



# **Influência da geometria da ferramenta na soldadura por fricção linear em ligas de alumínio AA 2017-T4**

*Sérgio Fernando Coutinho de Oliveira*

**Dissertação de Mestrado**

Orientador na FEUP: Prof. António Augusto Fernandes



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Fevereiro de 2018

*Para o Martim, o futuro.*

## Resumo

As ligas de alumínio da série 2XXX e 7XXX são muito utilizadas nas indústrias aeronáutica e aeroespacial. A soldadura destas ligas de alumínio pelos processos tradicionais de soldadura por fusão é pouco atrativa, devido ao facto de gerarem facilmente diversos defeitos, principalmente devido à fissuração na solidificação.

O processo de soldadura por fricção linear (FSW) permitiu ultrapassar este problema. Este é um processo de soldadura que se caracteriza pela ausência de fusão dos materiais envolvidos. É, portanto, um processo de soldadura no estado sólido. É um processo simples, em que a fonte de energia é o calor gerado pelo atrito provocado pelo avanço de uma ferramenta rotativa com os materiais a soldar. O processo é constituído por vários parâmetros, sendo um dos mais importante, senão o mais importante, a geometria da ferramenta utilizada.

Nesta dissertação realizaram-se soldaduras em ligas de alumínio AA 2017-T4, tendo-se utilizado para esse efeito duas ferramentas progressivas: uma ferramenta de pino cónico roscado helicoidal, e uma outra de pino piramidal. Foram realizados diversos ensaios mecânicos e metalográficos.

Concluiu-se que, pese embora os resultados não se tivessem revelado muito díspares, a ferramenta cónica roscada helicoidal progressiva apresentou as melhores soldaduras.

**Palavras-chave:** Soldadura por fricção linear, Soldadura no estado sólido, Alumínio, Juntas T-butt.

## **Influence of tool geometry in linear friction welding in aluminium alloys AA 2017-T4**

### **Abstract**

The aluminium alloys of the series 2XXX and 7XXX are widely used in aeronautics and aerospace industries. The welding of these aluminium alloys by traditional fusion welding processes is little attractive, because they generate a number of defects, especially solidification cracking.

The friction stir welding (FSW) can avoid this problem. This it is a welding process that is characterized by the absence of fusion of the materials involved. It is therefore a solid-state welding process. It is a simple process, in which the energy source is the heat generated by the friction caused by the advancement of a rotating tool with the materials to weld. The process is controlled by several parameters; one of the most important, if not the most important is the geometry of the tool used.

In this dissertation, weldings were carried out in aluminium alloys AA 2017-T4, and two progressive tools were used for this purpose: a helical threaded conical pin tool, and another pyramidal pin. Several mechanical and metallographic tests were performed.

Though the results for both tools were not too different, were not very disparate, the progressive conical threaded tool gave the best welds.

**Keywords:** Friction Stir Welding, Solid-State Welding, Aluminium, Joints T-butt.

## Agradecimentos

O trabalho aqui realizado só foi possível devido à colaboração, ajuda e apoio de algumas pessoas, às quais quero deixar aqui o meu sincero reconhecimento.

Em primeiro lugar, ao Professor António Augusto Fernandes, pela sua orientação e completa disponibilidade, pela sua ajuda, motivação e conhecimentos transmitidos. A ele deixo aqui o meu mais profundo e principal agradecimento e reconhecimento.

Um agradecimento particular ao Eng.º Miguel Augusto Vigário de Figueiredo pela sua ajuda e partilha de conhecimentos. Um agradecimento também ao Rui Silva pela ajuda que deu na realização dos ensaios mecânicos nas oficinas mecânicas da FEUP.

Um agradecimento muito especial ao Professor Altino de Jesus Roque Loureiro, da FCTUC, pela sua grande disponibilidade, ajuda e transmissão dos seus conhecimentos. Também pela sua simpatia e sempre boa disposição. Igualmente ao Professor José Domingos Moreira da Costa da mesma instituição. Um agradecimento também ao Eng.º Gustavo Carvalho pela ajuda e disponibilidade que deu na realização dos ensaios metalográficos.

Uma palavra de gratidão aos meus pais. À minha esposa, pelo constante e incondicional apoio, paciência e colaboração.

Um agradecimento também a todos os colegas e amigos pelo apoio e por nunca deixarem de acreditar.

Por fim, ao meu filho, ele a minha verdadeira inspiração.

## Índice de Conteúdos

1	Introdução, Enquadramento do Projeto e Objetivos .....	1
2	Soldadura por Fricção Linear de Ligas de Alumínio – Estado da Arte .....	5
2.1	Introdução .....	5
2.2	Descrição do processo FSW .....	8
2.3	Parâmetros do processo FSW .....	10
2.4	Fluxo de material .....	16
2.5	Caracterização microestrutural das juntas obtidas por FSW .....	18
2.6	Tipos de junta.....	20
2.7	Vantagens e desvantagens do processo FSW .....	23
2.8	Aplicações do processo FSW.....	24
2.9	Equipamentos industriais .....	26
3	Procedimento experimental .....	27
3.1	Liga de alumínio-cobre AA 2017-T4 .....	27
3.2	Soldadura dos coupons .....	28
3.3	Provetes.....	33
3.4	Ensaios de metalografia .....	35
3.5	Ensaios de dureza.....	35
3.6	Ensaios de tração.....	37
3.7	Ensaios de fadiga .....	40
4	Análise e discussão dos resultados .....	43
4.1	Análise metalográfica .....	43
4.2	Análise à dureza.....	50
4.3	Análise à tração.....	54
4.4	Análise à fadiga.....	56
4.5	Análise da fratura.....	59
5	Conclusões e trabalhos futuros .....	69
	Referências .....	71
	Apêndice A.....	75
	Apêndice B .....	79
	Apêndice C .....	84
	Apêndice D.....	85

## **Siglas**

CRHP – Cónica Roscada Helicoidal Progressiva

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FSW – Friction Stir Welding

MB – Material Base

MIG – Metal Inert Gas

N – Número de Ciclos de Fadiga

PP – Piramidal Progressiva

RPM – Rotações Por Minuto

S – Magnitude de Tensão

TIG – Tungsten Inert Gas

TWI – The Welding Institute

ZTA – Zona Termicamente Afetada

ZTMA – Zona Térmica e Mecanicamente Afetada

## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Ilustração do processo FSW .....	9
Figura 2.2 – Processo FSW (lado de avanço e recuo) .....	9
Figura 2.3 - Ferramenta típica do processo FSW .....	11
Figura 2.4 - Geometrias de bases desenvolvidas pelo TWI utilizadas no processo FSW .....	11
Figura 2.5 - Geometrias correntemente utilizadas para os pinos .....	12
Figura 2.6 - Pinos correntemente utilizados .....	12
Figura 2.7 - Ferramenta <i>Worl<sup>TM</sup></i> .....	13
Figura 2.8 - Ferramenta <i>MX Triflute<sup>TM</sup></i> .....	13
Figura 2.9 - Geometrias para a base da ferramenta desenvolvidas pelo TWI .....	14
Figura 2.10 - Força vertical (também denominada força axial) .....	15
Figura 2.11 - Ângulo de inclinação da ferramenta .....	16
Figura 2.12 – Esquema de rastreador de material .....	17
Figura 2.13 - Diferentes zonas microestruturais das soldaduras obtidas pelo processo FSW ..	18
Figura 2.14 - Transição entre a zona nugget e a zona térmica e mecanicamente afetada .....	20
Figura 2.15 - Tipos de junta utilizados no processo FSW .....	21
Figura 2.16 - Defeito " <i>Kissing bond</i> " .....	21
Figura 2.17 - Defeitos de " <i>túnel</i> " e falta de ligação .....	22
Figura 2.18 - Soldadura de convés de navio pelo processo FSW .....	22
Figura 2.19 - Furo no final da soldadura .....	24
Figura 2.20 - Painel lateral de catamarã soldado por FSW .....	25
Figura 2.21 - Painel lateral de cockpit soldado por FSW .....	25
Figura 2.22 - Carruagem de comboio soldada por FSW .....	26
Figura 2.23 – Esquema de equipamento utilizado no processo FSW .....	26
Figura 3.1 - Configuração “T-butt” no processo FSW .....	28
Figura 3.2 - Montagem das chapas na fresadora convencional .....	29
Figura 3.3 - Execução das soldaduras .....	30
Figura 3.4 - Execução das soldaduras .....	30
Figura 3.5 – Ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva .....	31
Figura 3.6 – Ferramenta piramidal progressiva .....	31
Figura 3.7 - Ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva .....	32
Figura 3.8 – Ferramenta piramidal progressiva .....	32
Figura 3.9 - Coupon final soldados por FSW .....	32
Figura 3.10 - Coupon final soldados por FSW .....	33
Figura 3.11 – Disposição dos provetes nos coupons .....	33
Figura 3.12 – Provette para os ensaios metalográficos e de dureza .....	34
Figura 3.13 – Provette para os ensaios metalográficos e de dureza (após resina) .....	34
Figura 3.14 - Ensaio de dureza .....	36
Figura 3.15 - Ensaio de dureza .....	36
Figura 3.16 - Esquema de medição das durezas ( <i>skin</i> ) .....	37
Figura 3.17 - Esquema de medição das durezas ( <i>stringer</i> ) .....	37
Figura 3.18 – Provette para o ensaio de tração .....	38
Figura 3.19 – Provetes para os ensaios de tração .....	38
Figura 3.20 – Ensaio de tração .....	39
Figura 3.21 – Ensaio de tração .....	39
Figura 3.22 - Provette de tração após fratura .....	40
Figura 3.23 - Provette para o ensaio de fadiga .....	41
Figura 3.24 - Provetes para os ensaios de fadiga .....	41
Figura 3.25 - Microscópio eletrónico de varrimento (SEM) .....	42
Figura 4.1 – Macrografia da soldadura do coupon CRHP3, (ampliação 12.5x) .....	44

Figura 4.2 – Micrografia da zona nugget do coupon CRHP3, (ampliação 200x).....	45
Figura 4.3 - Micrografia da transição zona nugget e a ZTMA do coupon CRHP3, (ampliação 50x).....	45
Figura 4.4 - Micrografia da ZTMA do coupon CRHP3 (ampliação 200x).....	46
Figura 4.5 - Micrografia do material base do coupon CRHP3 (ampliação 200x).....	47
Figura 4.6 - Macrografia da soldadura do coupon PP1 (ampliação 12.5x).....	47
Figura 4.7 - Micrografia da zona nugget do coupon PP1 (ampliação 200x).....	48
Figura 4.8 - Micrografia da transição zona nugget e a ZTMA do coupon PP1 (ampliação 50x).....	48
Figura 4.9 - Micrografia da ZTMA do coupon PP1 (ampliação 200x).....	48
Figura 4.10 - Macrografia da zona nugget do coupon PP3 (ampliação 12.5x).....	49
Figura 4.11 – Micrografia da zona nugget do coupon PP3 (ampliação 50x).....	49
Figura 4.12 – Dureza Vickers dos coupons CRHP3 e PP1 ( <i>skin</i> ).....	50
Figura 4.13 - Dureza Vickers dos coupons CRHP1 e PP2 ( <i>skin</i> ).....	51
Figura 4.14 - Dureza Vickers dos coupons CRHP2 e PP3 ( <i>skin</i> ).....	51
Figura 4.15 - Dureza Vickers dos coupons CRHP3 e PP1 ( <i>stringer</i> ).....	52
Figura 4.16 - Dureza Vickers dos coupons CRHP1 e PP2 ( <i>stringer</i> ).....	53
Figura 4.17 - Dureza Vickers dos coupons CRHP2 e PP3 ( <i>stringer</i> ).....	53
Figura 4.18 - Curva Tensão-Deformação para a ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva.....	55
Figura 4.19 - Curva Tensão-Deformação para a ferramenta piramidal progressiva.....	55
Figura 4.20 - Provette de fadiga fraturado na zona da amarra.....	57
Figura 4.21 - Curva S-N.....	58
Figura 4.22 - Superfície fraturada PP1 aos 90.479 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa.....	60
Figura 4.23 - Superfície fraturada PP1 aos 90.479 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa.....	60
Figura 4.24 – Fratura por fadiga PP1 a) aos 90.479 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa.....	60
Figura 4.25 – Fratura por fadiga PP1 b) aos 90.479 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa.....	61
Figura 4.26 – Fratura dúctil PP1 c) aos 90.479 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa.....	61
Figura 4.27 - Superfície fraturada PP1 aos 631.603 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 99 MPa.....	62
Figura 4.28 - Superfície fraturada PP1 aos 631.603 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 99 MPa.....	62
Figura 4.29 – Fratura por fadiga PP1 a) aos 631.603 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 99 MPa.....	62
Figura 4.30 – Fratura por fadiga PP1 b) aos 631.603 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 99 MPa.....	63
Figura 4.31 – Fratura dúctil PP1 c) aos 631.603 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 99 MPa.....	63
Figura 4.32 - Superfície fraturada CRHP3 aos 115.651 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa.....	64
Figura 4.33 - Superfície fraturada CRHP3 aos 115.651 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa.....	64
Figura 4.34 – Fratura por fadiga CRHP3 a) aos 115.651 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa.....	64
Figura 4.35 – Fratura por fadiga CRHP3 b) aos 115.651 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa.....	65

Figura 4.36 – Fratura dúctil CRHP3 c) aos 115.651 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa.....	65
Figura 4.37 - Superfície fraturada CRHP3 aos 135.458 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa.....	65
Figura 4.38 - Superfície fraturada CRHP3 aos 135.458 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa.....	66
Figura 4.39 – Fratura por fadiga CRHP3 a) aos 135.458 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa.....	66
Figura 4.40 – Fratura por fadiga CRHP3 b) aos 135.458 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa.....	66
Figura 4.41 – Fratura dúctil CRHP3 c) aos 135.458 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa.....	67
Figura A.1 - Ferramenta Piramidal Progressiva .....	75
Figura A.2 - Ferramenta Cónica Roscada Helicoidal Progressiva .....	76
Figura A.3 - Ferramenta Piramidal Progressiva .....	77
Figura A.4 - Ferramenta Cónica Roscada Helicoidal Progressiva .....	78
Figura B.1 – Provette para ensaio de fadiga .....	79
Figura B.2 – Provette para ensaio de tração .....	80
Figura B.3 – Provette para ensaio de metalografia.....	81
Figura B.4 – Provette para ensaio de dureza .....	82
Figura B.5 – Disposição dos provetes nos coupons .....	83
Figura C.1 – Registo ensaios de dureza.....	84
Figura D.1 – Microestrutura do coupon CRHP1 .....	85
Figura D.2 – Microestrutura do coupon CRHP2 .....	86
Figura D.3 – Microestrutura do coupon CRHP3 .....	87
Figura D.4 – Microestrutura do coupon PP1 .....	88
Figura D.5 – Microestrutura do coupon PP2 .....	89
Figura D.6 – Microestrutura do coupon PP3 .....	90

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Tabela da composição das diferentes séries do alumínio.....	6
Tabela 2.2 - Aplicações das diferentes ligas de alumínio.....	7
Tabela 2.3 – Especificação dos tratamentos térmicos nas ligas de alumínio .....	7
Tabela 3.1 - Composição química da liga de alumínio AA 2017-T4.....	27
Tabela 3.2 - Propriedades físicas e mecânicas da liga de alumínio AA 2017-T4 .....	27
Tabela 3.3 - Parâmetros utilizados nos coupons soldados utilizando a ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva.....	29
Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados nos coupons soldados utilizando a ferramenta piramidal progressiva.....	30
Tabela 3.5 - Composição do reagente Keller .....	35
Tabela 4.1 - Parâmetros dos coupons soldados com a ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva.....	43
Tabela 4.2 - Parâmetros dos coupons soldados com a ferramenta piramidal progressiva .....	43
Tabela 4.3 - Tensão de rotura dos coupons soldados com a ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva.....	54
Tabela 4.4 - Tensão de rotura dos coupons soldados com a ferramenta piramidal progressiva .....	54
Tabela 4.5 - Valores médios da tensão de rotura dos coupons soldados com a ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva .....	54
Tabela 4.6 - Valores médios da tensão de rotura dos coupons soldados com a ferramenta piramidal progressiva .....	54
Tabela 4.7 - Valores resumo dos ensaios de fadiga.....	58

## 1 Introdução, Enquadramento do Projeto e Objetivos

As ligas de alumínio da série 2XXX são dos materiais mais utilizados nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, muito principalmente devido à sua baixa densidade. Além disso, possuem também excelentes propriedades mecânicas, a que se junta uma excelente resistência à corrosão [1,2,3].

Quando se fala na união de metais, a soldadura é um dos processos mais utilizados na indústria. A soldadura das ligas de alumínio da série 2XXX pelos processos ditos tradicionais (soldadura por fusão, com formação de arco elétrico) é pouco atrativa, devido ao facto de gerarem facilmente diversos defeitos, tais como empenos, porosidades, descontinuidades, fendas e também fissuração na solidificação, defeitos que potenciam a perda de importantes propriedades [1,4,5]. Destacam-se os processos tradicionais de soldadura MIG (*Metal Inert Gas*) e TIG (*Tungsten Inert Gas*).

Com o objetivo de dar solução ao problema, estudaram-se e desenvolveram-se novos processos de soldadura e nesse contexto surgiu a soldadura por fricção linear - FSW (*Friction Stir Welding*), processo de soldadura que será objeto de estudo na presente dissertação. Este é um processo de soldadura que se caracteriza pela ausência de fusão dos materiais envolvidos. Caracteriza-se igualmente pela ausência de qualquer material de adição no processo de soldadura. É, portanto, um processo de soldadura no estado sólido. O processo é de relativa simplicidade, no qual o calor gerado pelo atrito e deformação plástica provocados pelo avanço de uma ferramenta rotativa com os materiais a unir, faz com que estes se deformem plasticamente e se misturem, dando assim origem a uma junta soldada formada pela mistura dos materiais deformados [1,4,5]. O processo FSW envolve o controlo e a conjugação de vários parâmetros, sendo um dos mais importante, senão mesmo o mais importante, a geometria da ferramenta rotativa utilizada [1,6,7].

Nesta dissertação estudou-se de que forma a geometria da ferramenta rotativa utilizada no processo FSW influencia a qualidade das juntas soldadas em ligas de alumínio AA 2017-T4. Utilizaram-se duas geometrias diferentes para as ferramentas envolvidas na realização das soldaduras, as quais, conjugadas e combinadas com outros parâmetros do processo, como a velocidade de avanço, a velocidade de rotação, a penetração e o ângulo de inclinação da ferramenta, permitiram compreender a influência das diferentes geometrias utilizadas, no que respeita à qualidade, em particular a resolução de defeitos nas soldaduras produzidas. Espera-se assim que, após os resultados dos ensaios mecânicos e metalográficos realizados, se consiga concluir qual é o procedimento de soldadura que permite obter as melhores propriedades finais.

Após a introdução, onde se enquadrou o projeto e se definiram os objetivos a atingir, a presente dissertação terá no seu capítulo dois uma descrição do estado da arte relativo ao processo de soldadura por fricção linear. O capítulo começará por abordar as ligas de alumínio e respetivas séries, a que se seguirá uma descrição detalhada do processo FSW e a forma como ele se desenvolve. O capítulo aborda com particular cuidado os diferentes parâmetros do processo, a sua importância, e de que forma afetam a qualidade das soldaduras. Na descrição e abordagem ao estado da arte é dado grande destaque aos elementos que constituem a ferramenta rotativa e as diferentes geometrias usuais neste processo. Faz-se referência às diferentes zonas microestruturais resultantes nas juntas soldadas, ao fluxo de material e também ao tipo de juntas normalmente obtidas. São descritas as vantagens do processo, em contraste com as suas desvantagens, sendo igualmente abordadas as aplicações práticas do processo e os equipamentos utilizados na indústria.

No capítulo três relata-se em pormenor o trabalho experimental realizado: caracterização da liga de alumínio utilizada, equipamento utilizado para a realização das soldaduras e dimensões das chapas que foram soldadas. Faz-se referência aos valores utilizados e definidos para os diferentes parâmetros utilizados, bem como às diferentes geometrias das ferramentas utilizadas, cuja influência na qualidade das soldaduras será objeto de estudo nesta dissertação. Descrevem-se igualmente os ensaios mecânicos e metalográficos realizados, bem como as dimensões utilizadas para a fabricação dos respetivos provetes. Detalham-se os ensaios metalográficos, os ensaios de tração, os ensaios de dureza e os ensaios de fadiga, fazendo-se referência aos equipamentos utilizados nos ensaios, bem como toda a metodologia utilizada na realização dos mesmos. Aborda-se também a visualização de superfícies fraturadas nos ensaios de fadiga.

No capítulo quatro faz-se a análise e discussão dos resultados obtidos, tendo em conta os resultados obtidos nos ensaios, quer os mecânicos, quer os metalográficos. É feita uma análise fractográfica das superfícies de fratura dos provetes de fadiga. Toda a análise e discussão dos resultados ajudará a perceber qual das geometrias das ferramentas rotativas utilizadas foi a que contribuiu para as melhores soldaduras.

