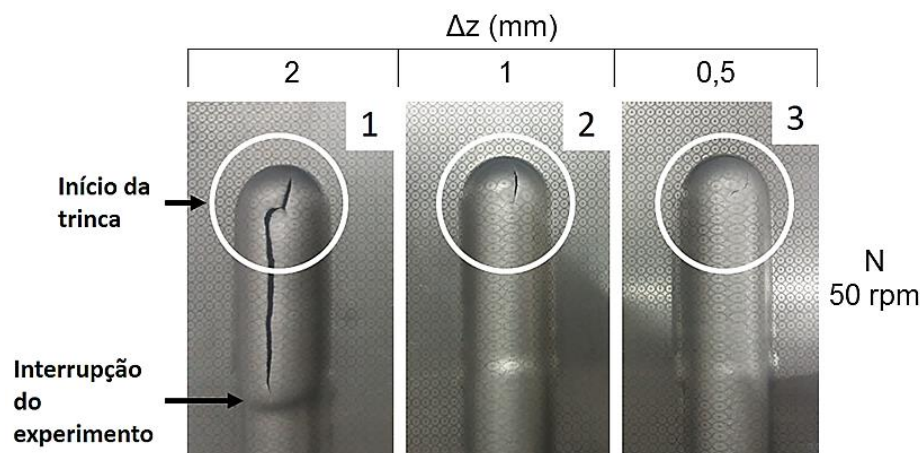


Figura 75: Início da trinca nos ensaios com ferramenta de diâmetro $d_f = 22$ mm

A partir destes resultados é possível verificar que menores incrementos verticais possibilitam a Estampagem Incremental com maior profundidade sem trinca, assim como apresentado na Figura 76. Este é o mesmo comportamento apresentado na primeira série de experimentos. E mesmo que com incremento vertical $\Delta z = 0,5$ mm a trinca tenha ocorrido de forma menos evidente, a profundidade em que ela ocorreu, assim como as deformações obtidas foram as mesmas do experimento com $\Delta z = 1$ mm. Dessa forma, é preferível utilizar incremento vertical $\Delta z = 1$ mm, já que possibilita a estampagem em um menor período de tempo.

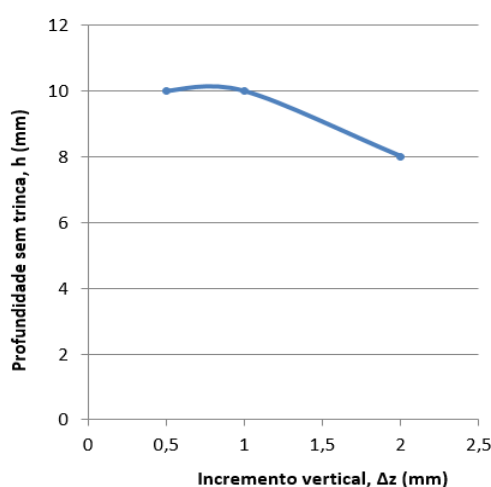


Figura 76: Relação de profundidade sem trinca (h) e incremento vertical (Δz) nos ensaios com ferramenta de diâmetro $d_f = 22$ mm

Com base nesta série de experimentos também foram construídas duas Retas Limite de Fratura, a primeira para o incremento vertical $\Delta z = 2$ mm (com menor estampabilidade) e a segunda para os incrementos verticais $\Delta z = 1$ mm e 0,5 mm (com maior estampabilidade), conforme indicado na Figura 77.

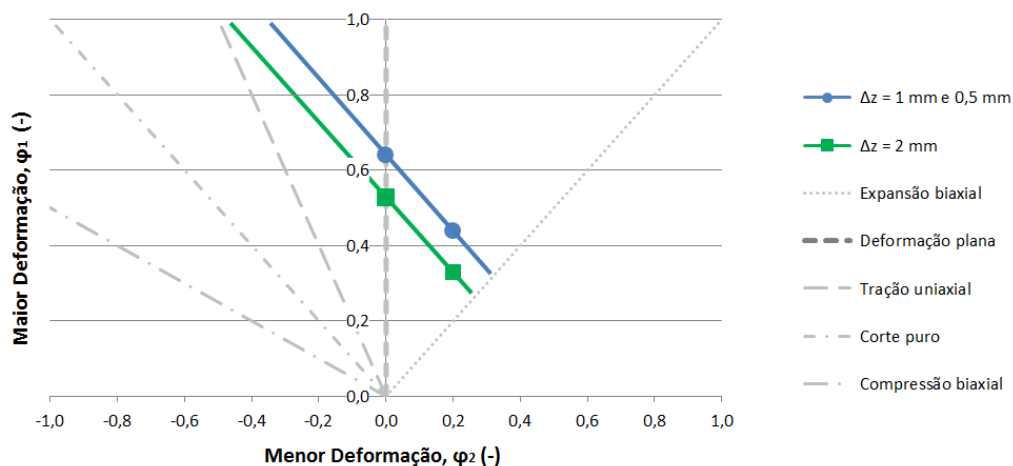


Figura 77: RLF para os experimentos com ferramenta de diâmetro $d_f = 22$ mm

Traçando um comparativo entre a estampabilidade obtida para os parâmetros seleccionados nas duas séries de experimentos, para a mesma rotação $N = 50$ rpm e os mesmos incrementos verticais $\Delta z = 2$ mm, 1 mm e 0,5 mm, agora em função da maior deformação (φ_1) ao invés da profundidade (h), é possível verificar que com menor diâmetro de ferramenta foi obtida maior estampabilidade em todas as situações, conforme indicado na Figura 78.

