

1 2 9 0



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Guilherme Roberto Cristão Correia

**USO DE SOLDADURA POR FRICÇÃO LINEAR PARA  
OTIMIZAR A RESISTÊNCIA MECÂNICA DE JUNTAS  
COLADAS SOBREPOSTAS**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, no ramo de produção e projeto orientada pela Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro e Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro apresentada à Universidade de Coimbra/Departamento de Engenharia Mecânica.**

Julho de 2019



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# **Uso de soldadura por fricção linear otimizar a resistência mecânica de juntas coladas sobrepostas**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

## **Improvement of the mechanical strength of single lap bonded joints using friction stir welding**

**Autor**

**Guilherme Roberto Cristão Correia**

**Orientadores**

**Ana Paula Betencourt Martins Amaro**

**Altino de Jesus Roque Loureiro**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa</b> <b>Professor Associado c/ agregação da Universidade de Coimbra</b>
<b>Orientador</b>	<b>Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro</b> <b>Professor Associado c/ agregação da Universidade de Coimbra</b>
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade da Beira Interior</b>

**Coimbra, Julho, 2019**







## **Agradecimentos**

A elaboração deste trabalho não seria possível sem a intervenção de algumas pessoas, às quais gostaria de deixar uma palavra de agradecimento.

Aos meus orientadores Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro e Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro, pela ajuda, disponibilidade e pelos ensinamentos ministrados. Gostaria também de agradecer ao Professor Doutor Carlos Leitão e ao Professor Doutor Rui Leal pela disponibilidade que tiveram em me ajudar em algumas partes do trabalho.

Aos meus exemplos, os meus Pais, por tudo o que fazem para que nada me falte na vida.

À minha namorada Rita, por me ter acompanhado em todos os momentos.





## Resumo

O uso de ligações adesivas em alternativa aos métodos de fixação convencionais permite obter reduções de peso consideráveis. Este fator apresenta um papel fundamental na indústria atual, uma vez que a diminuição de peso garante melhorias em termos de consumos energéticos e de desempenho.

Este trabalho tem como objetivo o uso de soldadura por fricção linear para maximizar a resistência mecânica de juntas coladas sobrepostas. Nesse sentido, o presente estudo visa produzir ligações soldadas, adesivas e híbridas de forma a estudar a sua resistência. As ligações híbridas são obtidas através de soldadura por fricção linear por ponto (*FSSW*) e por recurso ao adesivo Araldite 420 A/B, em simultâneo.

Foram concebidas duas séries de provetes dos 3 tipos de ligações a analisar com geometrias distintas, de forma a simular as configurações de junta habituais na indústria automóvel. Esta morfologia dos provetes permite a aplicação do adesivo, e da soldadura, em locais distintos. Para a obtenção dos provetes, chapas da liga de alumínio AA5083-H111 foram maquinadas até atingirem as geometrias pretendidas.

As ligações criadas foram sujeitas a análises de macroestrutura e microestrutura, dureza, ensaios de tração e deformações locais.

Verificou-se que as ligações híbridas foram as que apresentaram menores resistências em ambas as séries. As ligações que maior resistência apresentaram na série 1 foram as coladas e na série 2 as soldadas. Os provetes da primeira série apresentavam partes com espessuras muito finas onde ocorreu a rotura prematura. Os provetes híbridos da segunda série não apresentavam ligação das duas placas, por penetração insuficiente da ferramenta *FSSW*, e por haver contaminação da zona de soldadura com adesivo, servindo este último como barreira à soldadura.

**Palavras-chave:** Soldadura por fricção linear por ponto, juntas coladas, juntas soldadas, juntas híbridas, Liga de alumínio.



## Abstract

The use of adhesive bonds as an alternative to conventional fastening methods leads to considerable weight reductions. This factor plays a key role in today's industry, since weight reduction ensures improvements in terms of energy consumption and performance.

The main objective of this work is the use of friction stir spot welding to optimize the mechanical strength of bonded single lap joints. In that way, the presented study aims to produce welded, bonded and hybrid joints to study their strength. The hybrid joints were obtained by friction stir spot welding and use of the adhesive Araldite 420 A/B, simultaneously.

Two sets of test pieces of the three types to be analyzed were designed with different geometries, to simulate the usual joint configurations in the automotive industry. This morphology of the test pieces allows the application of the adhesive and welding in different places. To obtain the test pieces, plates of aluminium alloy AA5083-H111 were machined to the desired geometries.

The produced joints were subjected to macrostructure and microstructure analyzes, microhardness tests, tensile-shear tests and local strain analyzes.

It was verified that the hybrid joints presented lower strength in both sets. The joints that showed the greatest strength in set 1 were the bonded ones and in set 2 were the welded ones.

The test pieces of set 1 presented very thin parts where premature rupture occurred. The hybrid joints of set 2 did not have connection between the two plates due to insufficient penetration of the FSSW tool and contamination of the welded zone with adhesive, the latter being used as a welding barrier.

**Keywords** Friction stir spot welding, bonded joints, weld joints, hybrid joints, aluminum alloy.



## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xiii
Siglas .....	xv
Siglas .....	xv
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1. Introdução .....	3
2.2. Ligações adesivas .....	3
2.2.1. Tipos de esforços .....	5
2.2.2. Modos de rutura de ligações adesivas .....	7
2.2.3. Preparação de junta .....	8
2.3. Ligações obtidas por soldadura .....	10
2.3.1. <i>Friction Stir Welding (FSW)</i> .....	10
2.3.2. <i>Friction Stir Spot Welding (FSSW)</i> .....	11
2.4. Ligações híbridas .....	14
2.4.1. Processos para obtenção de ligações híbridas .....	15
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	17
3.1. Materiais e ferramentas .....	17
3.1.1. Liga de alumínio AA5083-H111 .....	17
3.1.2. Araldite 420 A/B .....	18
3.1.3. Ferramentas .....	18
3.2. Obtenção dos provetes .....	19
3.2.1. Obtenção dos provetes colados .....	21
3.2.2. Obtenção dos provetes soldados .....	23
3.2.3. Obtenção dos provetes híbridos .....	25
3.3. Metalografia .....	27
3.4. Ensaio de microdureza .....	28
3.5. Ensaio de tração/corte .....	28
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	30
4.1. Morfologia dos provetes .....	30
4.1.1. Macrografia das zonas de soldadura .....	31
4.2. Análise metalográfica .....	33
4.2.1. Microestrutura do material de base .....	33
4.2.2. Microestrutura dos provetes soldados .....	34
4.2.3. Microestrutura dos provetes híbridos .....	37
4.3. Análise de Microdureza .....	39
4.4. Análise à resistência estática das ligações .....	44
4.4.1. Ensaio de tração/corte dos provetes colados .....	44
4.4.2. Ensaio de tração/corte dos provetes soldados .....	45
4.4.3. Ensaio de tração/corte dos provetes híbridos .....	47
4.4.4. Análise comparativa .....	48

4.5. Análise às deformações locais .....	51
4.5.1. Ligação colada.....	51
4.5.2. Ligação soldada.....	53
4.5.3. Ligação híbrida.....	55
4.6. Rotura dos provetes .....	57
4.6.1. Superfície de rotura da ligação colada .....	57
4.6.2. Superfície de rotura da ligação soldada.....	58
4.6.3. Superfície de rotura da ligação híbrida .....	59
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63
5.1. Conclusões.....	63
5.2. Sugestões para trabalhos futuros .....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67
ANEXO A.....	70
APÊNDICE A .....	76
APÊNDICE B .....	78
APÊNDICE C .....	80
APÊNDICE D .....	83
APÊNDICE E.....	85
APÊNDICE F.....	87
APÊNDICE G .....	89

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Identificação do adesivo e aderente (adaptado de: [3]).....	4
Figura 2.2 – Esforços de tração a) e compressão b) (adaptado de: [1]). .....	5
Figura 2.3 - Esforços de clivagem a), arrancamento b) e concentração de tensões c) [1], [3]. .....	6
Figura 2.4 - – Esforços de arrancamento devido à flexão dos elementos [7].....	6
Figura 2.5 - Esforço de corte a) e distribuição de tensões b) [3].....	7
Figura 2.6 - Resistência da ligação em função da largura e do comprimento [3]. .....	7
Figura 2.7– Modos de rutura em ligações adesivas (adaptado de: [13]).....	8
Figura 2.8 - Desenho esquemático do processo de FSW (adaptado de: [17]).....	10
Figura 2.9 – Estágios do processo FSSW: a) penetração, b) mistura e c) saída [14]. .....	11
Figura 2.10– Micrografia típica de uma ligação obtida por FSSW (adaptado de [14]). .....	12
Figura 2.11 – Geometrias da ferramenta FSSW (sem o roscado do pino): a) pino cilíndrico e b) pino triangular (adaptado de: [25]).....	13
Figura 2.12 – Defeitos habituais de FSSW em placas sobrepostas [14]. .....	14
Figura 2.13 – Esquema dos métodos <i>Flow-in</i> e <i>weld-through</i> [26]. .....	16
Figura 3.1 – Ferramenta FSSW a) e fixador b). .....	19
Figura 3.2 – Placas utilizadas na série 1: a) Placa superior 1, b) Placa inferior 2 que contabiliza a espessura do adesivo, c) Placa inferior 3 que não contabiliza a espessura do adesivo. ....	20
Figura 3.3 – Placa utilizadas na série 2: a) Placa superior 4; b) Placa inferior 5. ....	21
Figura 3.4 – Acoplamento das placas para obtenção de provetes colados da série 1.....	21
Figura 3.5 – Acoplamento das placas para obtenção de provetes colados da série 2.....	22
Figura 3.6 – Pontos de aplicação da soldadura para obtenção dos provetes soldados: a) série 1 e b) série 2.....	24
Figura 3.7 – Realização da soldadura nos provetes soldados: a) série 2 e b) série 1. ....	24
Figura 3.8 – a) Locais de aplicação do adesivo e b) pontos de soldadura para os provetes da série 1. ....	26
Figura 3.9 – a) Locais de aplicação do adesivo e b) pontos de soldadura para os provetes da série 2. ....	27
Figura 4.1 – Consequência de partes com espessura muito reduzida no caso dos provetes da primeira série. ....	31
Figura 4.2 – Macrografia do provete colado B-1.6. ....	31

Figura 4.3 – Macrografia do provete colado B-2.6. ....	31
Figura 4.4 – Macrografia do provete soldado W-1.6. ....	32
Figura 4.5 – Macrografia do provete soldado W-2.6. ....	32
Figura 4.6 – Macrografia do provete híbrido H-1.2. ....	32
Figura 4.7 – Macrografia do provete híbrido H-2.6. ....	32
Figura 4.8 – Microestrutura do material de base. ....	34
Figura 4.9– Micrografia obtido no provete W-1.6: a) zona de soldadura, b) zona de mistura, c) zona termo-mecanicamente afetada e d) zona termicamente afetada. ....	35
Figura 4.10 – Micrografia obtida no provete W-2.6: a) zona de soldadura, b) zona de mistura, c) zona termo-mecanicamente afetada e d) zona termicamente afetada d) ....	36
Figura 4.11 – Micrografia obtida no provete H-1.2: a) zona de soldadura, b) zona de mistura, c) zona termo-mecanicamente afetada e d) zona termicamente afetada. ....	38
Figura 4.12– Micrografia obtida no provete H-2.6: a) zona de soldadura, b) zona de mistura, c) zona termo-mecanicamente afetada e d) zona termicamente afetada. ....	39
Figura 4.13 – Valores de dureza obtidos para o material de base. ....	40
Figura 4.14 – Resultados dos ensaios de microdureza efetuados no provete W-1.6. ....	41
Figura 4.15 – Resultados dos ensaios de microdureza efetuados no provete híbrido H-1.2. ....	41
Figura 4.16 – Resultados dos ensaios de microdureza efetuados no provete soldado W-2.6. ....	42
Figura 4.17 – Resultados dos ensaios de microdureza efetuados no provete híbrido H-2.6. ....	42
Figura 4.18 – Esquema de dissipação de calor numa junta sobreposta (adaptado de: [32]). ....	44
Figura 4.19 – Resultados dos ensaios de tração/corte dos provetes colados (B) da série 1. ....	44
Figura 4.20 – Resultados dos ensaios de tração/corte dos provetes colados (B) da série 2. ....	45
Figura 4.21– Resultados dos ensaios de tração/corte dos provetes soldados (W) da série 1. ....	46
Figura 4.22 – Resultados dos ensaios de tração/corte dos provetes soldados (W) da série 2. ....	46
Figura 4.23– Resultados dos ensaios de tração/corte dos provetes híbridos (H) da série 1. ....	47
Figura 4.24– Resultados dos ensaios de tração/corte dos provetes híbridos (H) da série 2. ....	47
Figura 4.25 – Curvas comparativas dos 3 tipos de ligação da série 1. ....	49
Figura 4.26 – Curvas comparativas dos três tipos de ligações da série 2. ....	50
Figura 4.27 – Deformações locais na superfície do provete B-2.5: a) estágio de força média (3074 N) e b) estágio de força máxima (6054 N). ....	52



---

Figura 4.28 – Deformações locais na superfície do provete W-2.2: a) estágio de força média (3075 N) e b) estágio de força máxima (6097 N).....	54
Figura 4.29 – Deformações locais na superfície do provete H-2.1: a) estágio de força média (640 N) e b) estágio de força máxima (1300 N).....	56
Figura 4.30 – Imagens dos provetes a) B-1.3 e b) B-2.5 após rotura adesiva.....	58
Figura 4.31 – Imagens dos provetes a) W-1.5 e b) W-2.2 após rotura.....	58
Figura 4.32 – Imagens dos provetes a) H-1.2 após rotura em modo misto e b) H-2.1 após rotura em modo adesivo.....	59
Figura AA 0.1 – Dimensões e geometria da ferramenta FSSW.....	76
Figura AB 0.1 - Dimensões e geometria da placa superior 1 para obtenção dos provetes da primeira série.....	78
Figura AC 0.1 - Dimensões e geometria da placa inferior 2 para obtenção dos provetes da primeira série.....	80
Figura AD 0.1 - Dimensões e geometria da placa inferior 3 para obtenção dos provetes da primeira série.....	83
Figura AE 0.1 – Dimensões e geometria da placa superior 4 para obtenção dos provetes da segunda série.....	85
Figura AF 0.1 - Dimensões e geometria da placa superior 4 para obtenção dos provetes da segunda série.....	87
Figura AG 0.1 – Identificação dos pontos na amostra onde foram efetuadas as indentações.....	89



---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas da liga AA508-H111 ( <a href="https://www.gleal.pt/files/products/145.pdf">https://www.gleal.pt/files/products/145.pdf</a> ) .....	17
Tabela 3.2 – Composição química da liga de alumínio 5083-H111 ( <a href="https://www.gleal.pt/pt/produtos/5083">https://www.gleal.pt/pt/produtos/5083</a> ) .....	18
Tabela 3.3 – Composição química do aço H13 ( <a href="http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=e30d1d1038164808a85cf7ba6aa87ef7">http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=e30d1d1038164808a85cf7ba6aa87ef7</a> ) .....	19
Tabela 3.4 – Lista e designação de todos os provetes colados .....	23
Tabela 3.5 – Parâmetros de soldadura relativos à série 1 de provetes soldados.....	25
Tabela 3.6 – Parâmetros de soldadura relativos à série 2 dos provetes soldados.....	25
Tabela 3.7 – Lista de provetes híbridos obtidos em cada série .....	26
Tabela 4.1 – Média e desvio padrão das forças máximas obtidas para os ensaios de cada tipo em cada série .....	48



## **SIGLAS**

### **Siglas**

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

*DIC – Digital image correlation*

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

*FSSW – Friction stir spot welding*

*FSW – Friction stir welding*

*TWI – The welding institute*

ZM – Zona de mistura

ZTA – Zona termicamente afetada

ZTMA – Zona térmica e mecanicamente afetada



## 1. INTRODUÇÃO

O recente desenvolvimento da indústria, nomeadamente no setor dos transportes, tem vindo a exigir melhorias a nível do desempenho e de consumos energéticos. A redução do peso dos componentes aparenta ser uma boa proposta para atingir esses objetivos. É nesse sentido que este trabalho propõe o uso de ligações estabelecidas através de adesivo e soldadura, *Friction Stir Spot Wealding (FSSW)*, em alternativa aos métodos de fixação convencionais, como parafusos ou rebitagem.

O *FSSW* é um processo de soldadura em estado sólido, por nunca se atingir o ponto de fusão dos materiais a ligar, promovendo, assim, uma união com menos defeitos relativamente a outras técnicas de soldadura por fusão. O processo consiste numa ferramenta em rotação, que promove a união de duas placas através da deformação plástica e fricção provenientes do contacto da ferramenta com a junta.

O uso de adesivo como método de ligação tem vindo a ser cada vez mais utilizado na prática de engenharia. Algumas das vantagens inerentes à utilização deste método de ligação são a redução de peso, e a boa distribuição de tensões. No entanto, a utilização de adesivo requer preparação da junta e uma distribuição adequada do adesivo nos componentes a unir.

Neste trabalho, à semelhança das configurações de junta habituais na indústria automóvel, foram projetados provetes dentados de forma a que a soldadura, e a colagem, fossem feitas em locais distintos, prevenindo a sua mistura.

Este estudo passa por conceber e estudar ligações estabelecidas através do uso adesivo e soldadura *FSSW* simultaneamente, de forma a verificar se uma melhoria na resistência mecânica deste tipo de ligações é obtida. Para além disso, são também produzidas juntas apenas coladas, e apenas soldadas, de forma a estabelecer uma comparação em termos de propriedades mecânicas.

Esta dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, sendo que o primeiro é a introdução de forma a explicar rápida e resumidamente o objetivo deste trabalho. De seguida, é feita uma revisão bibliográfica com o intuito de contextualizar o leitor acerca das temáticas inerentes a este trabalho. Depois é realizada a descrição do procedimento experimental. Os

resultados são então apresentados e discutidos com base na literatura existente. Finalmente, no capítulo 5, retiram-se conclusões e sugerem-se trabalhos futuros.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Introdução

Este capítulo tem como principal objetivo descrever algumas temáticas inerentes a este trabalho, de forma a contextualizar o leitor da melhor maneira possível.

As temáticas abrangidas por este capítulo são: ligações adesivas, ligações obtidas por soldadura e ligações híbridas.

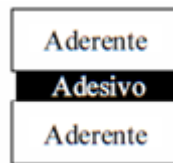
Inicialmente é apresentada uma definição de juntas coladas, ou ligações adesivas, assim como os esforços a que estas podem estar sujeitas, tipos de rotura e características da preparação de junta. Descreve-se também o processo de soldadura por fricção linear por ponto (*Friction stir spot welding*) dando alguma relevância aos parâmetros principais relativos a este processo. Este método é uma variante da soldadura por fricção linear (*Friction stir welding*). Para além disso, é feita uma introdução à microestrutura, e aos defeitos normalmente obtidos em ligações estabelecidas através desta tecnologia de soldadura.

Por último faz-se uma descrição das ligações híbridas e das suas principais características. Este subcapítulo inclui também uma explicação dos processos de obtenção destas juntas.

### 2.2. Ligações adesivas

Dados históricos revelam que o início do uso de adesivos remete a um passado distante há milhares de anos. Embora seja difícil identificar com precisão o início da sua utilização, existem vestígios de uma substância usada para a união de componentes em pedras com pelo menos 36000 anos [1], [2]. A substância utilizada como adesivo natural foi analisada, tendo sido identificado betume como material constituinte [1].

Designa-se por ligação adesiva qualquer união realizada através de um adesivo. Um adesivo representa um material que promove a adesão dos componentes que constituem a junta. Os elementos a ligar são designados por aderentes caso já tenham sido colados, ou substratos caso contrário [3]. A figura 2.1 ilustra a descrição feita.



**Figura 2.1 – Identificação do adesivo e aderente (adaptado de: [3]).**

O uso deste tipo de ligações tem vindo a crescer em engenharia por apresentar vantagens em relação aos métodos de fixação convencionais. Algumas dessas vantagens são [4]–[7]:

- Baixo peso estrutural;
- Custo de produção reduzido;
- Tensões distribuídas numa área maior (comparativamente aos métodos convencionais de fixação);
- Sem necessidade de furos;
- Elevada resistência à fadiga;
- Permitir juntar materiais dissimilares;
- Permitir a ligação de elementos de espessura reduzida;
- O aquecimento dos elementos a unir para a cura do adesivo pode eliminar problemas típicos de soldadura;
- O adesivo previne a corrosão;
- A dilatação térmica dos materiais é compensada.

Por outro lado, existem também alguns inconvenientes associados a estas ligações, o que justifica a utilização de ligações híbridas de forma a limitá-los. Algumas desvantagens são [5], [7], [8]:

- Necessidade de projeto da ligação, de forma a minimizar esforços de arrancamento e clivagem;
- Os diferentes coeficientes de expansão térmica do aderente e adesivo podem resultar em tensões residuais;
- Necessidade de pré-tratamento de superfície de forma a garantir uma boa adesão;
- Impossibilidade de, em algumas situações, as ligações serem separadas posteriormente;

- Risco de toxicidade e inflamabilidade associado a este tipo de ligações;
- Sensibilidade ao calor, humidade, tratamento de superfície e envelhecimento;
- Não apresentam elevada resistência ao corte a temperaturas superiores a 100°C;
- Exigem investimento inicial do equipamento.

### 2.2.1. Tipos de esforços

As ligações adesivas podem estar sujeitas a vários tipos de esforços, sendo estes de tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento.

Os esforços de tração e compressão ocorrem quando a força aplicada é perpendicular ao plano de colagem, dando origem a uma distribuição de tensões uniforme ao longo do comprimento da área colada. Estas solicitações estão esquematizadas na figura 2.2 [3].

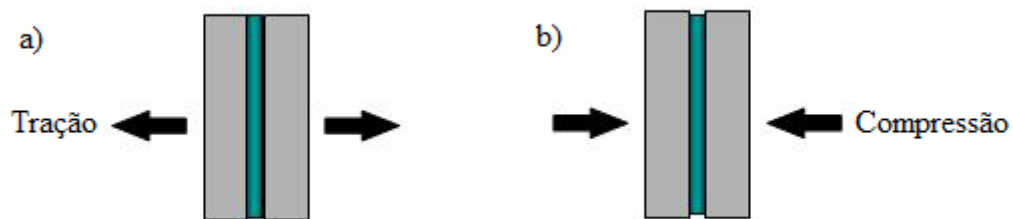


Figura 2.2 – Esforços de tração a) e compressão b) (adaptado de: [1]).

Os esforços de clivagem e arrancamento são muito semelhantes, na medida em que são ambos provocados por forças de tração nas extremidades da zona colada sobreposta. A diferença entre estes esforços reside no facto de, no caso do arrancamento, os aderentes serem flexíveis e se deformarem plasticamente mediante a força aplicada. Já no caso da clivagem, apenas se verificam essas forças nas extremidades, sem que se deformem os aderentes. Como confirma a figura 2.3 c), os dois casos dão origem a uma zona mais localizada de concentração de tensões, numa das extremidades da zona sobreposta [9]. Essa concentração de tensões nas extremidades da ligação deve ser evitada, recorrendo a configurações de junta que consigam suportar maioritariamente esforços cortantes [1], [10]. No entanto, a flexão ou rotação de um dos elementos a ligar quando solicitados ao corte, dá origem a esforços de arrancamento como ilustra a figura 2.4 [7]. Como tal, conclui-se que o nível de concentração de tensões é fortemente condicionado pela rigidez dos aderentes [3].

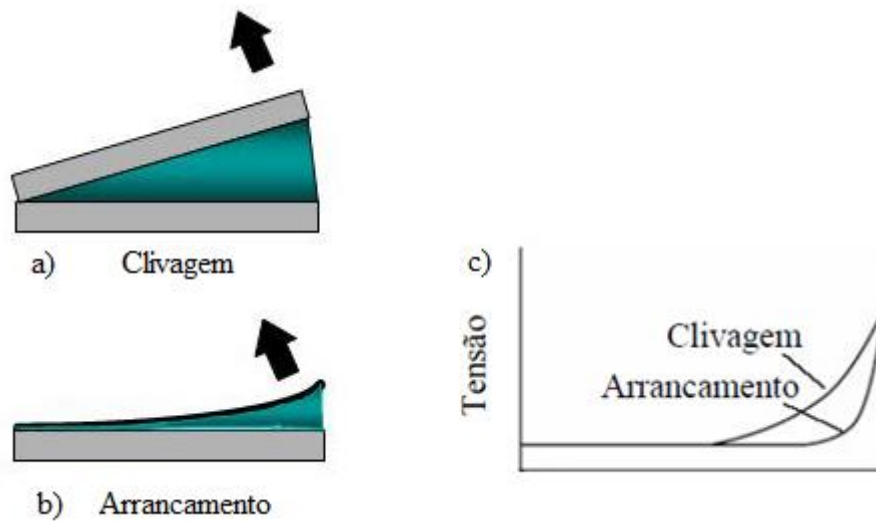


Figura 2.3 - Esforços de clivagem a), arrancamento b) e concentração de tensões c) [1], [3].

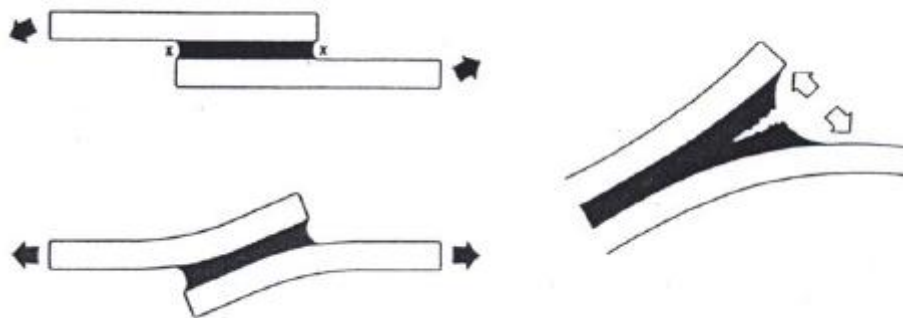


Figura 2.4 -- Esforços de arrancamento devido à flexão dos elementos [7].

De acordo com a figura 2.5, os esforços de corte ocorrem quando uma solicitação no plano do adesivo provoca o escorregamento dos aderentes [3].

Após análise da figura 2.5, verifica-se a existência de tensões superiores nas extremidades da zona sobreposta, que vão diminuindo até ao centro onde atingem o valor mínimo [11]. Segundo alguns autores, este comportamento deve-se ao facto de cada um dos aderentes se deformar diferencialmente e a uma taxa crescente, desde a extremidade livre até à extremidade oposta de sobreposição [8]. Este efeito torna-se mais notório com o aumento da largura de ligação, o que confere a esta dimensão maior relevância do que ao comprimento [3]. Como tal, e de acordo com a figura 2.6, verifica-se um acréscimo da resistência com o aumento da largura da ligação, por elevar a área nas extremidades onde existem tensões mais elevadas [11], [12].