Por fim, no capítulo cinco, elencam-se as conclusões retiradas de uma forma sucinta, perspectivando-se também a realização de trabalhos futuros, com vista a uma melhor compreensão do processo FSW, bem como a conjugação de todos os parâmetros envolvidos no mesmo, para que este possa ganhar terreno e se afirmar cada vez mais como uma opção a ter em conta na união de peças metálicas onde é importante a manutenção e preservação das propriedades dos materiais, propriedades que não se conseguem manter quando as peças são unidas pelos processos tradicionais de soldadura por fusão.



## **2 Soldadura por Fricção Linear de Ligas de Alumínio - Estado da Arte**

### **2.1 Introdução**

As ligas de alumínio são largamente utilizadas na indústria, na engenharia e na arquitetura. A sua vasta aplicação resulta da conjugação de muitas propriedades, das quais se destacam a baixa densidade. Além da baixa densidade, o alumínio tem uma elevada condutibilidade térmica, quando comparado com a grande maioria dos metais; tem também uma elevada ductilidade, que garante que o alumínio possa ser utilizado em vários objetos com variadas formas, podendo ser deformado e conformado com relativa facilidade; possui uma excelente condutibilidade elétrica, daí ser extremamente utilizado na produção de cabos elétricos. Ainda assim, a condutibilidade elétrica do alumínio é cerca de 60% da condutibilidade elétrica do cobre. Possui também uma excelente resistência à corrosão, devido ao facto de possuir uma fina camada de óxido, que garante a respetiva conservação ao longo do tempo; possui uma grande possibilidade de acabamentos, como a anodização e a lacagem, acabamentos que aumentam a sua resistência à corrosão; é também um material infinitamente reciclável, resultando dessa característica óbvios benefícios para o ambiente [2,3,8,9].

Porém, o alumínio, por si só, não pode ser utilizado para a obtenção de respostas às variadas solicitações de engenharia. A combinação de materiais para a obtenção de ligas abriu portas à produção de alumínio específico para diferentes aplicações, estando as ligas de alumínio divididas em duas grandes classes: as ligas para conformação plástica, que representam a maior parte da produção mundial, e as ligas para fundição. As ligas de alumínio estão configuradas e organizadas em diferentes séries. A tabela 2.1 resume as diferentes séries dos alumínios [2,3,8,9].

Série	Elementos de liga
1XXX	Alumínio com mínimo 99% pureza
2XXX	Alumínio-Cobre (Al-Cu)
3XXX	Alumínio-Manganês (Al-Mn)
4XXX	Alumínio-Silício (Al-Si)
5XXX	Alumínio-Magnésio (Al-Mg)
6XXX	Alumínio-Magnésio-Silício (Al-Mg-Si)
7XXX	Alumínio-Zinco-Magnésio (Al-Zn-Mg)
8XXX	Alumínio-Lítio (Al-Li) e outros

Tabela 2.1 - Tabela da composição das diferentes séries do alumínio [9]

As ligas de alumínio encontram-se igualmente divididas em dois grupos: as ligas tratáveis termicamente e as ligas não tratáveis termicamente. No grupo das ligas tratáveis termicamente fazem parte as ligas das séries 2XXX, 6XXX e 7XXX, enquanto que as ligas das séries 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX fazem parte do grupo das ligas de alumínio não tratáveis termicamente [9,10].

As ligas de alumínio das séries 2XXX e 7XXX são as mais utilizadas nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, pois possuem elevados níveis de resistência mecânica, as quais, aliadas à baixa densidade do metal e à sua facilidade de conformação e maquinação, transformam as ligas de alumínio numa das melhores opções para a fabricação de peças e estruturas utilizadas nas referidas indústrias [1,2,3,4]. Contudo, as ligas da série 2XXX têm melhor desempenho à fadiga do que as ligas da série 7XXX, daí serem das mais utilizadas nas indústrias aeronáutica e aeroespacial. As ligas da série 2XXX são geralmente compostas por 95% de alumínio puro, o que lhes garante uma maior resistência à corrosão [2,9]. Na tabela 2.2 destacam-se as principais aplicações das diferentes séries das ligas de alumínio.

Série	Aplicações
1XXX	Indústrias químicas e elétrica
2XXX	Indústrias aeronáutica e aeroespacial
3XXX	Peças arquitetônicas e produtos de uso geral
4XXX	Varetas e elétrodos para soldadura
5XXX	Indústrias automóvel e naval
6XXX	Produtos extrudidos de uso arquitetônico e aplicações na indústria automóvel e outras
7XXX	Indústrias aeronáutica e aeroespacial
8XXX	Aplicações várias

Tabela 2.2 - Aplicações das diferentes ligas de alumínio [10]

As ligas de alumínio que sofrem um tratamento térmico com vista a melhorar as suas propriedades, são classificadas com a letra T seguida por um ou mais dígitos, em que a sua designação está explicada na tabela 2.3 [2,9,10].

Tipo	Especificação Tratamento Térmico
T1	Solubilização parcial e envelhecimento natural
T2	Recozimento
T3	Solubilização total e deformação a frio
T4	Solubilização total e envelhecimento natural
T5	Envelhecimento artificial
T6	Solubilização total e envelhecimento artificial
T7	Solubilização e estabilização
T8	Solubilização, deformação a frio e envelhecimento artificial
T9	Solubilização, envelhecimento artificial e deformação a frio

Tabela 2.3 – Especificação dos tratamentos térmicos nas ligas de alumínio [9,10]

A liga de alumínio estudada na presente dissertação, a liga AA 2017-T4, foi tratada termicamente com solubilização total, seguido de envelhecimento natural. Este tratamento térmico confere às ligas uma melhor resistência mecânica. O tratamento consiste em aquecer

a liga uniformemente até uma temperatura aproximada de 500 °C. A temperatura exata depende da liga a tratar. O aquecimento ocasiona a dissolução dos compostos intermetálicos em solução sólida. Segue-se um arrefecimento rápido, geralmente em água, que previne temporariamente a precipitação dos compostos intermetálicos presentes. Os compostos vão-se gradualmente precipitando, alcançando o máximo efeito de endurecimento (envelhecimento). No tratamento T4 acontece espontaneamente após alguns dias (envelhecimento natural) [11].

## 2.2 Descrição do processo FSW

A soldadura por fricção linear – FSW (Friction Stir Welding) – é uma tecnologia de soldadura inovadora, que foi desenvolvida e patenteada em 1991 pelo “The Welding Institute” (TWI), no Reino Unido [1,4,5,12,13,14]. Esta nova tecnologia surgiu inicialmente aplicada às ligas de alumínio, material em crescente utilização nas indústrias aeronáutica e aeroespacial [1,4,15]. A soldadura das ligas de alumínio das séries 2XXX e 7XXX por processos de soldadura tradicionais (soldadura por fusão) apresentava diversas limitações devido à geração de múltiplos defeitos, tais como porosidades na zona de fusão, fissuras, resultando numa perda muito significativa das propriedades mecânicas em relação ao material base [1,4,5]. Devido à existência destes defeitos, normalmente as ligas de alumínio eram denominadas de não soldáveis [1,16]. A soldadura por fricção linear permitiu resolver este problema: sendo um processo de soldadura no estado sólido, em que não se atinge a fusão do material base, eliminavam-se os problemas de fissuração na solidificação, que ocorriam com os processos tradicionais de soldadura [1,4].

O processo é relativamente simples: a tecnologia é baseada no avanço duma ferramenta rotativa, não consumível, que penetra na linha de junção das peças a soldar, fixadas rigidamente e encostadas entre si [1,5,17,18]. O aquecimento gerado pela fricção da ferramenta rotativa com o material base, provoca o seu amaciamento e amolecimento e uma intensa deformação plástica, de que resulta uma junta soldada, após o arrefecimento [1,5,13,16]. O processo FSW é classificado como um processo de soldadura no estado sólido, obtendo-se, dessa forma, soldaduras com muito poucos ou nenhuns defeitos. Neste processo não ocorre a fusão dos materiais envolvidos, nem se utilizam materiais de adição. A junta soldada tem uma composição química semelhante à dos materiais a soldar. O processo de soldadura por fricção linear, sendo um processo de soldadura no estado sólido, pode ser usado tanto na soldadura de materiais homogêneos ou heterogêneos, como por exemplo alumínio e

cobre [5,16,18,19,20]. Na figura 2.1 [21] esquematiza-se o funcionamento geral do processo FSW.

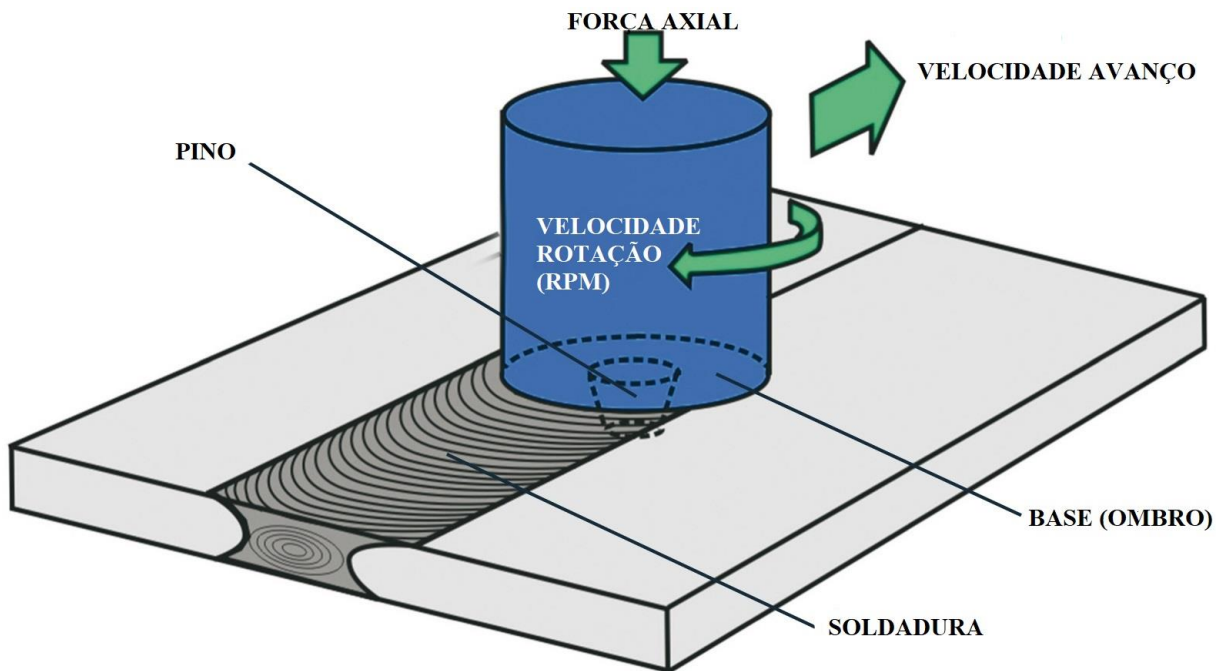


Figura 2.1 - Ilustração do processo FSW [21]

O processo de soldadura FSW é um processo assimétrico. O lado em que a velocidade de rotação e a velocidade de avanço da ferramenta coincidem chama-se lado de avanço, enquanto ao lado em que estas são opostas denomina-se lado de recuo. A geração de calor provocada pelo atrito da ferramenta leva ao amaciamento do material, de modo que no lado do avanço o material é empurrado para a parte da frente da ferramenta, enquanto que no lado do recuo o material flui para a parte de trás da ferramenta [14,22,23,24].

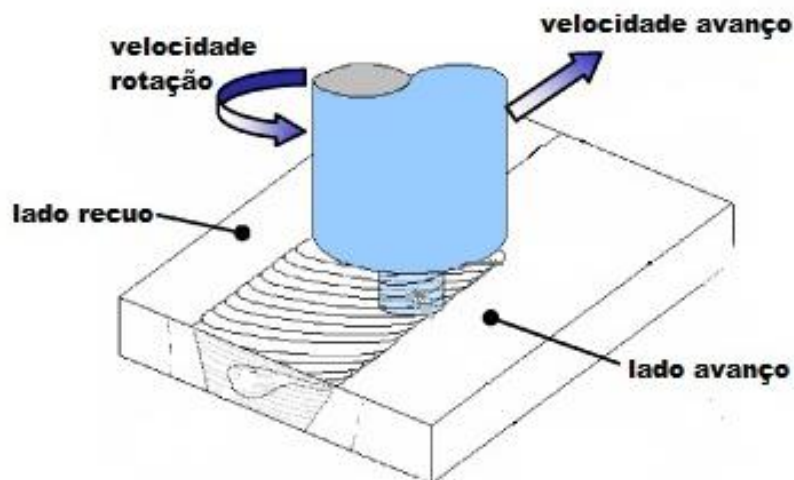


Figura 2.2 – Processo FSW (lado de avanço e recuo) [23]

## 2.3 Parâmetros do processo FSW

O processo FSW é controlado por diversos parâmetros. Estes influenciam todo o processo de soldadura e determinam a qualidade das juntas obtidas, determinando igualmente a temperatura máxima atingida no processo, bem como o binário e a potência [1,6,7,16]. São muitos os parâmetros a ter em conta no processo de soldadura por fricção linear. De entre os principais parâmetros, destacam-se a geometria da ferramenta rotativa, porventura o parâmetro mais importante e cuja influência no processo será objeto de estudo nesta dissertação, a velocidade de avanço, a velocidade de rotação da ferramenta, a força vertical, a inclinação e a penetração da ferramenta, e também os diferentes materiais das ferramentas [1,6,7,14,16,25]. De seguida, apresenta-se o resumo de cada um destes parâmetros, bem como a sua influência em todo o processo.

### 2.3.1 Geometria da ferramenta

A geometria da ferramenta rotativa é um dos parâmetros mais importantes, senão mesmo o mais importante do processo FSW [1,6]. Na presente dissertação focar-se-á em especial este parâmetro. A ferramenta rotativa é o elemento responsável pela geração do aquecimento e escoamento do material plastificado em redor do pino [1,5,6,13,26,27]. A geometria e a forma como a ferramenta é constituída, tem uma relação muito direta com o calor gerado no processo. Contudo, é no fluxo do material que a ferramenta tem o seu papel mais crítico. Ela tem, portanto, duas funções principais: a primeira, o aquecimento das peças a ligar, e a segunda, a mistura e o movimento do material a fim de produzir a junta soldada [1,6,17,26].

A ferramenta rotativa, que apesar do calor gerado devido ao atrito da mesma com a peça de trabalho não é consumível, é composta por um **pino** e um outro elemento denominado **base** ou **ombro**, conforme ilustrado na figura 2.3 [1,5,6,7,13,28,27]. A primeira função da ferramenta diz respeito ao aquecimento do material. Na fase inicial de mergulho da ferramenta na linha da junta, o aquecimento resulta principalmente do atrito entre o pino e a peça, sendo que algum aquecimento adicional resultará em consequência da deformação plástica do material [1,13]. A ferramenta é inserida até o ombro tocar na peça. O atrito entre o ombro e a peça irá gerar o maior aquecimento. O aquecimento localizado amacia o material em redor do pino da ferramenta, facilitando dessa forma a deformação plástica do material e a formação de grãos recristalizados na junta soldada. A combinação simultânea do movimento de rotação e de avanço da ferramenta ao longo da linha de junção das peças a unir provoca o

movimento do material da frente do pino para a parte traseira do mesmo. O ombro da ferramenta é ainda responsável pelo arrastamento do material para a zona de influência do pino e serve ainda para restringir e impedir que o material plastificado seja expulso da junta de soldadura [1,6,17,26].

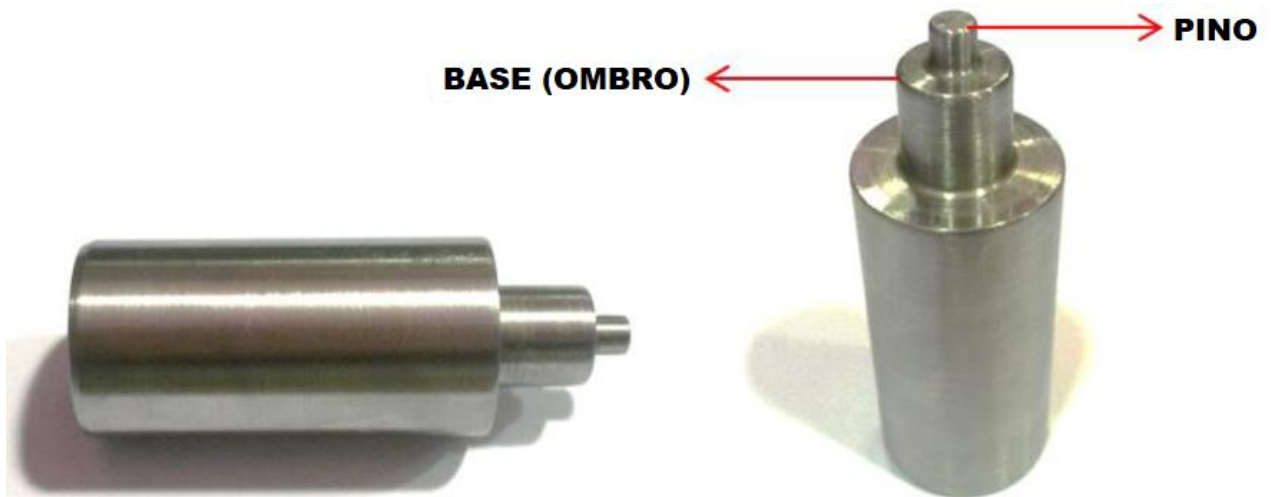


Figura 2.3 - Ferramenta típica do processo FSW [28]

O ombro da ferramenta pode apresentar diversas formas e geometrias. Os ombros em forma de espiral são os mais utilizados no processo, sobretudo quando a intenção é desenvolver forças centrífugas perfeitamente alinhadas numa determinada direção [26,29]. O efeito das estrias é suficiente para dirigir o material para o interior do ombro no sentido do pino, reduzindo dessa forma a formação de rebarba na soldadura [6,30]. A uniformidade da microestrutura e respetivas propriedades, bem como as cargas do processo, são regidas pela arquitetura e geometria da ferramenta. Geralmente, um ombro côncavo e pinos cilíndricos roscados são as geometrias de ferramenta mais utilizadas [1,29,31].

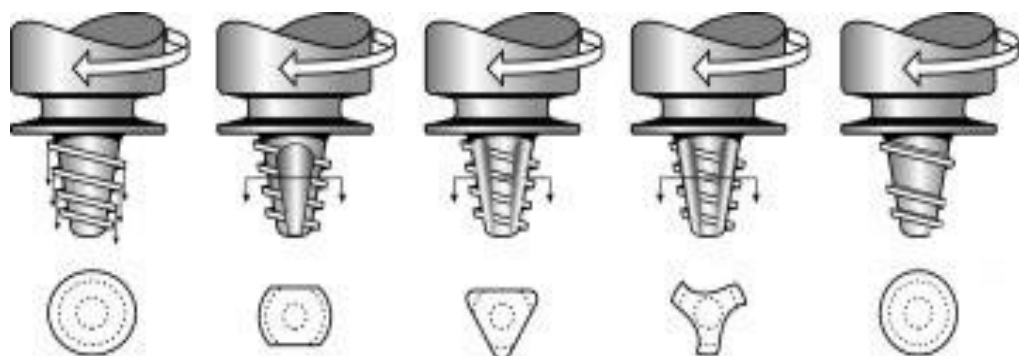


Figura 2.4 - Geometrias de bases desenvolvidas pelo TWI utilizadas no processo FSW [29]

A segunda função da ferramenta é misturar e movimentar o material que está a ser deformado plasticamente [1,6]. O pino desempenha um papel crucial neste trabalho e na intensa deformação plástica imposta aos materiais, influenciando igualmente a velocidade de soldadura no processo FSW [4,6,7,27]. Além disso, o pino pode fragmentar e dispersar qualquer óxido ou outras impurezas existentes na linha da junta, quando a soldadura é feita em ligas de alumínio [6]. É também responsável pela deslocação do material plastificado na direção da espessura da peça [7]. Devido às várias formas geométricas que a ferramenta pode ter, o movimento do material em redor do pino poderá ser bastante complexo [1,5,27]. Os pinos poderão possuir diversas formas, podendo também apresentar rosca ou não. Os pinos normalmente são cilíndricos, podendo também apresentar forma cónica [5,27,30]. Normalmente quando se pretendem soldar chapas finas o pino tem a forma cilíndrica. Ao invés, se chapas tiverem espessura elevada, deve usar-se um pino cónico. Na figura 2.5 [27] esquematiza-se algumas das geometrias de pinos mais utilizadas.