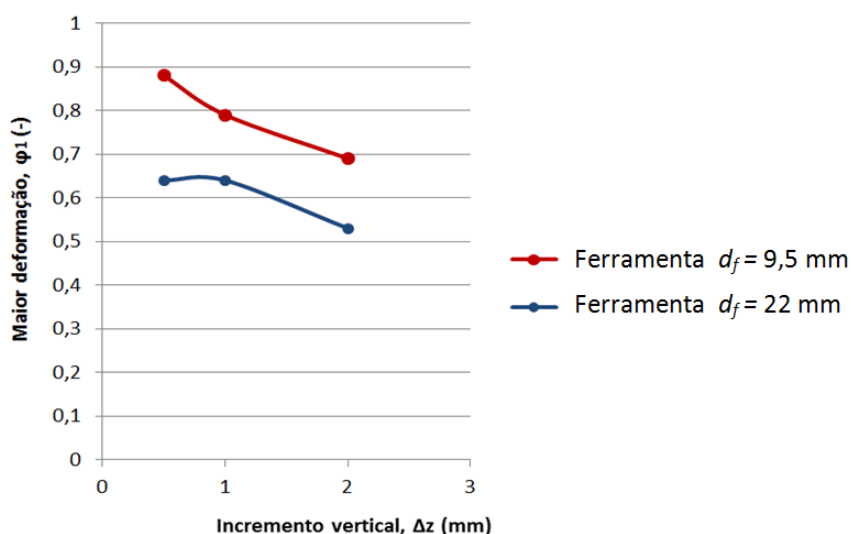


Figura 78: Maior deformação (φ_1) em função do incremento vertical (Δz) com rotação 50 rpm e com ferramenta de diâmetro $d_f = 9,5$ mm e de diâmetro $d_f = 22$ mm

A partir da análise de parâmetros de Estampagem Incremental foi selecionada a rotação $N = 50$ rpm (na qual não houve remoção de material) para todas etapas de estampagem da placa absorvedora.

Para a primeira etapa de estampagem, com ferramenta de diâmetro 22 mm, foi selecionado incremento vertical $\Delta z = 1$ mm, pois este parâmetro apresentou maior profundidade estampada em menor tempo de processo nos experimentos realizados.

A profundidade do canal de diâmetro 22 mm prevista no projeto do protótipo foi de 11 mm, maior que a profundidade em que ocorreu a trinca no experimento ($h' = 10$ mm) utilizando $\Delta z = 1$ mm. No entanto, mesmo com profundidade maior, utilizando este parâmetro a trinca foi concentrada apenas nas extremidades do canal, região que foi cortada após soldagem, não apresentando comprometimento na qualidade do protótipo. A Figura 79 apresenta a chapa estampada indicando o local onde surgiram as trincas e que foram cortadas e descartadas após a soldagem.

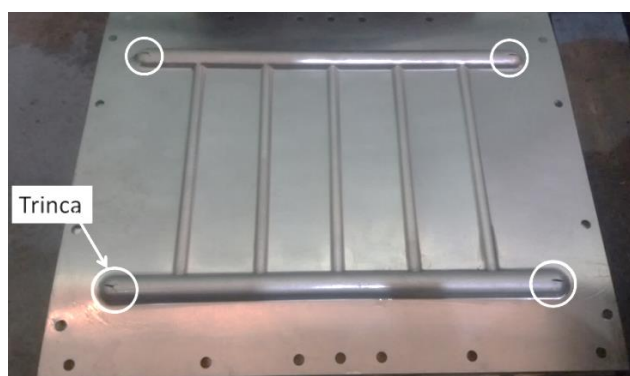


Figura 79: Chapa estampada

Para as demais etapas de estampagem, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm, verificou-se nos experimentos que com incremento vertical $\Delta z = 2$ mm foi possível realizar estampagem até a profundidade sem trinca de $h = 6$ mm, que é suficiente para um canal de profundidade 4,75 mm, conforme o projeto. No entanto, devido ao empenamento da chapa antes da estampagem dos canais, mesmo utilizando suportes de fixação intermediários, optou-se por utilizar incremento vertical $\Delta z = 1$ mm, a fim de evitar a ruptura prematura da chapa.

Após a estampagem do protótipo foi realizado o corte e a medição dos canais estampados. A distância de medição d_m em relação ao centro do canal, bem como a espessura final s_1 e a deformação relativa na espessura ε_s para cada canal foram relacionadas na Tabela 6.

Tabela 6: Variação de espessura dos canais estampados no protótipo

| Canais com diâmetro 9,5 mm | | | Canais com diâmetro 22 mm | | |
|----------------------------|---------------------|------------|---------------------------|---------------------|------------|
| d_m (mm) | ε_s (%) | s_1 (mm) | d_m (mm) | ε_s (%) | s_1 (mm) |
| 0 | 37 | 0,63 | 0 | 55 | 0,45 |
| 1 | 30 | 0,70 | 2,5 | 46 | 0,54 |
| 2 | 22 | 0,78 | 5 | 37 | 0,63 |
| 3 | 14 | 0,86 | 7,5 | 21 | 0,79 |
| 4 | 4 | 0,96 | 10 | 5 | 0,95 |
| 5 | 2 | 0,98 | 12,5 | 2 | 0,98 |
| 6 | 0 | 1,00 | 15 | 0 | 1,00 |

Na Tabela 6 é apresentada a variação de espessura dos canais estampados no protótipo, sendo que no canal de diâmetro 9,5 mm, com distância de medição d_m em relação ao centro do canal variando de 0 a 6 mm, obteve-se espessura final s_1 entre 0,63 mm a 1,00 mm, e a deformação relativa na espessura ε_s de 37 % a 0%. No canal de diâmetro 22 mm foi utilizada distância de medição d_m em relação ao centro do canal variando de 0 a 15 mm, obteve-se espessura final s_1 entre 0,45 mm a 1,00 mm e a deformação relativa na espessura ε_s de 55 % a 0%. A Figura 80(a) e a Figura 80(b) apresentam a relação entre a distância de medição e a deformação em espessura para os canais de diâmetro 9,5 mm e 22 mm, respectivamente.