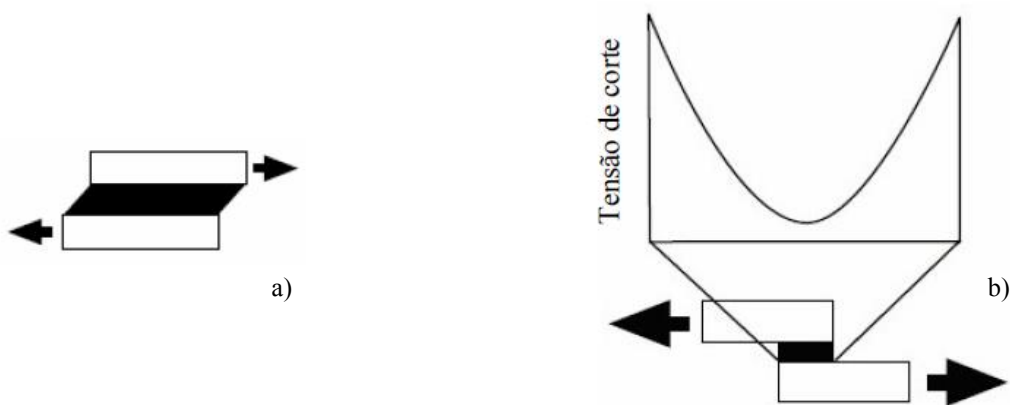


Figura 2.5 - Esforço de corte a) e distribuição de tensões b) [3].

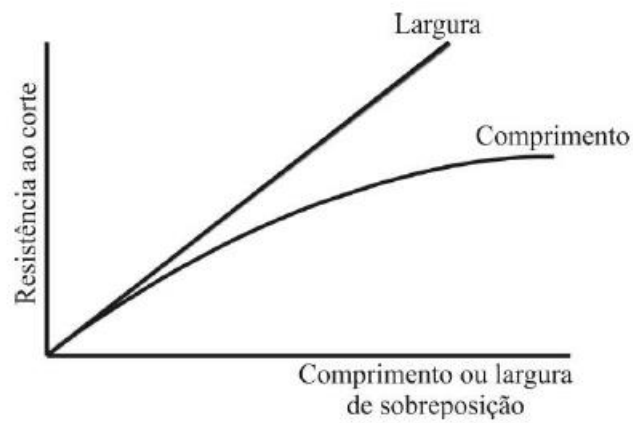
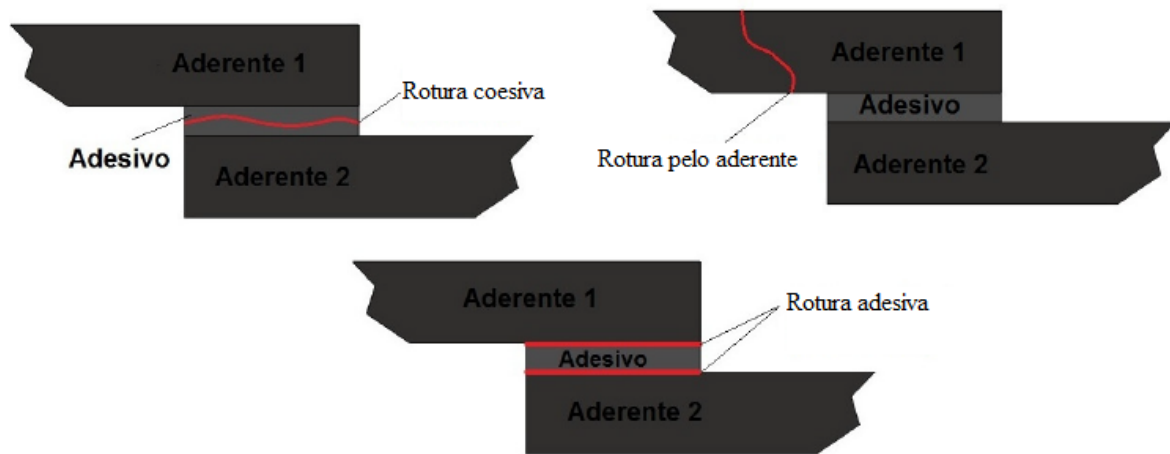


Figura 2.6 - Resistência da ligação em função da largura e do comprimento [3].

### 2.2.2. Modos de rutura de ligações adesivas

Os modos de rutura associados às ligações adesivas são: adesiva, coesiva, pelo aderente e mista, e estão representados na figura 2.7.



**Figura 2.7– Modos de rutura em ligações adesivas (adaptado de: [13])**

Designa-se por rutura adesiva quando se dá a separação da ligação e uma das superfícies coladas não apresenta resíduos de adesivo [12]. Segundo Pinto, a má preparação da superfície pode ser responsável pela ocorrência de este tipo de falha [3].

Relativamente à rotura coesiva, ocorre quando as forças da ligação entre o adesivo e o aderente são mais fortes do que a resistência interna do adesivo [12]. Esta situação leva a que ambas as superfícies do substrato estejam cobertas de adesivo após a rotura [3].

A rotura mista dá-se quando os dois fenómenos anteriores, rotura adesiva e coesiva, ocorrem simultaneamente, identificando-se nas superfícies do substrato algum adesivo [3].

Como o próprio nome indica, a rutura pelo aderente dá-se quando a falha da ligação ocorre no próprio aderente [11].

O modo de falha preferencial para esta ligações é a rutura coesiva, visto que nesta situação se está a “utilizar” toda a resistência dos materiais da junta [3].

### **2.2.3. Preparação de junta**

Vários autores dizem que o sucesso de uma junta passa pela sua preparação. Por exemplo tendo em conta os mecanismos de limpeza. Para se conseguir uma junta com durabilidade, será necessário recorrer a uma limpeza por solvente, abrasão mecânica ou tratamento térmico da superfície do substrato [14].

Para além disso, mediante o projeto de uma junta adesiva, devem ser consideradas as seguintes regras [3]:

- Minimizar a concentração de tensões;
- Projetar a ligação de modo a que esta seja solicitada ao corte;
- Minimizar esforços de arrancamento e clivagem;
- Distribuir as tensões uniformemente por toda a área colada sobreposta.

Em termos de melhoria da junta observa-se que:

- A resistência da ligação aumenta sempre com o aumento da largura da mesma. Já o aumento do comprimento da ligação nem sempre aumenta a sua resistência;
- Adesivos flexíveis são melhores ao arrancamento, enquanto que os rígidos resistem melhor ao corte;
- Tipicamente, um adesivo com melhores propriedades mecânicas promove uma ligação mais resistente. No entanto, um adesivo com resistência coesiva menor, mas com elevada capacidade de se deformar, pode dar origem a uma junta mais resistente;
- Quanto mais rígido for o aderente em relação ao adesivo, mais uniforme é a distribuição de tensões, logo, maior é a resistência da ligação;
- Quanto maior o produto do módulo de elasticidade pela espessura, menor a deformação, o que implica maior resistência da junta;
- A espessura uniforme da junta e uma camada de adesivo sem espaços vazios são fatores importantes a considerar.

Conclui-se, então, mediante estas considerações, que a junta deve apresentar uma geometria que lhe permita ser solicitada preferencialmente ao corte, e que distribua as tensões uniformemente em toda a zona colada sobreposta. Para além disso, deve-se ter em conta a largura de sobreposição, e a espessura dos aderentes, visto que o aumento destas dimensões implica uma maior resistência da junta. Deve também ser utilizado um adesivo rígido, aplicado numa camada de espessura uniforme e sem espaços vazios.

## 2.3. Ligações obtidas por soldadura

### 2.3.1. *Friction Stir Welding (FSW)*

Em 1991, o *The Welding Institute* desenvolveu o processo de soldadura por fricção linear (*Friction stir welding*), normalmente designado por FSW [15]. É um processo de soldadura em estado sólido, o que permite obter resultados com menos defeitos, tendo em conta que não se atinge a temperatura de fusão dos materiais [16].

A capacidade de unir materiais dissimilares como ligas leves de alumínio e magnésio, tornam esta técnica uma das descobertas mais importantes das duas últimas décadas no âmbito da tecnologia de ligação [15], [17].

De acordo com a figura 2.8, uma ferramenta rotativa e não consumível, constituída pelo pino (*pin*) e base (*shoulder*), é inserida na zona de junção das duas placas. De seguida, o movimento transversal percorrendo a zona da junta permite completar a ligação [17], [18].

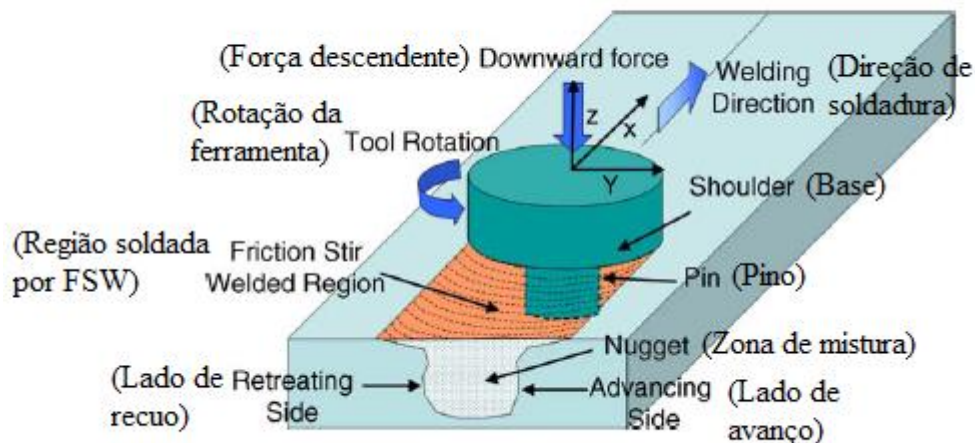


Figura 2.8 - Desenho esquemático do processo de FSW (adaptado de: [18]).

A ferramenta tem como funções principais o aquecimento e transporte do material base [18].

O aquecimento é proveniente da fricção da ferramenta e da deformação plástica, mudando o material de um estado sólido para um estado plasticizado e macio [17], [18]. De seguida, o material flui de maneira complexa à volta da ferramenta, sendo transportado do



lado de avanço (*advancing side*) para o lado de recuo (*retreating side*), de acordo com o ilustrado na figura 2.8 [17].

### 2.3.2. Friction Stir Spot Welding (FSSW)

Em 1993, a *Mazda Motor Corporation* desenvolveu o processo de FSSW (*Friction stir spot welding*), sendo este uma variante do processo FSW com aparência e conceito similar [15], [19]. A implementação desta nova técnica permitiu a esta empresa obter uma redução de cerca de 90% em consumos energéticos, e uma redução de aproximadamente 40% em investimento capital, face à utilização de outros métodos de ligação [19].

O FSSW é uma tecnologia de soldadura que promove a ligação localizada de materiais adjacentes quando dispostos numa junta sobreposta [20].

De acordo com a figura 2.9, o processo consiste em 3 estágios. O primeiro corresponde à fase de penetração (*plunging*), na qual a ferramenta em rotação é inserida na junta até uma profundidade pré definida [15], [21]. De seguida, segue-se a fase de mistura (*stirring*) em que a ferramenta, apenas em rotação, promove o amaciamento e mistura do material através do calor proveniente da fricção [15], [21]. Já a fase de saída (*retracting*) consiste em retirar a ferramenta, o que cria normalmente um “buraco” característico que condiciona fortemente as propriedades mecânicas da junta [15], [21].

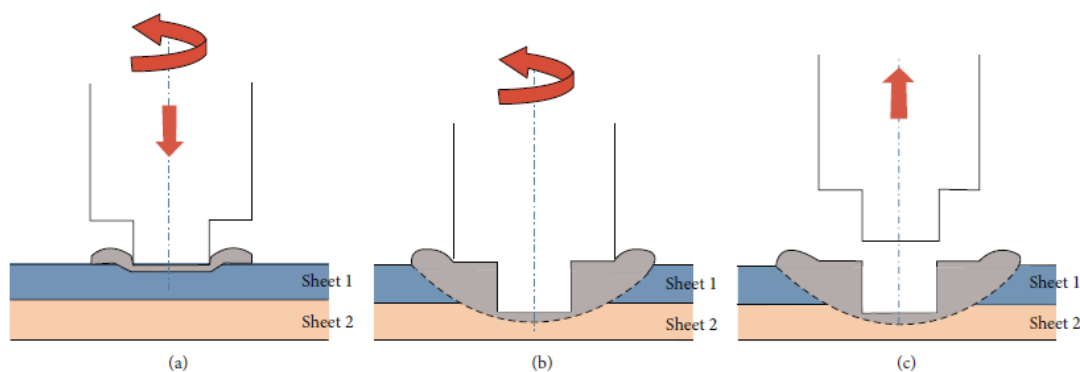


Figura 2.9 – Estágios do processo FSSW: a) penetração, b) mistura e c) saída [15].

A microestrutura habitualmente obtida neste tipo de soldadura apresenta 3 zonas distintas, as quais estão representadas na figura 2.10.

A zona térmica e mecanicamente afetada (ZTMA) que corresponde à região onde o material sujeito a elevadas temperaturas é deformado plasticamente. Apresenta grãos

finos equiaxiais devido à recristalização resultante do aumento da temperatura e deformação plástica [15], [22], [23].

A zona termicamente afetada (ZTA) que, como o próprio nome indica, corresponde à região onde o aumento de temperatura altera as propriedades do material, a qual não está sujeita a deformação [22], [23].

A zona de mistura (ZM) é a zona sujeita a maiores temperaturas e deformações plásticas, e é constituída por duas camadas. A elevada energia friccional devido ao contacto da ferramenta com o material, faz com que a camada superior desta zona esteja sujeita a temperaturas mais elevadas. No entanto, devido à convecção ambiente após a fase de saída, está sujeita também a um arrefecimento mais rápido e, conseqüentemente, ocorrerá uma diminuição do tamanho de grão [23].

Podem existir zonas que não são afetadas quer por deformações quer por alterações de temperatura, designando-se por MB (material base).

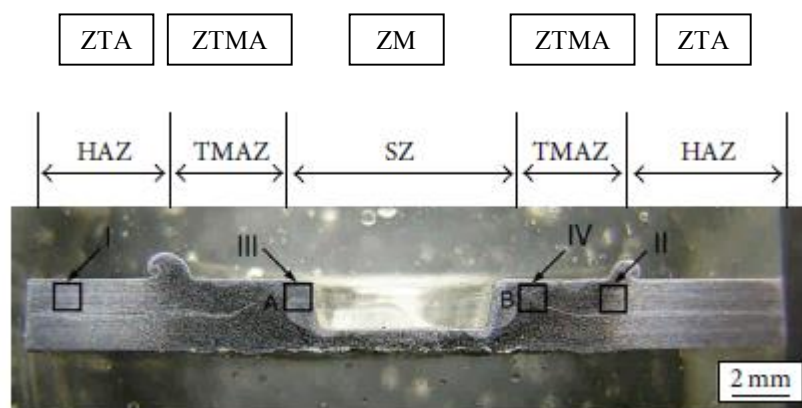


Figura 2.10– Micrografia típica de uma ligação obtida por FSSW (adaptado de [15]).

Tendo em conta o papel fundamental da otimização dos parâmetros deste tipo de soldadura, na melhoria das propriedades mecânicas da ligação, existem alguns estudos nesse sentido. Assim sendo, os parâmetros com maior influência na qualidade da junta são a [18], [20], [24]:

- Penetração da ferramenta (*plunge depth*);
- Velocidade de rotação da ferramenta;
- Geometria da ferramenta;
- *Dwell time* (tempo da fase de mistura).

A penetração da ferramenta é a distância a que a mesma penetra na junta. Não deve ser excessiva de forma a criar uma zona crítica, resultante da distorção da placa inferior, nem reduzida, de maneira a que o *shoulder* não chegue à superfície do material [18], [25]. A consolidação das duas placas a ligar é controlada por este parâmetro [20].

A velocidade de rotação da ferramenta está associada à mistura e aquecimento do material a unir [18], [20]. Para juntas em aço, o aumento deste parâmetro leva a um acréscimo da resistência da junta devido ao maior calor gerado que, conseqüentemente, amplia a ZM e a área de ligação. No entanto, um aumento excessivo pode levar à perda das propriedades mecânicas, como consequência do aumento do tamanho de grão [20].

A geometria da ferramenta é o parâmetro que mais condiciona a qualidade da soldadura, estando diretamente relacionada com o aquecimento localizado e com o fluxo de material [18]. Grande parte do calor gerado na fase inicial é proveniente da fricção da base (*shoulder*) com a placa superior, e a uniformidade da microestrutura é condicionada pelo fluxo de material [18], [24]. Algumas geometrias da ferramenta, constituída pelo pino (*pin*) e base (*shoulder*), estão representadas na figura 2.11 embora estejam omitidos os perfis roscados existentes nos pinos.

O *Dwell time* é o tempo em que a ferramenta está na fase de mistura. O aumento deste parâmetro leva a um aumento do efeito anelar de ligação, melhorando assim as propriedades mecânicas [20].

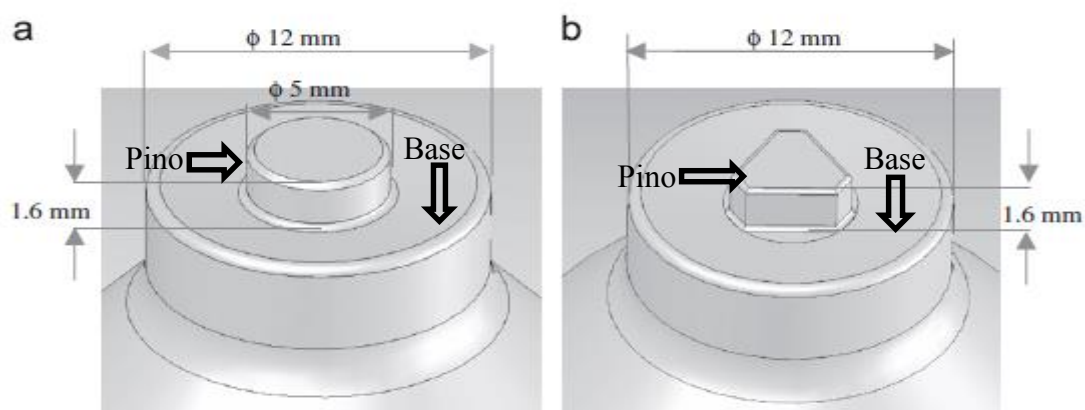


Figura 2.11 – Geometrias da ferramenta FSSW (sem o roscado do pino): a) pino cilíndrico e b) pino triangular (adaptado de: [26]).

Existem alguns defeitos típicos associados ao processo de soldadura FSSW em juntas sobrepostas, sendo eles o gancho (*hooking*), colagem (*bonding ligament*) e ligação parcial (*partial bonding*). Exemplos destes defeitos estão representados na figura 2.12.

O efeito de gancho (*hooking*) traduz-se numa falha na união entre as placas. Alguns autores afirmam que este defeito pode, ocasionalmente, ser consequência da eliminação incompleta da película de óxido de alumínio [15]. Outros dizem que este efeito se deve à fraca fluxibilidade do material e pressão insuficiente [15]. Para além disso, a forma do *hooking* é condicionada pela geometria do *pin* e penetração da ferramenta [15].

A colagem (*bonding ligament*) apresenta estrutura unida devido ao fluxo de material e força penetrante na junta [15].

A ligação parcial (*partial bonding*) é uma região onde a união entre as placas não foi bem sucedida, originando um defeito na zona de contacto entre elas [15].

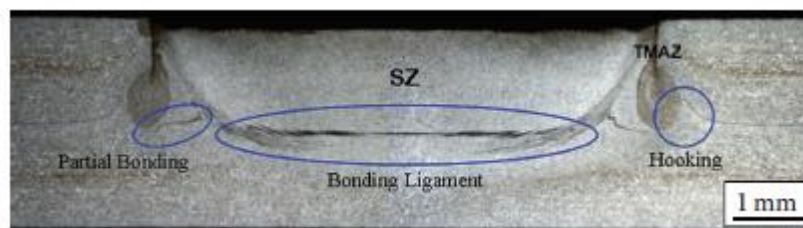


Figura 2.12 – Defeitos habituais de FSSW em placas sobrepostas [15].

## 2.4. Ligações híbridas

Atualmente, a redução de peso apresenta um papel fundamental na indústria, na medida em que permite obter melhorias a nível de desempenho e consumos energéticos [27], [28].

O uso de ligações híbridas, em alternativa aos métodos de fixação convencionais, pode representar uma redução de peso considerável [29].

Designa-se por ligação híbrida a união que é estabelecida através de dois métodos diferentes de junção, como por exemplo soldadura e adesivo. Para esse caso, a literatura existente confirma que estas ligações carecem normalmente de maior dureza, resistência e ductilidade, mas, no entanto, podem, em alguns casos, apresentar melhorias de 20% a 30% nas suas propriedades mecânicas, comparativamente às ligações só adesivas ou só soldadas [27].

Também no caso das juntas híbridas, para conceber uma junta com durabilidade e com uma boa ligação entre o adesivo e o aderente, será necessário ter em consideração os mecanismos de limpeza [14]. A diminuição dos problemas inerentes à colagem irá constituir uma melhoria na resistência destas ligações.

#### **2.4.1. Processos para obtenção de ligações híbridas**

Para a realização de ligações híbridas, utilizam-se normalmente dois métodos distintos:

- *Flow-in*
- *Weld-through*

O método *Flow-in* consiste em aplicar o adesivo depois de realizar a soldadura [27], [30]. Uma cola de viscosidade reduzida é introduzida na zona a ligar já soldada, que é curada posteriormente [30]. É um processo laborioso e desadequado para a produção em massa [27]. Para além disso, condiciona a escolha do adesivo pela viscosidade do mesmo [27].

Em alternativa existe o processo *Weld-through*, no qual a aplicação do adesivo é feita em primeiro lugar, seguindo-se a soldadura e, finalmente, o processo de cura [30]. Esta técnica é mais adequada para casos em que o processo de soldadura não atinja temperaturas muito elevadas. Caso contrário, as temperaturas podem ultrapassar a temperatura de transição vítrea do adesivo provocando a sua queima. É o método preferencialmente escolhido tendo em conta as vantagens relativas à sua industrialização [27]. Os processos anteriormente descritos encontram-se esquematizados na figura 2.13.

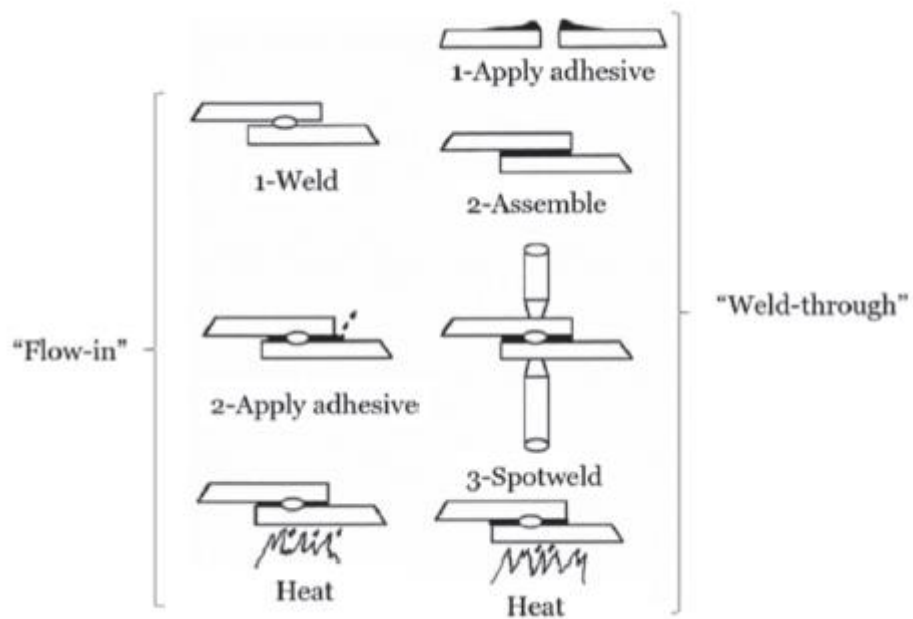


Figura 2.13 – Esquema dos métodos *Flow-in* e *weld-through* [27].

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo tem como principal função dar a conhecer ao leitor o procedimento experimental levado a cabo no presente estudo.

Inicialmente é feita uma descrição dos materiais e ferramentas a utilizar na realização dos diferentes tipos de ligações. De seguida são descritos os processos de obtenção de cada tipo de junta. Por último, é explicado como é feita a análise aos 3 tipos de ligações, mais propriamente em termos de ensaios de macrografia e micrografia, de dureza e de tração/corte.

#### 3.1. Materiais e ferramentas

Para a execução dos provetes foram utilizadas chapas de alumínio AA5083 com tratamento H11. A colagem dos provetes é feita recorrendo ao adesivo Araldite 420 A/B. Apenas uma ferramenta é utilizada no processo de soldadura FSSW, sendo esta objeto de análise no ponto 3.1.3.

##### 3.1.1. Liga de alumínio AA5083-H111

Neste trabalho foram usadas chapas de alumínio da liga AA5083-H111, com as dimensões de 120x120x3 [mm] para todos os tipos de provetes. É uma liga amplamente utilizada na construção naval, devido ao seu comportamento em termos de resistência e corrosão em ambientes marítimos. Na tabela 3.1 estão representadas as propriedades mecânicas da liga utilizada.

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas da liga AA508-H111 (<https://www.bleal.pt/files/products/145.pdf>).

Tratamento	H111
Resistência à tração	270-345 Mpa
Tensão de limite elástico	115 min. Mpa
Alongamento A	14% min.
Dureza-Brinell típica	73 HBW
Espessura	50 a 80 mm

Esta liga apresenta magnésio como principal elemento de adição, tem uma boa soldabilidade e resistência considerável. A tabela 3.2 apresenta em detalhe a composição química desta liga.

A letra “H” designa uma liga não tratada termicamente, onde o aumento da resistência é conseguido através da deformação plástica a frio [31]. Já os restantes números representam o grau de encruamento, ou outro tratamento adicional, que possa alterar as propriedades da liga [31].

**Tabela 3.2 – Composição química da liga de alumínio 5083-H111**  
(<https://www.gleal.pt/pt/produutos/5083>)

**Composição Química - EN 573-3**

Elemento	Composição (%)
Silício (Si)	≤ 0,40
Ferro (Fe)	≤ 0,40
Cobre (Cu)	≤ 0,10
Manganês (Mn)	0,40-1,0
Magnésio (Mg)	4,0-4,9
Crómio (Cr)	0,05-0,25
Zinco (Zn)	≤ 0,25
Titânio (Ti)	≤ 0,15
Alumínio (Al)	restante

### **3.1.2. Araldite 420 A/B**

A cola Araldite 420 A/B é uma resina epóxida de dois componentes (adesivo e endurecedor). As especificações técnicas e propriedades do adesivo utilizado no presente estudo podem ser consultadas no ANEXO A.

O adesivo e o endurecedor foram misturados de acordo com as dosagens indicadas nas especificações técnicas. Após a mistura, até se obter a homogeneidade, a colagem dos provetes é feita aplicando o conjunto, adesivo e endurecedor, na área reservada para o efeito, seguindo-se a cura do adesivo numa estufa a 50°C durante 4 horas.

### **3.1.3. Ferramentas**

Todas as soldaduras foram efetuadas utilizando a ferramenta indicada na figura 3.1.



A ferramenta foi produzida em aço de ferramentas H13. É um aço de trabalho a quente, em que os principais elementos de adição são o crómio, molibdénio e vanádio (<https://www.acoespecial.com.br/aco-h13.php>). A restante composição química está indicada na tabela 3.3.

Desenhos técnicos com os detalhes geométricos da ferramenta encontram-se no Apêndice A.



Figura 3.1 – Ferramenta FSSW a) e fixador b).