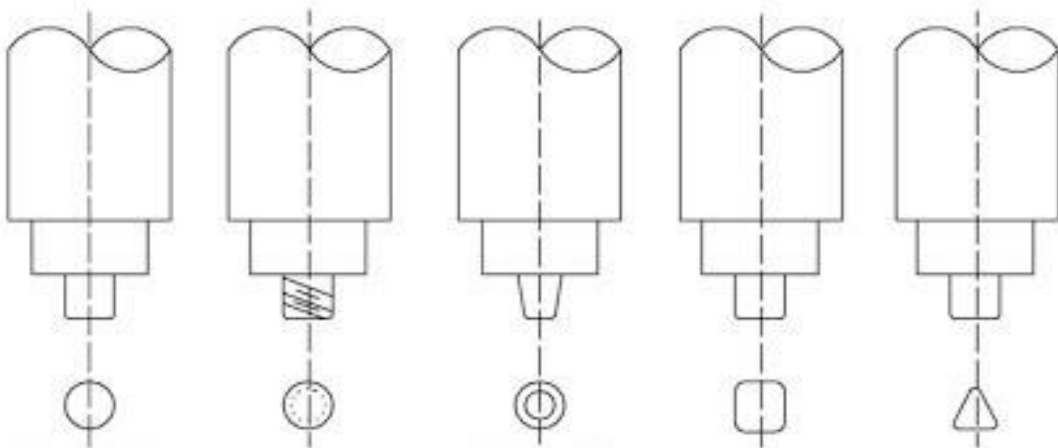


Figura 2.5 - Geometrias correntemente utilizadas para os pinos [27]



Figura 2.6 - Pinos correntemente utilizados [26]

A experiência acumulada, os conhecimentos adquiridos e também uma melhoria na compreensão dos mecanismos que controlam os fluxos do material, conduziu a uma conceção das ferramentas que foram evoluindo de forma muito significativa. Foram utilizados recursos adicionais e complexos para alterar o fluxo de materiais, misturar e reduzir as cargas do processo. O TWI desenvolveu e patenteou algumas ferramentas, das quais se destacam a ferramenta *Worl<sup>TM</sup>* e a *MX Triflute<sup>TM</sup>* [1,32].



Figura 2.7 - Ferramenta *Worl<sup>TM</sup>* [1,32]

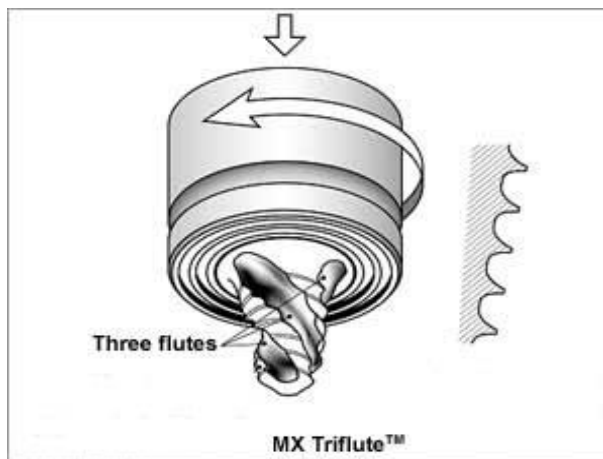


Figura 2.8 - Ferramenta *MX Triflute<sup>TM</sup>* [1,32]

A ferramenta *Worl<sup>TM</sup>* permite reduzir o volume de material deslocado em 60%, enquanto que a ferramenta *MX Triflute<sup>TM</sup>* consegue reduzir esse volume em cerca de 70%. As características da ferramenta *MX Worl<sup>TM</sup>*, que utiliza uma rosca helicoidal, têm quatro objetivos principais: reduzir a força axial na soldadura; melhorar o fluxo do material plastificado; facilitar a limpeza da junta soldada e aumentar a interação entre a ferramenta e o material, e assim, proporcionar um incremento mais fácil de calor gerado na junta. Quanto à

forma dos pinos da ferramenta *MX Triflute™*, foram dimensionados e desenhados com os seguintes objetivos: melhorar o fluxo do material em redor e por baixo do pino; alargar a região da soldadura durante o processo; promover uma melhor movimentação do material de forma a ajudar à dispersão de óxidos na interface da junta soldada, e por fim, devido à sua inclinação oblíqua, melhorar a qualidade das soldaduras na região da junta [1,32].

Para além destas ferramentas, a TWI desenvolveu e projetou outras geometrias e modelos, de forma a dar a melhor resposta a diferentes materiais e a condições distintas do processo. As várias geometrias desenvolvidas para os ombros das ferramentas, possuem a capacidade de melhorar o acoplamento e interação entre a base da ferramenta e a peça, atraindo e puxando, dessa forma, material plastificado dentro de certas características especiais. Tendo por base a relação estreita entre a geometria da ferramenta e o fluxo do material, bem como a relação entre este último e a microestrutura resultante das soldaduras, a geometria varia de acordo com cada ferramenta. Na figura 2.9 são ilustradas algumas geometrias para as bases das ferramentas desenvolvidas pelo TWI [1,32].

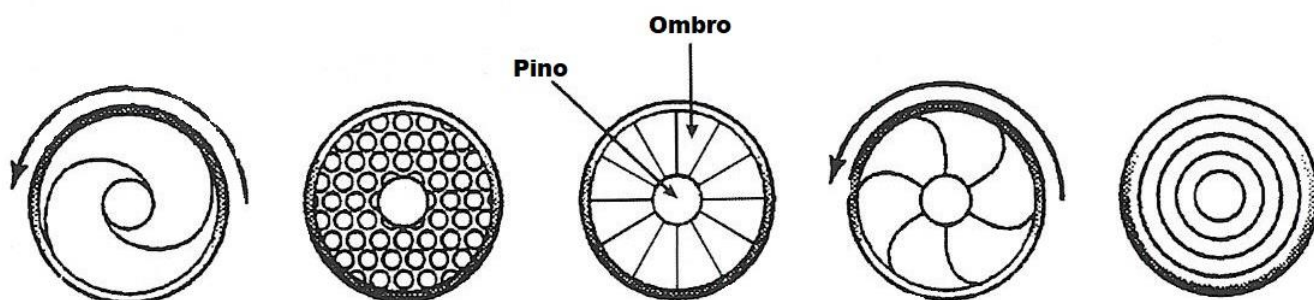


Figura 2.9 - Geometrias para a base da ferramenta desenvolvidas pelo TWI [1,32]

### 2.3.2 Velocidade de avanço

A velocidade de avanço mede a distância que a ferramenta rotativa percorre na linha de junção por unidade de tempo, normalmente medida em mm/min. Este parâmetro tem uma relação muito direta com a adição de calor durante o processo. Velocidades de avanço mais elevadas farão com que o calor localizado seja menor, o que dificulta o fluxo de material na soldadura. Ao invés, uma menor velocidade de avanço da ferramenta, produzirá uma maior adição de calor por unidade de comprimento da soldadura, permitindo desse modo um melhor fluxo de material, devido ao facto de um maior aquecimento da peça promover uma plastificação mais elevada do material [6,33].

### 2.3.3 Velocidade de rotação

A velocidade de rotação da ferramenta, influencia igualmente o calor adicionado durante o processo, na medida em que quanto maior for a velocidade, maior será também a temperatura atingida no processo, devido ao aquecimento provocado pelo atrito no contacto da ferramenta rotativa com a peça. O aumento deste parâmetro, com o consequente aumento da temperatura localizada, facilita o escoamento e o fluxo do material em torno do pino, em virtude de uma melhor plastificação do material [6,34]. A rotação da ferramenta rotativa faz com que o material em redor do pino escoe e se misture, num movimento da parte frontal da ferramenta para a parte traseira [1,5,6]. A qualidade final das soldaduras obtidas está diretamente ligada com a velocidade de rotação da ferramenta, pois um aumento deste parâmetro provocará uma maior geração de calor, o que poderá provocar o aparecimento e formação de rebarba na zona das soldaduras [6].

### 2.3.4 Força vertical

A força vertical, ou força axial, é igualmente um parâmetro importante, pois poderá provocar o aparecimento de defeitos nas soldaduras caso esta não seja bem calibrada. A temperatura atingida no processo aumenta com o aumento desta força: se for demasiado alta provoca sobreaquecimento e alargamento da junta devido à formação excessiva de rebarba. No caso da aplicação de uma força axial demasiado baixa, o ombro da ferramenta rotativa não assenta corretamente na superfície e o material não é corretamente misturado, levando à possibilidade de formação de ranhuras superficiais e de vazios. O excesso de força vertical no desenrolar do processo pode ocasionar a formação de rebarba (flash), que adere à superfície da peça, defeito que é facilmente visível [6,13,16,35].

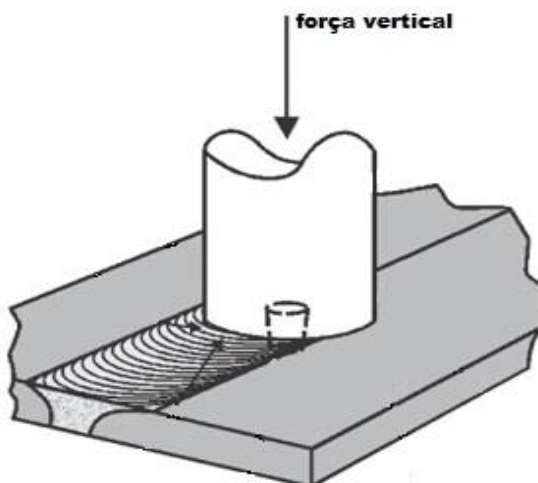


Figura 2.10 - Força vertical (ou força axial) [35]

### 2.3.5 Ângulo de inclinação

A ferramenta rotativa, que produz a união entre as chapas, fica, em geral, ligeiramente inclinada no sentido da soldadura, formando um ângulo com a vertical, designado ângulo de inclinação. Este ângulo de inclinação da ferramenta é um fator importante no processo FSW, pois auxilia o movimento do material da frente para trás do pino, e também ajuda na consolidação do material plastificado após a passagem do mesmo, devido à maior pressão existente nessa região [6,36].

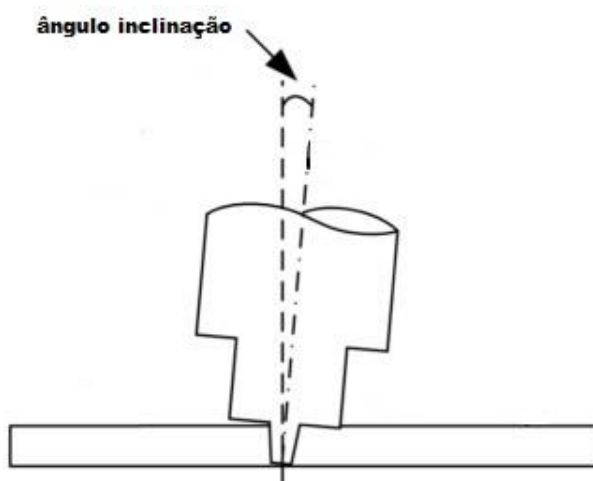


Figura 2.11 - Ângulo de inclinação da ferramenta [36]

### 2.3.6 Penetração da ferramenta

A penetração da ferramenta é a relação entre o comprimento do pino e o ângulo de inclinação, definindo assim a pressão que é exercida sobre o material na parte posterior da ferramenta durante o processo de soldadura. Quando o comprimento do pino é superior à espessura da chapa, o encosto da ferramenta não tem muito contacto com a chapa a ser soldada, diminuindo assim a temperatura de soldadura e reduzindo a pressão da base da ferramenta sobre a chapa, daí resultando frequentemente soldaduras com defeitos [6].

## 2.4 Fluxo de material

O fluxo de material durante a soldadura por fricção linear é bastante complexo e depende dos vários parâmetros do processo, bem como da geometria da ferramenta rotativa e também dos materiais a serem soldados. O fluxo de material é particularmente influenciado pela geometria da ferramenta. Torna-se muitíssimo importante compreender as características do fluxo de material, para que possa depois haver um ótimo projeto da ferramenta, e dessa forma poder-se

obter e conseguir excelentes soldaduras, através das quais se consiga obter uma grande eficiência estrutural. Realizaram-se numerosas investigações sobre o comportamento do fluxo de material durante o processo FSW. Uma série de técnicas, como a traçagem por marcador e a soldadura de materiais e ligas dissimilares foram utilizadas a fim de se compreender o mecanismo. Além disso, foram usados métodos computacionais para simular e estudar o fluxo de material [1].

Um dos métodos utilizados para se perceber o mecanismo do fluxo de material consiste em usar um material rastreador, diferente do que está a ser soldado. Materiais de marcação como folhas de cobre, pequenas tiras de aço e fios de tungstênio têm sido utilizadas como rastreadores do fluxo de material no processo FSW [1]. Reynolds e seus colaboradores [37,38,39] investigaram o comportamento do fluxo da liga de alumínio AA 2195-T8 no processo FSW, usando uma técnica de inserção de marcadores. Os marcadores, da liga de alumínio AA 5454-H32, foram incorporados no caminho da ferramenta rotativa e a sua posição final após a soldadura, foi revelada por corte de fatias sucessivas de 0.25 mm de espessura da superfície superior da soldadura, seguidamente “*atacadas*” com reagente Keller, seguido de exame metalográfico. Com base nas suas observações, Reynolds sugeriu que o processo de soldadura por fricção linear podia ser descrito como um processo de extrusão *in situ*, em que o ombro da ferramenta, o pino, a placa de suporte da soldadura e o metal de base formam uma “câmara de extrusão”, a qual se move em relação à peça de trabalho [1].

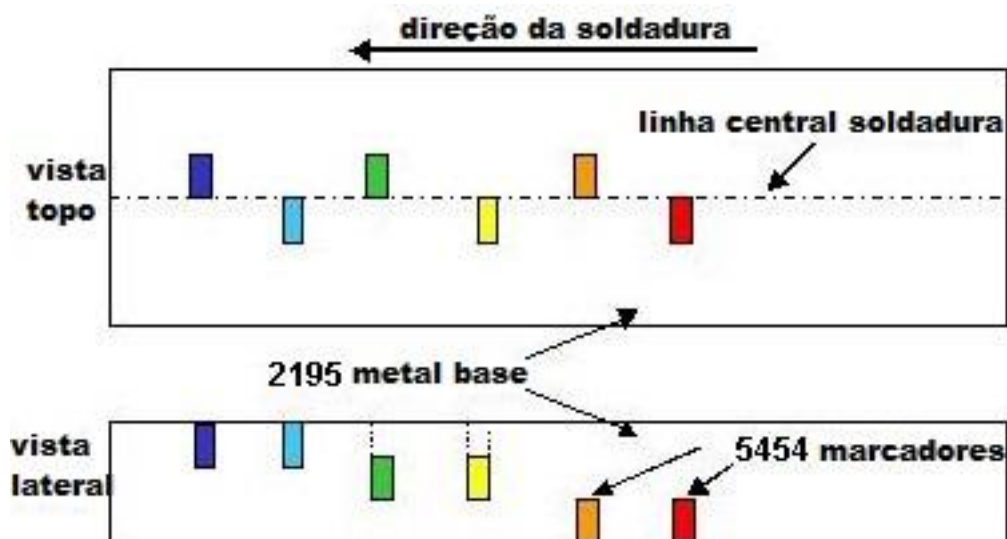


Figura 2.12 – Esquema de rastreador de material [1,38]

Outra técnica para se estudar o fluxo de material na soldadura por fricção linear consiste em soldar materiais dissimilares para visualizar o fenómeno [1]. Midling [40] investigou a influência da velocidade de avanço da soldadura no fluxo de material em soldaduras de ligas de alumínio diferentes, com base no estudo da microestrutura da junta. No entanto, a informação sobre a visualização do fluxo foi limitada à interface entre as ligas dissimilares [1,40]. Para além destas abordagens experimentais, foram efetuados vários estudos com recurso a métodos numéricos, simulando o fluxo de materiais que ocorre durante o processo FSW. Essas tentativas, visavam a compreensão do mecanismo físico que está na génese do fluxo de material que ocorre durante o processo [1]. Xu e seus colaboradores [41] desenvolveram dois modelos através do método de elementos finitos: o modelo de interface deslizante e o modelo de contacto de fricção [1,41]. Resumindo, o fluxo de material durante o processo FSW é complexo, e a compreensão do processo de deformação plástica ainda é bastante limitada [1].

## 2.5 Caracterização microestrutural das juntas obtidas por FSW

O processo FSW origina juntas muito diferentes das que são obtidas pelos processos comuns de soldadura por fusão. Conforme se pode observar na macrografia ilustrada na figura 2.13, uma soldadura executada pelo processo FSW possui quatro zonas distintas: a zona do material base (MB), a zona afetada pelo calor (ZAC), a zona térmica e mecanicamente afetada (ZTMA), e por último, a zona nugget [1,14,42,43,44,45].

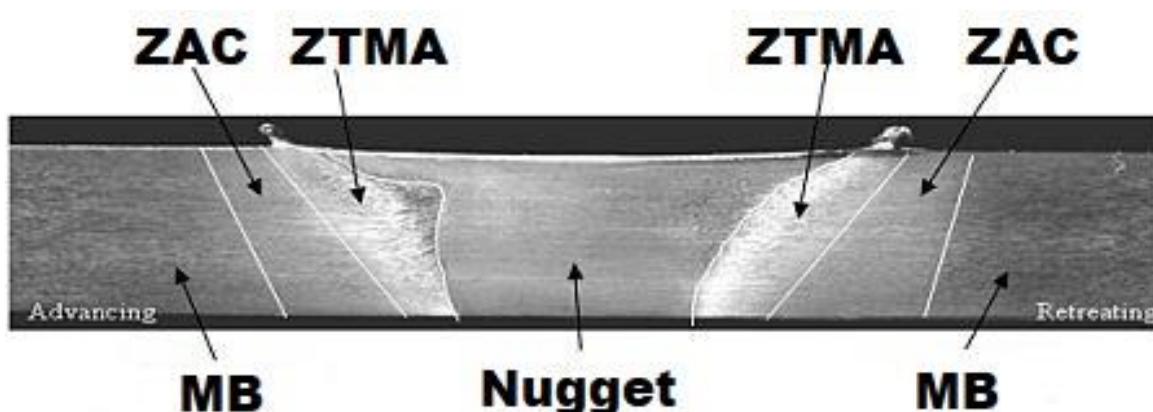


Figura 2.13 - Diferentes zonas microestruturais das soldaduras obtidas pelo processo FSW [43]

### **2.5.1 Zona nugget**

A zona nugget, ou zona dinamicamente recristalizada [1,43], é a zona que se encontra em contacto permanente com a ferramenta rotativa. Esta zona encontra-se em permanente contacto com o pino da ferramenta. A elevada deformação plástica dos materiais ocorrida no processo, bem como o aquecimento devido ao atrito provocado pela rotação e deslocamento da ferramenta, provoca a formação de uma microestrutura de grãos finos recristalizados e equiaxiais. Vários investigadores observaram que os pequenos grãos nesta zona contêm um elevado número de subgrãos, subfronteiras e deslocações [1,46,47]. A dimensão e forma desta zona dependem dos parâmetros de soldadura do processo, da geometria da ferramenta e também da temperatura atingida [45,46]. Esta zona apresenta duas formas distintas: uma forma em bacia na parte superior, local que está em permanente contacto com a ferramenta rotativa e onde a ação da temperatura mais se faz sentir, e uma outra de forma elítica. O tamanho desta zona está diretamente ligado com a dimensão do pino da ferramenta. Está comprovado que à medida que a dimensão do pino aumenta, a zona nugget adquire uma forma mais arredondada, com um diâmetro máximo no centro da junta soldada [1,38]. Diversos estudos comprovam que uma diminuição da temperatura no processo traduz-se numa diminuição do tamanho do grão recristalizado [1,46,48]. Pelo contrário, um aumento da temperatura leva à formação de grãos recristalizados grosseiros e crescimento de grãos. Da mesma forma, um abaixamento da velocidade de rotação da ferramenta, mantendo a velocidade de avanço constante, provoca a formação de grãos mais pequenos, devido à diminuição do aquecimento da peça ser menor. O ciclo térmico que se forma no centro da soldadura conduz à dissolução de precipitados. Quando a zona está exposta a temperaturas elevadas, perto da temperatura de fusão dos materiais, devido à elevada deformação plástica provocada pela rotação do pino, verifica-se um crescimento de precipitados mais grosseiros e também se verifica a dissolução de precipitados de endurecimento.

### **2.5.2 Zona térmica e mecanicamente afetada (ZTMA)**

A zona térmica e mecanicamente afetada é uma zona de transição entre a zona nugget e a zona afetada pelo calor [42,43]. Esta zona sofre influência térmica e mecânica devido ao contacto com o fluxo gerado à volta do nugget. Nesta zona, a soldadura é afetada pela temperatura atingida no processo e pela deformação plástica do material, apresentando grãos alongados devido ao fluxo gerado à volta do nugget [1,42]. Apesar da deformação plástica que esta zona sofre, não se verifica recristalização do grão, como acontece na zona nugget, porque aqui não há uma extensão de deformação suficientemente grande para provocar a

recristalização. Nesta zona poderá verificar-se dissolução dos precipitados devido às altas temperaturas a que a zona é exposta. A extensão da dissolução dos precipitados depende do ciclo térmico experimentado por esta zona. A figura 2.14 [1], mostra uma micrografia desta zona, podendo observar-se a transição e a separação entre a ZTMA e a zona nugget.