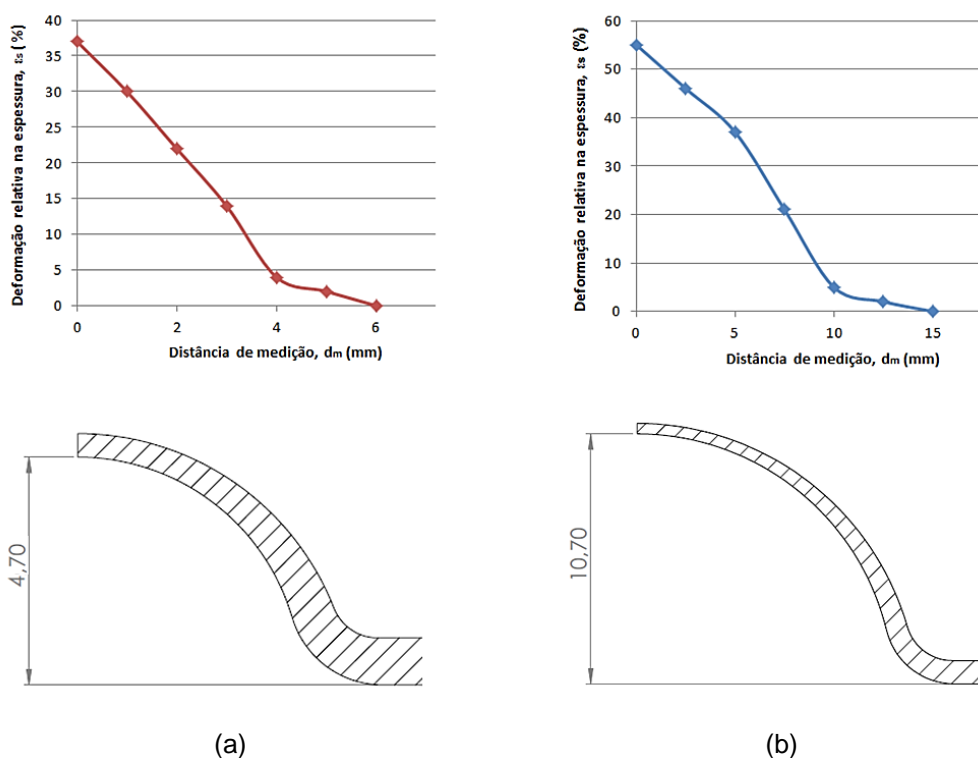


Figura 80: Deformação relativa em espessura nos canais estampados do protótipo: (a) Canal com diâmetro 9,5 mm e (b) Canal com diâmetro 22 mm

A Figura 80(a) e a Figura 80(b) também apresentam as profundidades dos canais de diâmetro 9,5 mm e 22 mm, respectivamente, medidas com relógio comparador da marca DIGIMESS, resolução 0,01 mm e curso 25 mm. Sendo que o canal de diâmetro 9,5 mm com profundidade prevista de 4,75 mm apresentou após a estampagem profundidade de 4,70 mm, enquanto que o canal de diâmetro 22 mm com profundidade prevista de 11,00 mm apresentou após a estampagem profundidade de 11,70 mm. Verifica-se a partir dessas medições que o retorno elástico no canal de diâmetro 22 mm foi maior do que no canal de diâmetro 9,5 mm.

4.3 EXPERIMENTOS DE SOLDAGEM FSW

Após a realização dos experimentos de Soldagem FSW no centro de usinagem CNC, foi verificado que a junta soldada formou rebarba, conforme indicado na Figura 81.

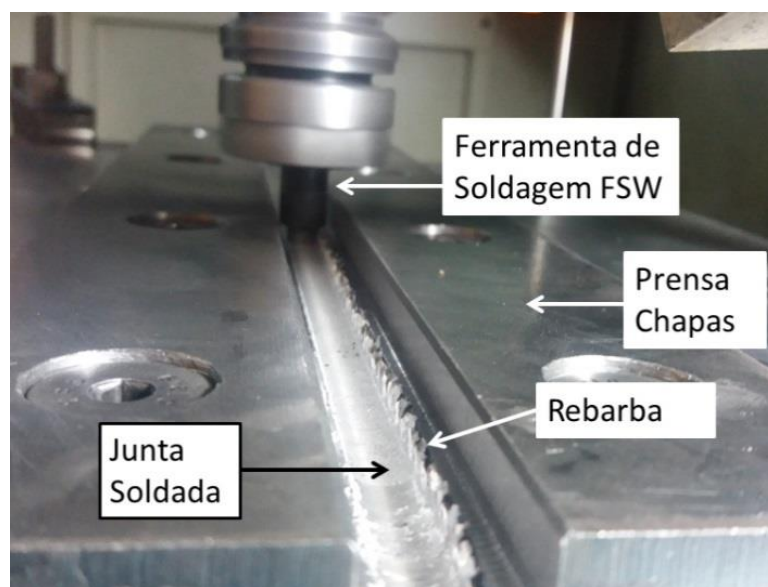


Figura 81: Realização dos experimentos de Soldagem FSW

A formação de rebarba, indicada na Figura 81, ocorreu devido à interferência do ombro sobre a chapa superior. Essa rebarba foi removida por uma operação de limagem, a fim de que as chapas fossem submetidas posteriormente aos ensaios de dobramento e tração.

A espessura da junta sobreposta após a soldagem foi de 1,80 mm, medidos com paquímetro digital com resolução de 0,01 mm da marca COSA. Essa diminuição da espessura é consequência da penetração do ombro da ferramenta de Soldagem FSW sobre a parte superior da junta, que resultou em remoção de material apresentado como rebarba no processo.

Todos os corpos de prova apresentaram bom aspecto visual após a dobra de raiz e de face, independente do parâmetro de avanço utilizado. A Figura 82 apresenta os corpos de prova após ensaio de dobramento.