Tabela 3.3 – Composição química do aço H13

([http://www.matweb.com/search/datasheet\\_print.aspx?matguid=e30d1d1038164808a85cf7ba6aa87ef7](http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=e30d1d1038164808a85cf7ba6aa87ef7))

Elemento	% em peso
Carbono, C	0,32 – 0,40 %
Crómio, Cr	5,13 – 5,25%
Ferro, Fe	$\geq 90,9$ %
Molibdénio, Mo	1,33 – 1,4 %
Silício, Si	1,0 %
Vanádio, V	1,0 %

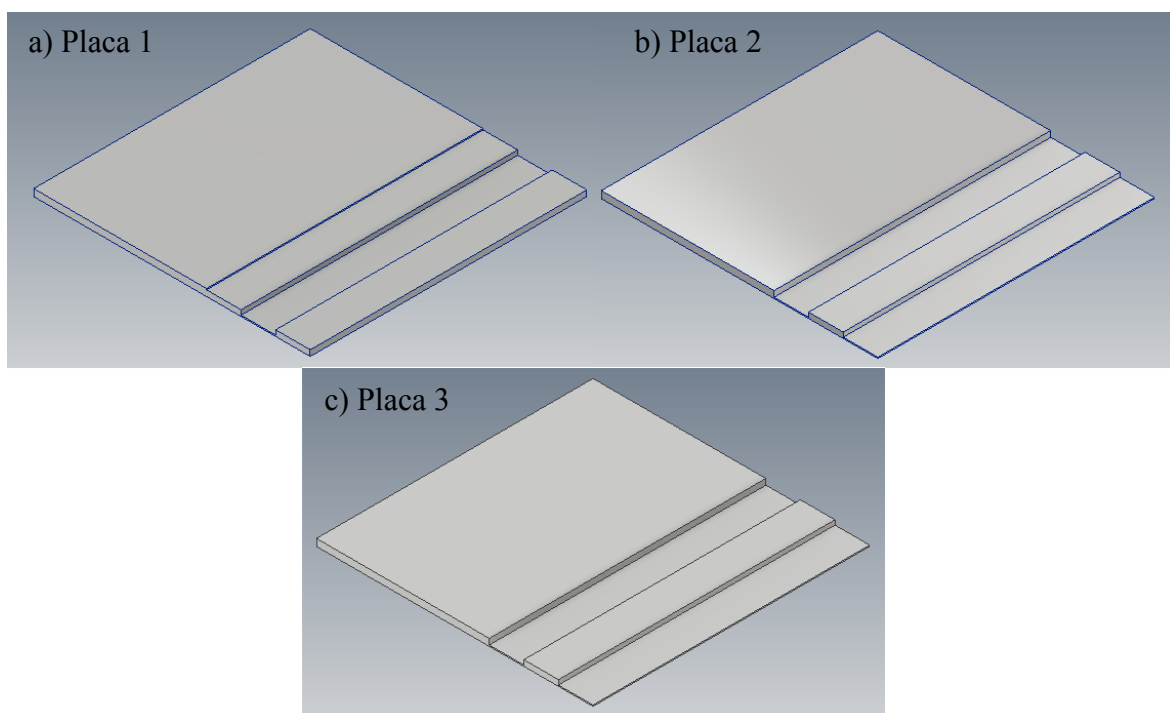
### 3.2. Obtenção dos provetes

No decorrer do presente estudo foram concebidas duas séries de provetes colados, soldados e híbridos, existindo algumas divergências geométricas entre ambas. A escolha das geometrias utilizadas é justificada no capítulo 4.

De acordo com o referido no ponto 3.1.1, placas de alumínio AA5083-H111, com as dimensões de 120x120x3 [mm], retiradas transversalmente à direção de laminagem,

são maquinadas de forma a obter as geometrias pretendidas. Para qualquer tipo de provete, o processo de obtenção consiste na ligação de duas placas acopladas, e posterior secionamento, obtendo, assim, 6 provetes de cada tipo, em cada série, com 20 mm de largura.

As figuras 3.2 e 3.3 identificam as placas utilizadas em cada série de provetes. Desenhos com dimensões e geometrias das placas encontram-se nos Apêndices B, C, D, E e F. A principal diferença entre os 2 conjuntos de placas tem a ver com a dimensão dos rasgos considerados.



**Figura 3.2 – Placas utilizadas na série 1: a) Placa superior 1, b) Placa inferior 2 que contabiliza a espessura do adesivo, c) Placa inferior 3 que não contabiliza a espessura do adesivo.**

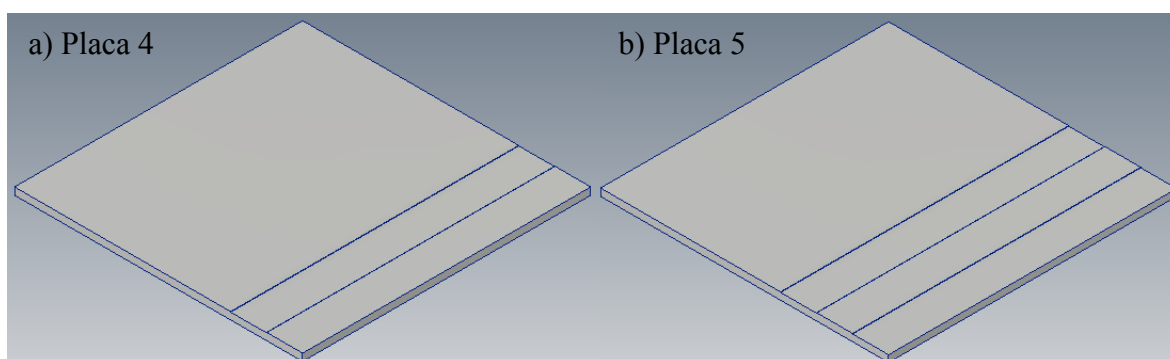


Figura 3.3 – Placa utilizadas na série 2: a) Placa superior 4; b) Placa inferior 5.

### 3.2.1. Obtenção dos provetes colados

Para a realização dos provetes colados é necessário unir as placas mediante a aplicação do adesivo. Para os provetes da série 1, é essencial juntar uma placa 1 com uma 2. Já no caso da série 2 é fundamental o acoplamento das placas 4 e 5.

Os aderentes foram sujeitos a uma limpeza com álcool nos locais destinados à aplicação do adesivo, de forma a eliminar eventual sujidade que possa comprometer o comportamento adequado do mesmo.

A cola foi obtida através da mistura do adesivo (Araldite 420 A) com o endurecedor (Araldite 420 B), segundo uma razão de 10/4 em peso dos dois componentes, respetivamente. A mistura foi feita lentamente de forma a evitar a formação de bolhas de ar.

O conjunto adesivo e endurecedor foi misturado até apresentar uma estrutura homogénea, e aplicado nos locais reservados para o efeito. As figuras 3.4 e 3.5 identificam o local de aplicação do adesivo para cada série de provetes colados (área marcada com um 'X').

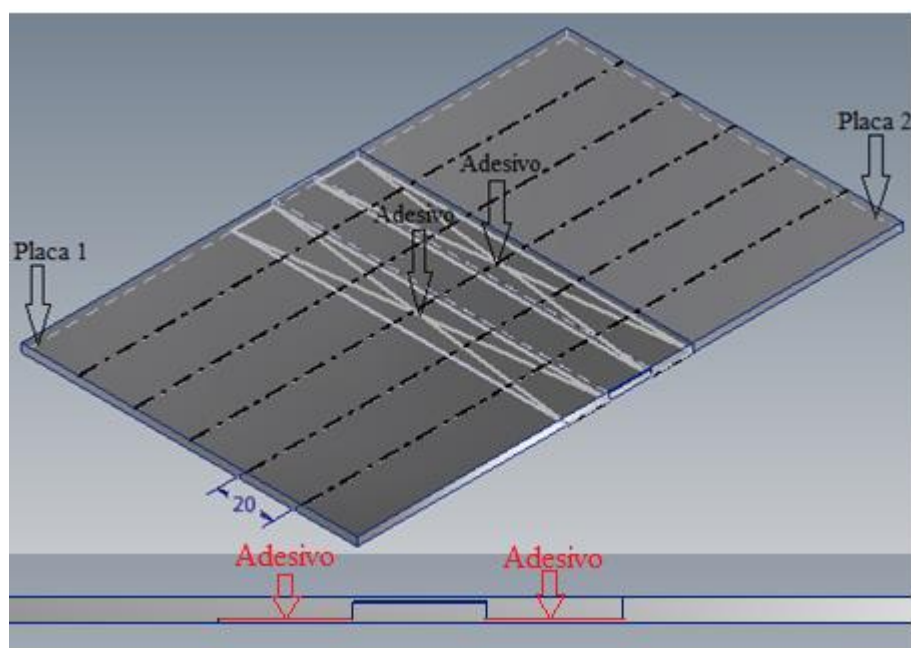


Figura 3.4 – Acoplamento das placas para obtenção de provetes colados da série 1.

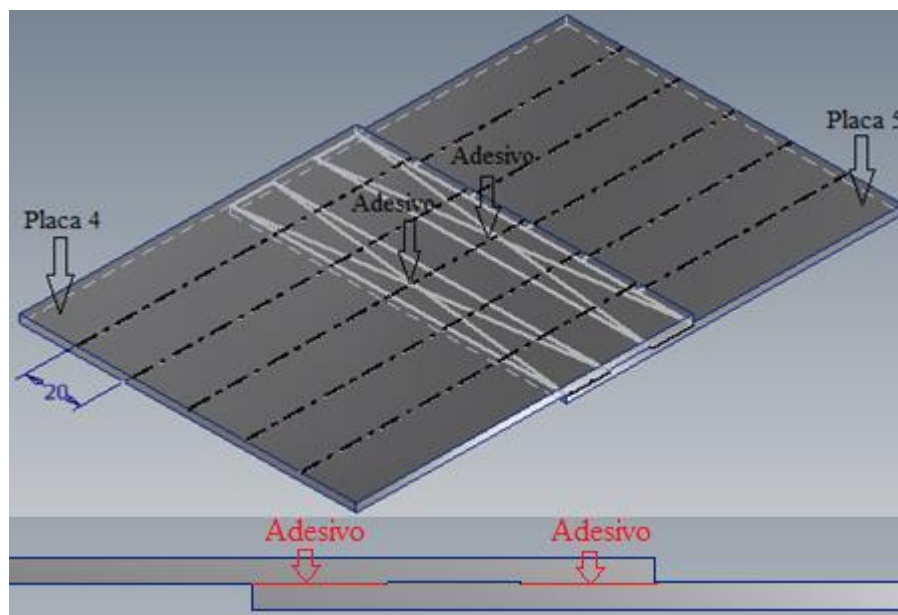


Figura 3.5 – Acoplamento das placas para obtenção de provetes colados da série 2.

As placas de cada série foram então acopladas, e comprimidas através de dois grampos aplicados nas extremidades da zona sobreposta, de forma a minorar a existência de bolhas de ar.

A cura do adesivo foi feita na estufa *PJ Selecta* modelo *Digithead*, submetendo as placas a uma temperatura de 50°C durante 4 horas. As placas de cada série foram então seccionadas de forma a obter os provetes colados. No decorrer do presente estudo foram concebidas duas séries de provetes, nas quais a aplicação do adesivo foi feita antes da execução da soldadura. No caso da primeira série de provetes, a cura do adesivo antecedeu o processo de soldadura, enquanto que na segunda o processo de cura foi posterior à soldadura. A situação pode não se enquadrar com nenhum dos processos descritos no ponto 2.4.1 (*Flow-in* e *Weld-through*), na medida em que o local de aplicação do adesivo é diferente do de soldadura, embora os gradientes térmicos induzidos no material possam também levar a perda de propriedades do adesivo.

A tabela 3.4 enumera todos os provetes colados produzidos. Estes provetes são designados por “B-“, seguindo-se o número da série e o número de cada provete.

Tabela 3.4 – Lista e designação de todos os provetes colados.

Designação	Série	Nº do provete
B-1.1	1	1
B-1.2	1	2
B-1.3	1	3
B-1.4	1	4
B-1.5	1	5
B-1.6	1	6
B-2.1	2	1
B-2.2	2	2
B-2.3	2	3
B-2.4	2	4
B-2.5	2	5
B-2.6	2	6

### 3.2.2. Obtenção dos provetes soldados

A conceção dos provetes soldados foi feita pelo acoplamento das placas 1 e 3, figura 3.2, no caso da primeira série de provetes, e das placas 4 e 5, figura 3.3, no caso da segunda série.

A união das placas foi obtida através do processo de soldadura FSSW em 12 pontos (2 em cada provete) recorrendo ao equipamento *Cincinnati Milacron 207MK*. Os pontos de soldadura estão identificados na figura 3.6, e a figura 3.7 representa imagens da realização da soldadura para ambas as séries.

Para a elaboração deste trabalho utilizaram-se os mesmos parâmetros de soldadura em todos os provetes soldados, à exceção da penetração da ferramenta. O aumento da espessura da zona sobreposta nos provetes da segunda série, levou à necessidade de se aumentar o valor deste parâmetro de forma a garantir a união das duas placas.

Os valores da velocidade de rotação da ferramenta, o tempo da fase de mistura e a profundidade de penetração da ferramenta estão indicados nas tabelas 3.5 e 3.6.

Após a realização da soldadura, as placas unidas foram seccionadas de forma a se obter novamente provetes com 20 mm de largura. Os provetes deste tipo são designados pela letra “W-“ seguindo-se o número da série e o número do provete.

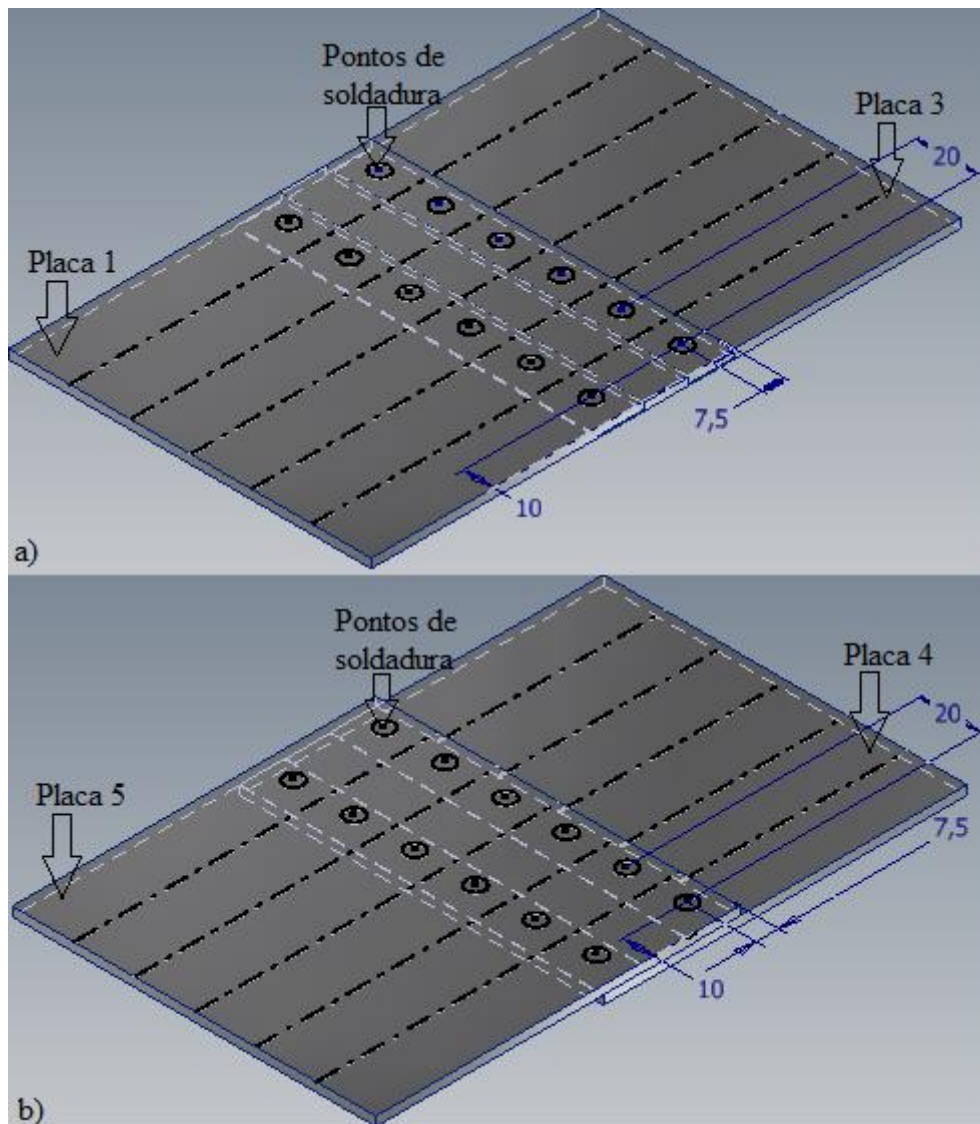


Figura 3.6 – Pontos de aplicação da soldadura para obtenção dos provetes soldados: a) série 1 e b) série 2.



Figura 3.7 – Realização da soldadura nos provetes soldados: a) série 2 e b) série 1.

**Tabela 3.5 – Parâmetros de soldadura relativos à série 1 de provetes soldados.**

	Velocidade de rotação [rpm]	Tempo da fase de mistura [s]	Penetração [mm]
W-1.1 / W-1.2 / W-1.3 / W-1.4 / W-1.5 / W-1.6	500	10	2,9

**Tabela 3.6 – Parâmetros de soldadura relativos à série 2 dos provetes soldados.**

	Velocidade de rotação [rpm]	Tempo da fase de mistura [s]	Penetração [mm]
W-2.1 / W-2.2 / W-2.3 / W-2.4 / W-2.5 / W-2.6	500	10	3,1 a 3,2

### 3.2.3. Obtenção dos provetes híbridos

Para conceber os provetes híbridos, foi necessário estabelecer a união entre as placas acopladas recorrendo ao processo de soldadura FSSW, e ao uso de adesivo, simultaneamente.

O processo de obtenção dos provetes da série 1 começou pela limpeza dos locais destinados à aplicação do adesivo, e indicados na figura 3.8, recorrendo a álcool aplicado em algodão. Estando concluída esta etapa, o adesivo Araldite 420 A/B é obtido de forma idêntica ao referido no ponto 3.2.1, e aplicado nas placas. Segue-se o acoplamento das mesmas, e posterior compressão da junta, através de grampos, de forma a minimizar a existência de bolhas de ar.

De seguida foi feito o processo de cura do adesivo de forma análoga ao descrito no ponto 3.2.1 para os provetes colados

O processo de soldadura FSSW é então aplicado nos pontos também identificados na figura 3.8, recorrendo novamente ao equipamento *Cincinnati Milacron 207MK*. Os parâmetros de soldadura utilizados são idênticos aos dos provetes soldados da série 1, cujos valores estão indicados na tabela 3.5.

Devido a uma espessura muito reduzida de uma das placas perto da zona de soldadura, alguns provetes não foram ligados de forma correta, resultando apenas em dois

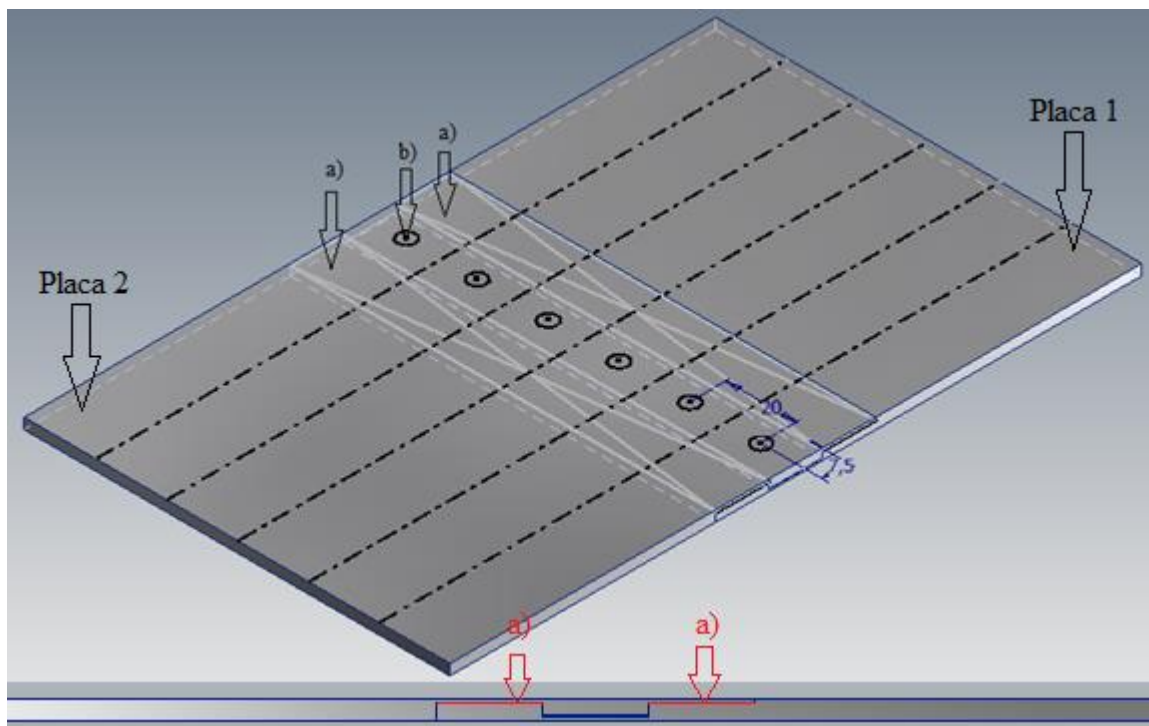


provetes aptos a serem testados. Na tabela 3.7 estão indicados todos os provetes híbridos obtidos neste trabalho.

Os provetes foram então seccionados de forma a obter provetes com 20 mm de largura de sobreposição.

**Tabela 3.7 – Lista de provetes híbridos obtidos em cada série**

Provetes híbridos da série 1	Provetes híbridos da série 2
H-1.1	H-2.1
H-1.2	H-2.2
	H-2.3
	H-2.4
	H-2.5
	H-2.6



**Figura 3.8 – a) Locais de aplicação do adesivo e b) pontos de soldadura para os provetes da série 1.**

Os provetes híbridos da segunda série foram produzidos a partir das placas 4 e 5, figura 3.3. Todo o processo de concepção é análogo ao descrito anteriormente para os



provetes da primeira série, à exceção da cura do adesivo que, neste caso, foi posterior ao processo de soldadura.

A figura 3.9 identifica os pontos de soldadura, assim como os locais de aplicação do adesivo para os provetes híbridos da segunda série. Os parâmetros de soldadura foram os mesmos que os utilizados nos provetes soldados da série 2, e estão indicados na tabela 3.6.

Esta série de provetes é designada pela letra “H-“, seguida do número da série e do número do provete.

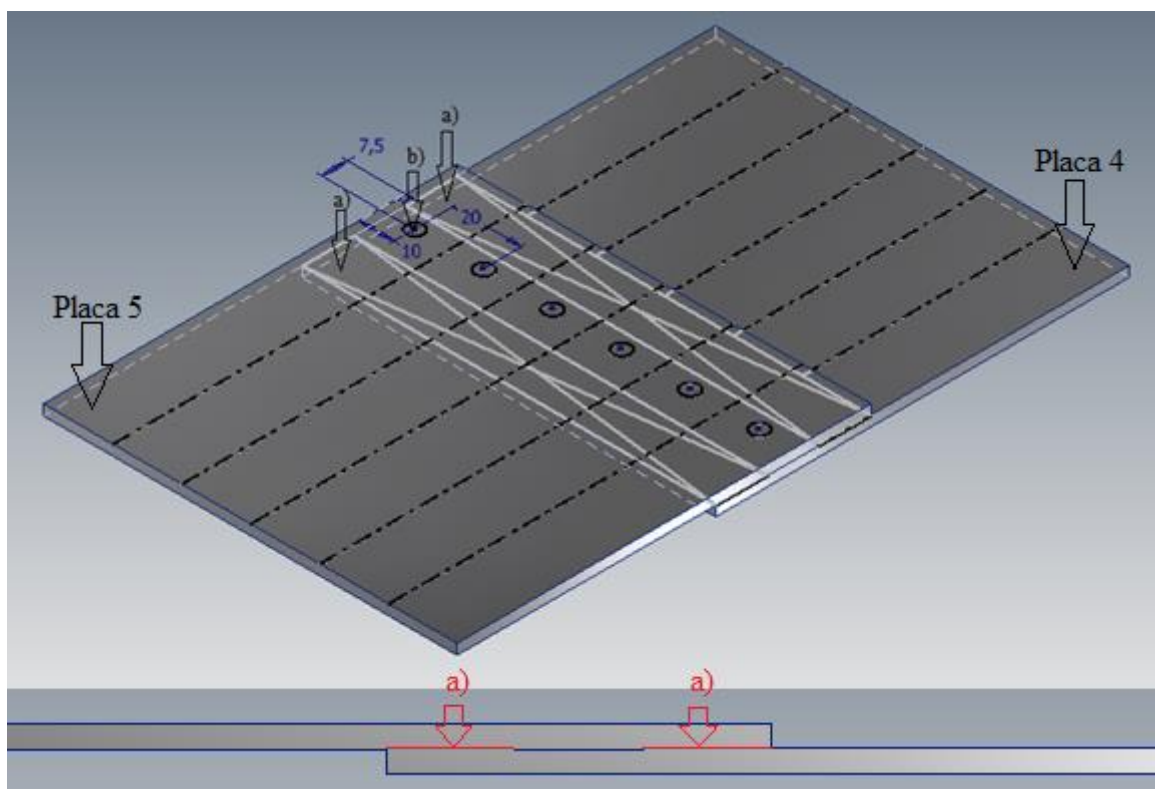


Figura 3.9 – a) Locais de aplicação do adesivo e b) pontos de soldadura para os provetes da série 2.

### 3.3. Metalografia

A análise metalográfica foi feita a partir de amostras provenientes de um provete de cada tipo. Metade da zona sobreposta dos provetes B-1.2, B-2.6, H-1.2, H-2.6, W-1.6 e W-2.6 foi retirada através de uma serra de fita, de forma a que uma das laterais do material removido representasse o plano das soldaduras.

As amostras foram obtidas após submersão do material removido de cada provete em resina epóxi, dentro de um molde, e com o plano das soldaduras voltado para baixo. Após polimerização da resina e remoção dos moldes, resultaram 6 amostras em forma

de cilindro. Este processo tem como objetivo facilitar o manuseamento do material removido dos provetes.

O procedimento seguinte consistiu em lixar as amostras, com lixas de água de granulometrias variadas, mais propriamente desde P600 até P2500. De seguida, o polimento das amostras foi feito com suspensão de diamante, primeiro de 6  $\mu\text{m}$  e depois de 1  $\mu\text{m}$ , até que as superfícies a analisar não apresentassem riscos.

O ataque químico foi executado recorrendo ao reagente *Keller's* (50 mL  $\text{H}_2\text{O}$ , 1 mL  $\text{HNO}_3$ , 2 mL  $\text{HCl}$ , 2 mL  $\text{HF}$ ), mergulhando as superfícies a analisar no químico durante 30 seg. Tendo a microestrutura do material visível, foram recolhidas imagens à escala através do microscópio *Leica DM 4000 M LED*, o qual se encontra ligado a uma máquina fotográfica *LEICA MC120 HD*.

### **3.4. Ensaios de microdureza**

Os ensaios de microdureza foram realizados recorrendo ao equipamento *SHIMADZU HMV-G*, permitindo assim fazer indentações nas mesmas amostras utilizadas para a análise metalográfica.

As amostras foram analisadas através de 80 indentações nas amostras da primeira série de provetes, e de 40 no caso da segunda série. Cada indentação é feita com uma carga de 1,96 N, durante 15 seg. O espaçamento entre cada indentação utilizado foi de 1 mm longe da zona de soldadura, e de 0,5 mm perto da zona de soldadura.

Como algumas amostras apresentavam duas soldaduras nas extremidades e outras no centro, todos os resultados destes ensaios serão representados em função do centro das amostras.