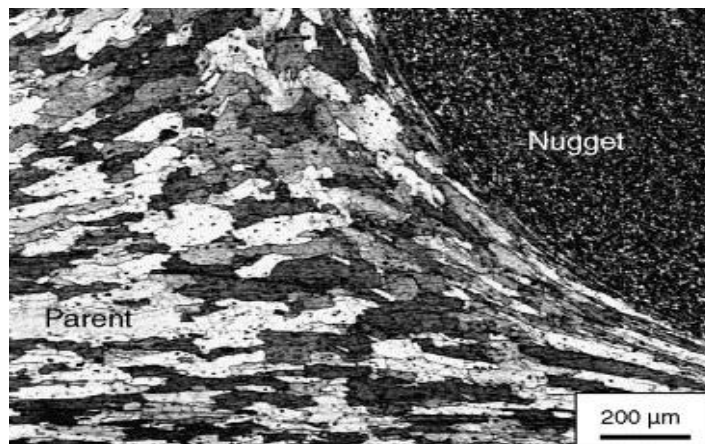


Figura 2.14 - Transição entre a zona nugget e a zona térmica e mecanicamente afetada [1]

### 2.5.3 Zona afetada pelo calor

A zona afetada pelo calor é a zona de maior dimensão da junta, sofrendo apenas a influência da temperatura promovida pelo atrito gerado no processo. Nesta zona, não se verifica deformação do material, estendendo-se até que o efeito da temperatura no processo não seja significativo [14,42,43]. Nesta zona já não existe deformação plástica, contudo, o metal base é afetado pelo ciclo térmico gerado no processo de soldadura. Esta zona segue-se à zona térmica e mecanicamente afetada e precede a zona correspondente à do material base. Esta zona mantém a estrutura do material base. Ela sofre um ciclo térmico, mas não sofre deformação plástica como a zona térmica e mecanicamente afetada. O ciclo térmico ao qual esta zona é submetida exerce uma grande influência sobre a estrutura dos precipitados, aumentando a sua fração volumétrica [1,43,44].

## 2.6 Tipos de junta

As configurações possíveis para os tipos de junta obtidos pelo processo FSW são: juntas topo a topo (a), juntas topo a topo em “T” (b), juntas tipo “T” com três peças (c), juntas sobrepostas (d), juntas sobrepostas de múltiplas peças (e), juntas tipo “T” com duas peças (f) e juntas de canto (g) [1,19,23,49]. Na figura 2.15 ilustram-se os vários tipos de junta utilizados no processo FSW.

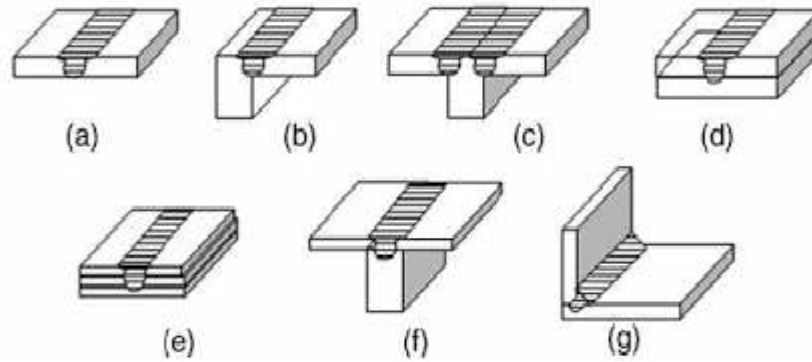


Figura 2.15 - Tipos de junta utilizados no processo FSW [1,19,23,49]

Na presente dissertação, usaram-se juntas soldadas do tipo “T” com três peças, normalmente denominadas “T-butt”. Devido a esse facto, iremos dar algum enfoque a este tipo de juntas. As juntas tipo “T” são normalmente constituídas por duas peças. Uma é denominada por *skin* e a outra de *stringer* [20,34,50]. No caso de juntas tipo “T” com três peças, existem duas peças *skin* e uma peça *stringer*. Um dos problemas que muito frequentemente surge neste tipo de juntas é a redução de espessura da peça *skin*, pois o material é empurrado de maneira a poder preencher todos os espaços entre a peça e a matriz instalada na máquina [51,52]. Para além da redução da espessura das peças *skin*, existem três defeitos muito comuns que podem ocorrer na soldadura destas juntas: o defeito denominado “*kissing bond*”, a falta de ligação e o defeito de “*túnel*” [34,53]. O defeito de “*kissing bond*” surge normalmente na interface original da junta e é causado pela falta de penetração do material. O defeito de “*túnel*” não é mais que uma cavidade que surge na zona nugget [34,53]. Deve-se sobretudo à insuficiência de fluxo de material na vertical para o fundo do cordão de soldadura. Nas figuras 2.16 e 2.17 ilustram-se estes três tipos de defeitos.

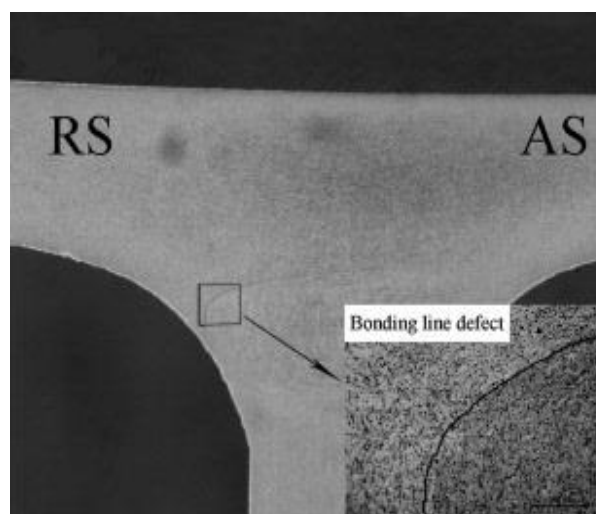


Figura 2.16 - Defeito “*Kissing bond*” [34]

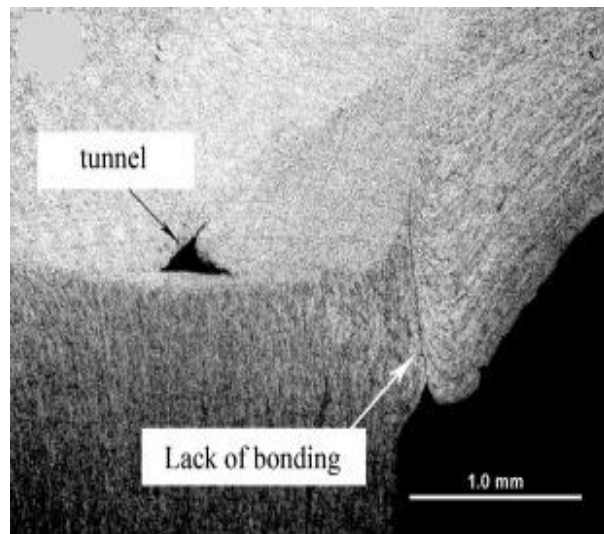


Figura 2.17 - Defeitos de "túnel" e falta de ligação [34]

Embora os tipos de junta da figura 2.15 se refiram a juntas efetuadas em chapas planas, convém salientar que o processo de soldadura por fricção linear não se aplica apenas à união de chapas planas, podendo também ser aplicado a chapas curvas e até mesmo em perfis tubulares [19]. O TWI aplicou o processo FSW na soldadura de ligas de alumínio numa gama de espessuras de 0.8 a 75 mm [49,54]. O processo FSW permite ainda a realização de soldaduras com comprimentos elevados (figura 2.18), existindo equipamentos que permitem soldar chapas até 16 metros de comprimentos [49,54].



Figura 2.18 - Soldadura de convés de navio pelo processo FSW [49]

## 2.7 Vantagens e desvantagens do processo FSW

De seguida, elencam-se algumas vantagens e desvantagens do processo FSW, quando comparado com os processos tradicionais de soldadura por fusão [1,6,7,19,55].

### 2.7.1 Vantagens do processo FSW

- Processo de soldadura no estado sólido;
- Obtenção de soldaduras com boas propriedades mecânicas e composição química similar à do material de base;
- Boas propriedades mecânicas das soldaduras, em particular resistência à fadiga;
- Presença de microestrutura refinada na junta;
- Distorção reduzida das peças soldadas, mesmo em soldaduras com comprimentos elevados; tensões residuais pouco significativas;
- Processo energeticamente muito eficiente;
- O processo de soldadura é extremamente seguro, não produzindo qualquer tipo de fumos, luz ou radiações, o que se traduz numa maior segurança para o operador;
- Não são utilizados consumíveis, o que torna o processo económico, permitindo obter componentes extremamente leves, eliminando a possibilidade de defeitos e desperdícios resultantes da projecção de material;
- Não é necessário a utilização de gás de proteção na soldadura;
- O processo utiliza ferramentas e procedimentos tecnológicos simples sem necessidade de elevados consumos de energia;
- Soldaduras pouco suscetíveis a fenómenos de fissuração e completamente isentas de porosidades;
- O processo permite soldar materiais heterogéneos;
- Não necessita de mão-de-obra altamente especializada;
- Processo suscetível de ser utilizado em todas as posições de soldadura e diversas configurações de junta;
- Processo facilmente automatizável.

### 2.7.2 Desvantagens do processo FSW

- O processo não pode ser aplicado a todos os materiais;
- Elevada exigência relativamente à montagem das peças a unir;
- Necessidade de fixar rigidamente as peças a unir, sendo necessário o recurso a placas de apoio para cada tipo de junta a soldar;
- Impossibilidade de obtenção de velocidades de soldadura muito elevadas;
- Equipamento de soldadura pouca flexível, com um custo elevado, não sendo portátil;
- Necessidade de máquinas extremamente poderosas e caras;
- Impossibilidade de portabilidade e deslocação manual do equipamento de soldadura;
- Tempo elevado na preparação da máquina para a realização de qualquer soldadura;
- Ferramentas exclusivas para cada tipo de junta a soldar, deixando um furo no final da soldadura (figura 2.19).

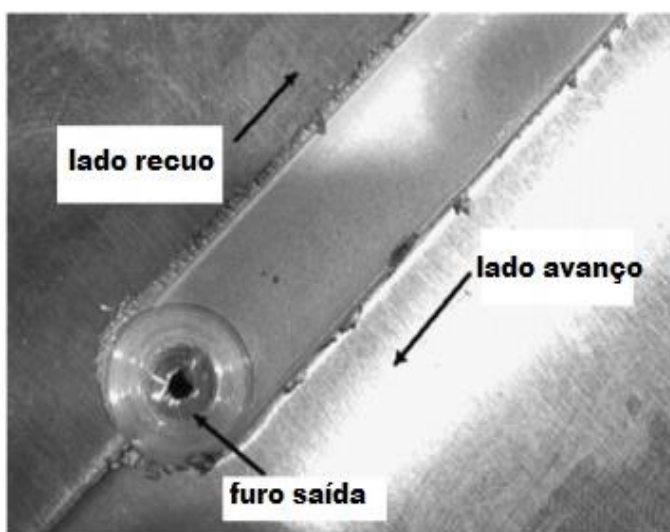


Figura 2.19 - Furo no final da soldadura [56]

### 2.8 Aplicações do processo FSW

Este processo é atualmente muito utilizado na indústria da construção naval, indústria ferroviária e indústria aeronáutica. A indústria naval foi um dos setores pioneiros na adoção do processo de soldadura por fricção linear para aplicações comerciais. Das muitas

aplicações, destacam-se os painéis para os decks e os pisos, cascos, plataformas para aterragens de helicópteros e mastros para veleiros [7,49,50,57].



Figura 2.20 - Painel lateral de catamarã soldado por FSW [58]

Seguiram-se outras indústrias, com especial destaque para a indústria aeronáutica. Atualmente esta indústria utiliza o processo na soldadura de protótipos, e outras peças de produção. Uma das grandes vantagens na utilização do processo prende-se com o facto de se poder, através de vários componentes, obter peças finais mais leves, com um custo de produção mais baixo comparativamente ao uso da maquinagem. Esta técnica de soldadura e a sua implementação permite também uma maior eliminação de ligações aparafusadas. As aplicações principais são: asas, fuselagens, tanques de combustível e também a reparação de soldaduras defeituosas realizadas por soldadura por fusão, normalmente realizadas no processo MIG [6,49,50,57].



Figura 2.21 - Painel lateral de cockpit soldado por FSW [49]

Relativamente à indústria ferroviária, a grande aplicação é no fabrico de carruagens, vagões de mercadorias, com especial destaque na fabricação de carruagens para comboios de alta velocidade [6,49].



Figura 2.22 - Carruagem de comboio soldada por FSW [49]

## 2.9 Equipamentos industriais

Este processo de soldadura é realizado com recurso a máquinas altamente sofisticadas, e por consequência bastante dispendiosas. Neste momento praticamente todas elas já possuem um elevado grau de robotização e autonomia, com recurso a soluções incorporadas de comando numérico computadorizado. Em trabalhos de maior simplicidade, onde o grau de exigência não seja elevado, recorre-se frequentemente a fresadoras convencionais devidamente adaptadas para a obtenção de juntas soldadas por este processo. Essa foi a solução encontrada para realizar as soldaduras no âmbito desta tese. Na figura 2.23, ilustra-se um equipamento atual e sofisticado utilizado na indústria na soldadura por fricção linear [59].



Figura 2.23 – Esquema de equipamento utilizado no processo FSW [59]

### 3 Procedimento experimental

Neste capítulo será feita uma descrição do procedimento experimental utilizado.

#### 3.1 Liga de alumínio-cobre AA 2017-T4

Os materiais utilizados na realização dos coupons foram ligas de alumínio AA 2017-T4, ligas de alumínio-cobre (Al-Cu). Na tabela 3.1 ilustra-se a composição química da liga de alumínio AA 2017-T4. Este material utilizado para a obtenção dos coupons sofreu um tratamento térmico de solubilização total, seguido de envelhecimento natural, tratamento que já foi abordado no capítulo 2.1.

Elementos	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Mn+Cr	Outros	Al min
Mín	0.2	3.5	0.4	0.4	0	0	0	0.4	0	-
Máx	0.8	4.5	1	0.8	0.25	0.15	0.1	0.9	0.15	Resto

Tabela 3.1 - Composição química da liga de alumínio AA 2017-T4

Na tabela 3.2 apresentam-se as principais propriedades físicas e mecânicas da liga de alumínio AA 2017-T4.

Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Ponto Fusão (°C)	Cond. Térmica (W/mk)	Resist. Tração (MPa)	Tensão Lim. Elástico (MPa)	Dureza Vickers (HV)
2790	513-641	134	427	276	118

Tabela 3.2 - Propriedades físicas e mecânicas da liga de alumínio AA 2017-T4

As propriedades físicas e mecânicas de qualquer material têm uma influência muito significativa no processo de soldadura. O alumínio puro tem uma temperatura de fusão de 660 °C. O ponto de fusão da liga AA 2017-T4 situa-se num patamar mais baixo que a temperatura de fusão do alumínio puro (característica transversal às principais ligas de alumínio), situando-se entre os 513 e os 641 °C.

### 3.2 Soldadura dos coupons

Os coupons obtidos foram da configuração “T-butt”. Este é um tipo de junta em “T” com 3 peças e, nesta dissertação, todas em liga de alumínio AA 2017-T4. As diferentes chapas foram acopladas e montadas conforme se ilustra na figura 3.1.

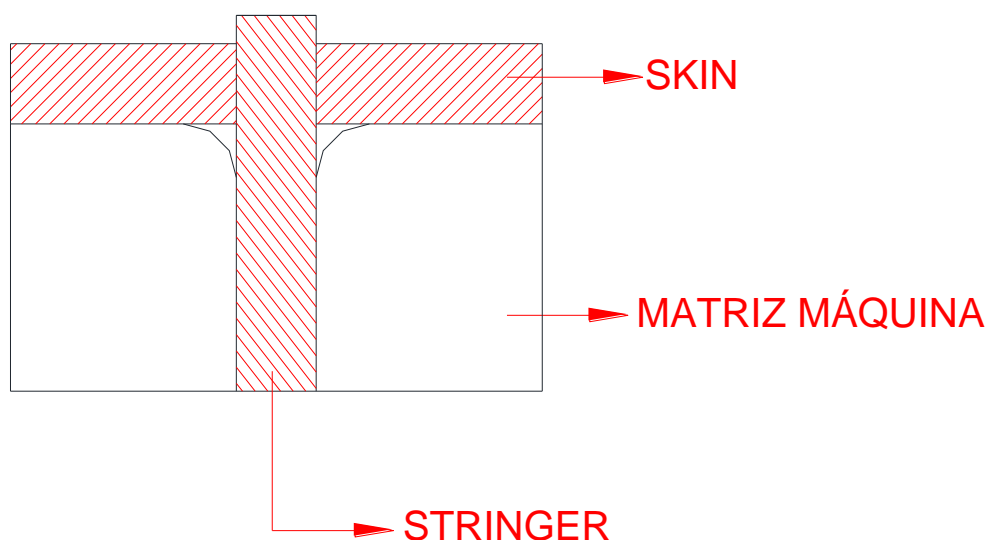


Figura 3.1 - Configuração “T-butt” no processo FSW

Para esta configuração “T-butt” usaram-se chapas com as medidas de 330x80x3 mm para ambas as peças *skin*, e chapas com as medidas de 330x35x3 mm para a peça *stringer*. Todas as chapas, depois de devidamente cortadas, foram lixadas com uma lixa granulada P320, de modo a poder ser retirada a camada de alumina, óxidos e impurezas nas arestas a soldar, e assim, dessa forma, garantir que as soldaduras fossem realizadas sem qualquer contaminante nas chapas. Para a realização das soldaduras foi utilizada uma fresadora convencional, da marca Cincinnati, modelo Milacron 207 MK. Esta fresadora permite controlar em simultâneo diferentes parâmetros, tais como a velocidade de avanço e a velocidade de rotação da ferramenta. As chapas de alumínio, depois de cortadas e lixadas, foram colocadas em matrizes da máquina, segundo a configuração já apresentada, e posteriormente fixadas em diversos

apoios de forma a que as chapas não sofressem qualquer tipo de deslocamento ou torsão, evitando assim empenos. A figura 3.2 mostra o esquema de montagem das chapas na mesa de trabalho.



Figura 3.2 - Montagem das chapas na fresadora convencional

A distância existente entre as chapas metálicas que servem de suporte aos batentes deve ser a mínima possível e apenas indispensável para a ferramenta rotativa passar. Se esse espaço for elevado, as chapas de alumínio tendem a levantar; esse efeito será agravado se as chapas a soldar forem finas. Nos vários coupons que foram soldados, foram definidos e fixados os diferentes valores para os parâmetros a utilizar. Foram realizados seis coupons, três com uma ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva, e três com uma ferramenta piramidal progressiva. As ferramentas progressivas são constituídas por pinos progressivos. Depois de inicialmente fixados os parâmetros, não foi feita qualquer alteração na execução das diferentes soldaduras, à exceção da velocidade de rotação da ferramenta, único parâmetro que foi sendo alterado à medida que as soldaduras eram efetuadas. As tabelas 3.3 e 3.4, resumem os parâmetros utilizados nos seis diferentes coupons obtidos.

	coupon 1	coupon 2	coupon 3
<b>Ferramenta rotativa</b>	cónica roscada helicoidal progressiva	cónica roscada helicoidal progressiva	cónica roscada helicoidal progressiva
<b>Código</b>	CRHP1	CRHP2	CRHP3
<b>Velocidade de rotação (rpm)</b>	660	870	500
<b>Velocidade de avanço (mm/min)</b>	30	30	30
<b>Ângulo inclinação (°)</b>	3	3	3
<b>Penetração da ferramenta (mm)</b>	5,6	5,6	5,6

Tabela 3.3 - Parâmetros utilizados nos coupons soldados utilizando a ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva

	coupon 4	coupon 5	coupon 6
Ferramenta rotativa	piramidal progressiva	piramidal progressiva	piramidal progressiva
Código	PP1	PP2	PP3
Velocidade de rotação (rpm)	500	660	870
Velocidade de avanço (mm/min)	30	30	30
Ângulo inclinação (°)	3	3	3
Penetração da ferramenta (mm)	5,6	5,6	5,6

Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados nos coupons soldados utilizando a ferramenta piramidal progressiva

Nas imagens das figuras 3.3 e 3.4 ilustra-se a realização das soldaduras.



Figura 3.3 - Execução das soldaduras



Figura 3.4 - Execução das soldaduras

Conforme já foi referido, foram utilizadas duas ferramentas diferentes para a realização das soldaduras: uma ferramenta cônica roscada helicoidal e uma ferramenta piramidal. Ambas as ferramentas com pinos progressivos, os quais promovem um fluxo de material mais intenso e uma adição de calor diretamente na zona do cutelo e nos raios de concordância da junta. A grande maioria dos autores defende a utilização de ferramentas com pino cônico roscado quando se soldam juntas tipo “T”. Porém, alguns autores defendem a existência de vantagens na utilização de ferramentas com pino piramidal quando se solda este tipo de juntas, principalmente quando as soldaduras são realizadas com recurso a elevadas velocidade de rotação da ferramenta. As bases das ferramentas utilizadas foram côncavas, forma que melhor promove o confinamento do material que é deformado plasticamente. Relativamente aos pinos, sabe-se que quanto maior o ângulo, maior o fluxo vertical e mais uniforme será a deformação plástica na zona de soldadura. As ferramentas foram fabricadas em aço para ferramentas de trabalho a quente H13, e depois temperadas e sujeitas a tratamento de revenido de modo a obterem uma dureza de 50 HRC. Nas figuras 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 representa-se os esquemas e imagens das ferramentas rotativas utilizadas nas soldaduras.