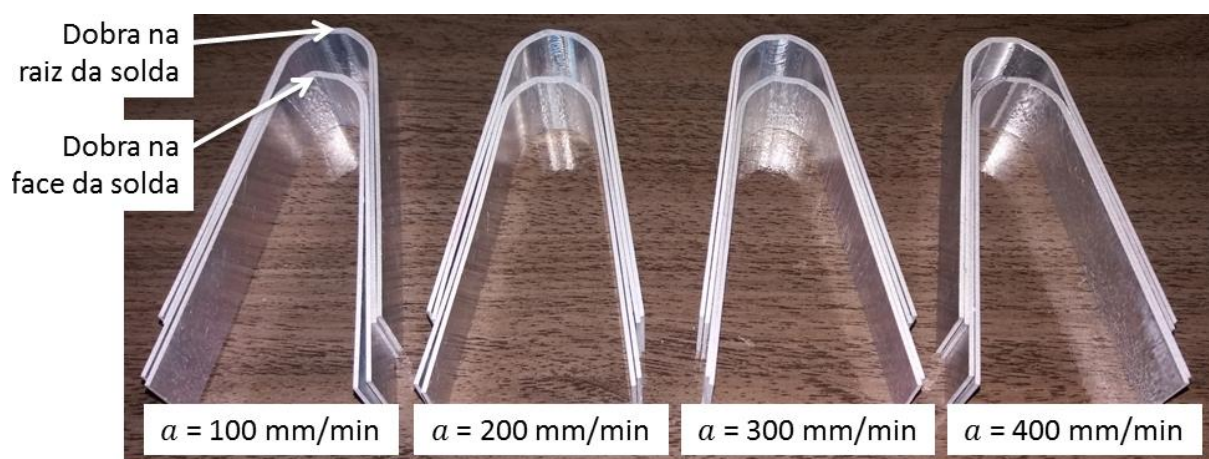


Figura 82: Corpos de prova após ensaio de dobramento na raiz da solda e na face da solda

Após inspeção visual verificou-se que não ocorreram defeitos de vazio (que se apresenta por uma pequena cavidade da região da solda) nem trincas, tanto na parte interna quanto externa dos corpos de prova dobrados, mesmo após a dobra no ângulo de 180°. A Figura 83(a) e a Figura 83(b) apresentam, respectivamente, a região interna e externa do corpo de prova após a dobra de raiz da solda, respectivamente, indicando que nenhum defeito ocorreu nas peças após o dobramento.

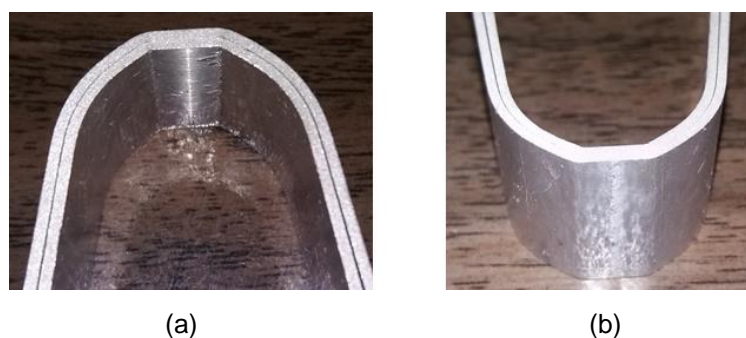


Figura 83: Dobra na raiz da solda: (a) Região interna da dobra e (b) Região externa da dobra

A Figura 84(a) e a Figura 84(b) apresentam, respectivamente, a região interna e externa do corpo de prova após a dobra de face da solda, indicando que nessa condição também não foi apresentado nenhum defeito após o dobramento.

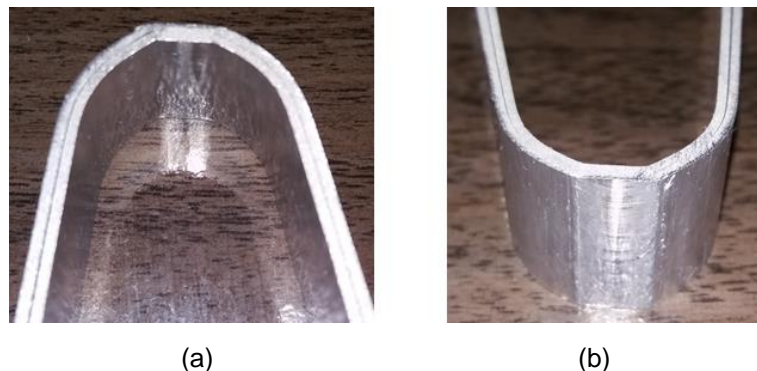


Figura 84: Dobra na face da solda: (a) Região interna da dobra e (b) Região externa da dobra

Após o ensaio de tração, verificou-se que nenhum corpo de prova rompeu na região da solda. A Figura 85 apresenta os corpos de prova após ensaio de tração, indicando a velocidade de avanço da ferramenta (a) utilizada na soldagem de cada corpo de prova.

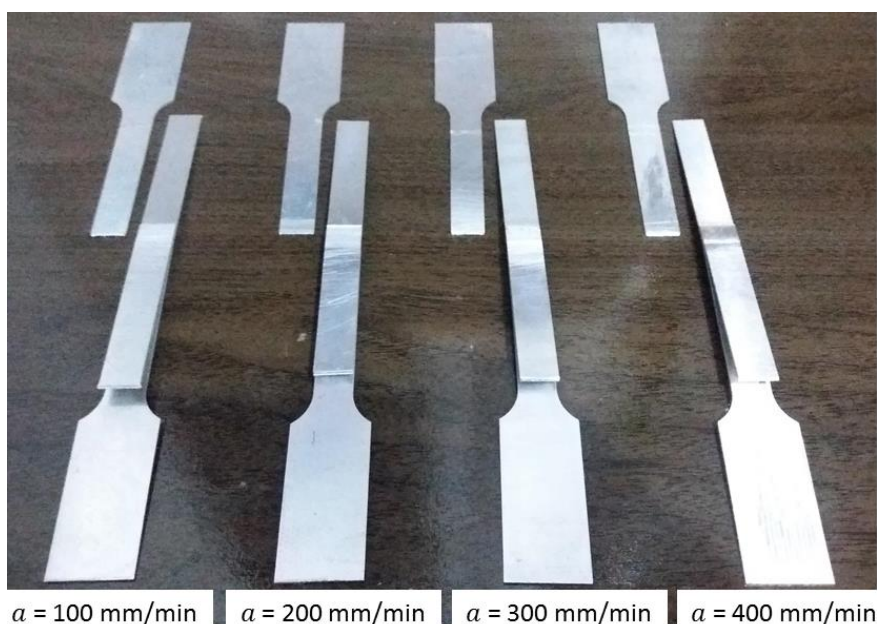


Figura 85: Corpos de prova após ensaio de tração

A região do cordão de solda FSW se manteve intacta após a soldagem. A fratura ocasionada pelo ensaio de tração ocorreu logo ao lado do cordão de solda, conforme Figura 86.