### **3.5. Ensaios de tração/corte**

Os ensaios de tração/corte têm o objetivo de quantificar a resistência mecânica das ligações obtidas, no sentido de verificar se foi vantajoso o uso de ligações híbridas em alternativa aos outros dois métodos de ligação (soldadura e adesivo).

O equipamento utilizado nos ensaios foi a máquina de tração *SHIMADZU AGS-X*, com célula de carga de 100 kN, tendo-se considerado avanço de travessão de 1 mm/min

de acordo com a norma NP EN10 002 -1 (2006). Relativamente aos ensaios da segunda série, foi necessário colocar *tabs* com 3 mm de espessura nos provetes, de forma a evitar fenómenos de flexão e, conseqüentemente, garantir que o esforço de tração seja aplicado apenas no plano da junta. Cada um dos provetes foi apertado nas amarras do equipamento, e submetido à aplicação de um extensómetro mecânico de 50 mm de amplitude, com o intuito de medir as deformações globais relativas a cada ensaio.

O sistema ARAMIS, método de extensometria ótica, da marca GOM foi utilizado apenas nos ensaios da segunda série de provetes. Esta tecnologia permite medir as deformações locais existentes no decorrer dos ensaios. Para isso foi necessário previamente pintar uma das superfícies laterais dos provetes de branco e depois pulverizar com spray preto, de forma a que o equipamento consiga reconhecer os pontos da superfície. A tecnologia inerente a este sistema consiste na recolha de imagens durante os ensaios, e posterior tratamento recorrendo a um método de correlação digital de imagem. Este método permite obter informação relativa aos deslocamentos locais, a partir das posições iniciais e finais dos pontos da superfície. As imagens recolhidas pelo ARAMIS no decorrer dos ensaios foram posteriormente analisadas recorrendo ao *software GOM Correlate V8 SR*.

## **4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS**

No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados, com base na literatura existente relacionada com as temáticas abordadas neste trabalho.

### **4.1. Morfologia dos provetes**

Como anteriormente referido, no desenvolvimento deste trabalho foram concebidas duas séries de provetes. A ideia inicial era obter juntas com uma geometria “dentada”, em que os dois componentes a juntar fossem “encaixados” um no outro, de forma a tentar simular as configurações de junta habitualmente existentes na indústria automóvel. Foi nesse sentido que foi feita a primeira série de provetes. Mas, por apresentar partes com espessura muito reduzida, fez com que o processo de soldadura destruísse grande parte dos provetes híbridos desta primeira série. Este fator levou a que a resistência mecânica dos provetes da primeira série fosse posta em causa logo à partida, levando assim à necessidade de redesenhar a junta, de forma a se obterem resultados passíveis de serem comparados com alguma confiança. A figura 4.1 mostra os efeitos do processo de soldadura quando executados perto de uma zona de espessura reduzida.

A forma dos provetes foi então redesenhada, de maneira a evitar espessuras tão reduzidas como as existentes nos provetes da primeira série. A espessura mínima dos aderentes passou de 0,5 mm no caso da primeira série, para 2,8 mm no caso da segunda série.

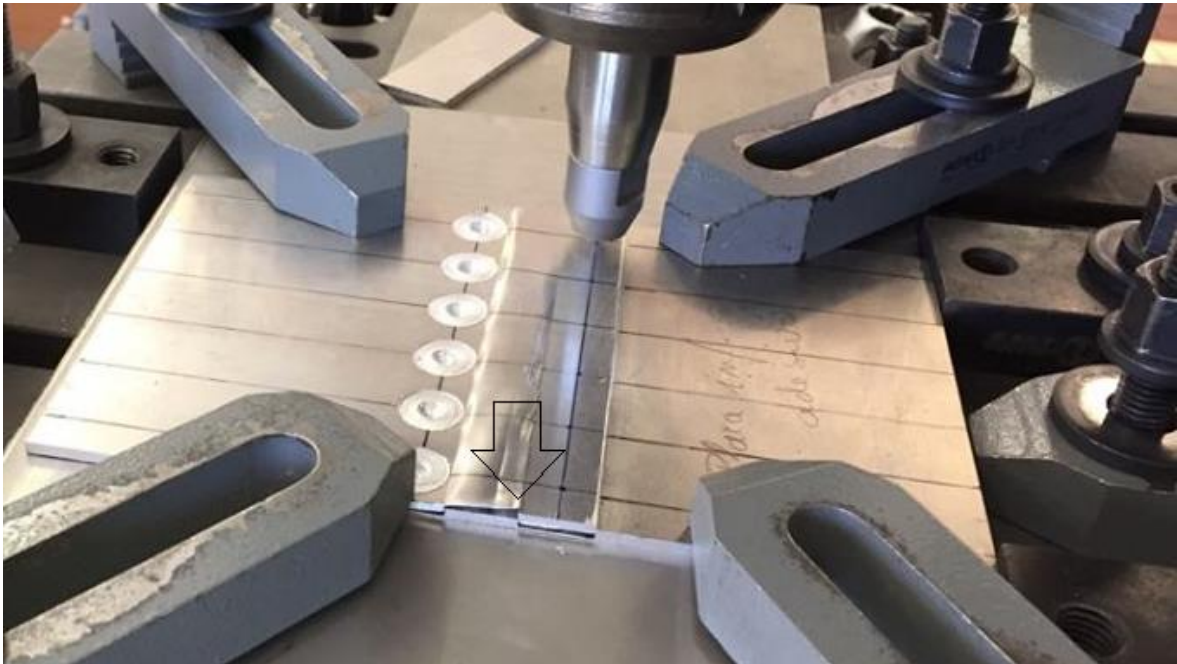


Figura 4.1 – Consequência de partes com espessura muito reduzida no caso dos provetes da primeira série.

#### 4.1.1. Macrografia das zonas de soldadura

Nesta secção pretende-se mostrar as macrografias obtidas em cada tipo de provetes estudados, de modo a analisar alguns fenómenos habituais consequentes da soldadura FSSW, e a discutir os parâmetros utilizados neste processo. As figuras 4.2 a 4.7 mostram as macrografias obtidas relativas aos provetes colados, soldados e híbridos, em ambas as séries.

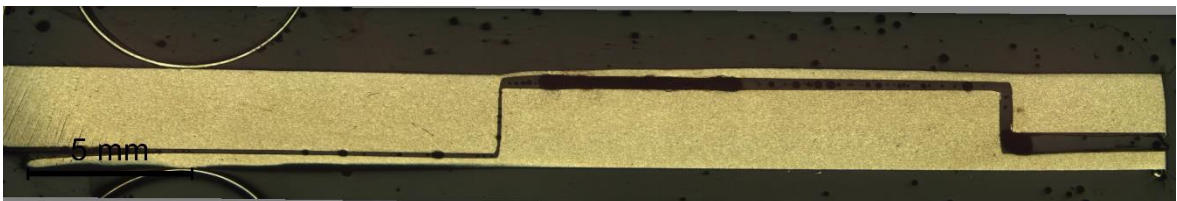


Figura 4.2 – Macrografia do provete colado B-1.6.



Figura 4.3 – Macrografia do provete colado B-2.6.



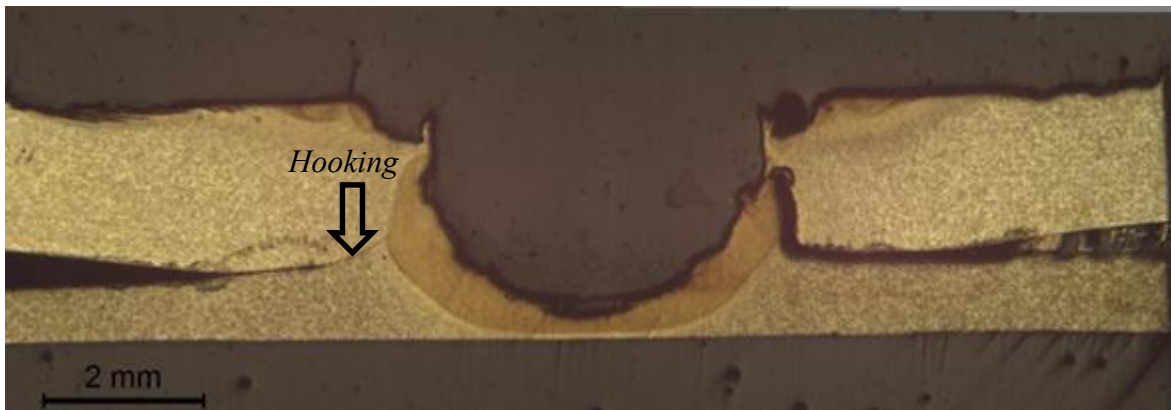


Figura 4.4 – Macrografia do provete soldado W-1.6.

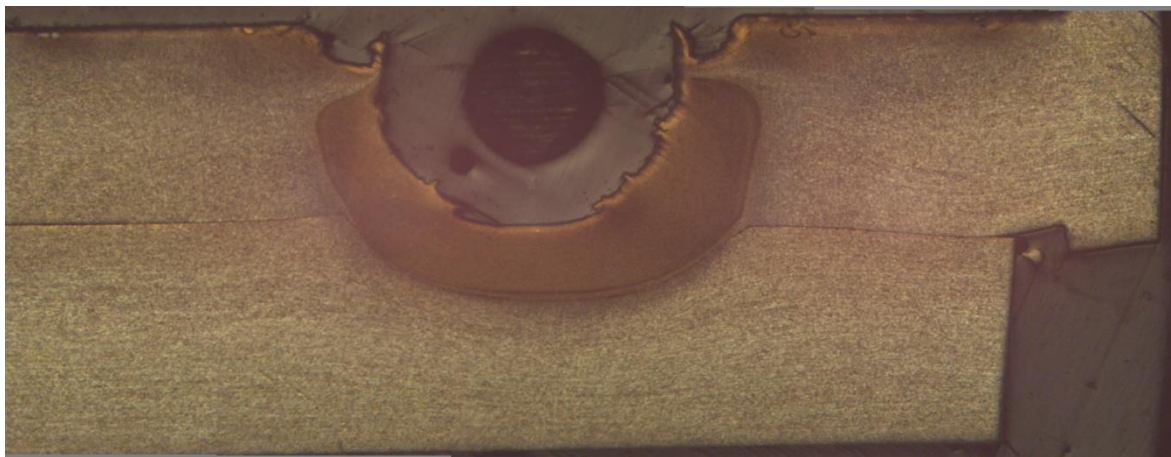


Figura 4.5 – Macrografia do provete soldado W-2.6.

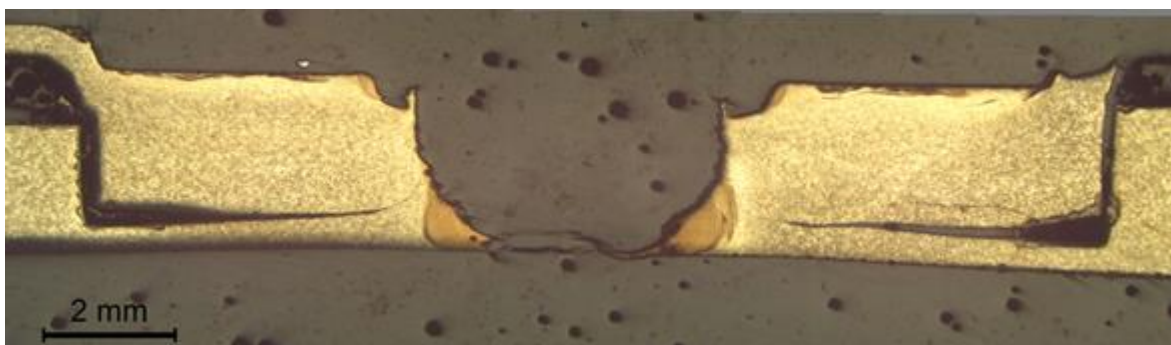


Figura 4.6 – Macrografia do provete híbrido H-1.2.



Figura 4.7 – Macrografia do provete híbrido H-2.6.

Nos provetes B-1.6 e B-2.6, figuras 4.2 e 4.3, para além de se visualizarem defeitos na colagem, é observável também algum adesivo fora do local que estaria reservado à sua aplicação, havendo vestígios de cola em toda a zona sobreposta.

A figura 4.4 mostra a presença de um elevado fenómeno de *hooking* no provete W-1.6, o que condiciona fortemente a resistência mecânica da junta. Já o provete W-2.6, figura 4.5, apresenta uma soldadura sem grandes defeitos a considerar.

O provete híbrido H-1.2, figura 4.6, apresenta defeitos na colagem, nível de *hooking* elevadíssimo e adesivo em locais onde não devia existir. Tendo em conta que o adesivo foi curado antes do processo de soldadura, as temperaturas induzidas podem ter provocado perdas de propriedade do adesivo [5], fator este que, aliado ao fenómeno de *hooking* forte, contribui fortemente para o declínio da resistência mecânica deste tipo de provetes.

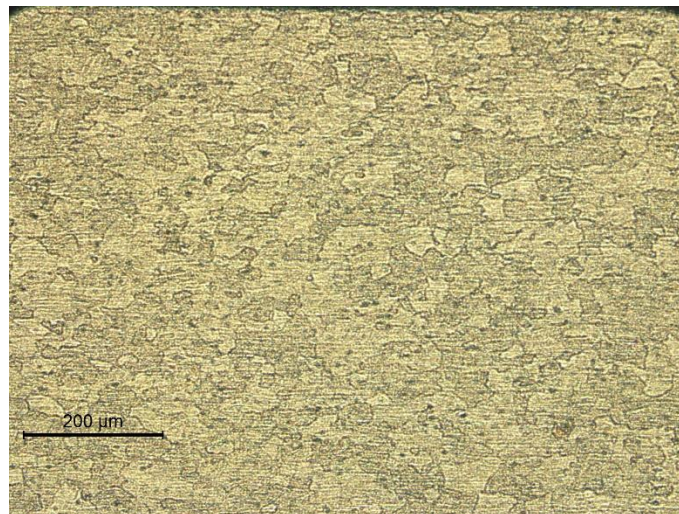
Relativamente ao provete híbrido H-2.6, figura 4.7, é notoriamente inexistente a ligação entre os dois elementos que constituem a junta. Este fenómeno deve-se ao facto de existir adesivo na zona de soldadura, constituindo este elemento uma barreira à mistura do material da chapa superior com a inferior durante o processo de soldadura. Para além disso, a penetração insuficiente da ferramenta pode ter contribuído significativamente para esta soldadura defeituosa, e conseqüente perda de propriedades mecânicas da ligação.

## **4.2. Análise metalográfica**

Pretende-se apresentar neste subcapítulo as micrografias obtidas, relativamente aos provetes híbridos e soldados de ambas as séries. A análise à micrografia dos provetes colados é desnecessária, na medida em que apenas apresenta a micrografia habitual do material de base do qual a junta é constituída.

### **4.2.1. Microestrutura do material de base**

A ordem microestrutural do material de base (MB) é influenciada pelo processo de fabrico, e pelo tratamento térmico aplicado nas chapas. A figura 4.8 apresenta a micrografia do material de base da liga de alumínio AA5083-H111. A microestrutura do MB é constituída por grãos com geometria muito irregular, com dimensão de aproximadamente 18  $\mu\text{m}$  [32].



**Figura 4.8 – Microestrutura do material de base.**

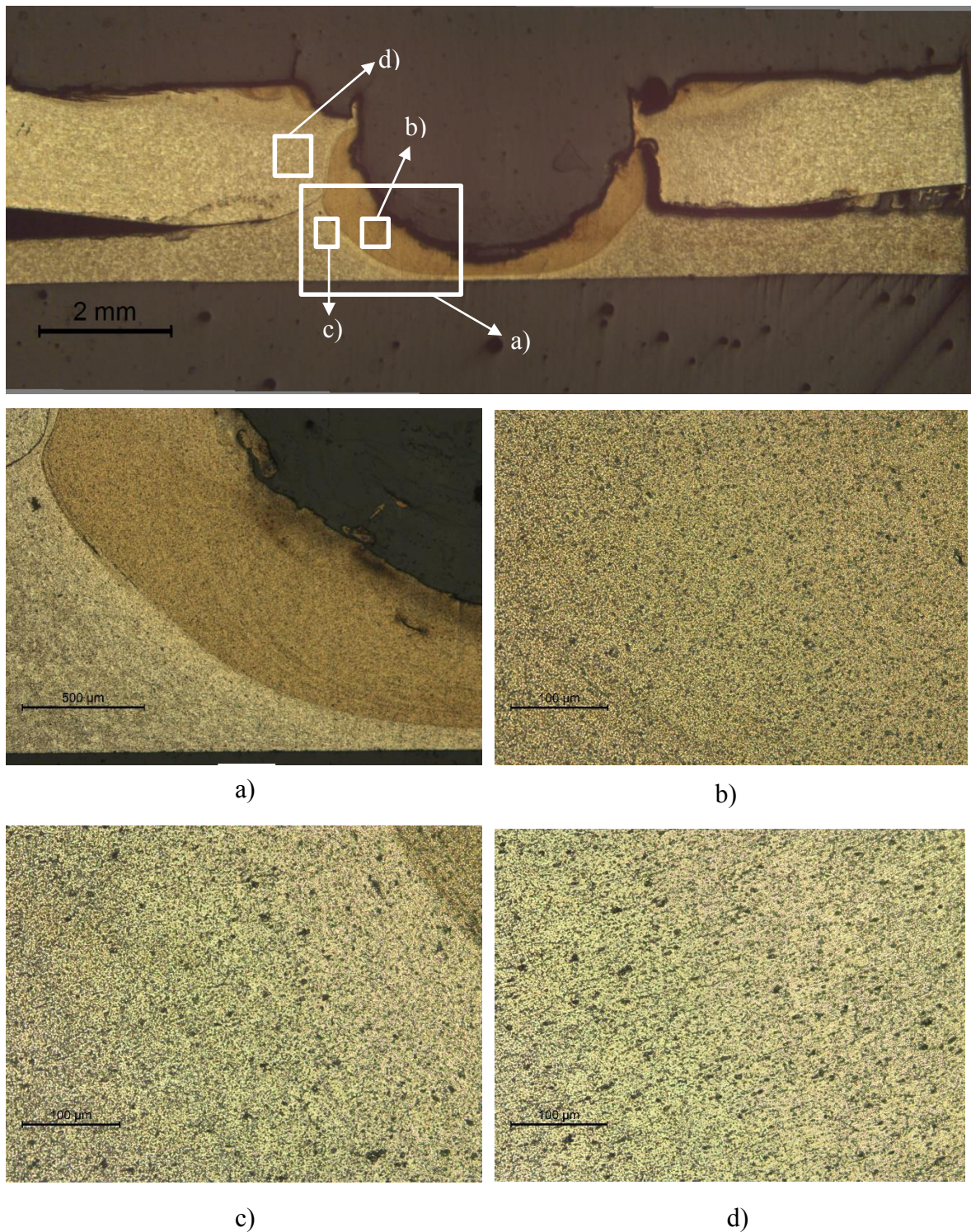
#### **4.2.2. Microestrutura dos provetes soldados.**

As figuras 4.9 e 4.10 identificam as regiões microestruturais obtidas no processo de soldadura FSSW, nas amostras dos provetes soldados da primeira e segunda série, respetivamente. Essas zonas são constituídas por grãos equiaxiais muito refinados, dificilmente distinguíveis em microscopia ótica.

As figuras 4.9 a) e 4.10 a) representam a zona de soldadura nos provetes de ambas as séries. Nestas imagens distinguem-se claramente 3 zonas com tamanhos de grão distintos; a zona de mistura (ZM), a zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA) e a zona termicamente afetada (ZTA).

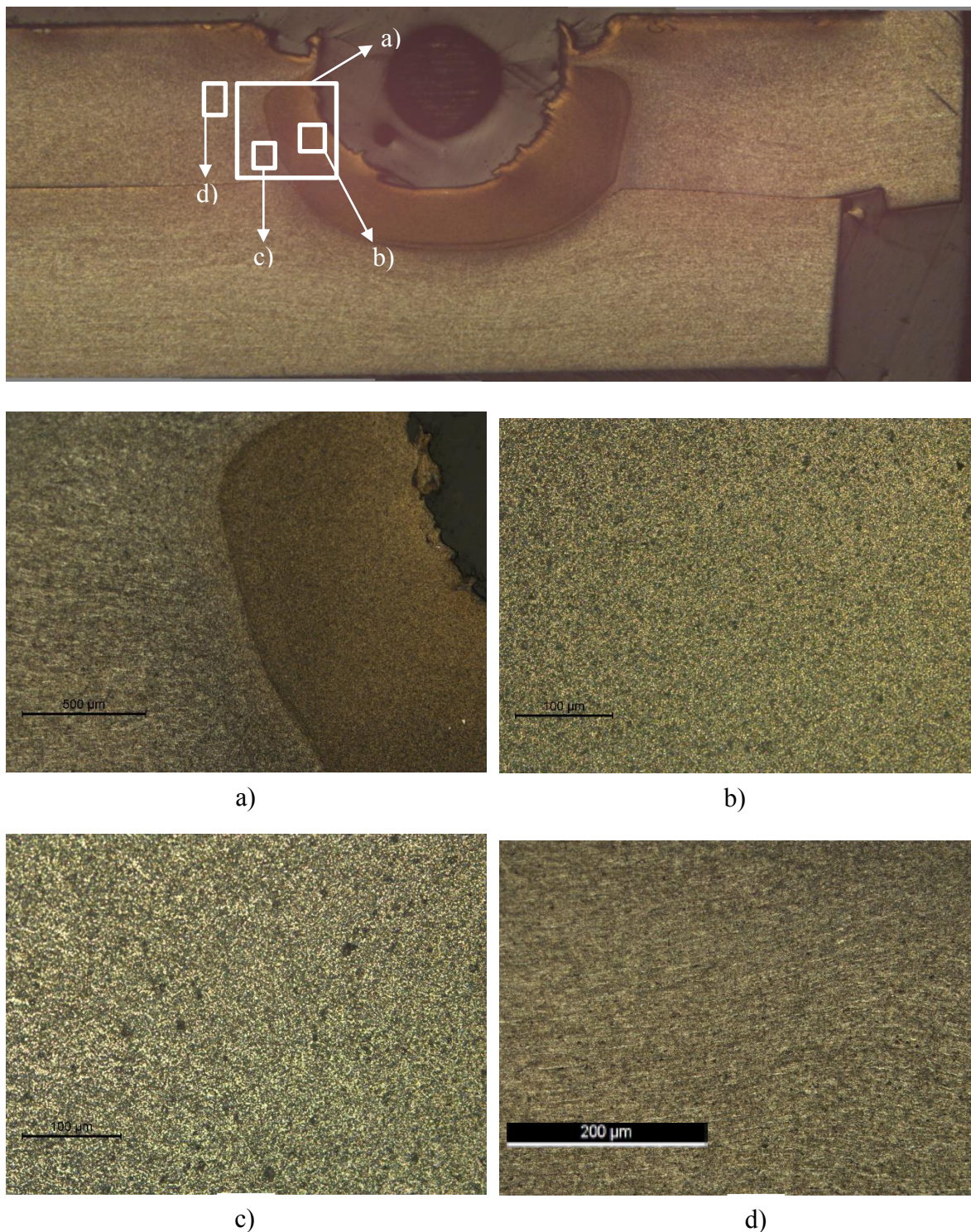
Após comparação das figuras 4.9 e 4.10, facilmente se identifica a ZM como a região com tamanho de grão mais reduzido. É nesta zona que se gera maior temperatura durante o processo da soldadura, devido à energia friccional proveniente do contacto da ferramenta com o material da junta. No entanto, após o recuo da ferramenta, a parte superior da ZM fica exposta ao ar ambiente promovendo, assim, a troca de calor por convecção e por condução, fazendo com que o arrefecimento seja mais rápido do que nas outras regiões. Consequentemente, o grão não tem tempo para crescer tanto como nas outras zonas indicadas, obtendo uma estrutura refinada e equiaxial [23].





**Figura 4.9–** Micrografia obtido no provete W-1.6: a) zona de soldadura, b) zona de mistura, c) zona termo-mecanicamente afetada e d) zona termicamente afetada.





**Figura 4.10 – Micrografia obtida no provete W-2.6: a) zona de soldadura, b) zona de mistura, c) zona termo-mecanicamente afetada e d) zona termicamente afetada d)**

A ZTMA situa-se entre a ZM e a ZTA, e representa a região afetada não só pelos gradientes térmicos gerados, mas também pela deformação mecânica provocada pela ação

da ferramenta. Esta deformação provoca o alongamento dos grãos comparativamente às outras zonas [23].

A ZTA é afetada apenas pelos gradientes térmicos induzidos no processo de soldadura, mas não tanto como as outras regiões, devido ao maior afastamento da zona de contacto da ferramenta ZTMA [23].

### **4.2.3. Microestrutura dos provetes híbridos**

As figuras 4.11 e 4.12 apresentam as microestruturas obtidas nas amostras dos provetes híbridos das séries 1 e 2, respetivamente. Também aqui a visão da microestrutura é difícil em microscopia ótica.

À semelhança dos provetes soldados, nas amostras dos provetes híbridos identificam-se 3 zonas com metalografia distinta, sendo elas a ZM, a ZTMA e a ZTA. Em ambas as séries, a ZM apresenta grão muito refinado, a ZTMA apresenta um grão alongado comparativamente ao presente nas outras regiões, e a ZTA uma estrutura diferente das anteriores com algumas semelhanças ao material de base.

É importante realçar que a placa inferior do provete H-2.6 não apresenta grandes alterações microestruturais, o que confirma a ligação débil apresentada pelos provetes híbridos da segunda série.