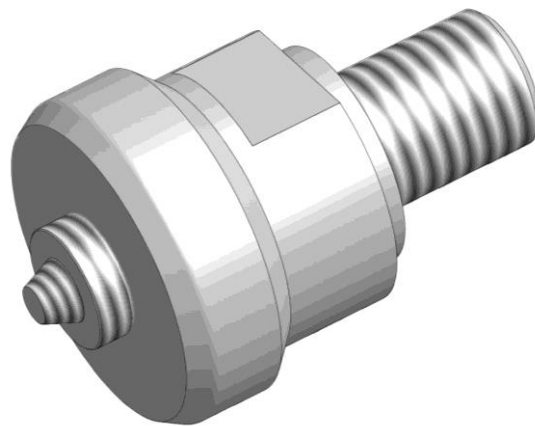


Figura 3.5 – Ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva

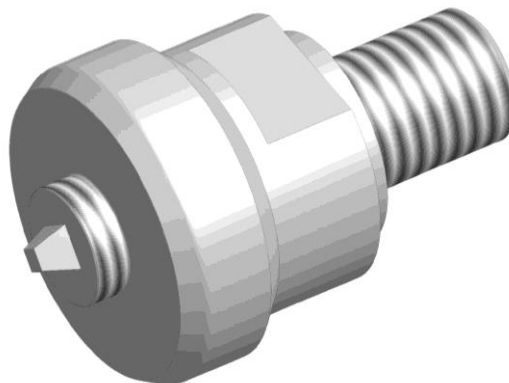


Figura 3.6 – Ferramenta piramidal progressiva



Figura 3.7 - Ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva



Figura 3.8 – Ferramenta piramidal progressiva

Nas imagens das figuras 3.9 e 3.10 mostra-se o aspeto final dos coupons soldados.

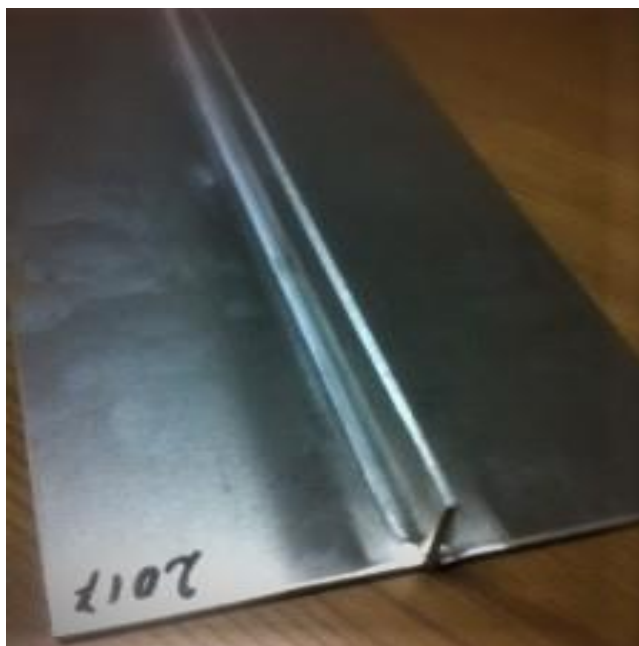


Figura 3.9 - Coupon final soldados por FSW

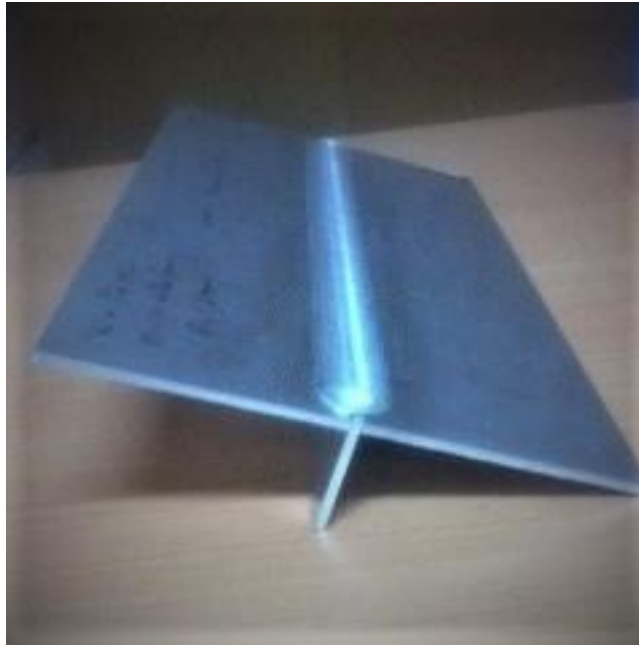


Figura 3.10 - Coupon final soldados por FSW

### 3.3 Provetes

Depois de soldados os coupons, foram retirados provetes para a realização dos diversos ensaios realizados nesta tese. A figura 3.11 mostra a forma como foram retirados os diferentes provetes. As quantidades, diferentes geometrias e respectivas dimensões dos provetes estão ilustradas nos apêndices desta tese. Todos os coupons foram cortados num serrote mecânico e posteriormente os provetes maquinados, de maneira a que as suas dimensões finais se situassem dentro das tolerâncias previstas nas normas aplicáveis. A parte dos coupons onde se situou o furo originado pelo processo FSW não foi aproveitada para qualquer provete.

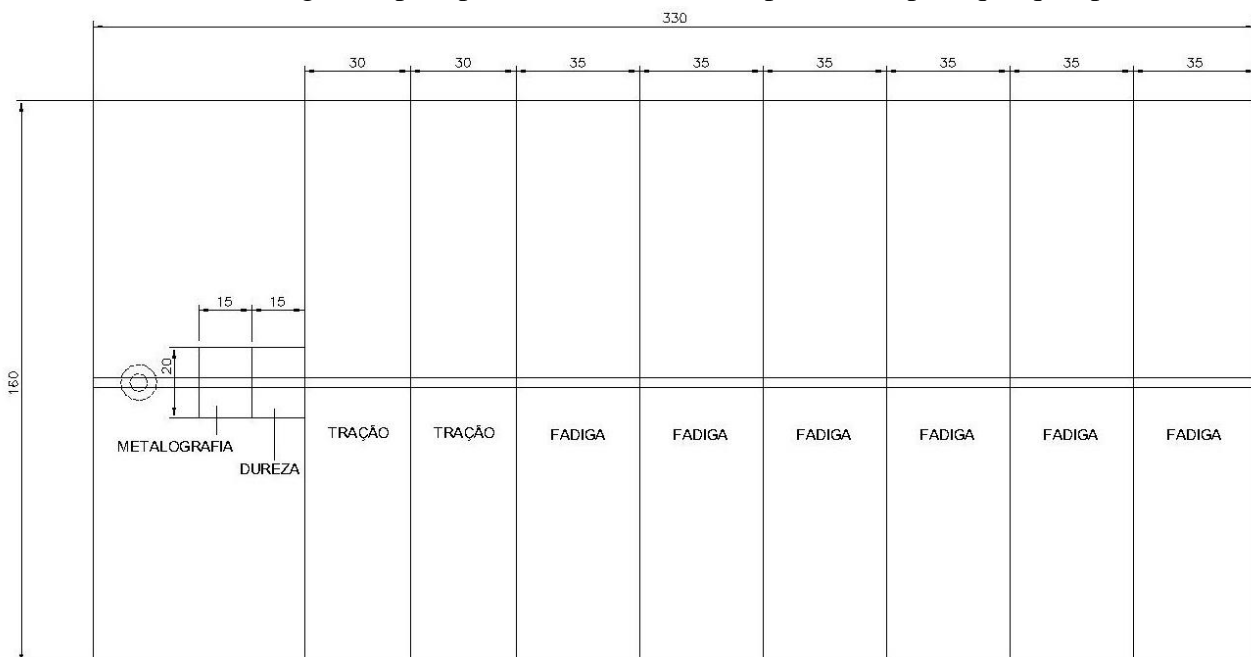


Figura 3.11 – Disposição dos provetes nos coupons

Para efeitos da realização dos ensaios metalográficos e dos ensaios de dureza, os provetes (seis) foram montados em resina; o tempo de cura foi de aproximadamente 45 minutos. Esta operação facilita o manuseamento e preparação dos provetes para efetuar os ensaios de metalografia e dureza. Nas figuras 3.12 e 3.13 podemos observar um dos provetes na forma inicial, e depois já inserido na resina entretanto curada.



Figura 3.12 – Provetes para os ensaios metalográficos e de dureza



Figura 3.13 – Provetes para os ensaios metalográficos e de dureza (após resina)

De seguida, os provetes foram lixados com diferentes lixas de granulometria decrescente (P320, P600, P1000 e P2500), ou seja, utilizando-se lixas de grão mais grosso até lixas com grão mais fino. Apenas quando visualmente se verificou que determinada lixa foi eficaz é que se passou para a lixa seguinte mais fina. Após estas operações, passou-se ao polimento, tendo os provetes sido polidos com pasta de diamante de 6  $\mu\text{m}$  e acabamento final com pasta de diamante de 3  $\mu\text{m}$ , e de 1  $\mu\text{m}$ , para garantir ausência total de riscos. Os provetes foram em seguida “*atacados*” quimicamente, tendo-se utilizado o reagente Keller durante cerca de vinte

segundos, de forma a realçar o tamanho do grão do material. A tabela 3.5 faz referência à composição do reagente Keller.

<b>Reagente Keller</b>			
2 ml HF	3 ml HCl	5 ml HNO <sub>3</sub>	190 ml H <sub>2</sub> O

Tabela 3.5 - Composição do reagente Keller

### **3.4 Ensaios de metalografia**

Para se fazer a análise metalográfica utilizou-se o microscópio ótico da marca Leica, referência DM 4000 M LED. Para a realização das micrografias utilizou-se ampliações de 50x, 100x e 200x. Para as macrografias, utilizou-se a ampliação 12.5x. O registo fotográfico das macro e micrografias foi efetuado com recurso à máquina fotográfica da marca Leica, modelo MC 120 HD. Depois de tiradas e gravadas as fotografias, fez-se um estudo do tamanho do grão com recurso ao software “ImageJ”. Estudaram-se as interfaces entre os diferentes constituintes que compõem o material e também as diferentes zonas microestruturais que resultaram do processo de soldadura.

### **3.5 Ensaios de dureza**

Os ensaios para a obtenção dos valores relativos às durezas foram realizados utilizando-se os mesmos provetes usados nos ensaios metalográficos. Para a obtenção dos perfis de durezas Vickers, utilizou-se a máquina OTTC WOLPERT-WERKE, modelo Dia Testor 2Rc, com aplicação de uma carga de 5 Kg durante cerca de 30 segundos em cada medição. As figuras 3.14 e 3.15 mostram o equipamento utilizado para a realização dos ensaios de dureza.



Figura 3.14 - Ensaio de dureza



Figura 3.15 - Ensaio de dureza

A análise e obtenção dos perfis de durezas foram obtidos conforme ilustrado nas figuras 3.16 e 3.17. A distância utilizada entre medições foi sempre de 1 mm, quer nas medições horizontais (*skin*), quer nas medições verticais (*stringer*).

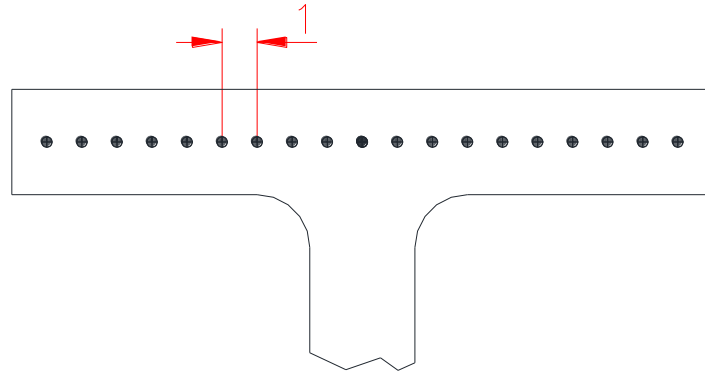


Figura 3.16 - Esquema de medição das durezas (*skin*)

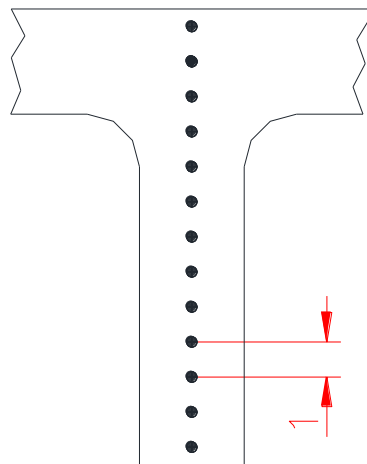


Figura 3.17 - Esquema de medição das durezas (*stringer*)

### 3.6 Ensaios de tração

Os ensaios de tração foram realizados numa máquina MTS 810, com uma velocidade de ensaio de 1 mm/min até à fratura do provete em cada ensaio. Como foram obtidos seis coupons, resultantes das seis soldaduras efetuadas, foram ensaiados doze provetes, ou seja, dois provetes ensaiados para cada coupon. Teria sido ideal ensaiar pelo menos três provetes por cada coupon obtido, mas tal não foi possível devido ao comprimento dos coupons (300 mm, descontado a zona do furo).



Figura 3.18 – Provete para o ensaio de tração



Figura 3.19 – Provetes para os ensaios de tração



Figura 3.20 – Ensaio de tração



Figura 3.21 – Ensaio de tração

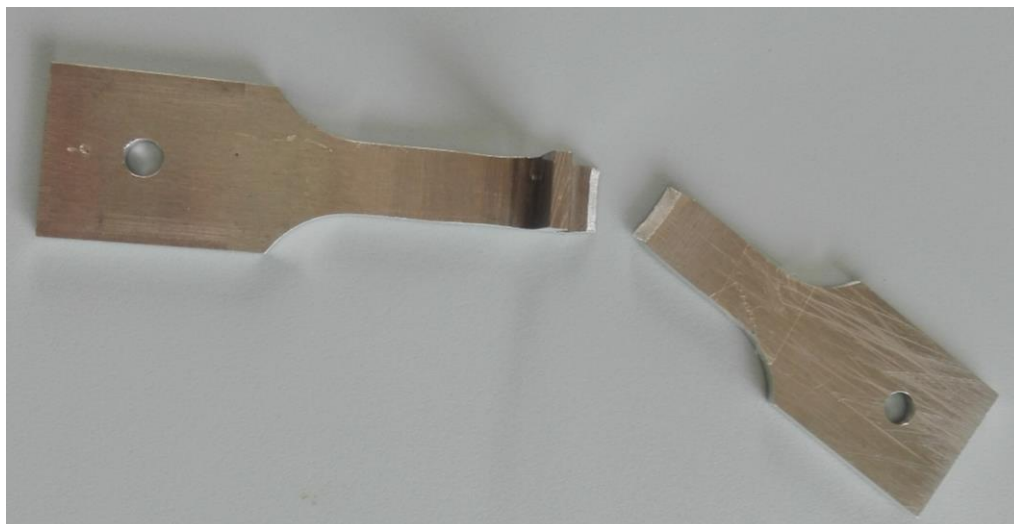


Figura 3.22 - Provete de tração após fratura

### 3.7 Ensaios de fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados usando-se o mesmo equipamento utilizado nos ensaios de tração, ou seja, a máquina MTS 810. Com estes ensaios, pretendeu-se traçar a curva tensão versus número de ciclos, vulgarmente conhecida por curva S-N, procurando-se chegar ao valor limite de fadiga, valor a partir do qual, o número de ciclos até à rotura tende para infinito. Decidiu-se realizar ensaios de fadiga apenas para um coupon soldado pela ferramenta cónica roscada helicoidal progressiva e para um coupon soldado pela ferramenta piramidal progressiva. O critério de escolha dos coupons foi os que apresentaram melhores resultados nos ensaios de tração. O motivo desta limitação prendeu-se com o facto destes ensaios serem bastante demorados e existirem constrangimentos do tempo disponível do equipamento.

Foram usados três patamares de tensão para a realização dos ensaios. O primeiro patamar de tensão de 50% da tensão de rotura obtido no ensaio de tração, o segundo patamar, 30% do referido valor de tensão, e por último um patamar intermédio, ou seja, a 40% da referida tensão de rotura. Para cada patamar ensaiaram-se dois provetes, portanto, para cada ferramenta foram ensaiados à fadiga um total de seis provetes. No total, fizeram-se doze ensaios de fadiga. Também aqui seria ideal ensaiar mais provetes para cada patamar de tensão, mas o problema da limitação de provetes retirados dos coupons soldados (limitação já sublinhada aquando dos ensaios de tração) não permitiu o ensaio de mais de dois provetes por cada patamar de tensão. Os ensaios foram realizados com o valor da frequência a variar entre os 10 e 12 Hz. O critério de paragem dos ensaios foi a rotura do provete ou o atingir um

milhão de ciclos sem o mesmo fraturar. Estes provetes têm uma configuração ligeiramente diferente dos que foram fabricados para os ensaios de tração, tendo sido elaborados de acordo com a norma ASTM E 466 - 96. Nas figuras 3.23 e 3.24 podemos observar os provetes destinados a estes ensaios.



Figura 3.23 - Provede para o ensaio de fadiga



Figura 3.24 - Provedes para os ensaios de fadiga

Algumas das superfícies obtidas após a fratura dos provetes de fadiga foram posteriormente analisadas com recurso a microscopia eletrónica SEM (Scanning Electron Microscope),

utilizando-se para o efeito um microscópio da marca MERLIN. A técnica SEM permite obter imagens tridimensionais de alta resolução das superfícies fraturadas nos provetes, conseguindo fazer ampliações de elevadíssima grandeza. Utilizou-se esta técnica e tecnologia para se poder visualizar as zonas onde as fendas de fadiga se iniciaram, entender a sua propagação e também conseguir perceber quais das amostras fraturadas e visualizadas tiveram velocidades de propagação das fendas de fadiga maiores. Na imagem da figura 3.25 ilustra-se o equipamento utilizado para a análise das superfícies fraturadas.



Figura 3.25 - Microscópio eletrônico de varrimento (SEM)

## 4 Análise e discussão dos resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nos diferentes ensaios experimentais realizados.

### 4.1 Análise metalográfica

Para uma melhor identificação das ferramentas utilizadas na realização das soldaduras, resumam-se nas tabelas 4.1 e 4.2 os parâmetros das soldaduras efetuadas.

	coupon 1	coupon 2	coupon 3
<b>Ferramenta rotativa</b>	cónica roscada helicoidal progressiva	cónica roscada helicoidal progressiva	cónica roscada helicoidal progressiva
<b>Código</b>	CRHP1	CRHP2	CRHP3
<b>Velocidade de rotação (rpm)</b>	660	870	500
<b>Velocidade de avanço (mm/min)</b>	30	30	30
<b>Ângulo inclinação (°)</b>	3	3	3
<b>Penetração da ferramenta (mm)</b>	5,6	5,6	5,6

Tabela 4.1 - Parâmetros dos coupons soldados com a ferramenta cónica roscada helicoidal progressiva

	coupon 4	coupon 5	coupon 6
<b>Ferramenta rotativa</b>	piramidal progressiva	piramidal progressiva	piramidal progressiva
<b>Código</b>	PP1	PP2	PP3
<b>Velocidade de rotação (rpm)</b>	500	660	870
<b>Velocidade de avanço (mm/min)</b>	30	30	30
<b>Ângulo inclinação (°)</b>	3	3	3
<b>Penetração da ferramenta (mm)</b>	5,6	5,6	5,6

Tabela 4.2 - Parâmetros dos coupons soldados com a ferramenta piramidal progressiva

A análise às macro e micrografias de todos os provetes fabricados revelou-se muito semelhante e sem grandes diferenças. Nos apêndices da presente tese encontram-se ilustradas as macro e micrografias de todos os provetes ensaiados. Iremos neste capítulo analisar os resultados dos ensaios metalográficos realizados nos provetes resultantes do coupon 3 (CRHP3) e do coupon 4 (PP1), ou seja, das diferentes ferramentas utilizadas na realização das soldaduras, mantendo-se todos os restantes parâmetros iguais para ambas as ferramentas. Começamos por caracterizar e analisar a macrografia relativa ao coupon 3, ou seja, soldado com a ferramenta com pino cónico roscado helicoidal. Através da macrografia, onde foi utilizada uma ampliação de 12.5x, representada na figura 4.1, não se consegue visualizar defeitos na soldadura. Não se observam os conhecidos defeitos de “*kissing bond*”, falta de ligação e o defeito de “*túnel*”, nem se vislumbra também qualquer linha de óxidos.