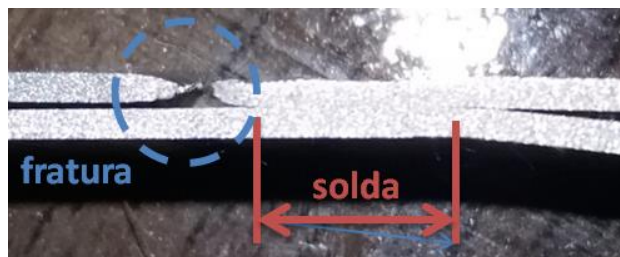
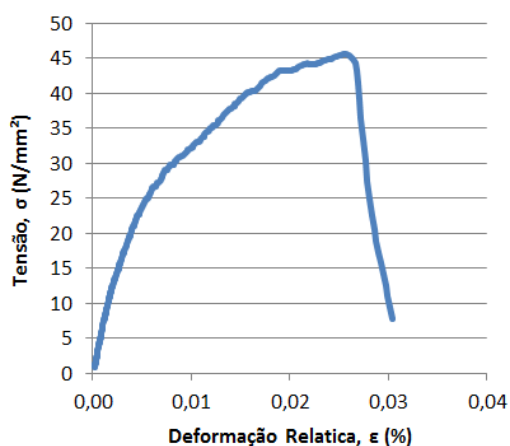
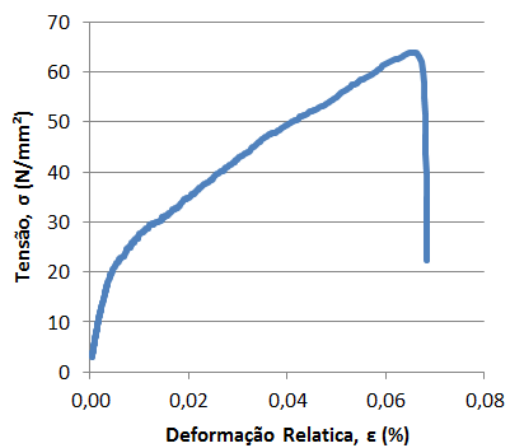


Figura 86: Região da fratura nos ensaios de tração

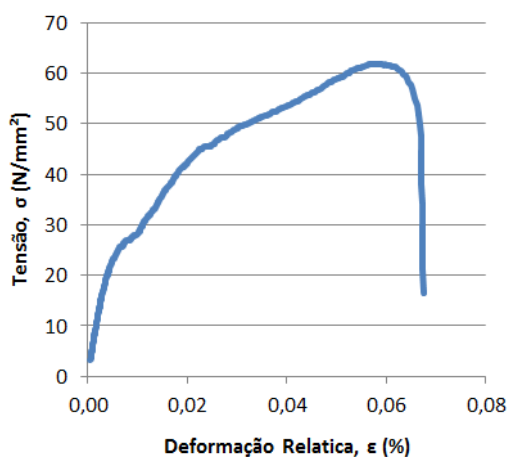
Nas Figura 87(a), Figura 87(b), Figura 87(c) e Figura 87(d) são apresentadas as Curvas Tensão x Deformação para os ensaios de tração nos corpos de prova soldados, com velocidades de avanço da ferramenta de soldagem $a = 100$ mm/min, 200 mm/min, 300 mm/min e 400 mm/min, respectivamente.



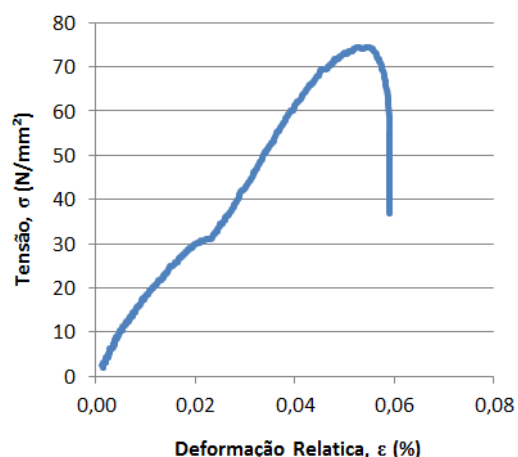
(a)



(b)



(d)



(e)

Figura 87: Curva Tensão x Deformação para os corpos de prova soldados com diferentes velocidades de avanço da ferramenta: (a) 100 mm/min, (b) 200 mm/min, (c) 300 mm/min e (d) 400 mm/min

A tensão máxima admissível aplicada nos corpos de prova soldados apresentou valores menores que o metal base ($\sigma_{m\acute{a}x} = 99 \text{ N/mm}^2$), variando de $\sigma_{m\acute{a}x} = 45 \text{ N/mm}^2$ a 75 N/mm^2 , com a maior tensão ocorrendo no ensaio em que se utilizou maior velocidade de avanço da ferramenta de soldagem. O valores de deformação foram muito menores do que os obtidos no metal base ($\epsilon = 1,8 \%$), variando de $\epsilon = 0,03 \%$ a $0,07 \%$. Essa diferença dos valores pode indicar que a região onde ocorreu a ruptura sofreu fragilização devido à soldagem.

Nos experimentos de Soldagem FSW todos os corpos de prova apresentaram boa qualidade após os ensaios de dobramento e tração, independente da velocidade de avanço da ferramenta utilizado. Sendo que nos ensaios de tração os corpos de prova soldadas com maior valor de avanço ($a = 400 \text{ mm/min}$) foram obtidos a maior tensão admissível e a maior deformação. Por isso esse parâmetro foi selecionado para a soldagem do protótipo, possibilitando alta produtividade no processo.

A penetração vertical da ferramenta de Soldagem FSW sobre as chapas foi facilitada por uma etapa prévia de furação com broca de diâmetro 2,5 mm até a profundidade de 1,7 mm. Isso fez com que a ferramenta penetrasse sobre a chapa sem que ocorresse esforço excessivo e, pelo fato do furo não ser passante, isso permitiu um bom acabamento do produto nesse local. A Figura 88 apresenta a placa absorvedora após a soldagem.