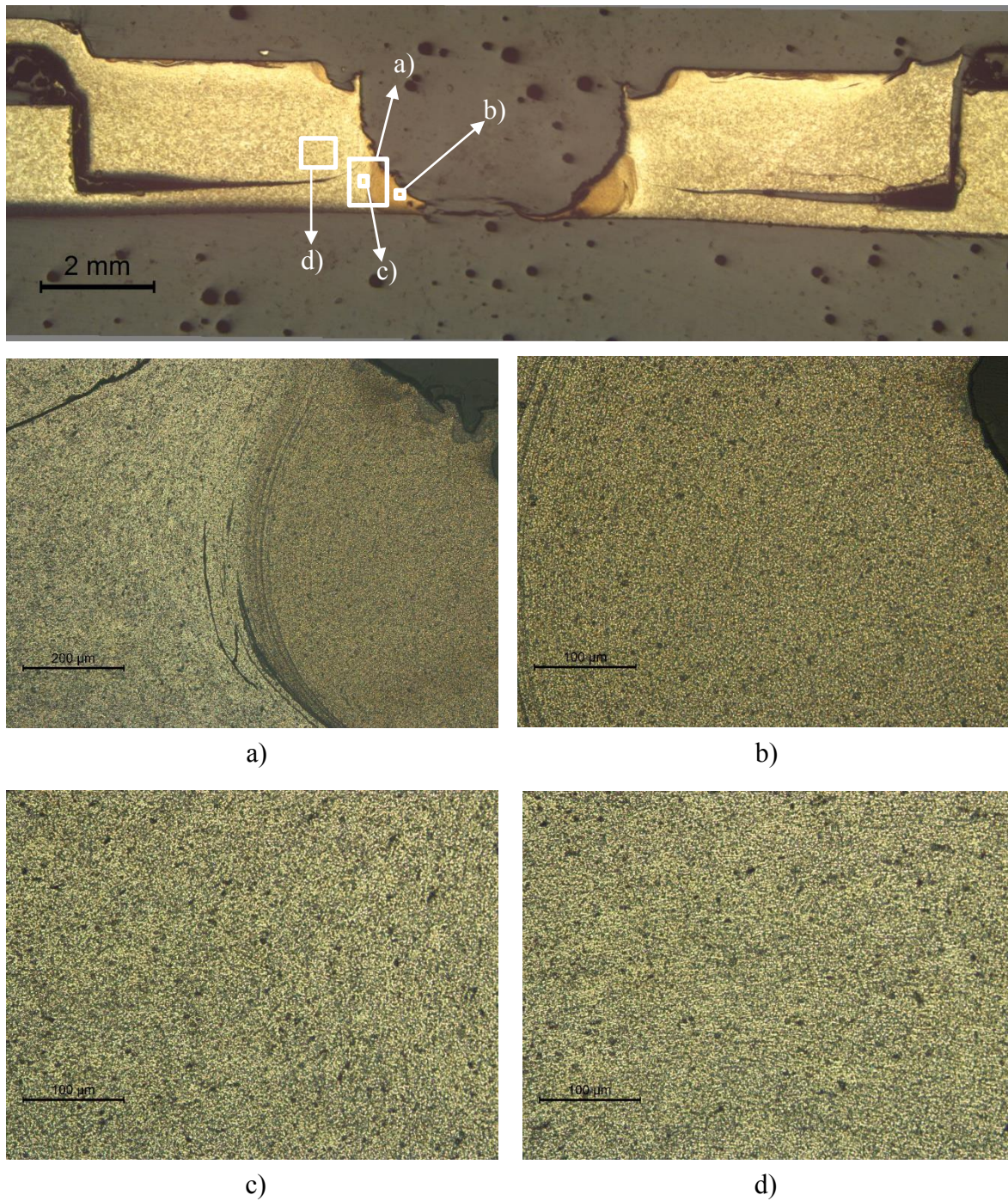
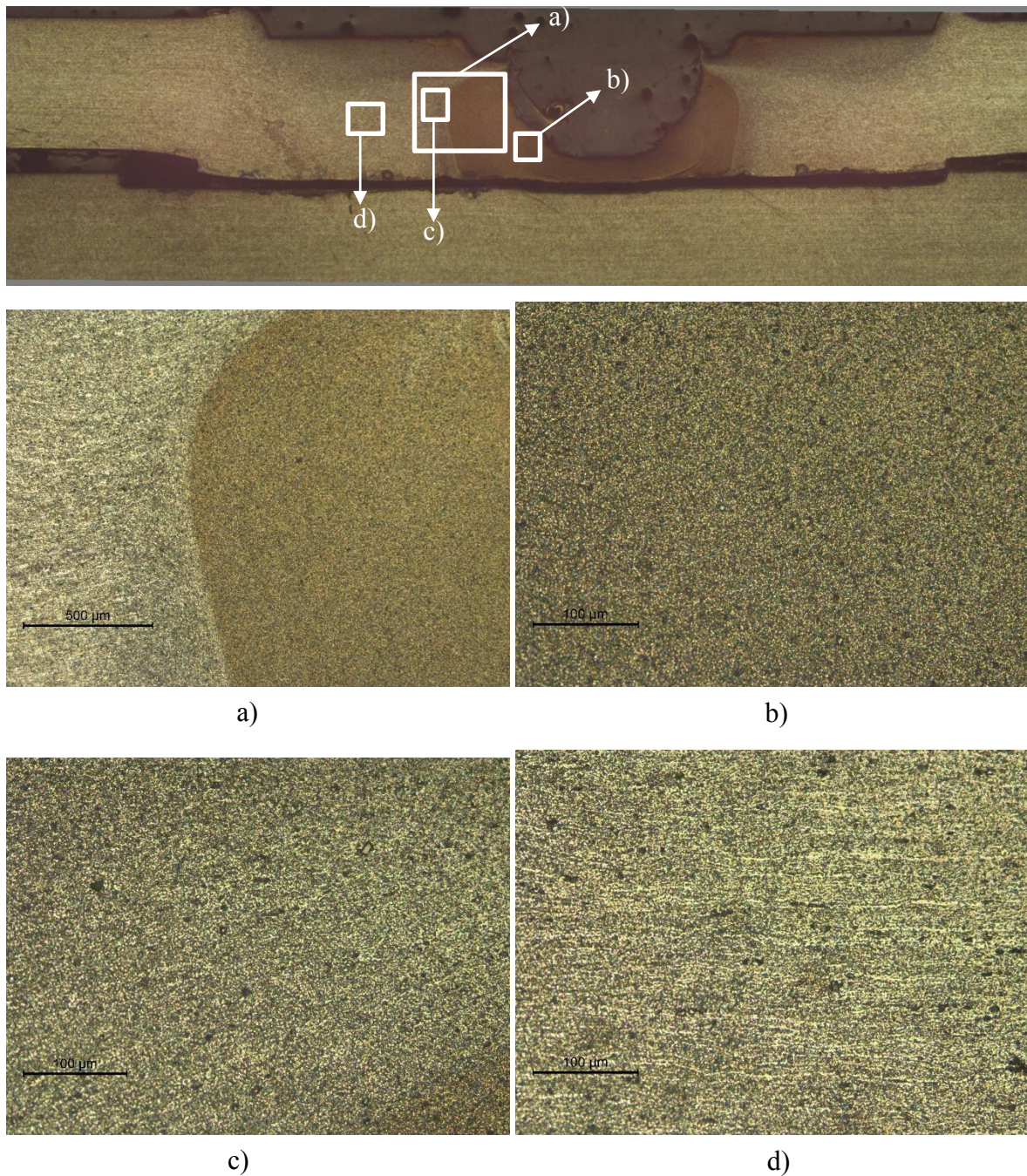


Figura 4.11 – Micrografia obtida no provete H-1.2: a) zona de soldadura, b) zona de mistura, c) zona termomecanicamente afetada e d) zona termicamente afetada.



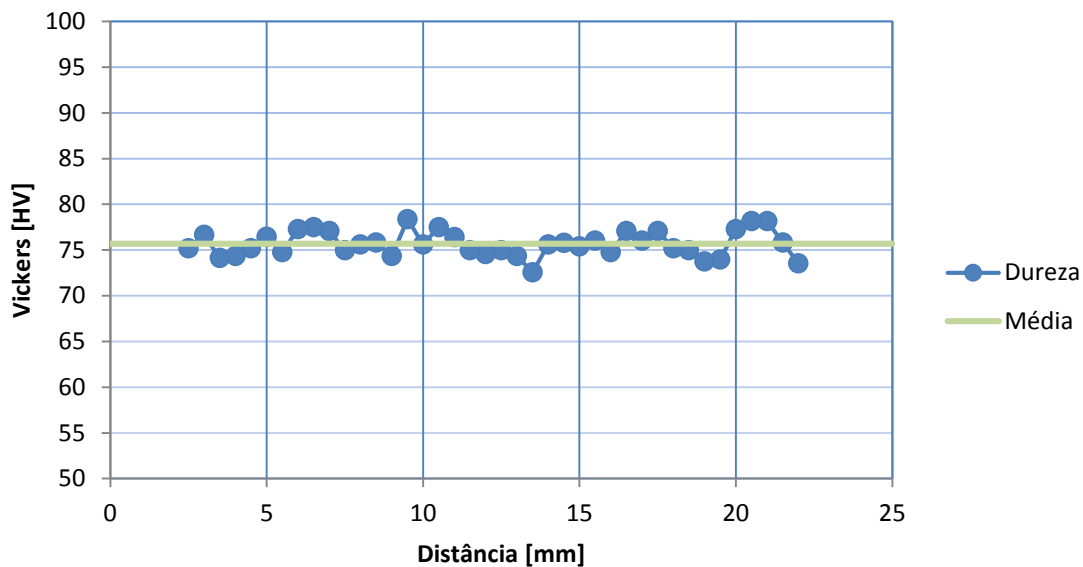


**Figura 4.12–** Micrografia obtida no provete H-2.6: a) zona de soldadura, b) zona de mistura, c) zona termomecanicamente afetada e d) zona termicamente afetada.

### 4.3. Análise de Microdureza

Os resultados provenientes dos ensaios de microdureza são apresentados neste subcapítulo. Note-se que apenas foram analisadas amostras dos provetes híbridos e soldados de ambas as séries, uma vez que os provetes colados não apresentam alterações a nível de dureza relativamente ao material de base.

Parte das chapas da liga de alumínio AA5083-H111 utilizada na concepção dos provetes foi analisada, de forma a ser possível obter um valor de dureza relativamente à região do material de base. Assim, será exequível estabelecer uma comparação deste parâmetro com o de outras regiões metalográficas. De acordo com a figura 4.13, a média dos valores obtidos corresponde a uma dureza de  $75,68 HV_{0,2}$ , sendo este valor muito próximo do indicado na literatura para a liga de alumínio utilizada no presente estudo (<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2804>).



**Figura 4.13 – Valores de dureza obtidos para o material de base.**

No apêndice G encontra-se uma imagem onde se apresentam os locais do provete onde foram feitas as indentações, assim como o espaçamento entre cada uma. As figuras 4.14 a 4.17 representam os gráficos com os resultados obtidos nas amostras dos provetes soldados e híbridos, nas duas séries. Os valores de dureza são indicados nos gráficos em função da distância ao centro das amostras.

É importante referir que as amostras dos provetes soldados apresentam dois pontos de soldadura perto das extremidades da área sobreposta, e os provetes híbridos apresentam uma soldadura na região central dessa zona. Em qualquer um dos casos, os limites da ZM estão indicados no gráfico. Para além disso, relembra-se que os provetes da série 1 foram analisados em 40 pontos, pertencendo entre eles a uma ou outra placa da junta. Já as amostras dos provetes da série 2 foram analisadas em 80 pontos, 40 em cada placa.

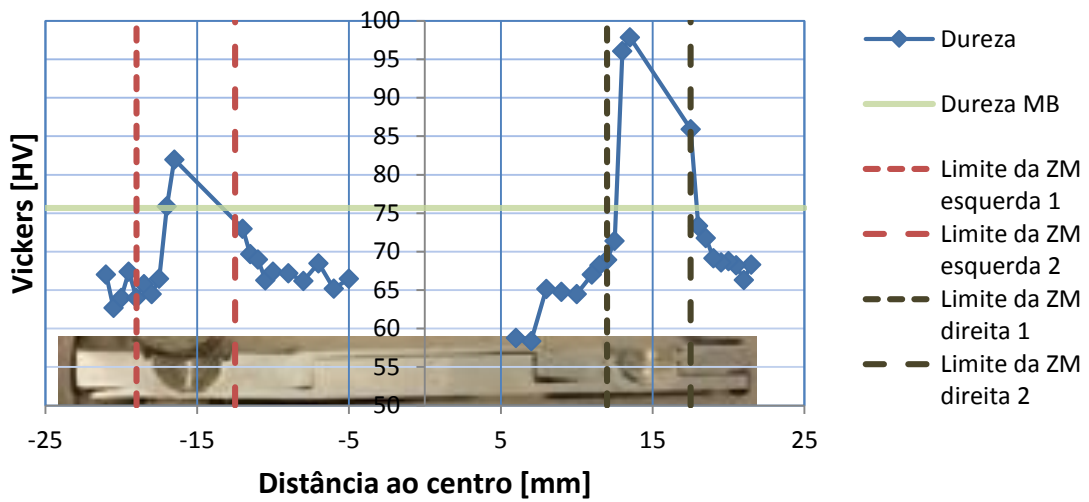


Figura 4.14 – Resultados dos ensaios de microdureza efetuados no provete W-1.6.

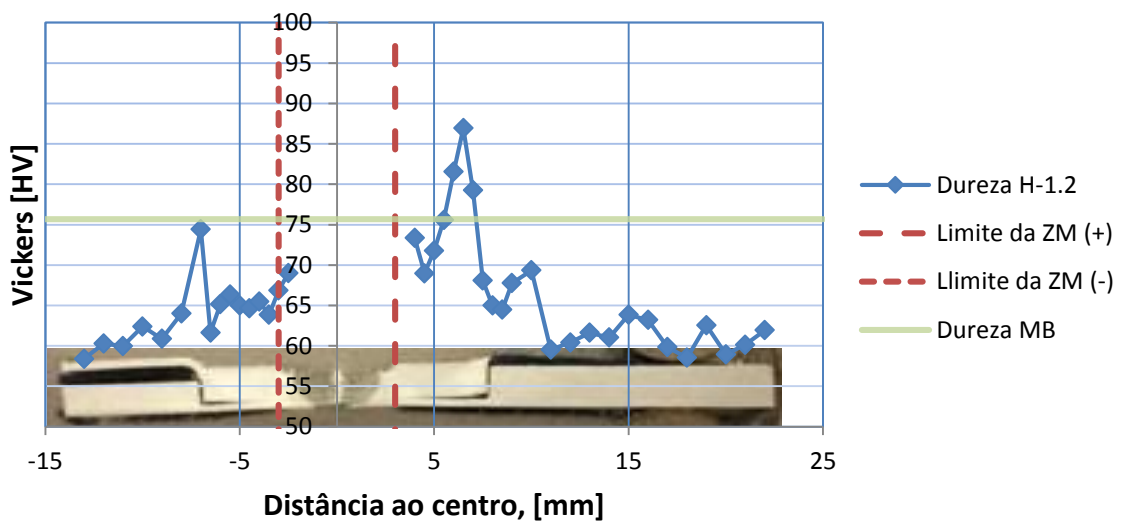


Figura 4.15 – Resultados dos ensaios de microdureza efetuados no provete híbrido H-1.2.



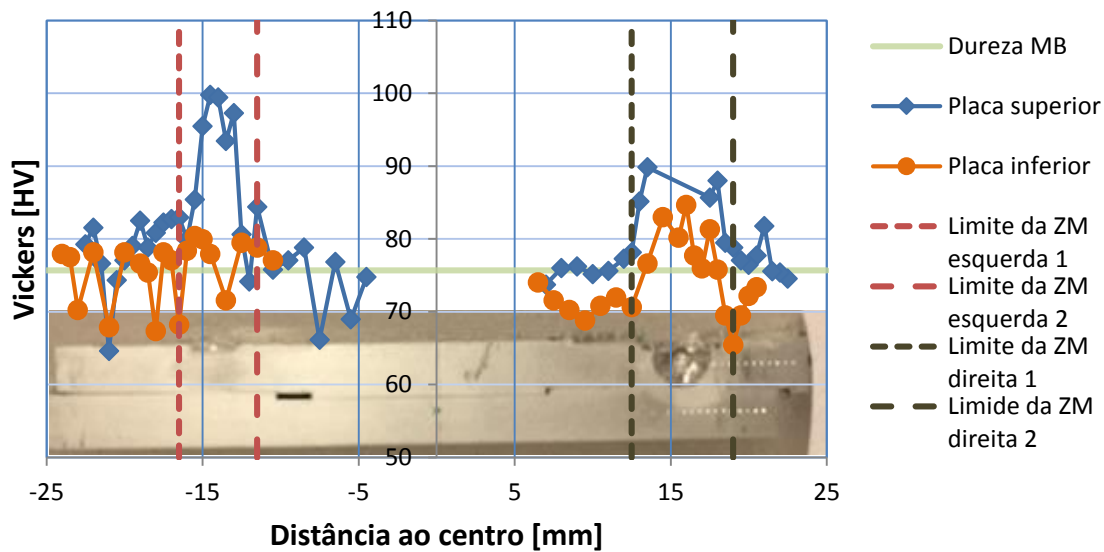


Figura 4.16 – Resultados dos ensaios de microdureza efetuados no provete soldado W-2.6.

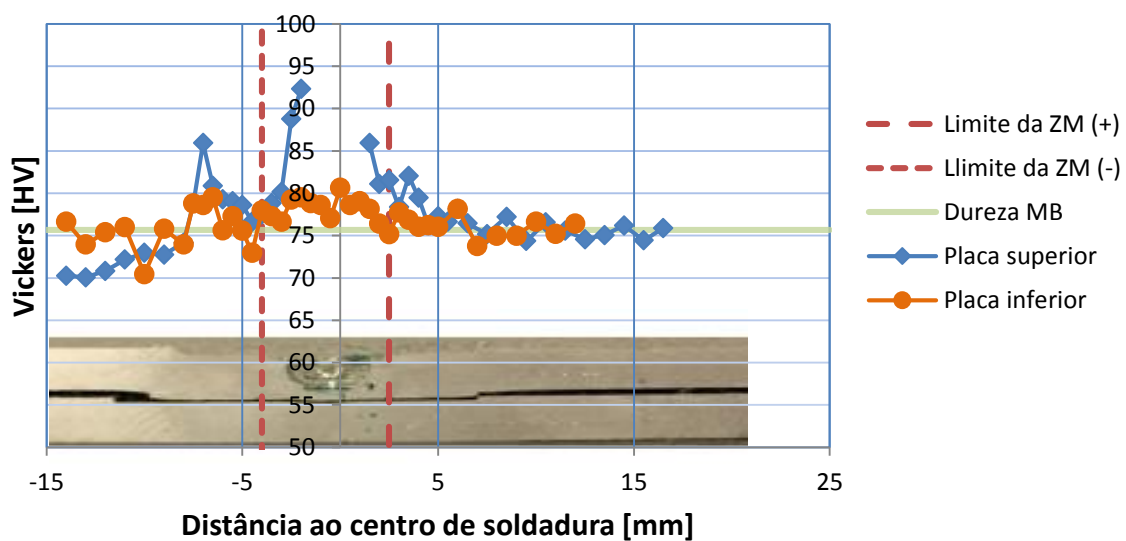


Figura 4.17 – Resultados dos ensaios de microdureza efetuados no provete híbrido H-2.6.

Após observação das figuras 4.14 a 4.17 conclui-se que, para todos provetes, os níveis de dureza são mais elevados em regiões mais próximas do centro de soldadura. De acordo com a literatura, este comportamento deve-se ao facto de as zonas mais próximas do centro de soldadura corresponderem a locais onde existiram maiores deformações mecânicas, provenientes do contacto da ferramenta FSSW com a amostra [23].



Os valores mínimos também correspondem a zonas onde a microestrutura corresponde ao MB, devido ao elevado tamanho de grão existente nesta zona [23].

É possível identificar, em todos os gráficos anteriores (figuras 4.14 a 4.17), uma descida do nível de dureza antes da ZM. Alguns trabalhos indicam que, no caso de ligas tratadas termicamente, este comportamento se deve ao crescimento e dissolução de precipitados à volta dessa zona, provocados pelos ciclos térmicos induzidos pelo processo de soldadura FSSW [27]. No caso da liga de alumínio utilizada neste trabalho (não tratada termicamente), o aumento da dureza ocorre devido à deformação plástica não compensada pelo recozido. Quando há redução de dureza é devida ao recozimento induzido pelo aquecimento.

Não se verifica simetria dos valores obtidos no caso dos gráficos dos provetes da série 2 (W-2.6 e H-2.6), figuras 4.16 e 4.17. Os valores de dureza da parte esquerda das amostras são mais elevados do que os apresentados à direita. A ocorrência deste fenómeno é notória apenas na análise às placas superiores desta série de provetes. O lado esquerdo representa uma zona mais próxima da extremidade da placa superior em ambos os provetes, ou seja, a parte esquerda está mais exposta à convecção do que à condução, contrariamente ao que acontece do lado direito. Este fenómeno contradiz a literatura existente, pois o lado que está sujeito à convecção liberta calor mais lentamente do que o lado favorável à condução. Essa perda de calor mais lenta leva à formação de precipitados responsáveis pela diminuição do nível de dureza. Assim sendo, a parte mais à esquerda deveria apresentar valores de dureza mais reduzidos, o que não se verificou [33].

A figura 4.18 ilustra o que foi descrito anteriormente. A parte direita é mais favorável à transmissão de calor por condução por representar a continuidade do material da placa superior, resultando numa maior acumulação de calor na parte esquerda devido à menor velocidade de arrefecimento por convecção.

Na figura 4.17 também é possível observar que não houve alterações significativas no nível de dureza na placa inferior da amostra do provete H-2.6, o que implica que esta zona não teve grandes alterações microestruturais. Este fator representa mais uma evidência da ligação mal conseguida nos provetes híbridos da segunda série.

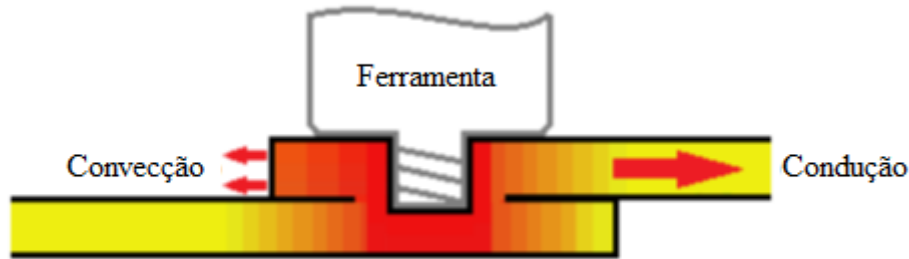


Figura 4.18 – Esquema de dissipação de calor numa junta sobreposta (adaptado de: [33]).

#### 4.4. Análise à resistência estática das ligações

Este subcapítulo tem o propósito de apresentar os resultados dos ensaios de tração e discuti-los com base na literatura existente. Os resultados são apresentados em gráficos que relacionam a força exercida nos provetes em função do deslocamento sofrido pelos mesmos.

##### 4.4.1. Ensaios de tração/corte dos provetes colados

As figuras 4.19 e 4.20 representam os resultados obtidos nos ensaios de tração/corte dos provetes colados das séries 1 e 2, respetivamente.

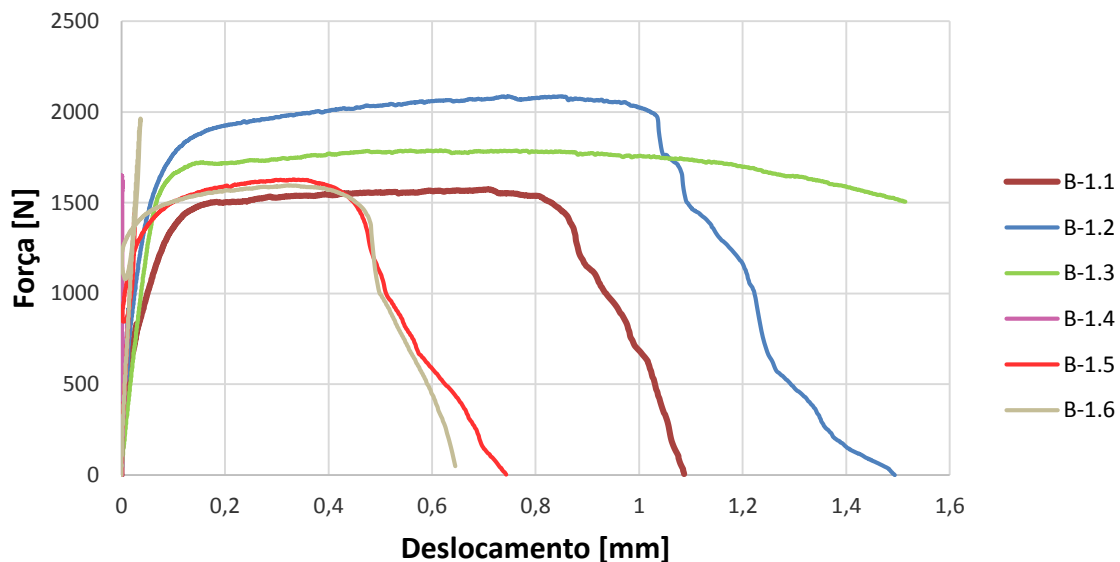


Figura 4.19 – Resultados dos ensaios de tração/corte dos provetes colados (B) da série 1.

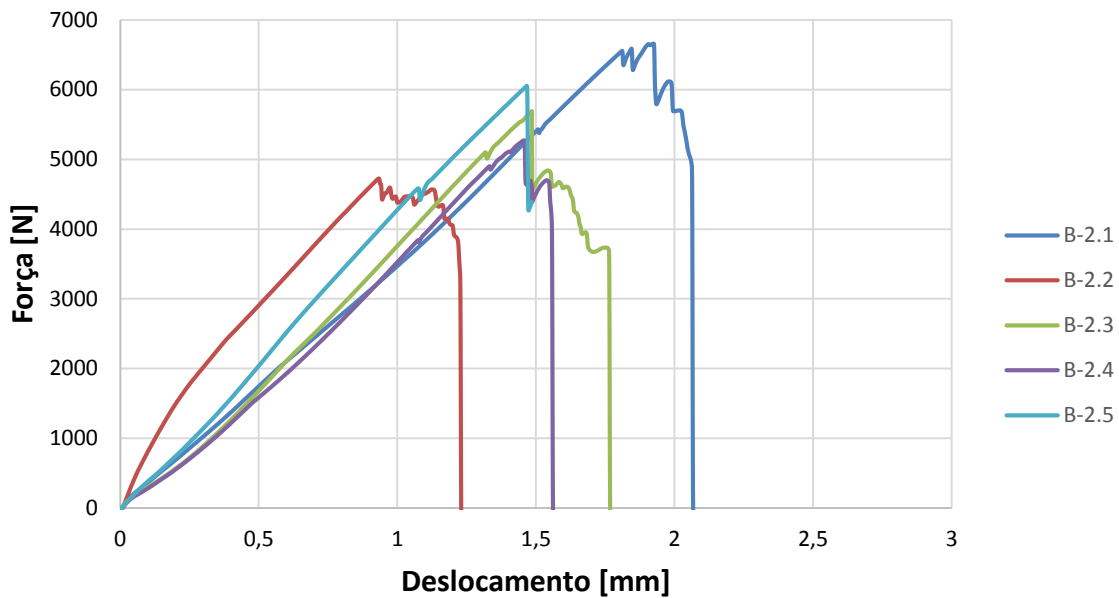


Figura 4.20 – Resultados dos ensaios de tração/corte dos provetes colados (B) da série 2.

Após análise da figura 4.20 conclui-se que os provetes colados da segunda série apresentam um comportamento quase linear, mantendo-se praticamente constante a razão entre a força e do deslocamento.

Também se identificam alguns provetes da primeira série cujos resultados obtidos provenientes do ensaio de tração/corte mostram comportamentos não habituais. Um exemplo disso é o ensaio do provete B-1.4, cujo comportamento não apresenta qualquer sentido, indiciando a possibilidade de ter existido algum problema com a colagem que terá cedido à tração de forma prematura.

Foram selecionadas curvas representativas de cada gráfico de forma a se tentar estabelecer a comparação entre provetes os resultados das diferentes séries, sendo elas a curva B-1.3 no caso da primeira série e a B-2.5 no caso da segunda. Os ensaios do provete B-1.3 e B-2.5 apresentam uma força máxima de 1789 N e de 6054 N, respetivamente.

#### 4.4.2. Ensaios de tração/corte dos provetes soldados

As figuras 4.21 e 4.22 representam os resultados dos ensaios de tração/corte dos provetes soldados das séries 1 e 2, respetivamente.