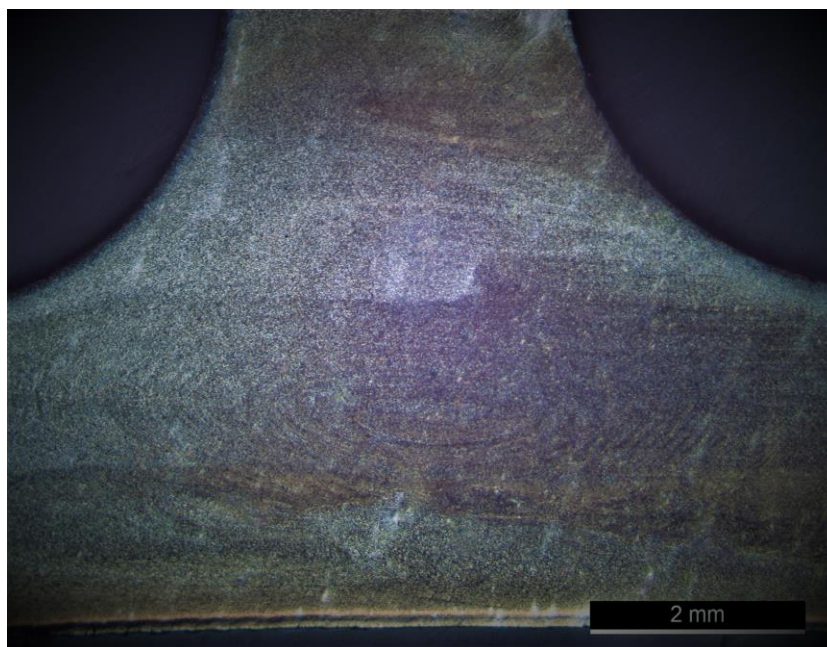


Figura 4.1 – Macrografia da soldadura do coupon CRHP3, (ampliação 12.5x)

Na macrografia consegue-se observar com clareza as marcas deixadas pela ferramenta rotativa na zona central da soldadura, a zona nugget. Nesta zona, que está em permanente contacto com a ferramenta e onde a mistura do material é mais intensa, vêm-se perfeitamente as curvas e as formas deixadas pela ação do pino. Na figura 4.2 ilustra-se a micrografia da zona do nugget, com uma ampliação de 200x. Visualiza-se um tamanho de grão pequeno, muito refinado, proveniente do fenómeno de recristalização dinâmica sempre presente nesta zona. A medida do tamanho de grão varia entre 7  $\mu\text{m}$  e 8  $\mu\text{m}$ .

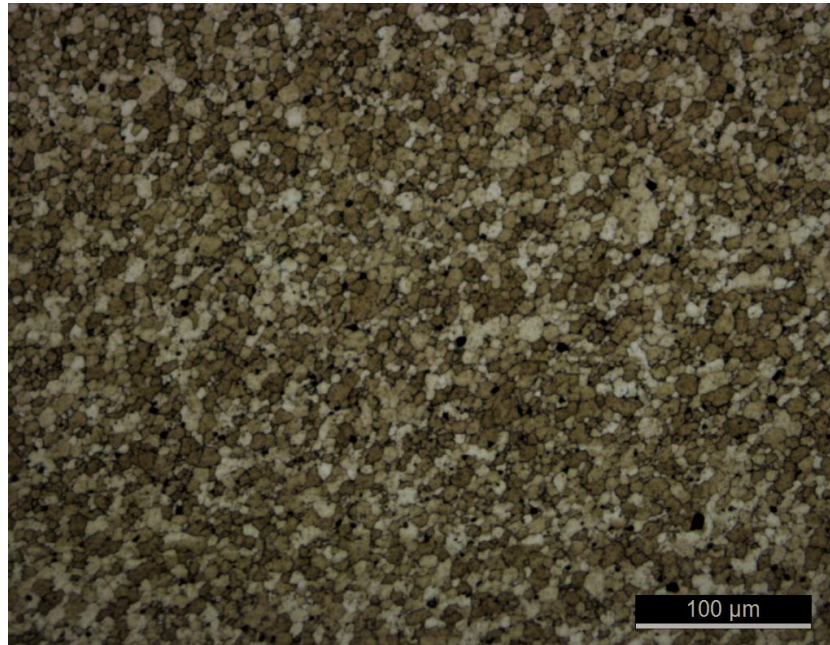


Figura 4.2 – Micrografia da zona nugget do coupon CRHP3, (ampliação 200x)

Na figura 4.3, podemos visualizar com grande clareza a transição entre a zona do nugget (à direita) e a ZTMA (à esquerda). Nesta micrografia utilizou-se uma ampliação de 50x.

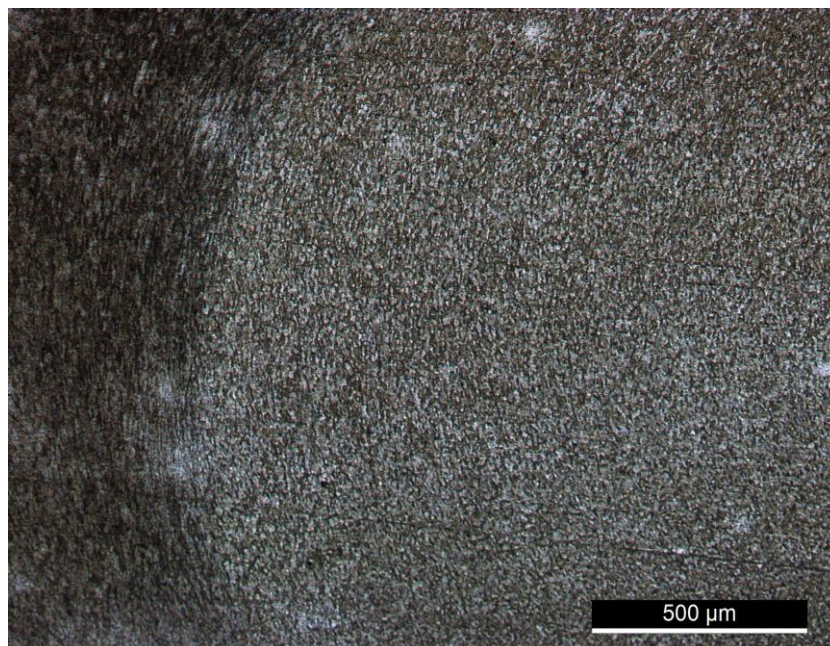


Figura 4.3 - Micrografia da transição zona nugget e a ZTMA do coupon CRHP3, (ampliação 50x)

Constata-se um grão mais refinado na zona do nugget, enquanto que na zona térmica e mecanicamente afetada o grão é mais disperso e claramente mais alongado. Na figura 4.4 apresenta-se a micrografia da zona térmica e mecanicamente afetada com a mesma ampliação da micrografia tirada na zona do nugget. Consegue-se visualizar que a orientação dos grãos se perfila de forma diferente da observada na zona do nugget. Os grãos orientam-se numa

direção bem definida, enquanto que na zona do nugget o sentido da orientação não é perceptível, em virtude do tamanho do grão ser bastante mais pequeno e arredondado, e também por causa da intensa mistura do material nessa zona, o que provoca uma indefinição no que diz respeito à orientação dos grãos presentes na microestrutura.

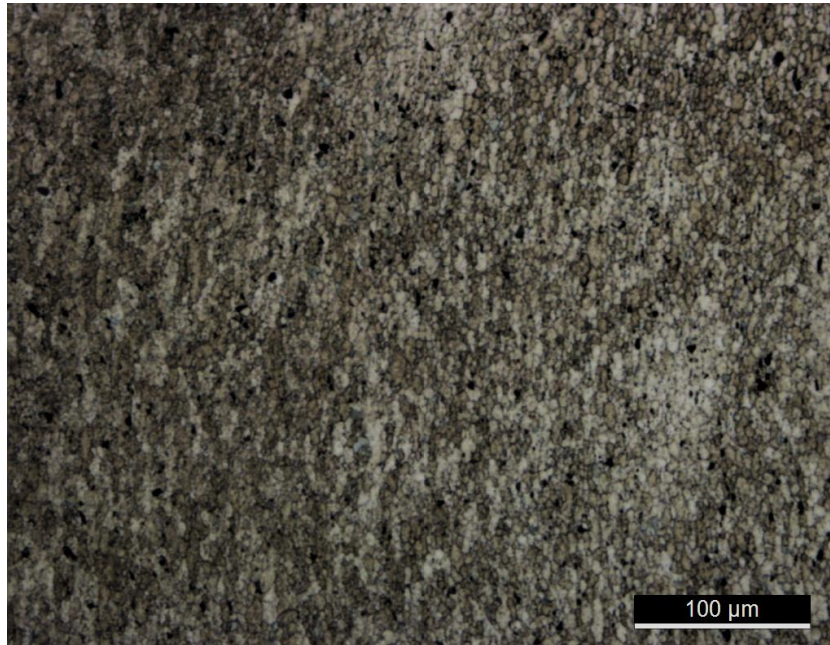


Figura 4.4 - Micrografia da ZTMA do coupon CRHP3 (ampliação 200x)

Por fim, podemos observar na figura 4.5 a microestrutura na zona do material base. Aqui, o tamanho de grão é maior e mais alongado, tendo uma orientação bem definida, muito provavelmente a orientação com que o material foi laminado. Nesta zona, como é obvio, a ferramenta rotativa não intervém, portanto, a microestrutura do material não sofre qualquer alteração. Poderá observar-se com clareza a diferença do tamanho dos grãos, comparativamente com a zona do nugget. O tamanho do grão na microestrutura da zona do material base variou entre os 25 e os 35 µm.

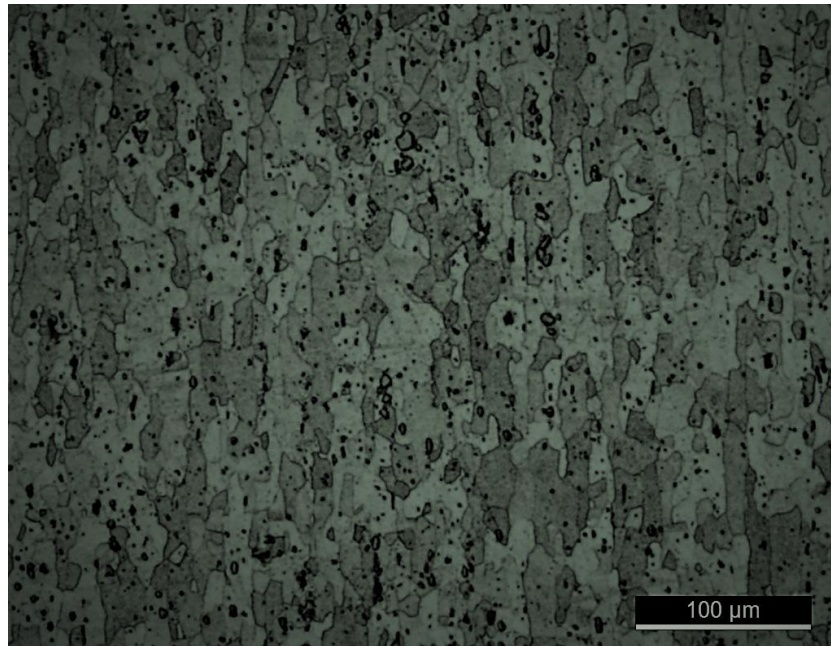


Figura 4.5 - Micrografia do material base do coupon CRHP3 (ampliação 200x)

A análise às macro e micrografias relativas ao coupon soldado com a ferramenta piramidal progressiva não mostraram resultados muito diferentes dos que foram já apresentados para o coupon CRHP3, pelo que nas figuras seguintes apenas se reproduzem as imagens das diferentes microestruturas reveladas à soldadura do coupon PP1.

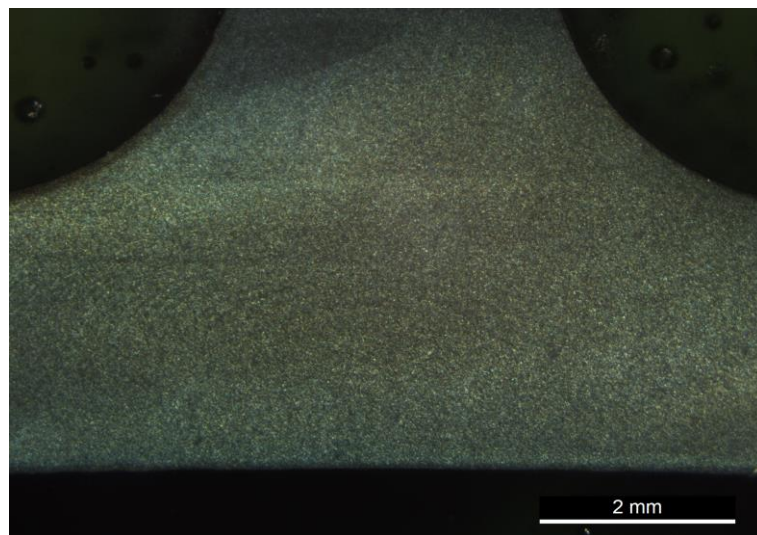


Figura 4.6 - Macrografia da soldadura do coupon PP1 (ampliação 12.5x)

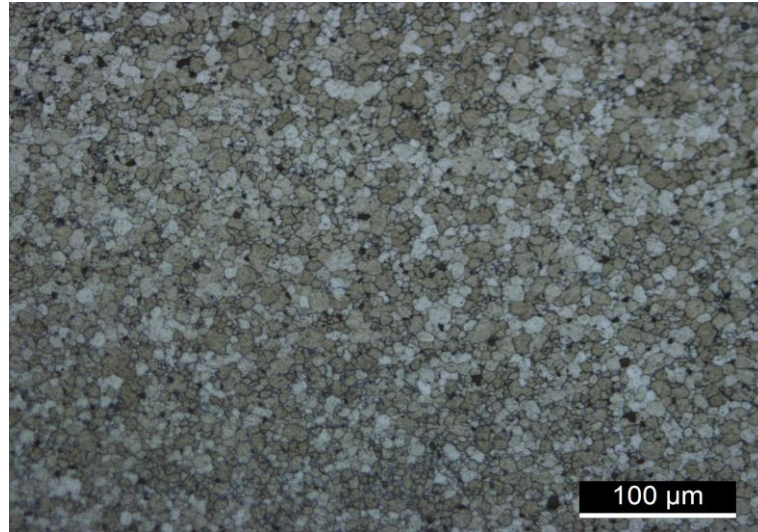


Figura 4.7 - Micrografia da zona nugget do coupon PP1 (ampliação 200x)

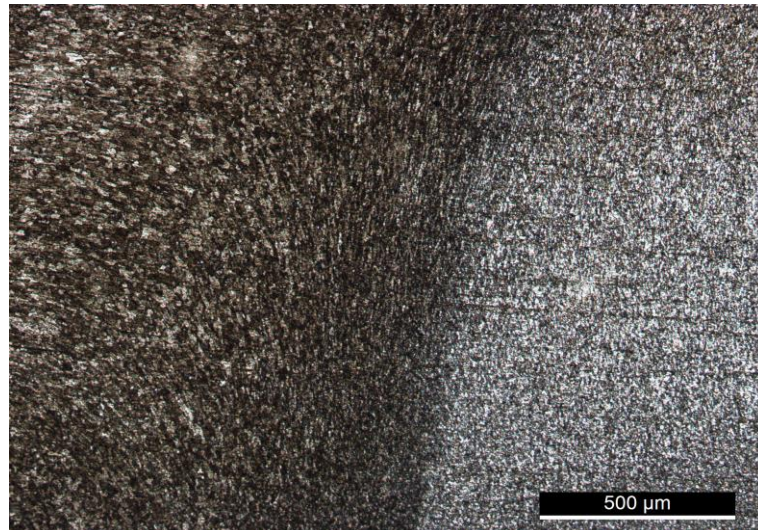


Figura 4.8 - Micrografia da transição zona nugget e a ZTMA do coupon PP1 (ampliação 50x)

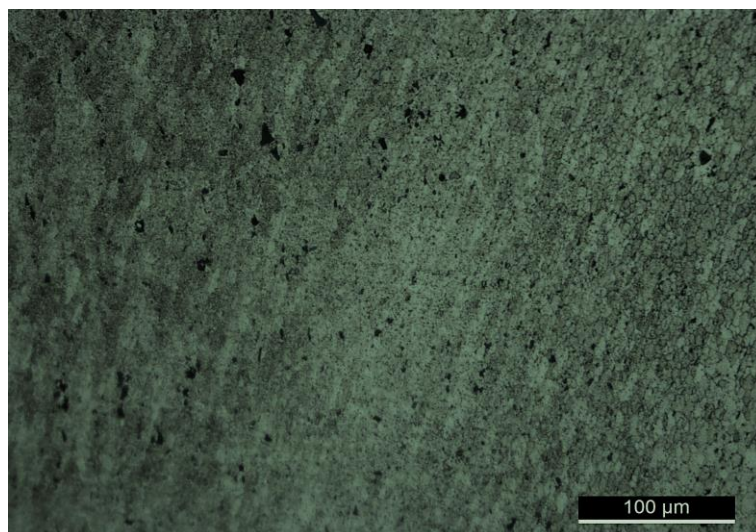


Figura 4.9 - Micrografia da ZTMA do coupon PP1 (ampliação 200x)

Uma última análise relativamente ao coupon PP3. Neste coupon, a macrografia revelou um defeito na zona do nugget, muito provavelmente uma linha de óxidos. Foi o único coupon soldado que apresentou defeito. A micrografia da zona do nugget mostra com clareza a existência do defeito. O motivo pode ter que ver com a alta velocidade de rotação da ferramenta utilizada na execução da soldadura deste coupon, 870 rpm. Como a ferramenta em questão não tinha rosca no seu pino, a mistura do material pode não ter sido suficiente para evitar a falta de ligação do material. Também o facto de a ferramenta rodar a uma velocidade maior, provoca uma junta com marcas da ferramenta mais vincadas, facto que poderá promover e potenciar o aparecimento de defeitos.

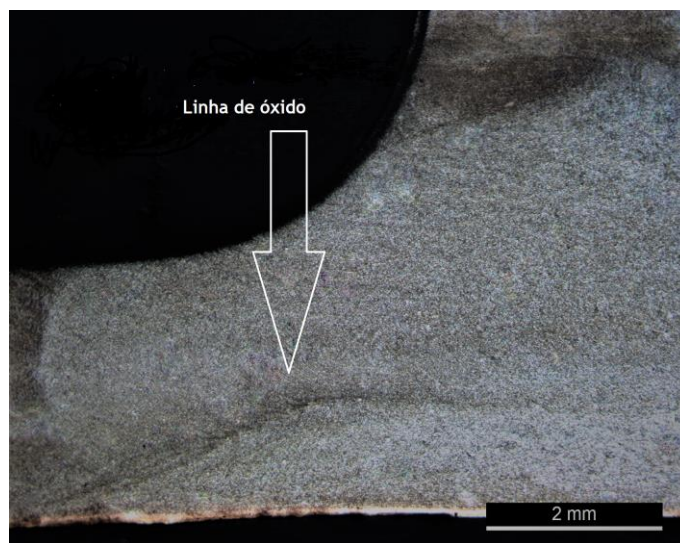


Figura 4.10 - Macrografia da zona nugget do coupon PP3 (ampliação 12.5x)

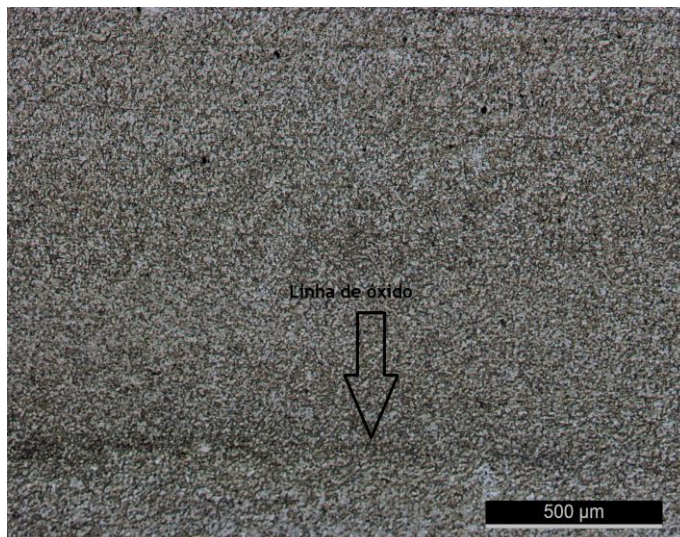


Figura 4.11 – Micrografia da zona nugget do coupon PP3 (ampliação 50x)

## 4.2 Análise à dureza

A avaliação da dureza nos coupons soldados por FSW foi efetuada através da análise dos diferentes perfis de dureza. Nas figuras que se seguem apresenta-se os diferentes valores de dureza para os coupons soldados com a ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva e para os coupons soldados com a ferramenta piramidal progressiva. O critério foi aferir os valores de dureza das juntas obtidas com diferentes ferramentas, mantendo todos os outros parâmetros iguais. Os valores de dureza obtidos e ilustrados nas figuras 4.12, 4.13 e 4.14 foram obtidos no *skin*. Nas figuras 4.15, 4.16 e 4.17 ilustra-se os valores de dureza obtidos no *stringer*. Para ambas as ferramentas, constata-se que na zona do nugget os valores de dureza são maiores do que os verificados nas outras zonas. Tal resultado pode ser justificado devido à recristalização dinâmica na zona do nugget, o que provoca a formação de grãos cada vez mais pequenos, induzindo e promovendo dessa forma uma maior dureza.