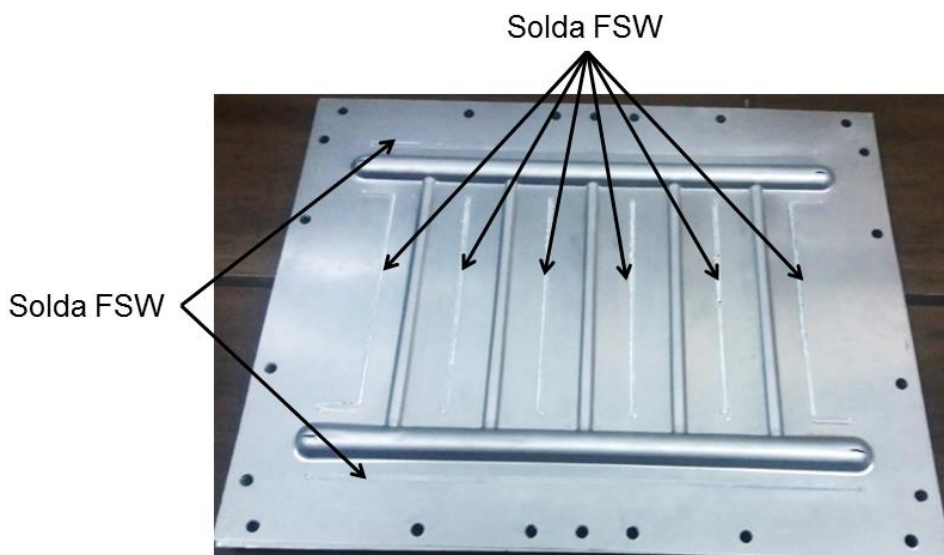


Figura 88: Placa absorvedora após a soldagem

Durante o processo de soldagem também foi verificado que a utilização dos suportes intermediários não foi suficiente para garantir a regularidade do cordão de

solda. A rebarba não foi gerada em todo o percurso da ferramenta e o acabamento dos cordões não foi regular.

Depois da soldagem da placa absorvedora foi realizado o corte do contorno do conjunto. Esse corte foi realizado pelo processo de fresamento com uma fresa de topo com diâmetro 6 mm, e essa operação foi realizada no mesmo centro de usinagem CNC no qual foram executados os processos de Estampagem Incremental e Soldagem FSW. Em seguida a placa absorvedora passou pelo processo de pintura spray com tinta preta fosca (processo comum em coletores solares a fim de aumentar a eficiência do produto). A Figura 89(a) apresenta a placa absorvedora após o corte e pintura com indicação dos cordões de solda e a Figura 89(b) apresenta a placa absorvedora com indicação dos canais para passagem de água.

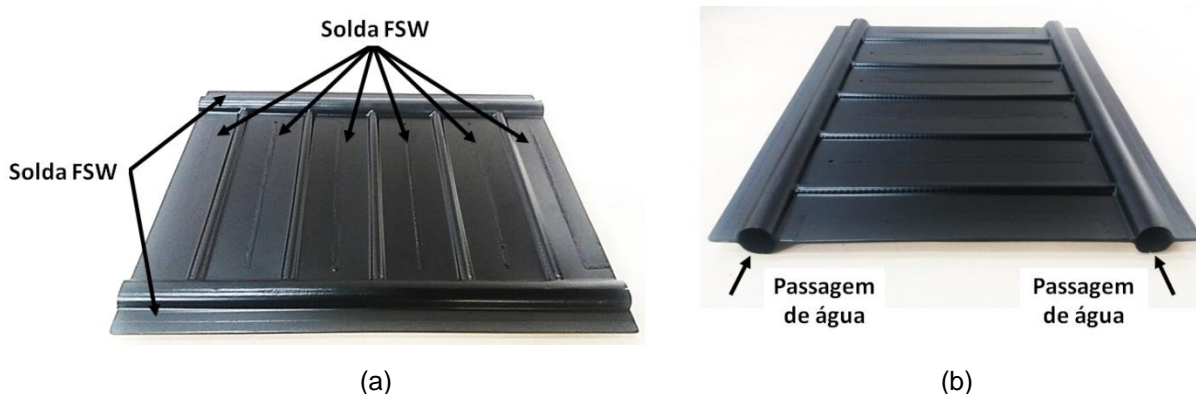


Figura 89: Placa absorvedora do coletor solar: (a) Indicação das juntas soldadas e (b) Indicação dos locais de passagem de água

5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Na caracterização da chapa de alumínio AA1200-H14 por meio do Ensaio de Tração foram obtidos valores dentro dos limites especificados pelo fabricante para deformação relativa $\varepsilon = 1,8 \%$ e tensão de escoamento $\sigma_{0,2} = 95 \text{ N/mm}^2$. No entanto, a tensão máxima obtida no ensaio $\sigma_{\text{máx}} = 99 \text{ N/mm}^2$ foi 10% menor que o limite inferior estabelecido pelo fornecedor.

Assim como no estudo de Park e Kim (2003), foi possível obter maior estampabilidade das chapas com o processo de Estampagem Incremental do que seria possível com o processo de Estampagem Convencional (considerando os dados de referência da Curva Limite de Conformação).

A partir dos experimentos realizados no processo de Estampagem Incremental, foi verificado que as maiores deformações são obtidas com altas rotações e pequenos incrementos verticais, assim como verificado por Xu *et al.* (2015) e Bhattacharya *et al.* (2011), respectivamente. No entanto, a estampagem com altas rotações gerou resíduo em forma de limalha, indicando que nestas condições o óleo selecionado não foi eficiente. Também se nota que incrementos verticais muito pequenos (como 0,2 mm ou 0,5 mm), mesmo permitindo maiores deformações, apresentam o inconveniente de deixar o período de tempo de processo demasiadamente longo.

Para Estampagem Incremental da placa absorvedora do coletor foi utilizada rotação $N = 50 \text{ rpm}$, na qual o óleo VG 100 se apresentou eficiente, combinada com incremento vertical $\Delta z = 1 \text{ mm}$, que permitiu a estampagem no formato desejado sem apresentação de defeitos e com um período de tempo de processo relativamente curto.

A utilização da ferramenta de Estampagem Incremental com $d_f = 9,5 \text{ mm}$ permitiu maiores deformações das chapas, quando comparada à ferramenta com $d_f = 22 \text{ mm}$, confirmando os estudos de Al-Ghamdi e Hussain (2015) que indicam que o diâmetro da ferramenta influencia na estampabilidade da chapa.