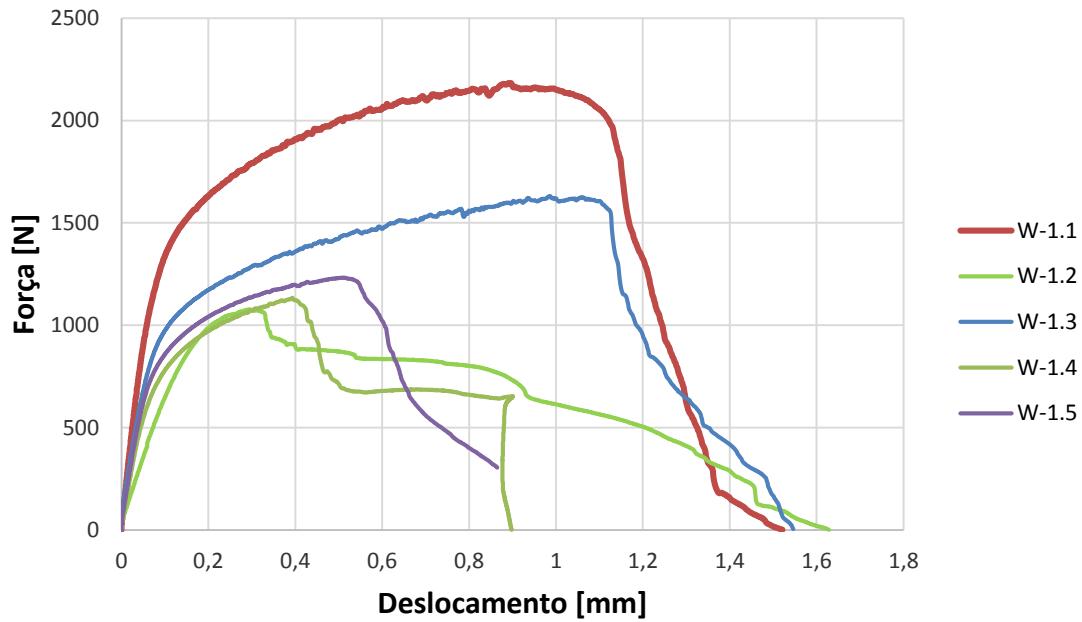


Figura 4.21– Resultados dos ensaios de tração/corte dos provetes soldados (W) da série 1.

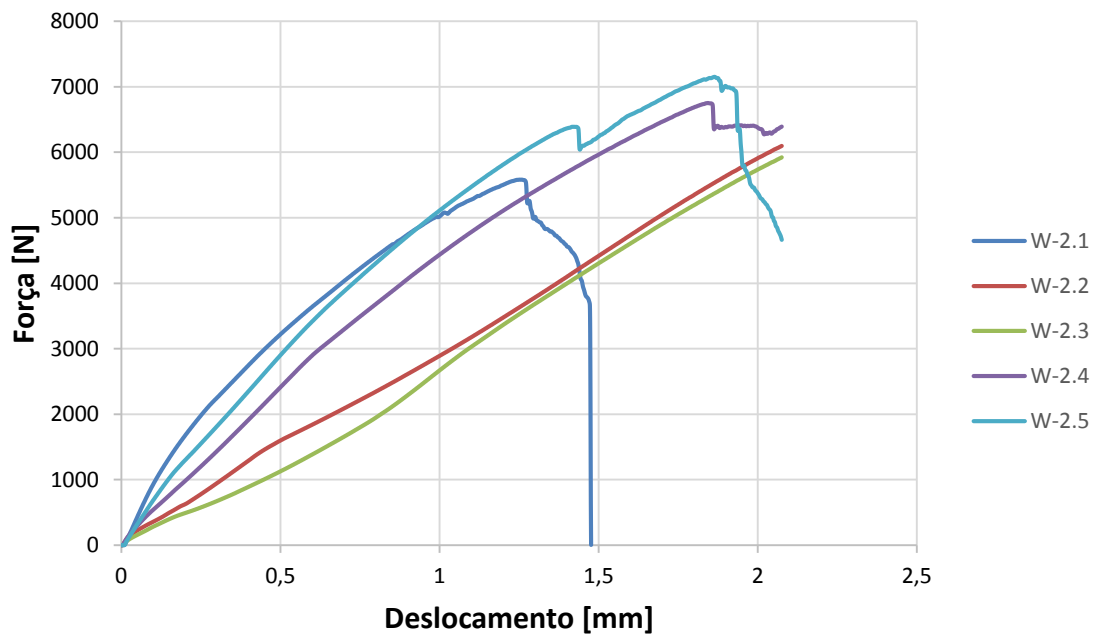


Figura 4.22 – Resultados dos ensaios de tração/corte dos provetes soldados (W) da série 2.

Também neste caso, os provetes soldados da segunda série apresentam um comportamento relativamente linear. As curvas representativas selecionadas foram a W-1.5 e a W-2.2, apresentando uma força máxima de 1232 N e 6097 N, respetivamente.

#### 4.4.3. Ensaio de tração/corte dos provetes híbridos

Os gráficos representativos dos resultados dos ensaios de tração/corte dos provetes híbridos da série 1 e 2 são representados pelas figuras 4.23 e 4.24.

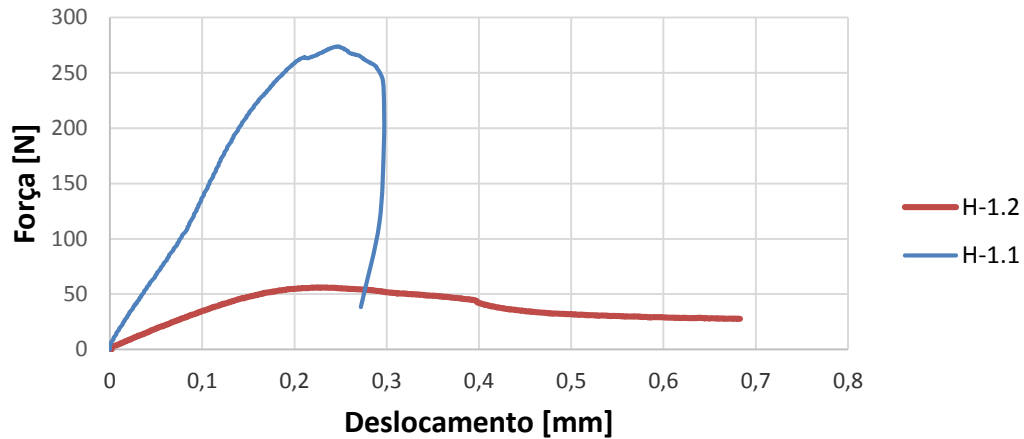


Figura 4.23– Resultados dos ensaios de tração/corte dos provetes híbridos (H) da série 1.

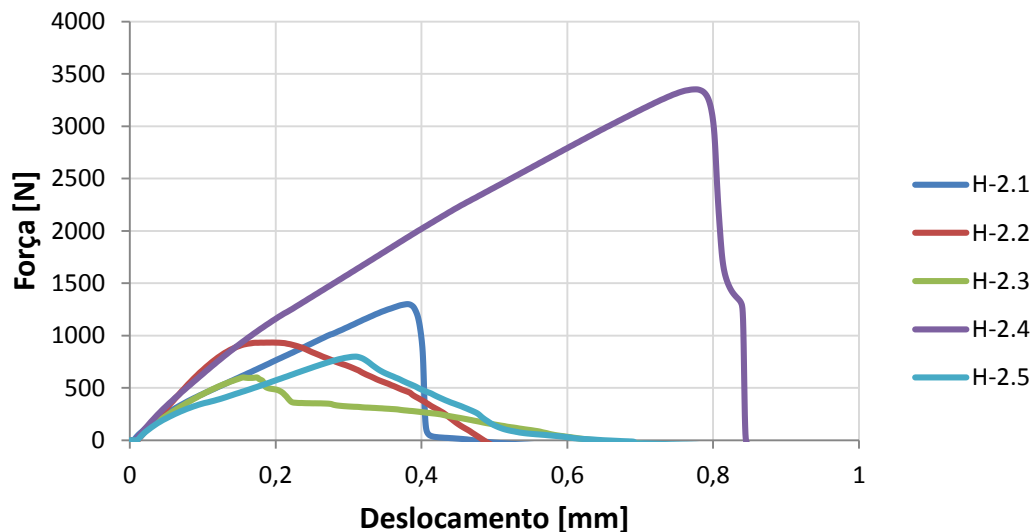


Figura 4.24– Resultados dos ensaios de tração/corte dos provetes híbridos (H) da série 2.

Parece evidente a disparidade entre os valores de algumas curvas no caso dos provetes híbridos. A curva H-1.1 apresenta um valor máximo de 78 N e a curva H-1.2 de 304 N, representando uma diferença de 74,4%. Sendo que apenas foi possível testar 2 provetes, e tendo os resultados dado valores bastante afastados, estes apenas são apresentados, mas não serão considerados para análise, já que o número de testes não é suficiente. Já na série 2, a curva H-2.1 apresenta um valor de força máxima de 1300 N e a curva H-2.4 de 3353 N, havendo assim uma diferença de 61,24 %. Esta desigualdade de

valores de força máxima em provetes da mesma série é mais um indício de eventuais falhas que possam ter ocorrido na ligação obtida nas juntas híbridas, tanto na primeira como na segunda série. Assim, pode-se concluir que as ligações híbridas apresentaram problemas na sua conceção, sendo que H-2.1 e H-2.4 mostram um comportamento típico de um ensaio de tração, e as restantes levam a pensar que terá ocorrido rotura prematura da ligação.

#### 4.4.4. Análise comparativa

De forma a ser possível estabelecer uma comparação viável foram calculadas as tensões máximas avaliadas em cada provete. Posteriormente foi calculada a média e o desvio padrão das tensões máximas para cada tipo de provete em cada série, estando os resultados indicados na tabela 4.1.

Parece importante referir que os provetes da série 1 não devem ser comparados aos da série 2. O facto de a configuração de junta apresentar diferenças entre as séries não permite a comparação entre as mesmas. Através da tabela 4.1 consegue-se perceber que os provetes que suportaram maiores esforços na primeira série foram os colados (B-1) e na segunda série os soldados (W-2), atingindo forças máximas de 1782 N e 6301 N, respetivamente. Foram as ligações híbridas em ambas as séries de provetes que menos força suportaram mediante os ensaios efetuados, nas quais se atingiram forças máximas na ordem dos 191 N no caso da primeira série e 1397 N no caso da segunda.

**Tabela 4.1 – Média e desvio padrão das forças máximas obtidas para os ensaios de cada tipo em cada série**

Tipo e série	Força Média [N]	Desvio padrão [N]
B-1	1782	230
B-2	5994	535
W-1	1452	934
W-2	6301	638
H-1	191	160
H-2	1397	1123

Em concordância com o que foi exposto no ponto 4.1.1 em termos de macrografia, e em 4.3 relativamente à microdureza, conclui-se que as ligações híbridas não

foram bem-sucedidas. Como já foi referido anteriormente, a falta de penetração da ferramenta na junta, e o facto de existir adesivo em zonas onde não deveria haver, foram fatores que contribuíram para a fraca união deste tipo de ligações. A débil resistência evidenciada por este tipo de juntas veio confirmar o exposto anteriormente.

O elevado valor do desvio padrão nas ligações híbridas significa que ocorreu uma variação elevada nos ensaios de cada provete, sendo este mais um fator indicador de uma má ligação relativamente a este tipo de ligações.

As curvas com os valores de força máxima mais próximos das médias calculadas, para cada tipo de provete, em ambas as séries, foram selecionadas, de forma a poder elaborar os gráficos representados nas figuras 4.25 e 4.26, onde se apresentam as curvas representativas de cada tipo de provetes para a série 1 e 2, respetivamente.

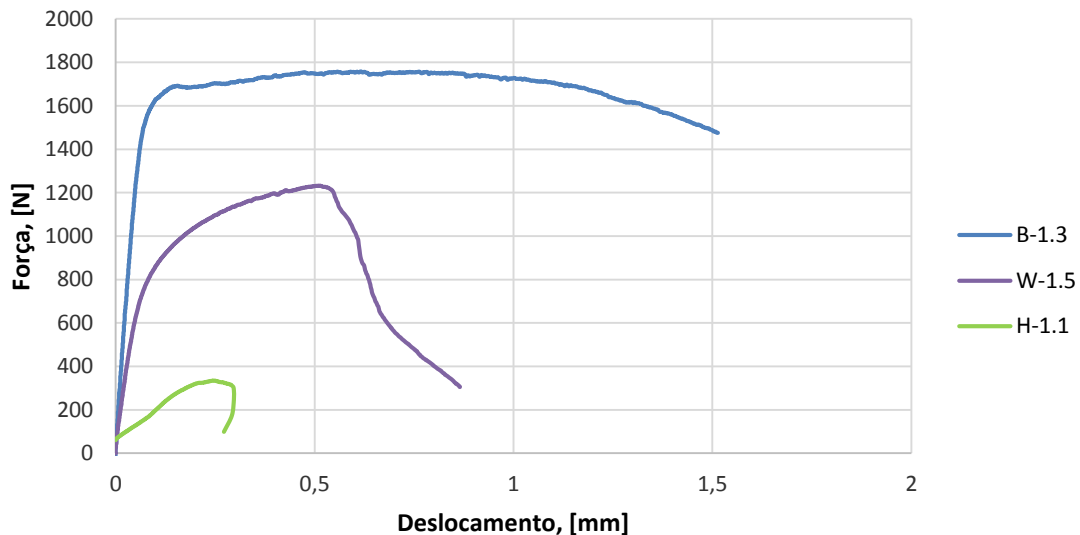


Figura 4.25 – Curvas comparativas dos 3 tipos de ligação da série 1.

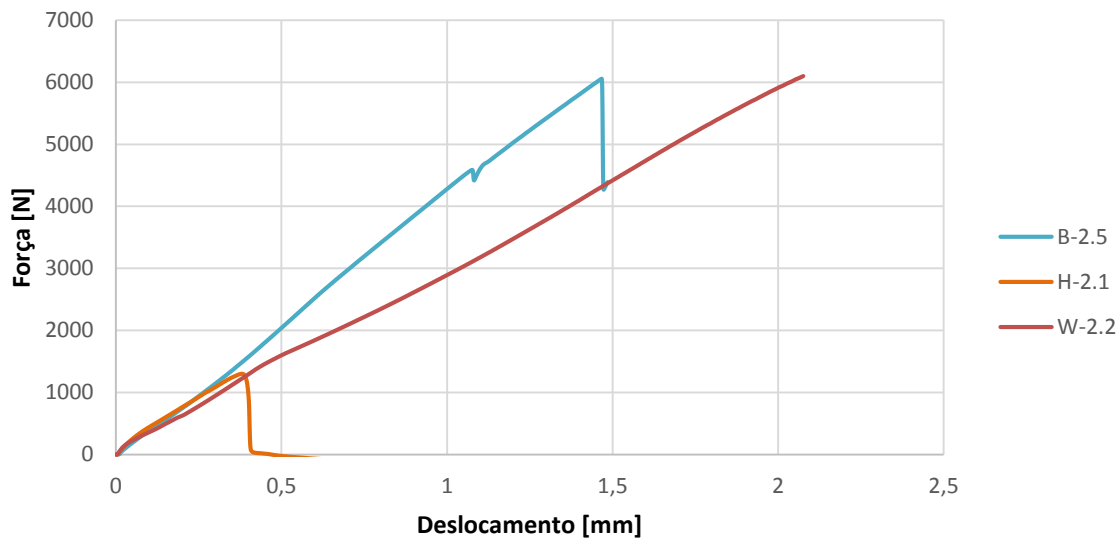


Figura 4.26 – Curvas comparativas dos três tipos de ligações da série 2.

Resumindo, o uso de adesivo e da soldadura FSSW simultaneamente mostrou-se prejudicial à resistência das ligações em ambas as séries, sendo que não foram observadas diferenças significativas entre os outros dois tipos de ligação.

De seguida, serão enumeradas as possíveis causas que justifiquem o declínio da resistência mecânica das ligações híbridas comparativamente às coladas e soldadas.

Na série 1:

- A colagem dos provetes híbridos apresenta defeitos a nível macroscópico, indiciando que poderá ter havido problemas na colagem, não detetados antes dos ensaios.
- Presença de adesivo no local de soldadura, contrariamente ao que se pretendia.
- Elevado fenómeno de *hooking* existente na macrografia do provete híbrido.
- Espessura muito reduzida em algumas partes dos provetes. O facto de terem sido os provetes colados desta série os que mais esforços suportaram corrobora esta hipótese.

Na série 2:



- Forte presença de adesivo na zona de soldadura, contrariamente ao pretendido. A cola pode ter constituído uma barreira para o processo de soldadura, prejudicando a qualidade da ligação.
- Penetração insuficiente da ferramenta, na medida em que não se evidencia a ligação do material das duas placas na macroscopia dos provetes híbridos. Outro indício da existência deste problema está nos ensaios de microdureza, uma vez que os valores obtidos na placa inferior dos provetes híbridos não indicam alterações significativas a nível microestrutural, evidenciando que possam ter surgido eventuais contrariedades durante o processo de soldadura, não identificados antes dos ensaios.

#### **4.5. Análise às deformações locais**

Para este trabalho, a análise das deformações locais foi feita com o uso à extensometria ótica neste caso através do equipamento ARAMIS. Esta tecnologia permitiu capturar imagens durante o ensaio de tração/corte, e as mesmas observadas através do sistema de correlação de imagem digital (DIC). O software inerente a este sistema permite analisar as fotos capturadas em intervalos de 1 seg durante o ensaio, de forma a comparar os deslocamentos sofridos em cada ponto da superfície em estudo, obtendo assim informação sobre a deformação pontual.

Note-se que apenas os provetes da série 2 foram analisados relativamente às deformações locais.

##### **4.5.1. Ligação colada**

Pretende-se analisar a evolução da rotura que ocorreu durante os ensaios dos provetes colados da segunda série. A figura 4.27 apresenta os resultados do ensaio do provete B-2.5 e as imagens das deformações provocadas pelas forças máxima e média, indicando o ponto a que cada uma corresponde no gráfico.

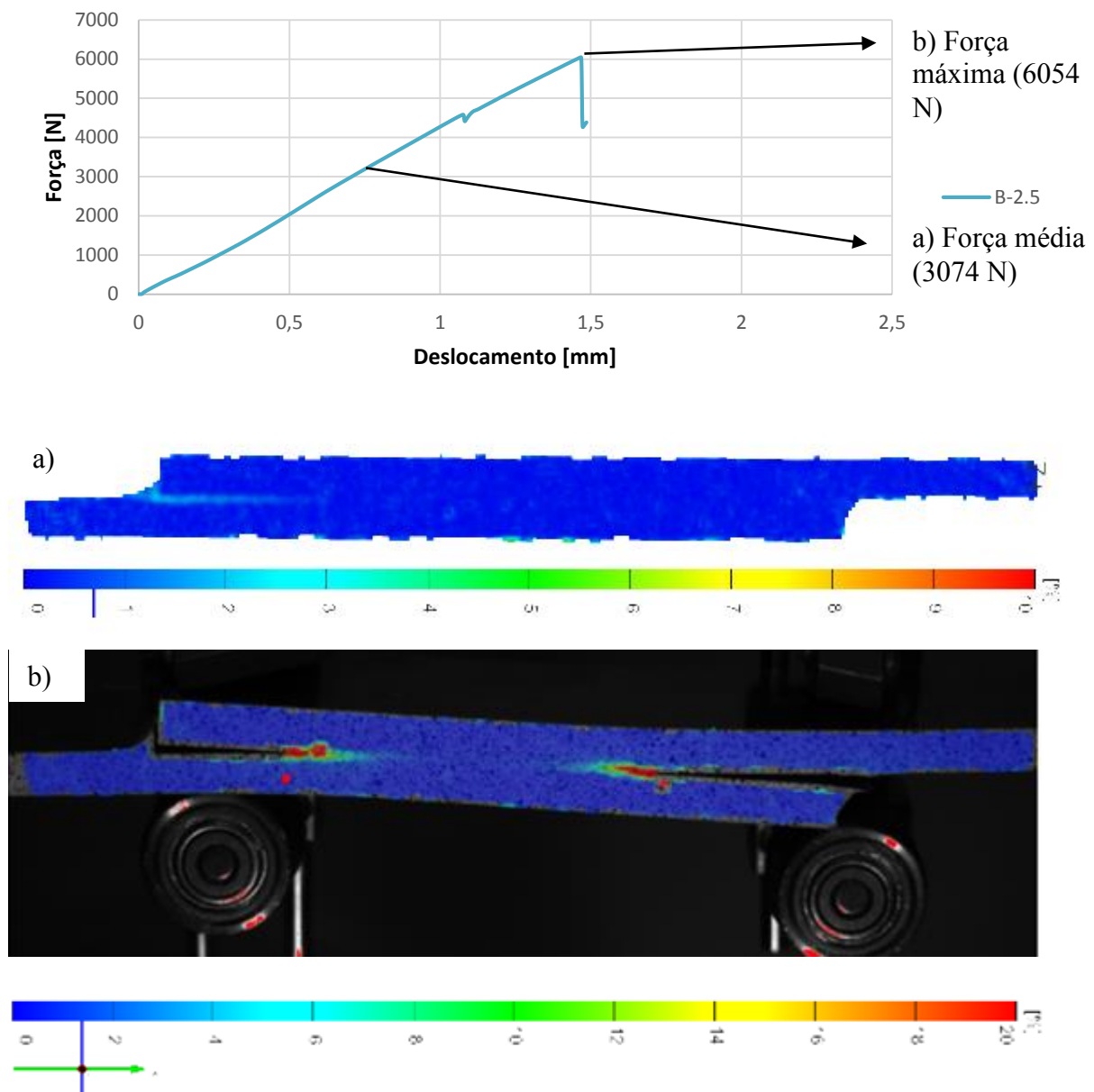


Figura 4.27 – Deformações locais na superfície do provete B-2.5: a) estágio de força média (3074 N) e b) estágio de força máxima (6054 N).

Após análise da figura 4.27 a), verifica-se que a deformação se inicia pela extremidade da zona sobreposta. É nessa zona que se evidencia alguma deformação no estágio de força média, correspondendo a um carregamento de 3074 N.

A figura 4.27 b) corresponde à deformação quando o provete é solicitado à força máxima do ensaio, na qual se contempla o início da rotura do provete pelas extremidades da zona sobreposta. Nesta imagem é perceptível que as deformações mais consideráveis atuam no plano de contacto da junta, correspondendo ao plano onde existe adesivo.

São também visíveis sinais de clivagem e arrancamento moderados. Estes fenómenos são consequência de alguma flexão do provete durante o ensaio de tração/corte, que se traduz em esforços de tração localizados nas extremidades da junta, de acordo com o que mostra a figura 4.27 [3], [7].

#### **4.5.2. Ligação soldada**

A análise das deformações locais deste tipo de ligações foi efetuada no provete W-2.2, sendo este tipo de ligação a que maior resistência apresentou nos ensaios efetuados da segunda série de provetes. A figura 4.28 expõe as imagens com informação sobre a deformação local na secção lateral do provete, assim como os pontos do ensaio referentes às imagens patentes.

Analogamente ao que foi descrito relativamente aos provetes colados, a rotura teve início numa das extremidades da zona sobreposta. Ocorreu também relativamente cedo, na medida em que na figura 4.28 a), sendo esta imagem referente à deformação provocada pela força média, já se verifica a separação das placas. Parece importante referir que os elevados valores de deformação na extremidade da junta, não traduzem a deformação do material propriamente dito, mas sim o deslocamento referente à separação das duas placas.

Observam-se novamente prenúncios de clivagem e arrancamento, provocando esforços de tração nas extremidades da junta. A persistência deste problema nas duas séries de provetes analisadas até ao momento, pode significar que a colocação dos *tabs* não teve o efeito desejado, ou seja, que o uso dos mesmos não foi suficiente para evitarem a flexão dos provetes durante os respetivos ensaios.

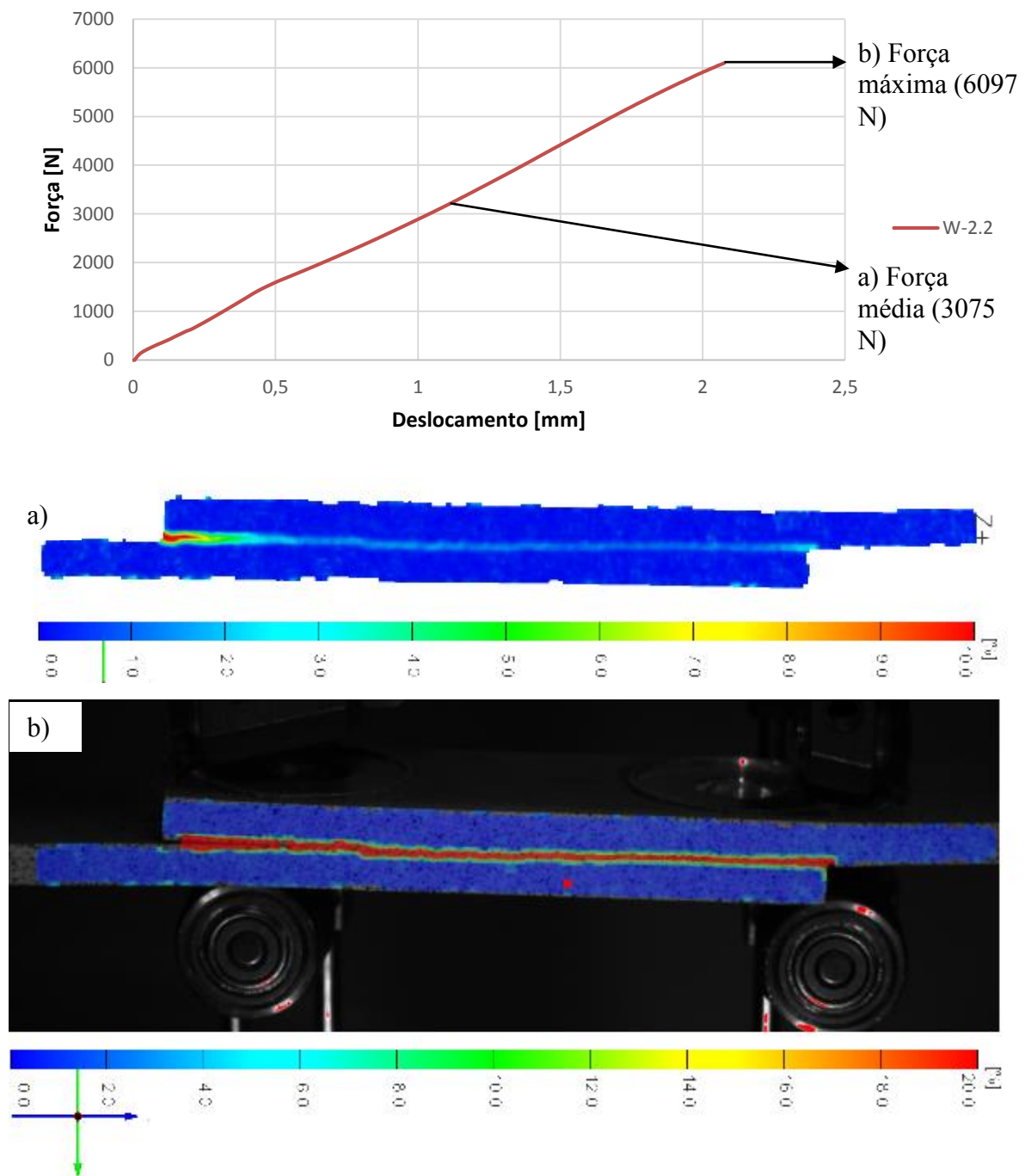


Figura 4.28 – Deformações locais na superfície do provete W-2.2: a) estágio de força média (3075 N) e b) estágio de força máxima (6097 N).

### **4.5.3. Ligação híbrida**

A figura 4.29 apresenta a informação recolhida relativamente à deformação local, nos instantes correspondentes à força média e máxima dos ensaios do provete híbrido H-2.1, em conformidade com a análise realizada para as duas ligações anteriormente apresentadas. Relativamente às outras ligações estudadas, as ligações híbridas foram as que menos esforços suportaram, apresentando alguma discrepância em termos de valores obtidos nos ensaios de tração/corte. No entanto, a curva da figura 4.29, apresenta a forma típica de uma curva de um ensaio de tração.