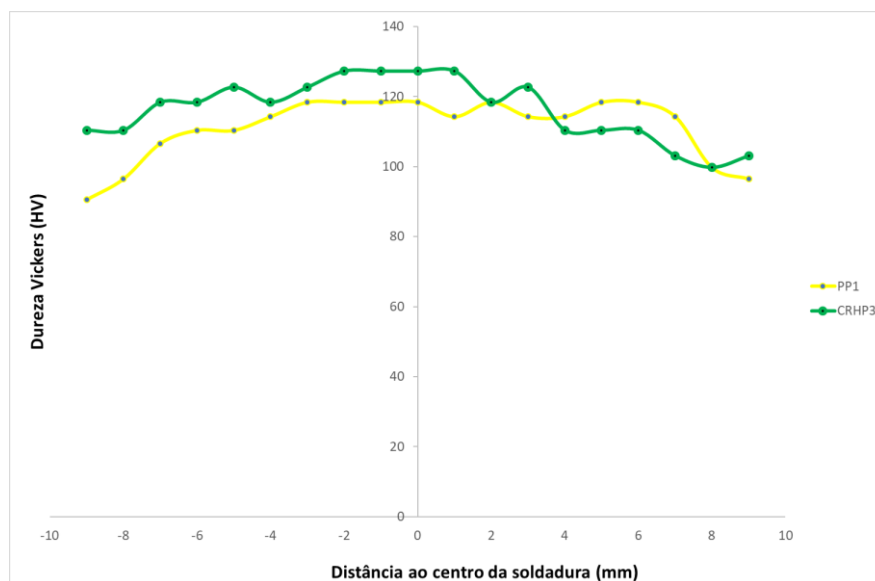


Figura 4.12 – Dureza Vickers dos coupons CRHP3 e PP1 (*skin*)

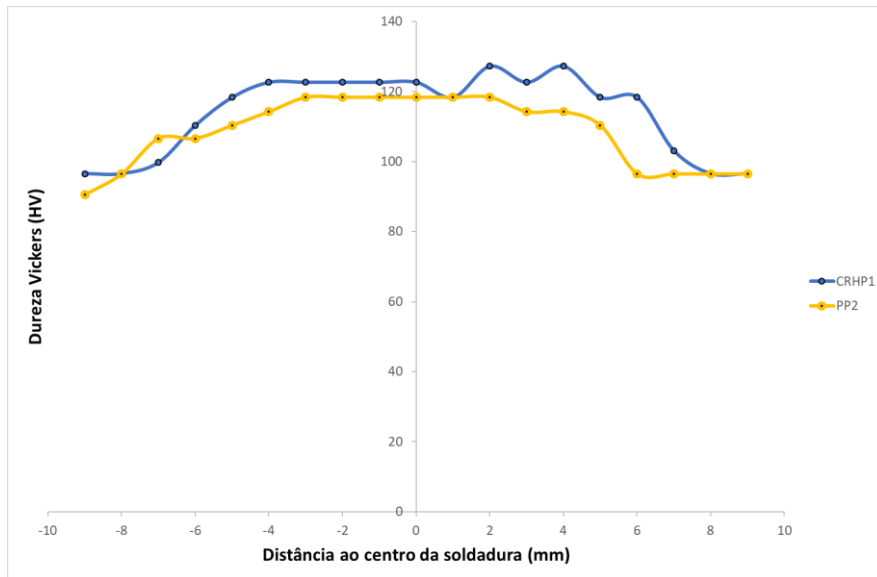


Figura 4.13 - Dureza Vickers dos coupons CRHP1 e PP2 (*skin*)

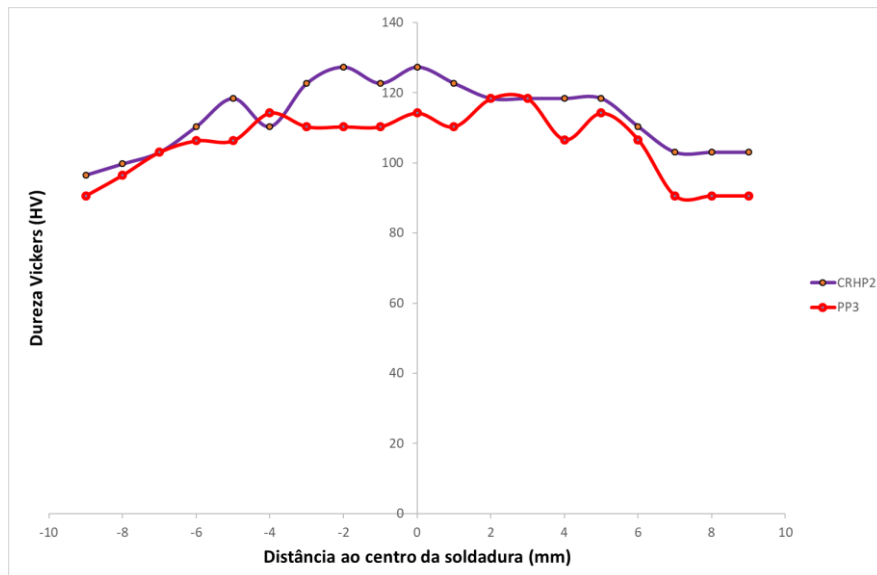


Figura 4.14 - Dureza Vickers dos coupons CRHP2 e PP3 (*skin*)

Inicialmente foi verificada a dureza na zona do material base. Após várias medições, a média achada foi de 127,2 HV. Os coupons soldados com a ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva registaram valores de dureza semelhantes ao registrado no material base, nomeadamente na zona do nugget. De uma forma geral, os valores de dureza verificados foram superiores nas soldaduras efetuadas com a ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva, comparativamente com os valores registrados nos coupons soldados com a ferramenta piramidal progressiva.

Para a ferramenta piramidal progressiva o máximo valor de dureza registado foi 118,3 HV, bem abaixo dos 127,2 HV verificados em todos os coupons soldados com a ferramenta cónica roscada helicoidal progressiva. Em termos médios, a dureza obtida com a ferramenta piramidal progressiva foi 10% inferior à dureza registada com a ferramenta cónica roscada helicoidal progressiva. Todos os valores referidos foram registados no *skin*. Transversalmente a todos os coupons é o facto de o valor da dureza baixar à medida que as medições se afastam da zona do nugget e entram na ZTMA. Tal deve-se ao facto de nesta zona não existir a recristalização dinâmica do grão, o que faz com que este tenha um tamanho de grão maior do que o verificado na zona do nugget, traduzindo-se num abaixamento da dureza do material na ZTMA. De referir que no *skin* não se conseguiu medir as durezas na zona do material base, daí os valores de dureza não infletirem até atingir o valor aferido inicialmente nessa zona. O provete para a realização destes ensaios foi cortado com a medida de 20 mm no *skin*. A maior parcela da microestrutura no *skin* é ocupada pelo nugget, sendo que a ZAC é extensa, devido à grande condutibilidade térmica do alumínio. O provete não tem dimensão suficiente para se atingir a zona do material base. O coupon PP3, que apresentou o defeito de linha de óxido, foi o que apresentou menores valores de dureza.

De seguida, apresentam-se os valores de dureza obtidos no *stringer* dos diversos coupons.

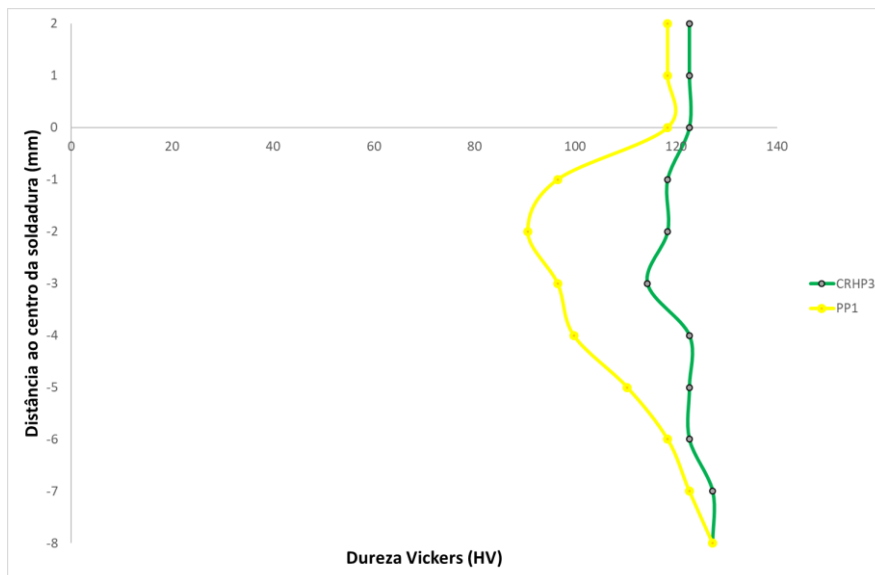


Figura 4.15 - Dureza Vickers dos coupons CRHP3 e PP1 (*stringer*)

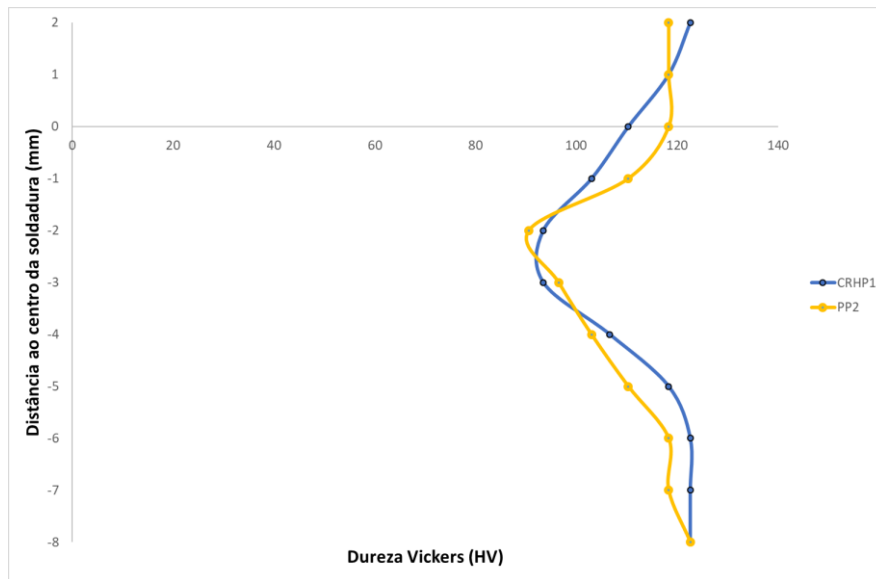


Figura 4.16 - Dureza Vickers dos coupons CRHP1 e PP2 (*stringer*)

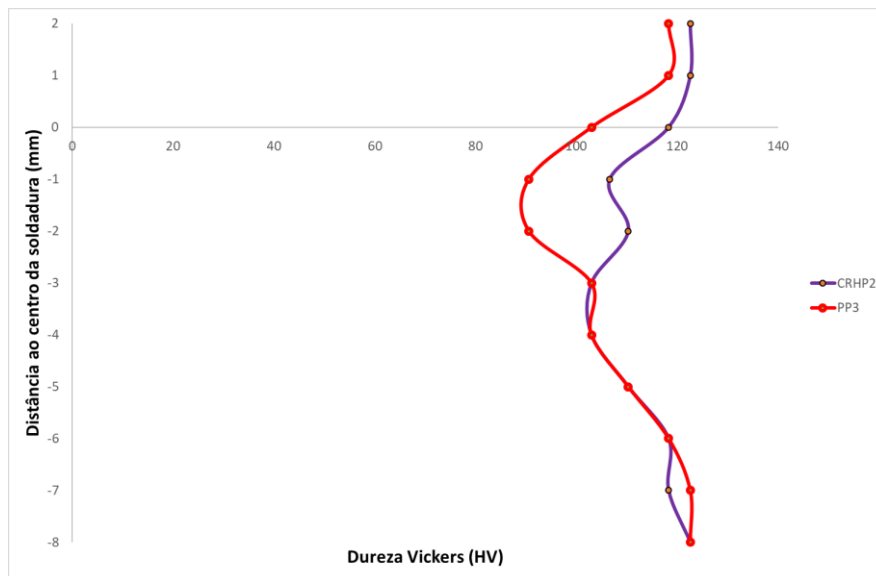


Figura 4.17 - Dureza Vickers dos coupons CRHP2 e PP3 (*stringer*)

Os valores obtidos para as durezas no *stringer* em nada diferem dos que foram observados no *skin*. Os melhores resultados foram alcançados com a ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva. Igualmente se verificou que na zona do nugget os valores para a dureza são maiores, caindo quando se entra na ZTMA, voltando a subir na extremidade do *stringer*, quando as medições entram na zona correspondente ao material base, sendo que o *stringer* apresentou dimensão suficiente para se atingir essa zona. Os valores de dureza na zona do material base foram de 127,2 HV e correspondem ao valor de dureza do material medido antes da realização dos ensaios.

### 4.3 Análise à tração

Foram realizados doze ensaios de tração: dois para cada coupon obtido. Todos os provetes fraturaram sensivelmente à mesma tensão de rotura, ainda assim, abaixo da tensão de rotura mínima do material base (tabela 3.2). Não é evidente a partir dos resultados a influência da geometria da ferramenta utilizada. Nas tabelas 4.3 e 4.4 apresentam-se os resultados obtidos para as tensões de rotura resultantes dos doze ensaios de tração realizados.

CRHP1 (proвете 1)	CRHP1 (proвете 2)	CRHP2 (proвете 1)	CRHP2 (proвете 2)	CRHP3 (proвете 1)	CRHP3 (proвете 2)
361 MPa	357 MPa	361 MPa	363 MPa	367 MPa	364 Mpa

Tabela 4.3 - Tensão de rotura dos coupons soldados com a ferramenta cónica roscada helicoidal progressiva

PP1 (proвете 1)	PP1 (proвете 2)	PP2 (proвете 1)	PP2 (proвете 2)	PP3 (proвете 1)	PP3 (proвете 2)
365 MPa	362 MPa	362 MPa	361 MPa	360 MPa	357 Mpa

Tabela 4.4 - Tensão de rotura dos coupons soldados com a ferramenta piramidal progressiva

De seguida, apresentam-se os valores médios relativos aos ensaios realizados.

CRHP1	CRHP2	CRHP3
359 MPa	362 MPa	366 MPa

Tabela 4.5 - Valores médios da tensão de rotura dos coupons soldados com a ferramenta cónica roscada helicoidal progressiva

PP1	PP2	PP3
364 MPa	362 MPa	359 MPa

Tabela 4.6 - Valores médios da tensão de rotura dos coupons soldados com a ferramenta piramidal progressiva

Os valores obtidos para a tensão de rotura nos doze ensaios realizados foi muito similar. Tal facto não permite, por si só, retirar qualquer conclusão acerca da influência das diferentes geometrias das ferramentas utilizadas na soldadura dos coupons. De seguida, apresentam-se as curvas Tensão-Deformação obtidas nos ensaios de tração, conforme ilustrado nas figuras 4.18 e 4.19.

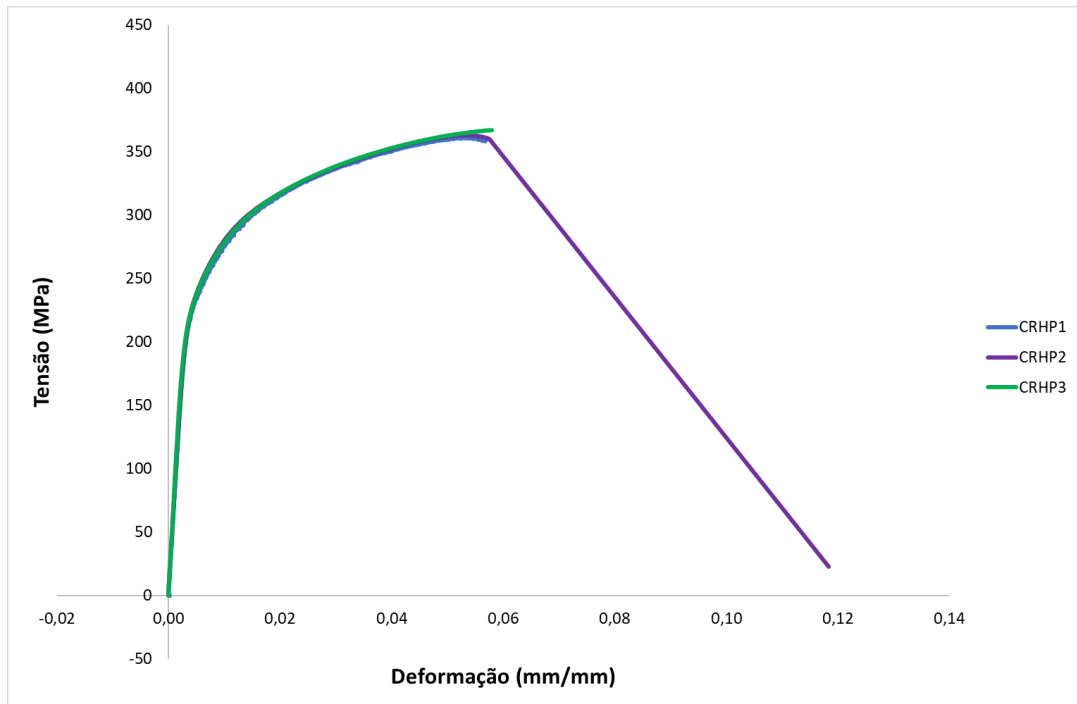


Figura 4.18 - Curva Tensão-Deformação para a ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva

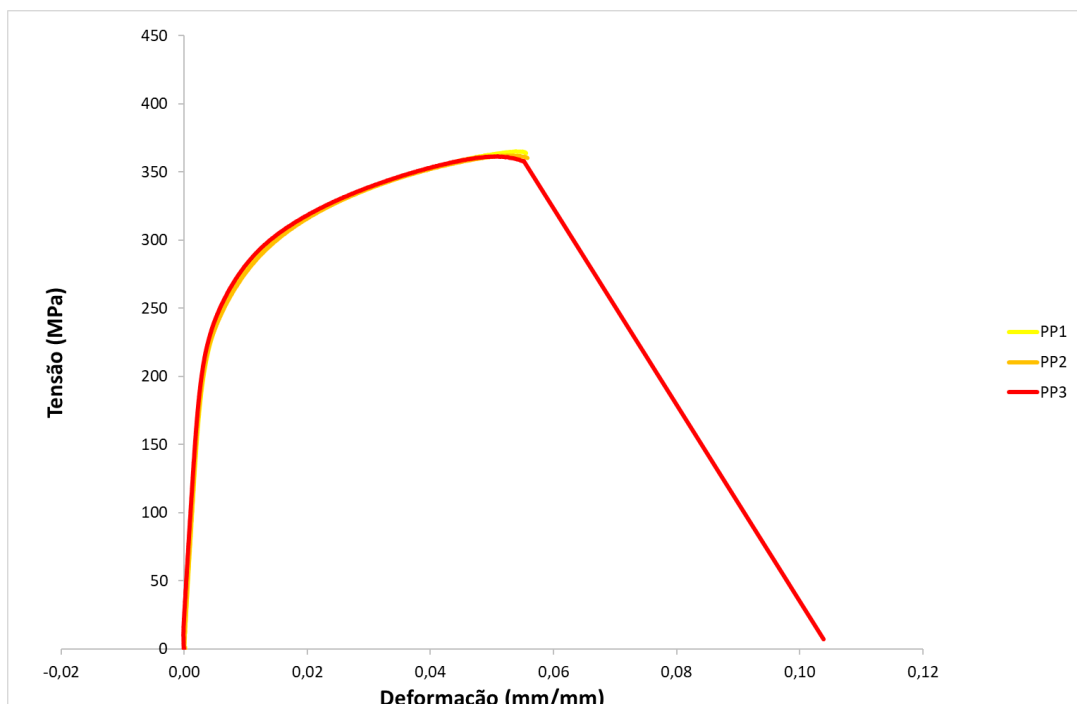


Figura 4.19 - Curva Tensão-Deformação para a ferramenta piramidal progressiva

Comparando os registos Tensão-Deformação, não se vislumbra diferenças entre uma ferramenta e outra. Apesar dos resultados serem muito semelhantes, escolheu-se mesmo assim os coupons onde se obtiveram os melhores resultados nos ensaios de tração, a fim de se realizarem os ensaios de fadiga, isto porque não havia tempo para realizar ensaios de fadiga em todos os provetes. Nesse sentido, escolheu-se para a ferramenta cônica helicoidal progressiva os provetes retirados do coupon 3 (CRHP3), e para a ferramenta piramidal progressiva os provetes resultantes do coupon 4 (PP1). Estes coupons foram ambos soldados com uma velocidade de rotação da ferramenta de 500 rpm, ou seja, a menor velocidade de rotação utilizada nas soldaduras. Uma velocidade de rotação da ferramenta menor provoca um menor aquecimento da peça. Ao invés, uma maior velocidade de rotação produz uma entrega térmica maior, sendo a temperatura atingida no processo maior. Maior energia no processo, traduzir-se-á num aumento do tamanho do grão. De referir ainda que uma maior velocidade de rotação utilizada nas soldaduras provoca juntas soldadas com marcas da rotação da ferramenta mais vincadas e pronunciadas, o que poderá potenciar o aparecimento de pequenos defeitos que diminuem a resistência do material, especialmente a resistência à fadiga se a superfície da junta não for afagada.

#### **4.4 Análise à fadiga**

Ensaiou-se à fadiga os coupons soldados com a ferramenta piramidal progressiva e soldados com a ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva. Para cada patamar de tensão ensaiaram-se dois provetes de cada coupon. Fixaram-se inicialmente três patamares de tensão diferentes. Decidiu-se parar os ensaios quando o número de ciclos atingisse um milhão sem que o provete faturasse. Decidiu-se igualmente fixar o primeiro patamar de tensão nestes ensaios num valor de 50% do valor da tensão de rotura observado nos ensaios de tração. Os ensaios de fadiga foram efetuados com uma razão de tensão  $R=0.1$ .