Mesmo assim optou-se pela ferramenta de diâmetro $d_f = 22 \text{ mm}$ na estampagem dos canais maiores, pelo fato de que maiores diâmetros de ferramenta possibilitam estampagem com menor rugosidade (BHATTACHARYA *et al.*, 2011),

além de permitir a realização do processo em um período de tempo menor, já que o raio da ferramenta é o mesmo do canal estampado.

Em relação ao processo de Soldagem FSW, assim como constatado por Arruda (2010), é possível ocorrer o defeito de falta de preenchimento no cordão de solda feita pelo processo FSW, em juntas sobrepostas de alumínio puro. Neste trabalho esse defeito foi solucionado com duas medidas combinadas: a penetração do ombro da ferramenta de soldagem 0,2 mm sobre a junta (o que também ocasionou o surgimento de rebarba) e pela aproximação dos pontos de fixação.

Na soldagem do protótipo de placa absorvedora, porém, não foi possível aproximar suficientemente os pontos de fixação da junta a ser soldada e, devido ao empenamento das chapas, não se obteve cordões de solda FSW regulares. Este fato dificultaria a soldagem de uma placa em dimensões comerciais, pois a fixação apresentaria maior complexidade. O problema de fixação na Soldagem FSW foi atenuado pela utilização de suportes intermediários. Mesmo assim, esta ainda é uma questão crítica para a aplicação da Soldagem FSW neste modelo de produto.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma nova alternativa de forma construtiva e de processos de fabricação aplicados a placas absorvedoras de coletores solares planos. Através de uma análise de parâmetros abrangente sobre os processos de Estampagem Incremental e Soldagem FSW e pela fabricação de um protótipo de produto foi possível obter as seguintes conclusões:

- A caracterização de chapas pelo Ensaio de Tração fornece informações importantes sobre a curva de escoamento do material, que pode ser usada como referência para determinação das tensões máximas obtidas no momento da fratura das chapas na Estampagem Incremental;
- Através do Ensaio Nakajima é possível estabelecer os limites de conformação para o processo de Estampagem Convencional. Sendo que na Estampagem Incremental para estabelecer estes limites é fundamental a determinação de Retas Limite de Fratura;
- É possível obter maiores deformações na Estampagem Incremental do que na Estampagem Convencional;
- O diâmetro da ferramenta de Estampagem Incremental influencia na estampabilidade, sendo que a ferramenta com diâmetro 9,5 mm permitiu maiores deformações que a ferramenta com diâmetro de 22 mm;
- Combinando alta rotação com pequeno incremento vertical na Estampagem Incremental é possível obter maiores deformações até que ocorra o início de trinca na chapa;
- Quanto maior a rotação e menor o incremento vertical são grandes as chances de ocorrer a remoção de material em forma de limalha no processo de Estampagem Incremental, o que pode indicar lubrificação ineficiente;
- O processo de Soldagem FSW pode ser aplicado a juntas sobrepostas de chapas alumínio AA1200-H14 com 1 mm de espessura, com boa qualidade da junta soldada, sem influência do avanço da ferramenta dentro da faixa de parâmetros analisada;

- É possível fabricar protótipos de placas absorvedoras de coletores solares com área coletora de 0,12 m² pelos processos de Estampagem Incremental e Soldagem FSW;
- Para fabricação de placas absorvedoras de coletores em tamanho comercial (iguais ou maiores que 1 m²) é necessário melhorar a fixação da junta a ser unida.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros há a possibilidade de ampliar a análise de parâmetros aqui descrita na área de Estampagem Incremental, aplicando-a a chapas de alumínio com menores espessuras. Neste caso, também seria recomendável utilizar alumínio recozido, que possui maior estampabilidade.

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

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

Na área de Soldagem FSW é possível estudar a influência da rotação no processo, bem como o impacto de diferentes combinações de rotação e avanço na qualidade do cordão soldado e na temperatura obtida.

Para evitar o empenamento da chapa na Estampagem Incremental e na Soldagem FSW, poderia ser analisada a aplicação de tratamento térmico para alívio de tensões antes e após cada processo.

8 REFERÊNCIAS

ADAMOWSKI, J.; GAMBARO, C.; LERTORA, E.; PONTE, M.; SZKODO, M. Analysis of FSW welds made of aluminium alloy AW6082-T6. **Archives of Materials Science and Engineering**, Gliwice, v. 28, n. 8, p. 453–460, 2007.

ALI, W. J.; EDREES, A. O. Theoretical Determination of Forming Limit Diagram for Steel, Brass and Aluminum alloy sheets. **AL Rafdain Engineering Journal**, [s. l.], v. 15, p. 40-55, 2007.

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

ALMEIDA, D. T. **Análise estrutural e avaliação mecânica de juntas soldadas por fricção e mistura mecânica FSW da liga de alumínio 5182-O**. 2015. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

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

AMINO, M.; MIZOGUCHI M.; TERAUCHI Y.; MAKI T. Current status of “Dieless” Amino’s incremental forming. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 81, p. 54–62, 2014.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Energia no Brasil e no Mundo**. Brasília, 2008.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Boletim de Informações Gerenciais - 4º trimestre 2017**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informações+Gerenciais+-+4º+trimestre+2017/44ee3035-27e5-0398-e7e3-c612ec4dc994>>. Acesso em: 27 dez. 2017.

APRICUS. **Solar Thermal Collectors**. Disponível em: <<http://www.apricus.com/solar-thermal-collectors.html#.WHeW7FMrLIU>>. Acesso em: 12 jan. 2017.

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

ARAGHI, B. T.; GÖTTMANN, A.; BERGWEILER, G.; SAEED-AKBARI, A.; BÜLTMANN, J.; ZETTLER, J.; BAMBACH, M.; HIRT, G. Investigation on Incremental Sheet Forming Combined with Laser Heating and Stretch Forming for the Production of Lightweight Structures. **Key Engineering Materials**, Aedermannsdorf, v. 473, p. 919–928, 2011.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12269**: Instalação de sistemas de aquecimento solar de água em circuito direto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 7438**: Materiais metálicos - Ensaio de dobramento. Rio de Janeiro, 2016.