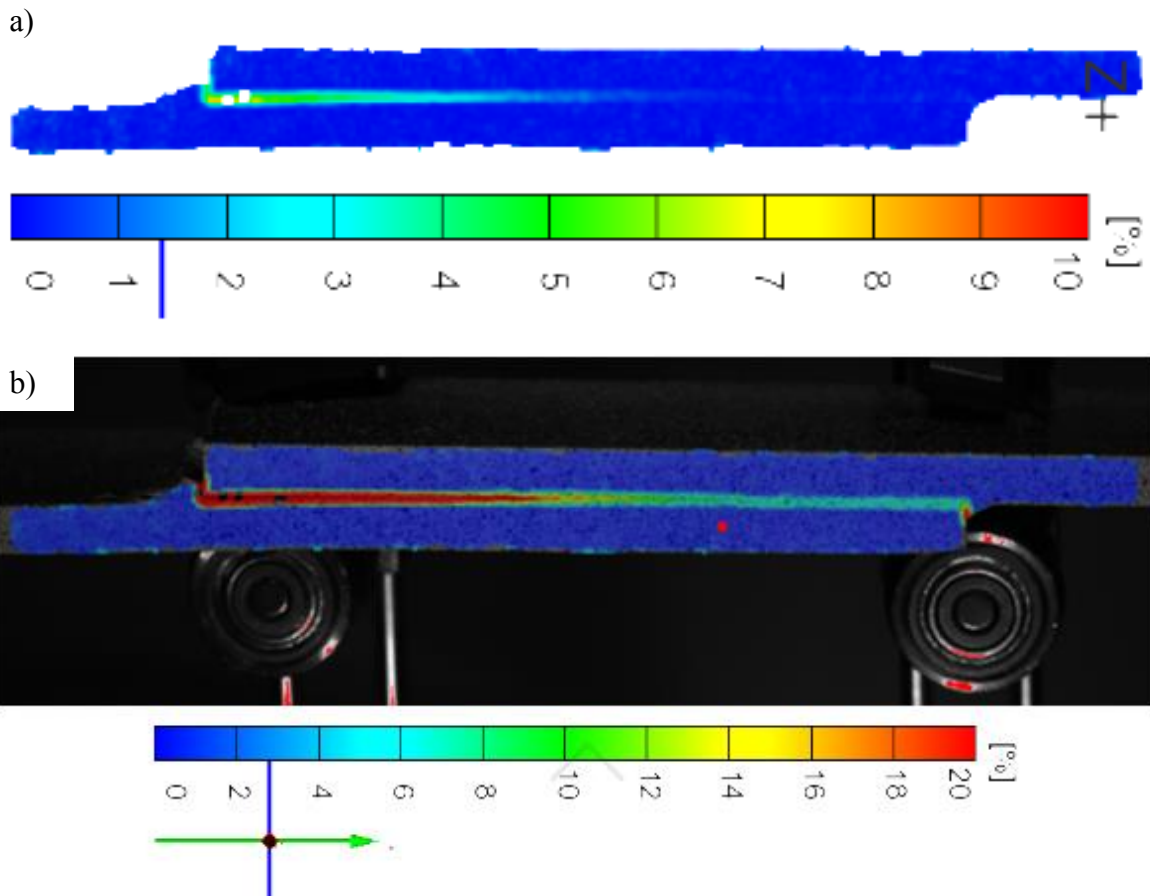
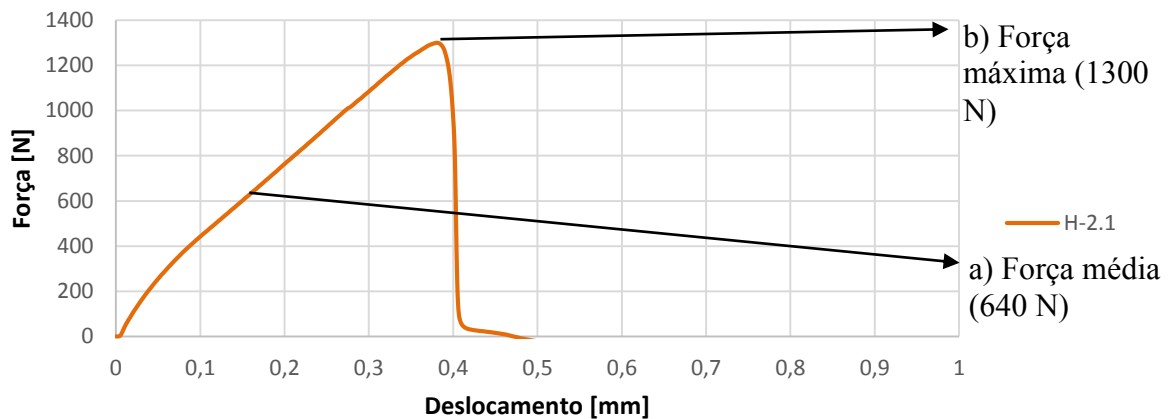


Figura 4.29 – Deformações locais na superfície do provete H-2.1: a) estágio de força média (640 N) e b) estágio de força máxima (1300 N).

A separação de placas ocorreu de forma rápida e mediante uma sollicitação baixa, comparativamente aos provetes analisados anteriormente. É claramente visível a separação das placas já no estágio da força média. O facto de a zona da extremidade da junta, que estaria ligada por adesivo, ceder mediante uma sollicitação tão baixa, indica que pode ter

havido problemas com a colagem. Para além disso, a falta de ligação entre as duas placas evidenciadas no ponto 4.1.1, provocada pela penetração insuficiente da ferramenta, fez com que a ligação fosse mal conseguida, diminuindo a resistência das ligações híbridas.

Resumindo, os provetes colados e soldados apresentaram roturas semelhantes, cedendo mediante solicitações de valor mais ou menos idênticas. Esforços de clivagem e arrancamento nestas ligações indiciam flexão dos provetes durante os ensaios. A rotura nos provetes híbridos ocorreu mediante um esforço reduzido, comparativamente às tensões obtidas para os outros métodos de ligação. Com uma força média equivalente a 640 N já se observava separação de grande parte da zona sobreposta.

## **4.6. Mecanismos de dano dos provetes**

Este subcapítulo tem como objetivo apresentar os tipos de rotura, e fazer a respetiva análise, de forma a ilustrar os tipos de rotura obtidos para as diversas ligações.

### **4.6.1. Mecanismos de dano da ligação colada**

Na figura 4.30 estão representadas as áreas sobrepostas dos provetes colados após rotura, para ambas as séries.

O modo de rotura da ligação colada da primeira série ocorreu em modo adesivo, na medida em que os locais da placa inferior sem adesivo correspondem aos locais com adesivo na placa superior. Também se verifica que o provete cedeu numa das partes de espessura mais reduzida, fazendo com que o parte do adesivo fosse responsável por suportar o esforço induzido no ensaio de tração/corte.

Como se pode observar na figura 4.30 b), a rotura do provete colado da segunda série ocorreu em modo adesivo. Este modo de rotura é normalmente indicativo de uma má preparação da junta [3]. Também se identifica adesivo na parte central onde não era suposto existir, e aparenta ter mais adesivo do que as outras partes. As setas indicam os locais onde existe adesivo.

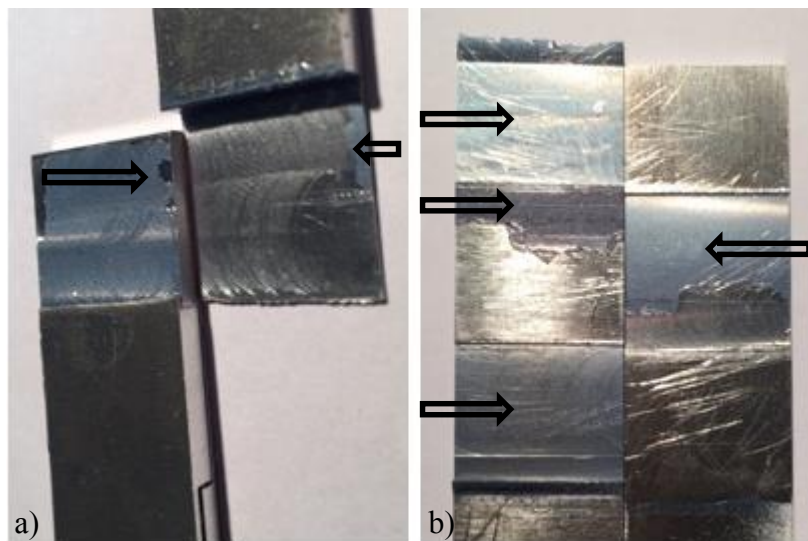


Figura 4.30 – Imagens dos provetes a) B-1.3 e b) B-2.5 após rotura adesiva.

#### 4.6.2. Mecanismos de dano da ligação soldada

A figura 4.31 mostra as imagens dos provetes soldados de ambas as séries após rotura.

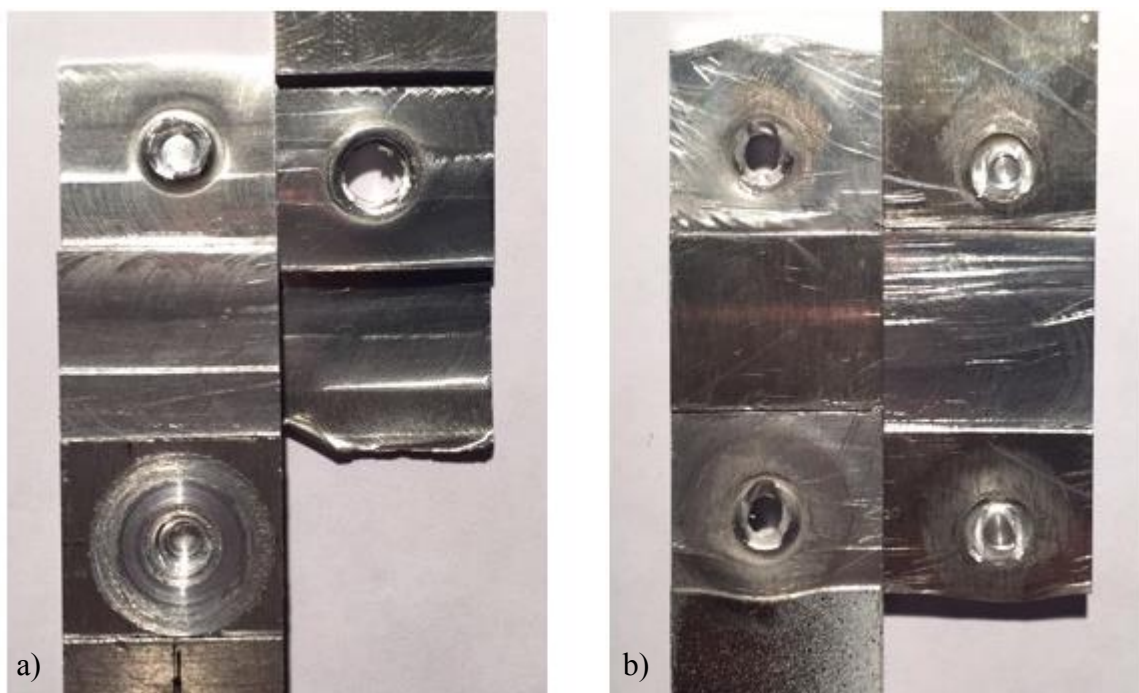


Figura 4.31 – Imagens dos provetes a) W-1.5 e b) W-2.2 após rotura.

O provete da primeira série apresenta novamente rotura numa das partes de espessura muito reduzida, e danificada pelo processo de soldadura. Assim sendo, após a



rotura dessa parte, o esforço dos ensaios é submetido apenas numa soldadura, originando uma fratura em apenas uma delas como ilustra a figura 4.31 a).

Relativamente ao provete da segunda série, figura 4.31 b), verifica-se a deformação dos aderentes, confirmando os esforços de clivagem identificados no ponto 4.5.2. Aparenta ter tido duas soldaduras de qualidade, tendo sido ambas igualmente solicitadas durante o ensaio de tração.

#### 4.6.3. Mecanismos de dano da ligação híbrida

Neste ponto será analisada a rotura dos provetes híbridos, estando as superfícies dos mesmos representada na figura 4.32.

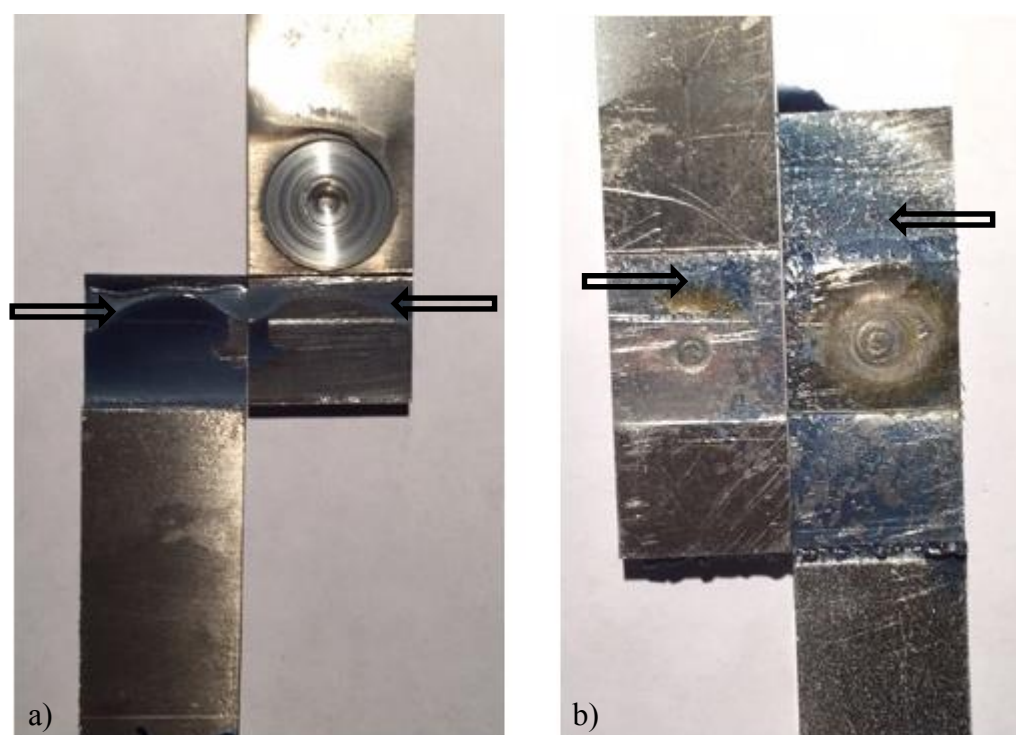


Figura 4.32 – Imagens dos provetes a) H-1.2 após rotura em modo misto e b) H-2.1 após rotura em modo adesivo.

No provete híbrido da primeira série, a rotura dá-se novamente pela mesma zona do provete com espessura muito reduzida. Os danos do processo de soldadura nos provetes são bem visíveis na parte superior da soldadura da figura 4.32 a). A cedência neste local implica que o esforço induzido no ensaio de tração/corte tenha sido suportado apenas pelo adesivo de uma das três secções da área sobreposta, fazendo com que o esforço suportado seja inferior ao das outras três ligações da mesma série. A rotura pelo adesivo dá-se

maioritariamente em modo adesivo, mas também em modo coesivo numa pequena parte, sendo, portanto, uma rotura em modo misto.

Através da observação da figura 4.32 b), verifica-se que a ligação entre as duas placas por parte do processo de soldadura foi mínima, ou até mesmo nula. O facto de o provete apresentar adesivo na zona de soldadura prejudicou a qualidade da ligação. Também se observa que, as temperaturas induzidas no processo de soldadura causaram a carbonização do adesivo adjacente à soldadura, levando às perdas de propriedades mecânicas da junta [5]. A rotura dá-se no modo adesivo.





## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. Conclusões

As conclusões a que se chegou através da elaboração deste trabalho são as seguintes:

- O uso de soldadura *FSSW* e de adesivo simultaneamente prejudicou a resistência mecânica das juntas, relativamente aos outros métodos de ligação em estudo.
- A primeira tentativa de configuração de junta apresentava partes demasiado finas, comprometendo a resistência mecânica dos provetes da série 1 quando submetidos ao processo de soldadura.
- Não houve sinais de ligação dos provetes híbridos da série 2, existindo uma camada de adesivo entre as placas, num local onde nem deveria existir.
- Os provetes da série 1 que maiores esforços suportaram foram os colados.
- Os provetes da série 2 que maiores esforços suportaram foram os soldados.
- Os provetes que menos esforços suportaram foram os híbridos em ambas as séries.
- A penetração da ferramenta *FSSW* foi insuficiente para a soldadura dos provetes híbridos da série 2.

### 5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros seria interessante projetar uma outra configuração de junta, que permita que os provetes sejam colados e soldados em partes separadas. A morfologia dos provetes da série 1 poderia tornar-se interessante e vantajosa se fosse concebida com espessuras superiores.

No caso de se adotar o perfil dentado da junta, é imperativo contabilizar a espessura do adesivo mediante o projeto da mesma, de forma a que a zona a soldar não seja

contaminada com cola. No caso de se utilizarem juntas sobrepostas constituídas por placas nas mesmas condições que as utilizadas no presente estudo, devem ser utilizados valores de penetração da ferramenta superiores mediante a soldadura *FSSW*.







---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Täljsten, “The Importance of Bonding — A Historic Overview and Future Possibilities,” *Adv. Struct. Eng.*, vol. 9, no. 6, pp. 721–736, 2007.
- [2] P. A. Fay, *History of adhesive bonding*. Woodhead Publishing Limited, 2005.
- [3] A. M. G. Pinto, “Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos,” 2007.
- [4] M. D. Banea and L. F. M. Da Silva, “Adhesively bonded joints in composite materials: An overview,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 223, no. 1, pp. 1–18, 2009.
- [5] R. D. S. G. Campilho, A. M. G. Pinto, M. D. Banea, and L. F. M. Da Silva, “Optimization study of hybrid spot-welded/bonded single-lap joints,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 37, pp. 86–95, 2012.
- [6] J. A. B. P. Neto, R. D. S. G. Campilho, and L. F. M. Da Silva, “Parametric study of adhesive joints with composites,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 37, pp. 96–101, 2012.
- [7] A. J. R. Loureiro, “Ligações adesivas,” *Ligações adesivas*, pp. 1–40, 2014.
- [8] F. J. Almeida, “Estudo e otimização de juntas do tipo T- peel soldadas, adesivas e híbridas,” 2015.
- [9] F. M. Lucas and R. D. Adams, “Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites,” vol. 27, pp. 227–235, 2007.
- [10] C. S. Adderley, *Adhesive Bonding*, vol. 9, no. 5. 1988.
- [11] P. N. B. Reis, “Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints,” vol. 67, pp. 125–133, 2005.
- [12] A. G. Zink, R. W. Davidson, and R. B. Hanna, “The influence of overlap length on adhesive joint strength,” 1995.
- [13] J. A. Neto, “Estudo Paramétrico de Juntas Adesivas em Material Compósito Resumo,” 2011.
- [14] L. F. . da Silva, *Handbook of Adhesion Technology*. .
- [15] X. W. Yang, T. Fu, and W. Y. Li, “Friction Stir Spot Welding: A Review on Joint Macro- and Microstructure, Property, and Process Modelling,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2014, pp. 1–11, 2014.
- [16] M. P. Mubiayi, E. T. Akinlabi, and M. E. Makhatha, *Current trends in friction stir welding (FSW) and friction stir spot welding (FSSW) : an overview and case studies*.

- 2018.
- [17] Z. Y. Ma, A. H. Feng, D. L. Chen, and J. Shen, “Recent Advances in Friction Stir Welding/Processing of Aluminum Alloys: Microstructural Evolution and Mechanical Properties,” *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 43, no. 4, pp. 269–333, 2018.
- [18] R. S. Mishra, M. W. Mahoney, Y. Sato, and Y. Hovanski, “Friction stir welding and processing VIII,” *Frict. Stir Weld. Process. VIII*, vol. 50, pp. 1–300, 2005.
- [19] D. Klobcar, J. Tusek, A. Skumavc, and A. Smolej, “Parametric Study of Friction Stir Spot Welding of Aluminium Alloy 5754,” *Metalurgija*, vol. 53, no. 1, pp. 21–24, 2014.
- [20] A. K. Lakshminarayanan, V. E. Annamalai, and K. Elangovan, “Identification of optimum friction stir spot welding process parameters controlling the properties of low carbon automotive steel joints,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 262–272, 2015.
- [21] A. K. Pattanaik, S. Pradhan, S. N. Panda, D. K. Bagal, K. Pal, and D. Patnaik, “Effect of Process Parameters on Friction Stir Spot Welding Using Grey Based Taguchi Methodology,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 5, pp. 12098–12102, 2018.
- [22] C. Leitao, R. M. Leal, D. M. Rodrigues, A. Loureiro, and P. Vilaça, “Mechanical behaviour of similar and dissimilar AA5182-H111 and AA6016-T4 thin friction stir welds,” *Mater. Des.*, vol. 30, no. 1, pp. 101–108, 2009.
- [23] F. Heydari, A. A. L. I. Amadeh, O. O. Ojo, M. H. Hasanniya, and M. Tamizifar, “Microstructure and mechanical properties of autobody steel joined by friction stir spot welding,” *Sādhanā*, vol. 0123456789, no. 3, pp. 1–10, 2019.
- [24] J. M. Piccini and H. G. Svoboda, “Effect of pin length on Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar Aluminum-steel joints,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 9, pp. 504–513, 2015.
- [25] T. P. SAJU and R. G. NARAYANAN, “Effect of tool plunge depth on joint formation and mechanical performance of friction stir forming joints made between AA 5052-H32 and AA 6061-T6 sheet metals,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 28, no. 4, pp. 613–628, 2018.
- [26] H. Badarinarayan, Q. Yang, and S. Zhu, “International Journal of Machine Tools & Manufacture Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded

- aluminum alloy,” vol. 49, pp. 142–148, 2009.
- [27] R. Maciel, V. Infante, D. Braga, P. Moreira, T. Bento, and L. da Silva, “Development of hybrid friction stir welding and adhesive bonding single lap joints in aluminium alloys,” *Frat. ed Integrità Strutt.*, vol. 13, no. 48, pp. 269–285, 2019.
- [28] D. F. O. Braga, L. M. C. De Sousa, V. Infante, L. F. M. Da Silva, and P. M. G. P. Moreira, “Aluminium friction-stir weld-bonded joints,” *J. Adhes.*, vol. 92, no. 7–9, pp. 665–678, 2016.
- [29] D. F. O. Braga *et al.*, “Fatigue performance of hybrid overlap friction stir welding and adhesive bonding of an Al-Mg-Cu alloy,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, no. June, pp. 1–9, 2018.
- [30] S. M. H. Darwish and A. Ghanya, “Critical assessment of weld-bonded technologies,” vol. 105, 2000.
- [31] P. Lapão, “Soldadura por fricção linear de ligas de alumínio : Influência das propriedades do material Paulo Jorge Trindade Lapão Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica Júri,” 2008.
- [32] A. Tronci, R. Mckenzie, R. M. Leal, and D. M. Rodrigues, “Microstructural and mechanical characterisation of 5XXX-H111 friction stir welded tailored blanks,” vol. 16, no. 5, pp. 433–439, 2011.
- [33] H. Rumor, “Melhoria da resistência mecânica de juntas coladas sobrepostas simples com recurso à soldadura por fricção linear,” 2017.

## ANEXO A



### Advanced Materials

## Araldite® 420 A/B

Structural Adhesives

### ARALDITE® 420 A/B

#### Two component epoxy adhesive system

#### Key properties

- Very high lap shear and peel strength
- Bonds a wide variety of materials (metal, composite and thermoplastics)
- Good moisture resistance
- Extremely tough and resilient adhesive

#### Description

ARALDITE® 420 A/B is a two-component room temperature curing, epoxy adhesive paste of high strength and toughness. Performances can be enhanced by post-curing at elevated temperature. It is suitable for bonding a wide variety of metals, ceramics and many other substrates in common use.

#### Product data

Property	Araldite 420 A	Araldite 420 B	Mixed Adhesive
Colour (visual) (A112)*	Yellow	Blue	Dark green
Specific gravity	1.2	1.0	approx. 1.1
Viscosity at 25 °C (A93) (Pa.s)*	100-300	0.6-1.4	35-45
Lap shear strength at 23 °C (A501)*	-	-	> 30 MPa
Pot Life (100 gm at 25°C)			Ca. 60 min

\* Specified data are on a regular basis analysed. Data which is described in this document as 'typical' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.

#### Processing

##### Pretreatment

The strength and durability of a bonded joint are dependent on proper treatment of the surfaces to be bonded. At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone, iso-propanol (for plastics) or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt. Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used. The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite 420 A	100	100
Araldite 420 B	40	50

The resin and hardener should be blended until they form a homogeneous mix.

Araldite® 420 A/B is available in cartridges incorporating mixers and can be applied as ready to use adhesive with the aid of the tool recommended by Huntsman Advanced Materials



#### Application of adhesive

The resin/hardener mix is applied with a spatula, to the pretreated and dry joint surfaces.

A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint.

The joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied. An even contact pressure throughout the joint area will ensure optimum cure.

#### Mechanical processing

Specialist firms have developed metering, mixing and spreading equipment that enables the bulk processing of adhesive.

We will be pleased to advise customers on the choice of equipment for their particular needs.

#### Equipment maintenance

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.

If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

#### Typical times to minimum shear strength

Temperature	°C	23	40	60	100
Cure time to reach	hours	7.5			
LSS > 1N/mm <sup>2</sup>	minutes		100	35	< 5
Cure time to reach	hours	11	2	1	
LSS > 10N/mm <sup>2</sup>	minutes				20

LSS = Lap shear strength.

#### Typical cured properties

Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

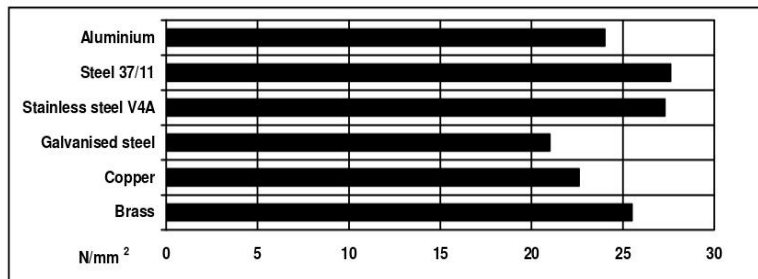
Note: The data in this edition is based on recent retesting of the product.

**Figura AN 0.2. Página 2 das especificações técnicas do adesivo Araldite 420 A/B**



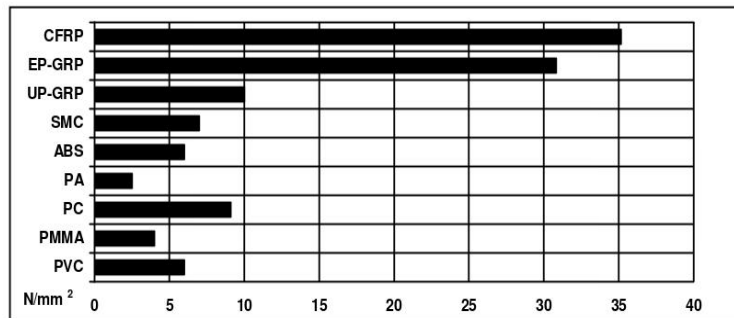
**Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587) (typical average value)**

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C  
Pretreatment - Sand blasting



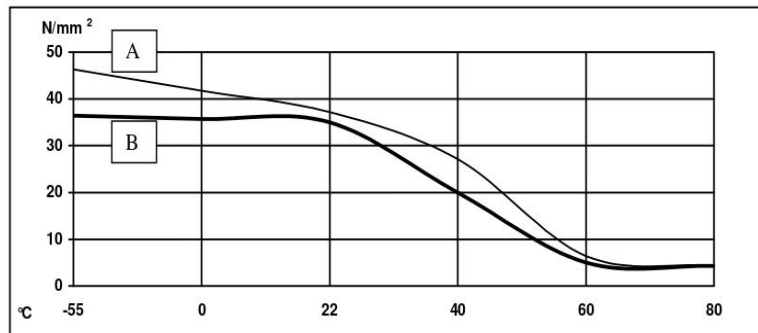
**Average lap shear strengths of typical plastic-to-plastic joints (ISO 4587) (typical average value)**

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment - Lightly abrade and alcohol degrease.



**Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)**

A: Cure: 4 hours at 50°C B: cure: 7 days at RT



**Figura AN 0.2. Página 3 das especificações técnicas do adesivo Araldite 420 A/B**



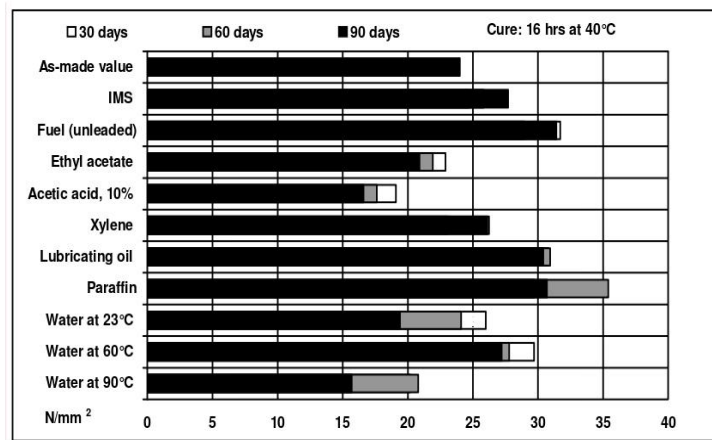
**Glass transition temperature (ISO 6721) (typical average value)**

Cure: 16 hours at 40°C

56°C by DMA

**Lap shear strength versus immersion in various media (typical average values)**

Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 30,60 and 90 days at 23°C



**Tensile strength at 23°C (ISO 527)**

(typical average value)

29 MPa

E-modulus

1495 MPa

Elongation at break

4.6 %

**Shore Hardness (D scale) (ISO 868/03)**

(typical average value)

75 D

Cure 16 hours/ 40°C, tested at 23°C,

50%RH

**Shear modulus G' (ISO 6721)**

(typical average value)

Cure: 16 hours/ 40°C

-20°C - 1.00 GPa

0°C - 880 MPa

23°C - 730 MPa

60°C - 74 MPa

90°C - 5.5 MPa

**Figura AN 0.4. Página 4 das especificações técnicas do adesivo Araldite 420 A/B**



**Storage** ARALDITE® 420A and Araldite® 420 B may be stored at room temperature provided the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

**Handling precautions** **Caution**  
Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.



**Huntsman Advanced Materials**  
(Switzerland) GmbH  
Klybeckstrasse 200  
4057 Basel  
Switzerland  
  
Tel: +41 (0)61 299 11 11  
Fax: +41 (0)61 299 11 12  
  
[www.huntsman.com/advanced\\_materials](http://www.huntsman.com/advanced_materials)  
Email: [advanced\\_materials@huntsman.com](mailto:advanced_materials@huntsman.com)

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the user. Specified data are analysed on a regular basis. Data which is described in this document as 'typical' or 'guideline' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of Huntsman Advanced Material's knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, **nothing herein is to be construed as a warranty, whether express or implied, including but without limitation, as to merchantability or fitness for a particular purpose. In all cases, it is the responsibility of the user to determine the applicability of such information and recommendations and the suitability of any product for its own particular purpose.**

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., Huntsman Advanced Materials (UAE) FZE, Huntsman Advanced Materials (Guangdong) Company Limited, and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

All trademarks mentioned are either property of or licensed to Huntsman Corporation or an affiliate thereof in one or more, but not all, countries.

Copyright © 2012 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved





## APÊNDICE A

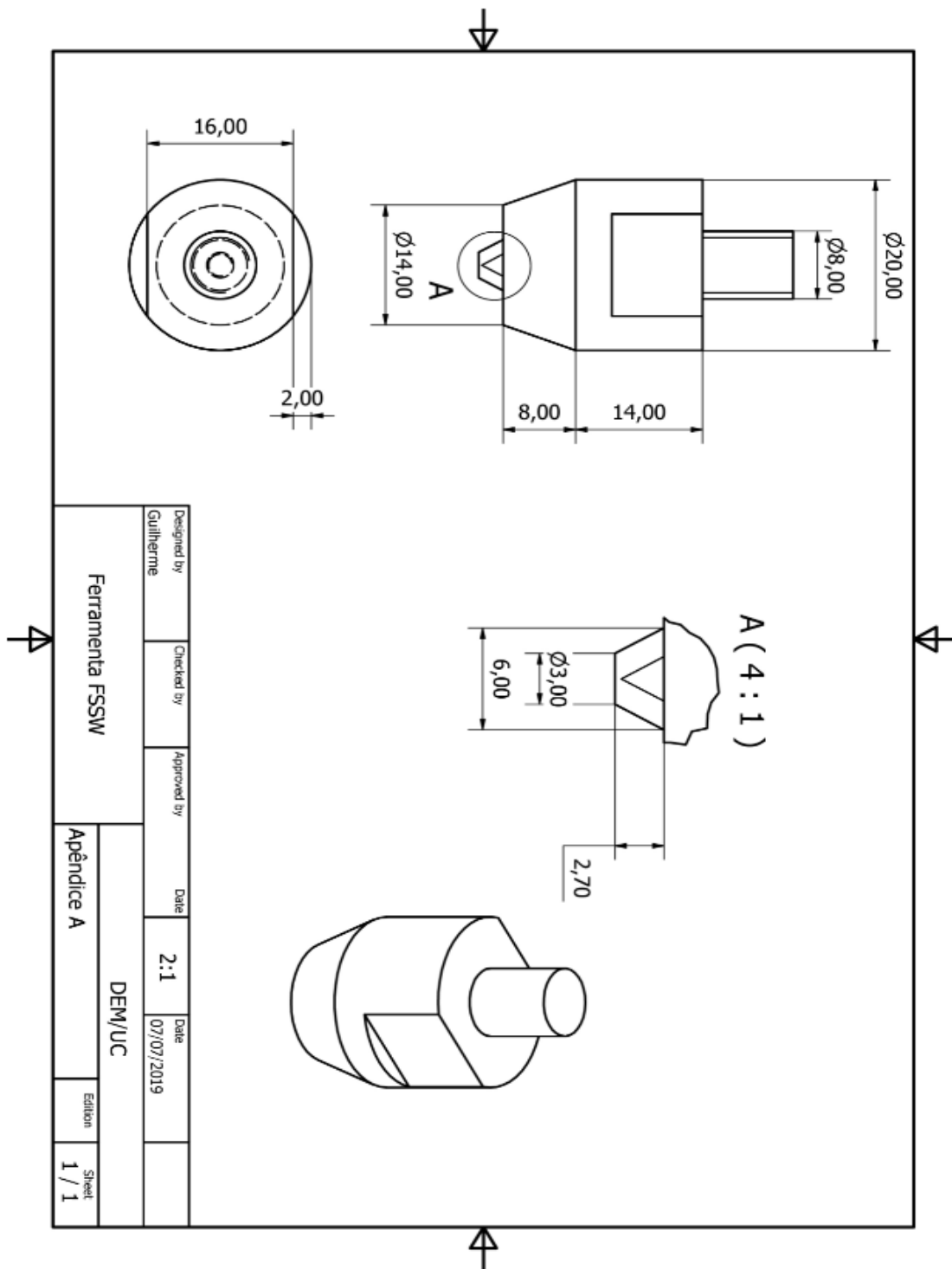


Figura AA 0.1 – Dimensões e geometria da ferramenta FSSW.



## APÊNDICE B

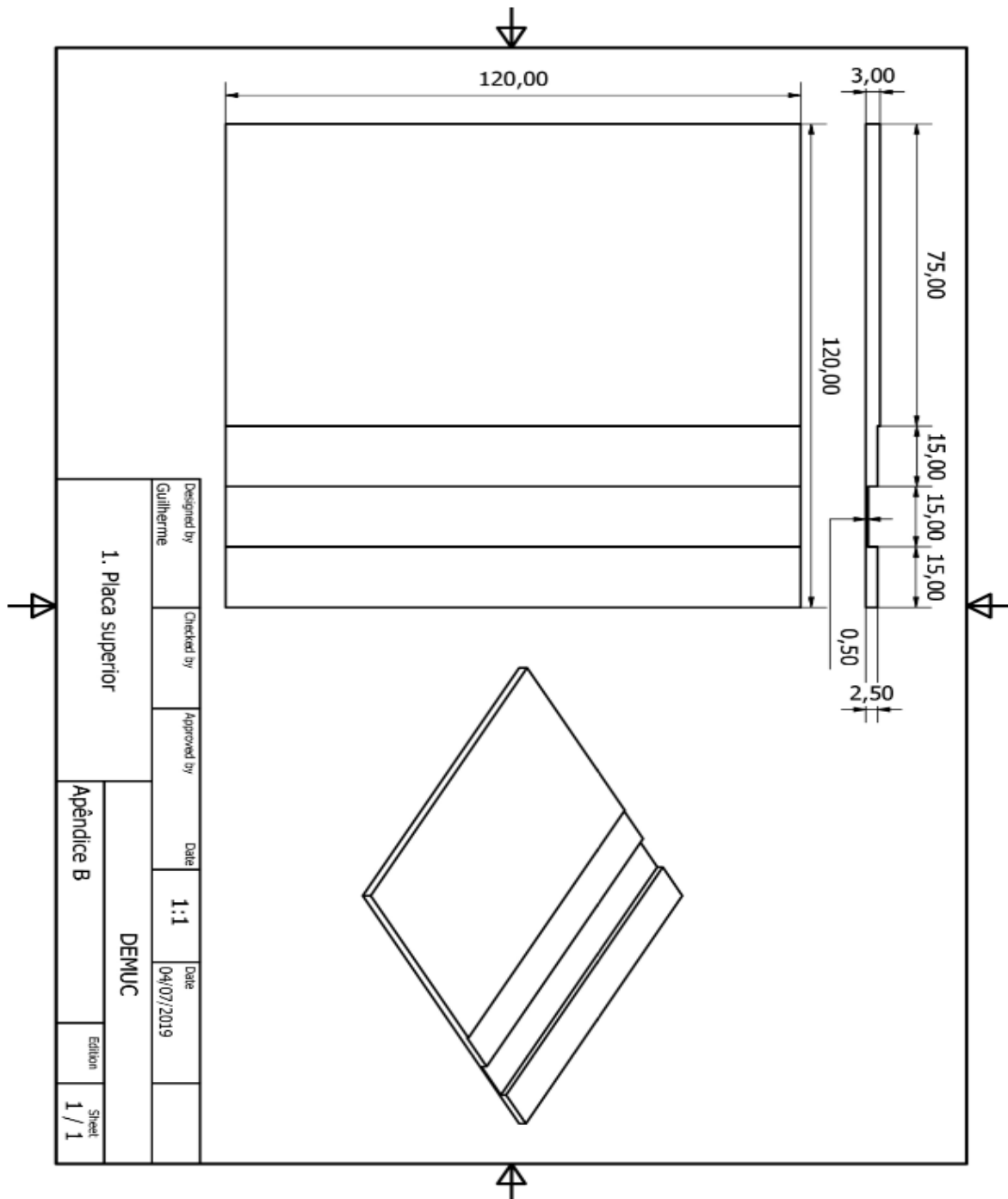


Figura AB 0.1 - Dimensões e geometria da placa superior 1 para obtenção dos provetes da primeira série.



## APÊNDICE C

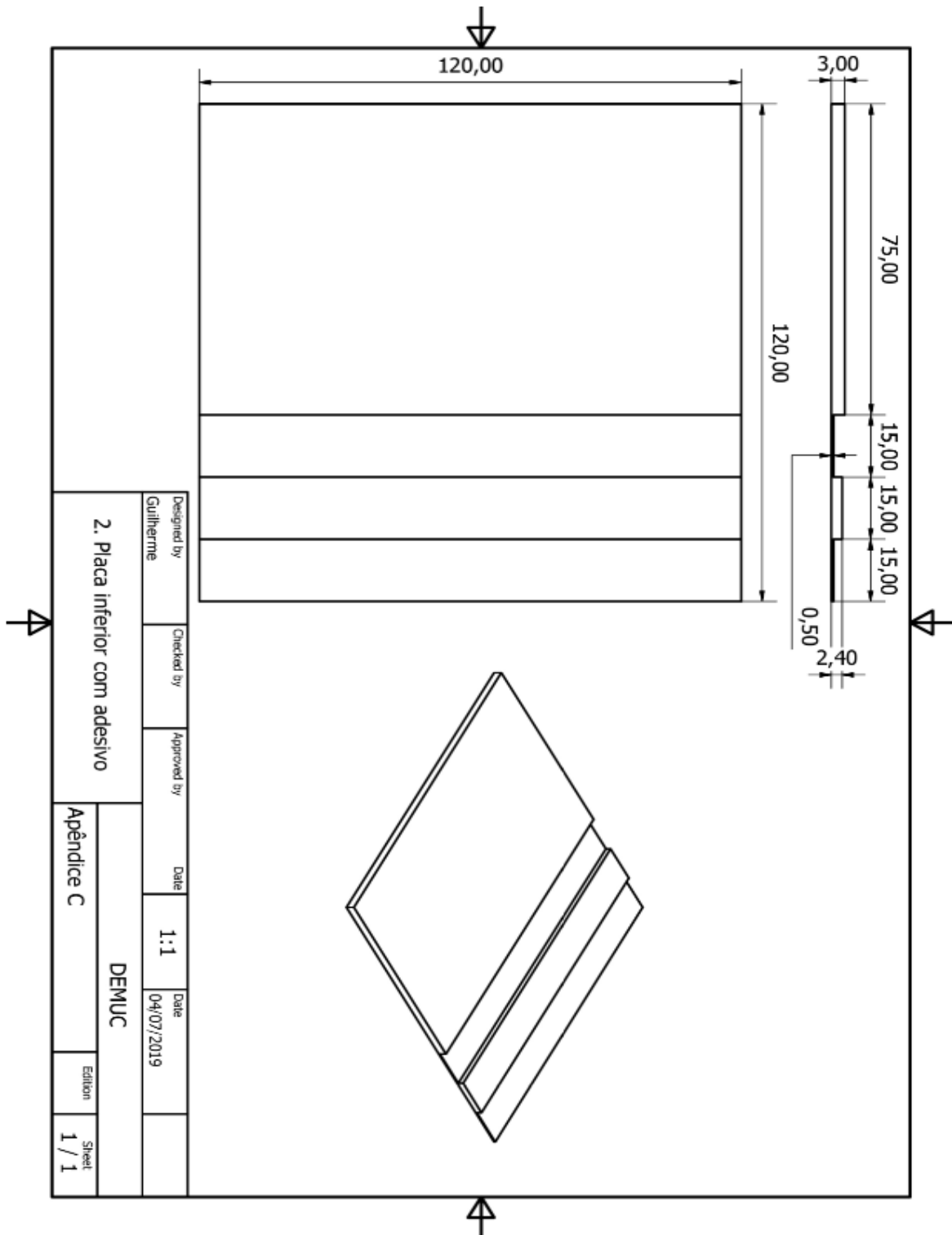


Figura AC 0.1 - Dimensões e geometria da placa inferior 2 para obtenção dos provetes da primeira série.







## APÊNDICE D

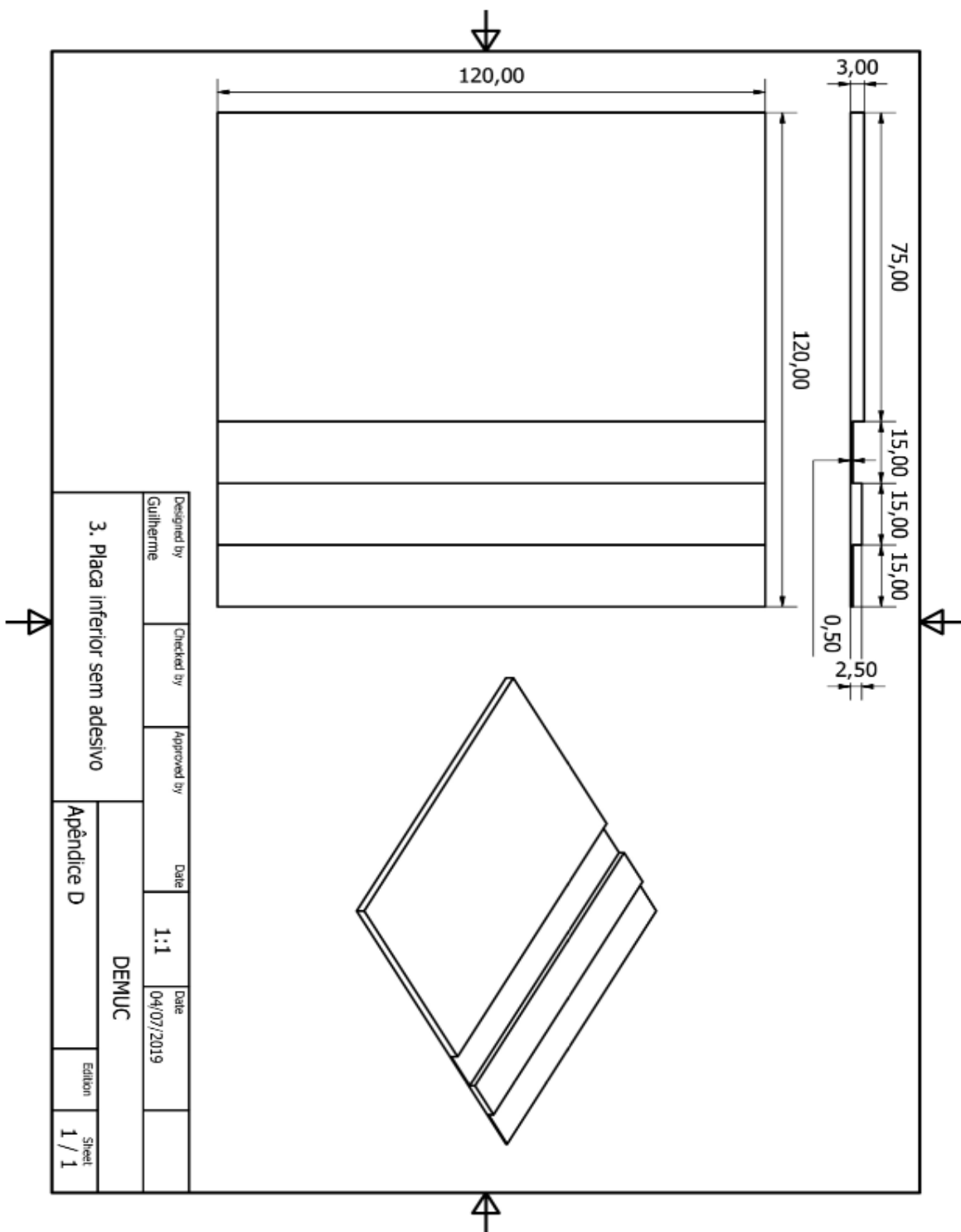


Figura AD 0.1 - Dimensões e geometria da placa inferior 3 para obtenção dos provetes da primeira série



APÊNDICE E

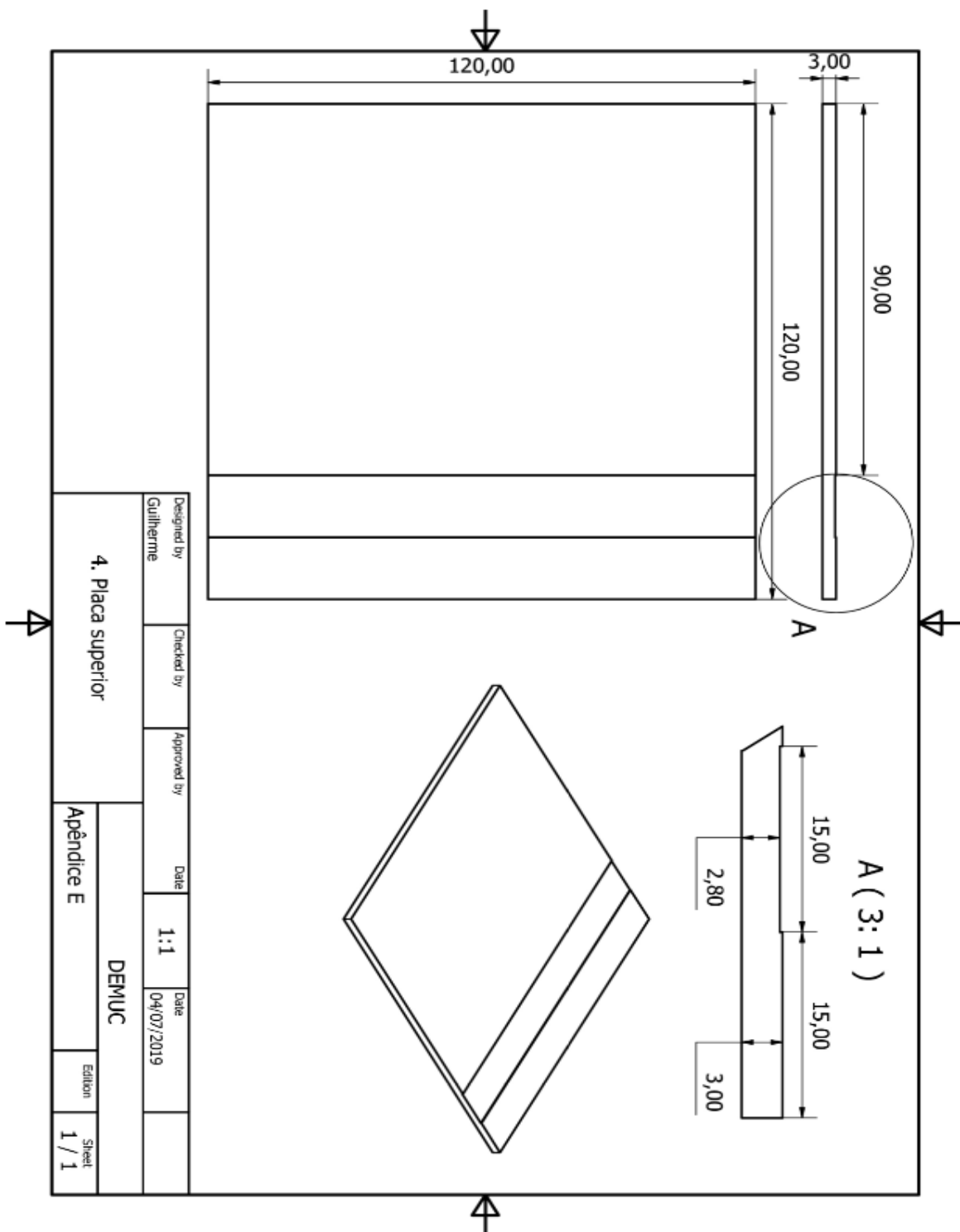


Figura AE 0.1 – Dimensões e geometria da placa superior 4 para obtenção dos provetes da segunda série.



APÊNDICE F

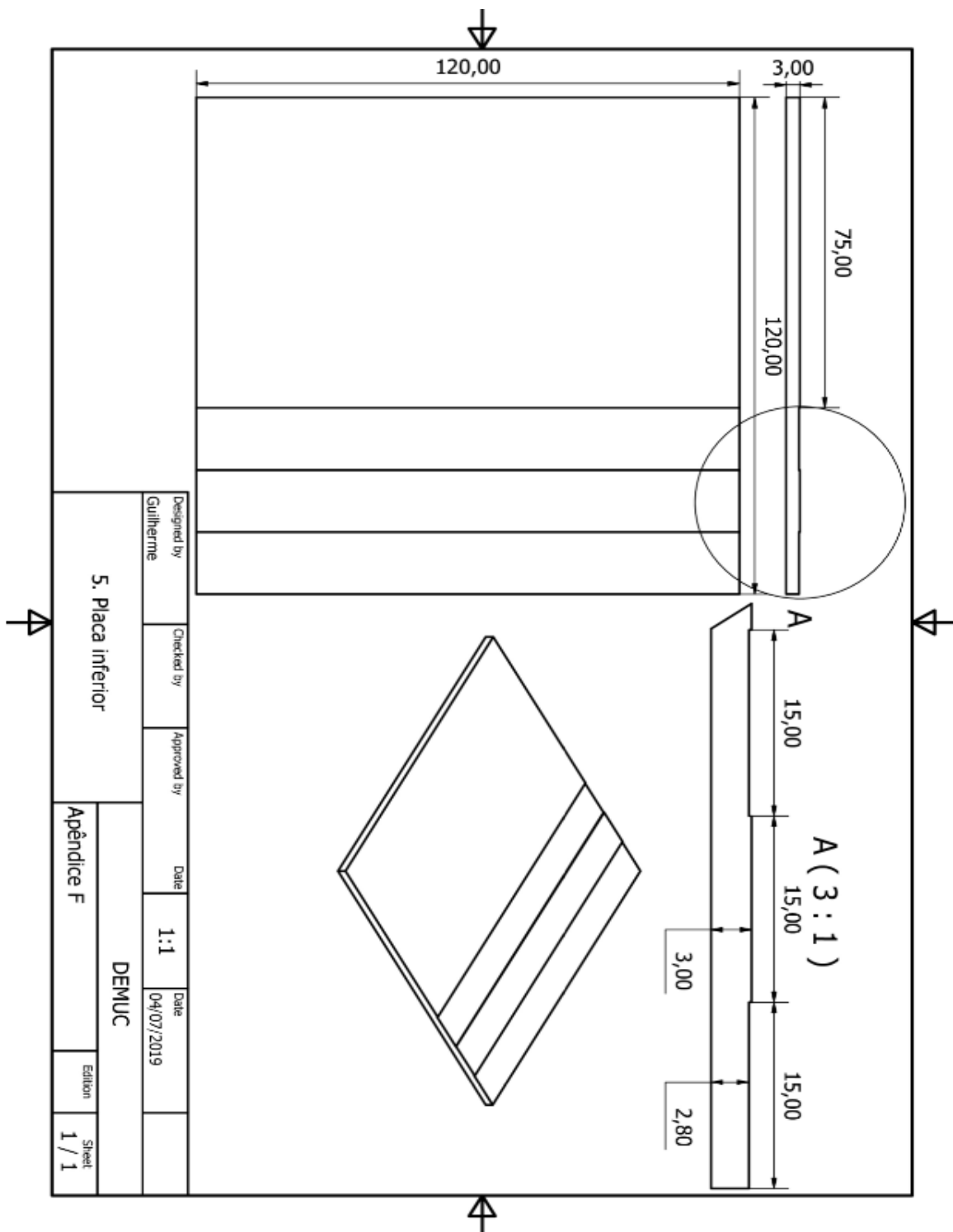


Figura AF 0.1 - Dimensões e geometria da placa superior 4 para obtenção dos provetes da segunda série.



## APÊNDICE G



Figura AG 0.1 – Identificação dos pontos na amostra onde foram efetuadas as indentações