AZEVEDO, N. G.; FARIAS, J. S.; BASTOS, R. P.; TEIXEIRA, P.; DAVIM, J. P.; SOUSA, R. J. A. Lubrication aspects during Single Point Incremental Forming for steel and aluminum materials. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, Seoul, v. 16, n. 3, p. 589–595, 2015.

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

BHATTACHARYA, A.; MANEESH, K.; REDDY, N. V.; CAO, J. Formability and Surface Finish Studies in Single Point Incremental Forming. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, [s. l.], v. 133, n. December, 2011.

BRASIL. Resolução - RDC N° 20, de 22 de março de 2007. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2007.

CALLISTER, W. D.; RETHWISH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAPELARI, T. V. **Avaliação da Geometria de Ferramenta e Parâmetros do Processo FSW na Soldagem da Liga de Alumínio AA5052**. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

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

DUFLOU, J. R.; CALLEBAUT, B.; VERBERT, J.; BAERDEMAEKER, H. Improved SPIF performance through dynamic local heating. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Amsterdam, v. 48, n. 5, p. 543–549, 2008.

EKOS BRASIL; VITAE CIVILIS. **Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar**. São Paulo, 2010.

FRITZEN, D. **Estudo dos Parâmetros de Conformabilidade para o Processo de Estampagem Incremental**. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

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

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

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

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key world energy statistics**. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>>. Acesso em: 27 dez. 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO-DIS 25239-4: Friction stir welding – Aluminium – Part 4: Specification and qualification of welding procedures**. Geneva, 2007.

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, London, v. 30, n. 3, p. 231–295, 2004.

KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2014.

KUKA. **Friction stir welding**. Disponível em: <http://www.kuka-systems.com/brazil/br/technologies/friction_stir_welding/>. Acesso em: 22 dez. 2016.

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

LIMBERGER, L. E.; VASCONCELLOS, M.; COUTO, M. A. **Energia Solar para aquecimento de água no Brasil: Contribuições da Eletrobras Procel e Parceiros**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2012.

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

MARTINS, P. A. F. *et al.* Theory of single point incremental forming. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 57, n. 1, p. 247–252, 2008.

MARTINS, P. A. F. *et al.* Single point incremental forming of polymers. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 229–232, 2009.

MAUTHNER, F.; WEISS, W.; SPÖRK-DÜR, M. **Solar Heat Worldwide**. Graz, Austria, 2017.

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

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

MISHRA, R. S.; DE PARTHA, S.; KUMAR, N. **Friction Stir Welding and Processing: Science and Engineering**. [s.l.] : Springer, 2014.

MISHRA, R. S.; MAHONEY, W. M. **Friction Stir Welding and Processing**. Ohio: ASM International, 2007.

MISHRA, R. S.; MA, Z. Y. Friction stir welding and processing. **Materials Science and Engineering R: Reports**, Amsterdam, v. 50, n. 1–2, p. 1–78, 2005.

NANDAN, R.; DEBROY, T.; BHADESHIA, H. K. D. H. Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties. **Progress in Materials Science**, London, v. 53, n. 6, p. 980–1023, 2008.

OLIVIECKI, N. J.; BESKOW, A. B. Análise dos Parâmetros do Processo de Soldagem por Fricção em uma Liga de Alumínio. **Perspectiva**, Erechim, v. 37138, p. 15–29, 2013.

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

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

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006.

PONTICEL, P. **Ford sheet-metal-forming technology on journey from lab to application**. Disponível em: <<http://articles.sae.org/12385/>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

PROCOBRE. **Qualidade em Instalações de Aquecimento Solar: Boas Práticas**. São Paulo, 2009.

PTG. **Friction Stir Welding - Crawford Swift**. Disponível em: <<http://www.holroyd.com/heavy-industries/new-machines/friction-stir-welding.php>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

SCHAEFFER, L. **Manufatura por Conformação Mecânica**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2016.

SOLARGIS. **Solar resource maps for Brazil**. Disponível em: <<http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/brazil>>. Acesso em: 27 dez. 2016.

SOLARGIS. **Solar resource maps for Germany**. Disponível em: <<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/germany>>. Acesso em: 1 jan. 2017.

SOLETROL. **Coletores Solares Soletrol Max**. Disponível em: <<http://www.soletrol.com.br/produtos/coletores-solares/aquecedor-solar-linha-max/>>. Acesso em: 20 dez. 2016.

SOLETROL. **Aquecedores Solares para Piscinas**. Disponível em: <<http://www.soletrol.com.br/produtos/piscinas/>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

SUBRAMANYA, P. AMAR, M.; ARUN, S.; MERVIN, H.; SHRIKANTHA, R. Friction stir welding of Aluminium matrix composites - A Review. **MATEC Web of Conferences**, Paris, v. 86, p. 61–71, 2015.

THOMAS, W. M.; NICHOLAS, E. D.; NEEDHAM, J. C.; MURCH, M. G.; TEMPLESMITH, P.; DAWES, C. J. **Friction Stir Butt Welding**, International Patent Application N. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No 9125978.8 and US Patent Application No. 5,460,317, 1991.

THOMAS, W. M.; JOHNSON, K. I.; WIESNER, C. S. Friction stir welding-recent developments in tool and process technologies. **Advanced Engineering Materials**, London, v. 5, n. 7, p. 485–490, 2003.


THOMAS, W. M.; NICHOLAS, E. D. Friction stir welding for the transportation industries. **Materials & Design**, London, v. 18, n. 4–6, p. 269–273, 1997.

WAN, L.; HUANG, Y. Microstructure and Mechanical Properties of Al/Steel Friction Stir Lap Weld. **Metals**, Basel, v. 7, n. 12, p. 542, 2017.

WESTEC. **SP-S58 Solar Collector**. Disponível em: <http://www.wt-solar.com/Solar_Collector/82.html>. Acesso em: 17 fev. 2017.

XU, D.; WU, W.; MALHOTRA, R.; CHEN, J.; LU, B.; CAO, J. Mechanism investigation for the influence of tool rotation and laser surface texturing (LST) on formability in single point incremental forming. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Amsterdam, v. 73, p. 37–46, 2013.

ANEXOS

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