Para o coupon soldado com a ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva, realizaram-se os dois primeiros ensaios aplicando aos provetes uma gama de tensão de 164.7 MPa. Ambos os provetes fraturaram; o primeiro fraturou aos 135.458 ciclos e o segundo partiu aos 115.651 ciclos. Seguidamente, reduziu-se a gama de tensão aplicada, passando-se para o patamar de 30%, aplicando-se uma gama de tensão de 99 MPa. Neste patamar, ambos os provetes chegaram a um milhão de ciclos sem fraturar, e em consequência disso interromperam-se os respetivos ensaios. Como no patamar de 50% ambos os provetes fraturaram e no patamar de 30% eles não partiram, decidiu-se então realizar o terceiro e último ensaio a um patamar de

40%. A gama de tensão aplicada foi de 131.4 MPa e suspendeu-se o ensaio do primeiro provete quando atingiu um milhão de ciclos sem partir, enquanto o segundo provete partiu aos 816.496 ciclos, contudo, ele fraturou na zona da cabeça e não na zona da soldadura, muito provavelmente por causa da concentração de tensões provocada pela amarra que prende o provete à máquina. Como o provete estava muito perto de atingir um milhão de ciclos de fadiga, assumiu-se que caso não tivesse fraturado pela cabeça, muito provavelmente chegaria a um milhão de ciclos sem partir.



Figura 4.20 - Provete de fadiga fraturado na zona da amarra

Para o coupon soldado com a ferramenta piramidal progressiva, o primeiro provete fraturou aos 158.878 ciclos e o segundo partiu aos 90.479 ciclos. Seguidamente, reduziu-se a gama de tensão aplicada, passando-se para um patamar de 30%. Novamente, ambos os provetes fraturaram. O primeiro fraturou aos 631.603 ciclos e o segundo partiu aos 446.165 ciclos. Nesta altura, seria lógico reduzir ainda mais o patamar de tensão aplicada, de modo a se tentar aferir qual o patamar em que os provetes chegariam a um milhão de ciclos de fadiga sem fraturar. Contudo, em coerência com a metodologia seguida para os ensaios aos provetes da ferramenta cónica roscada helicoidal progressiva, decidiu-se realizar os ensaios aos dois últimos provetes a um patamar de 40% da tensão de rotura registada nos ensaios de tração. O primeiro provete partiu aos 372.096 ciclos e o segundo fraturou quando estavam realizados 350.540 ciclos. Portanto, para a ferramenta piramidal progressiva, todos os provetes fraturaram nos ensaios de fadiga, sem que algum tivesse atingido um milhão de ciclos.

Na tabela 4.7 apresenta-se o resumo dos patamares e respectivas gamas de tensão aplicadas nos ensaios de fadiga, bem como o número de ciclos de fadiga suportados pelos provetes.

	CRHP3 (coupon 3)		PP1 (coupon 4)	
	Gama tensão aplicada	N.º ciclos	Gama tensão aplicada	N.º ciclos
Patamar 50% (provetes 1)	164.7 MPa	135.548	164.7 MPa	158.878
Patamar 50% (provetes 2)	164.7 MPa	115.651	164.7 MPa	90.479
Patamar 40% (provetes 1)	131.4 MPa	1.000.000	131.4 MPa	372.096
Patamar 40% (provetes 2)	131.4 MPa	1.000.000	131.4 MPa	350.540
Patamar 30% (provetes 1)	99 MPa	1.000.000	99 MPa	631.603
Patamar 30% (provetes 2)	99 MPa	1.000.000	99 MPa	446.165

Tabela 4.7 - Valores resumo dos ensaios de fadiga

Na figura 4.21 apresenta-se a curva Tensão-Número de ciclos obtida nos ensaios de fadiga realizados, mais conhecida por curva S-N.

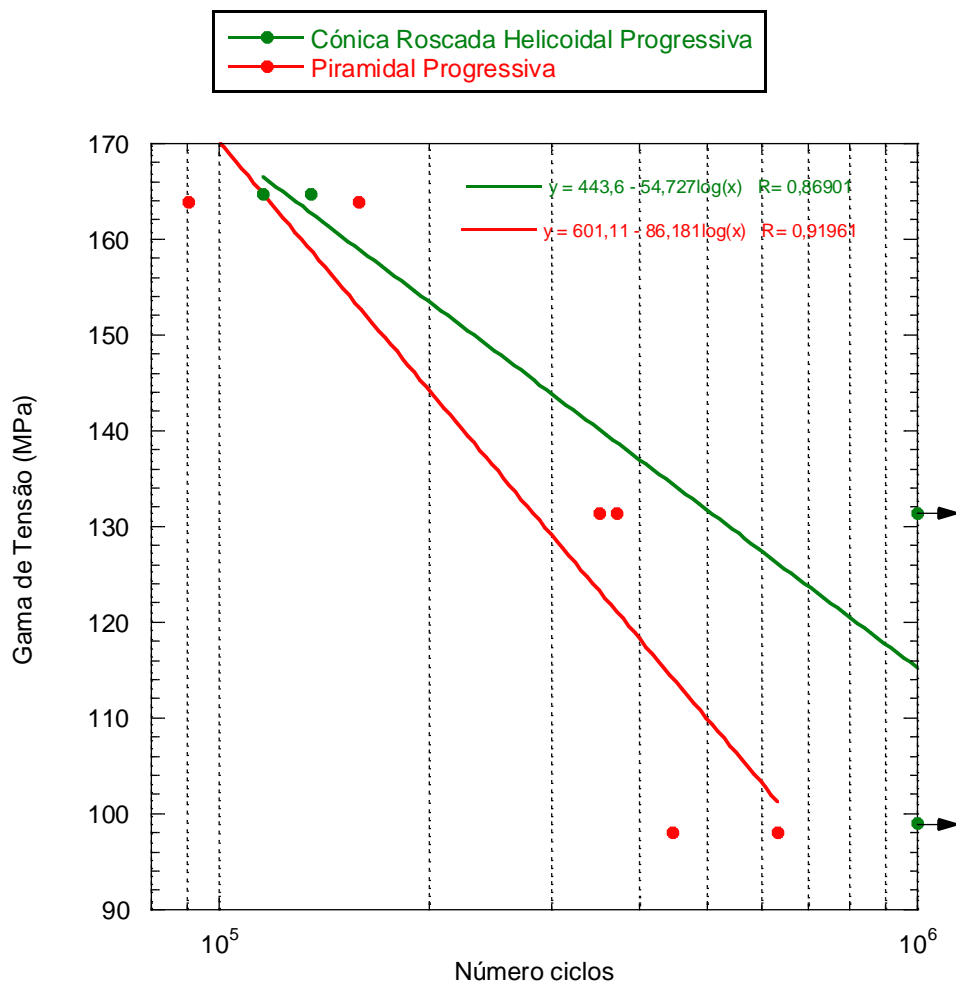


Figura 4.21 - Curva S-N

Os resultados obtidos nestes ensaios permitem retirar algumas conclusões. Os provetes soldados com a ferramenta cónica roscada helicoidal progressiva mostraram um melhor comportamento à fadiga que os provetes soldados com a ferramenta piramidal progressiva. Nesta última, nenhum provete conseguiu sequer atingir um milhão de ciclos de fadiga sem fraturar. A razão pode prender-se com a existência de rosca helicoidal no pino da ferramenta cónica helicoidal progressiva. A presença da rosca helicoidal no pino melhora o fluxo do material plastificado, promovendo igualmente a recristalização dinâmica na zona do nugget. Em função disso, obtém-se uma microestrutura com tamanho de grão mais pequeno e juntas com melhores propriedades. Relativamente aos provetes soldados com a ferramenta piramidal progressiva, o facto de esta não ter rosca prejudica o fluxo do material plastificado, podendo potenciar o aparecimento de pequenos defeitos como cavidades e linhas de óxidos, os quais contribuem para a redução acentuada do número de ciclos necessários para a iniciação da fenda de fadiga.

#### **4.5 Análise da fratura**

Para a realização da análise de superfícies fraturadas nos ensaios de fadiga, escolheram-se quatro provetes. Dois resultantes dos coupons soldados com a ferramenta cónica roscada helicoidal progressiva e dois soldados com a ferramenta piramidal progressiva. Propositadamente escolheram-se provetes que fraturaram a diferentes números de ciclos. Para a ferramenta cónica roscada helicoidal progressiva analisaram-se os dois únicos provetes que partiram, na medida em que todos os outros chegaram a um milhão de ciclos de fadiga (excetuando o que fraturou na zona da amarra). Para a outra ferramenta, escolheram-se os provetes que fraturaram a 90.479 e 631.603 ciclos de fadiga.

Nas imagens das figuras 4.22 e 4.23 apresenta-se a superfície faturada do provete de fadiga PP1 que fraturou aos 90.479 ciclos de fadiga. Assinalam-se nas imagens as diferentes zonas que serão objeto de uma análise mais detalhada à fratura.

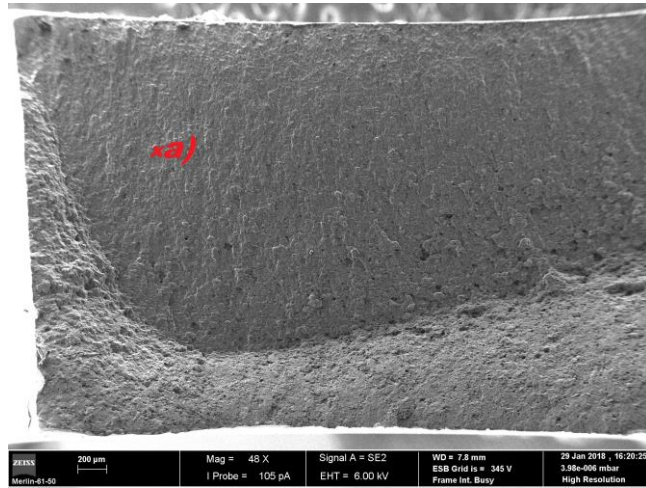


Figura 4.22 - Superfície fraturada PP1 aos 90.479 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa

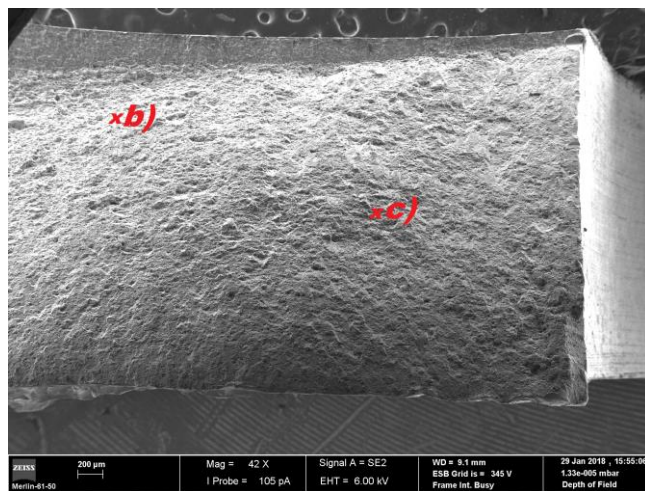


Figura 4.23 - Superfície fraturada PP1 aos 90.479 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa

Nas imagens das figuras 4.24, 4.25 e 4.26 apresentam-se as fotografias da superfície fraturada do provete de fadiga PP1, nas três zonas identificadas nas imagens anteriores.

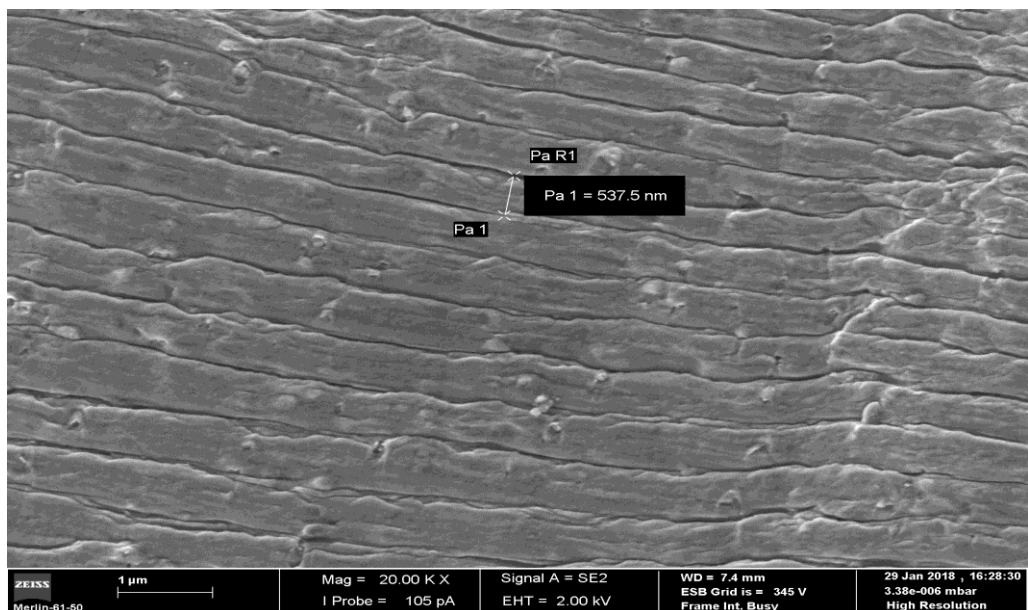


Figura 4.24 – Fratura por fadiga PP1 a) aos 90.479 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa

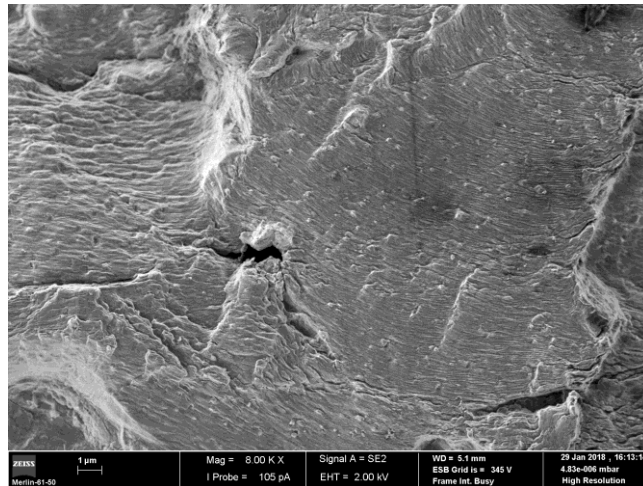


Figura 4.25 – Fratura por fadiga PP1 b) aos 90.479 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa

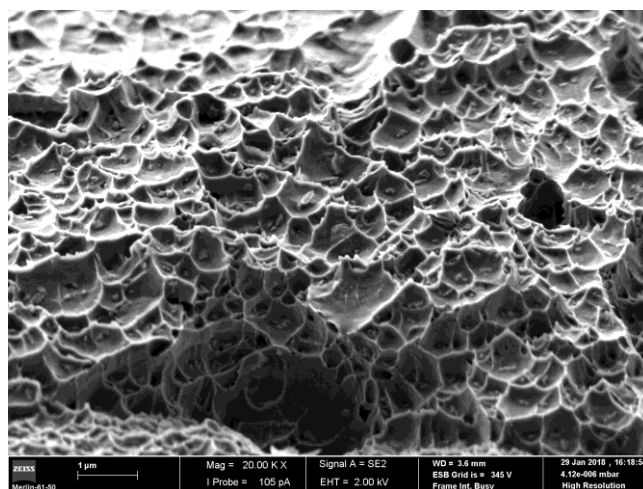


Figura 4.26 – Fratura dúctil PP1 c) aos 90.479 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa

Na imagem da figura 4.24 apresenta-se uma ampliação das estrias de fadiga, características de rotura por fadiga. Na imagem da figura 4.26 é apresentada a zona de rotura dúctil. É possível observar com nitidez os *dimples*, muito característicos desse tipo de rotura nos materiais. Como se pode observar na imagem da figura 4.24, a largura das estrias de fadiga é de 537.5 nm.

Nas imagens das figuras 4.27 e 4.28 apresenta-se a superfície faturada do provete de fadiga PP1 que fraturou aos 631.603 ciclos de fadiga.

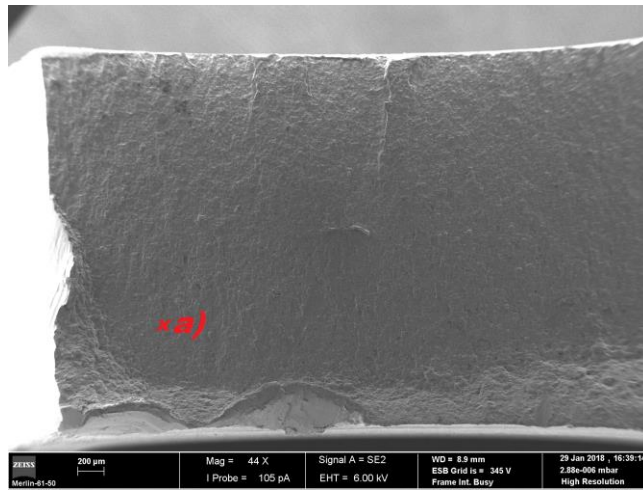


Figura 4.27 - Superfície fraturada PP1 aos 631.603 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 99 MPa

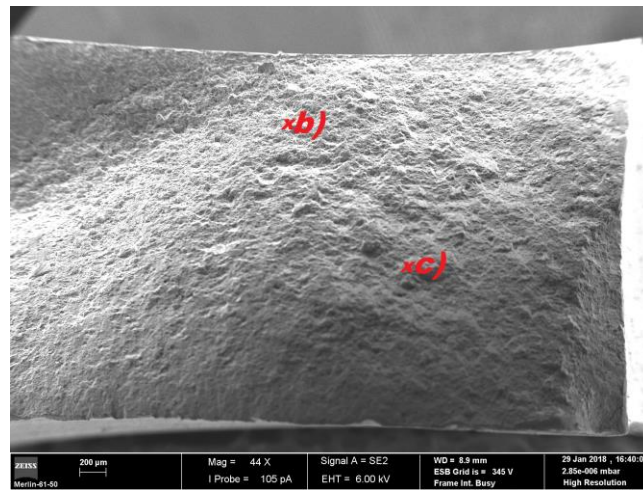


Figura 4.28 - Superfície fraturada PP1 aos 631.603 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 99 MPa



Figura 4.29 – Fratura por fadiga PP1 a) aos 631.603 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 99 MPa

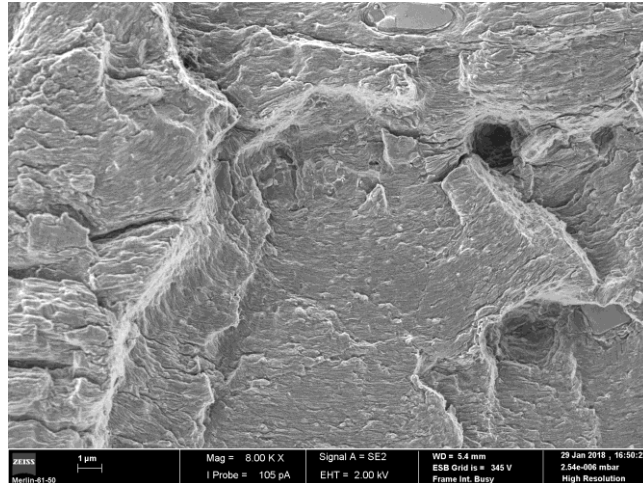


Figura 4.30 – Fratura por fadiga PP1 b) aos 631.603 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 99 MPa

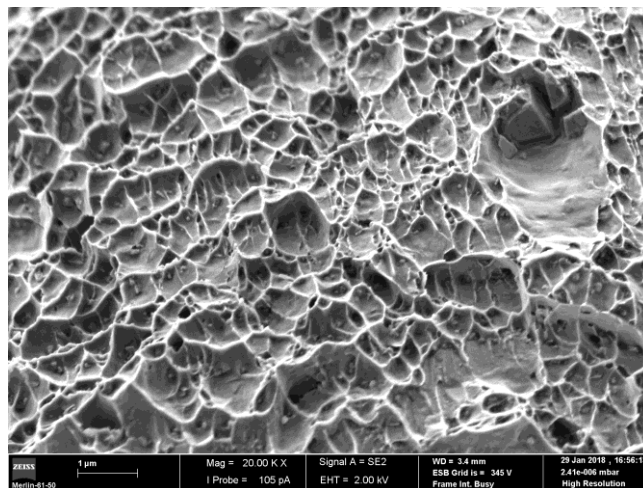


Figura 4.31 – Fratura dúctil PP1 c) aos 631.603 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 99 MPa

Pode-se observar na imagem da figura 4.27 que a área de propagação das fendas de fadiga é maior que a área de propagação observada na figura 4.22. O provete da figura 4.22 rompeu aos 90.479 ciclos de fadiga, enquanto que o da figura 4.27 rompeu aos 631.603 ciclos de fadiga. A dimensão da fenda de fadiga está em consonância com as conclusões anteriores, na medida em que o provete que rompeu com menos ciclos tem uma largura das estrias de 537.5 nm, diferente do provete que partiu aos 631.603 ciclos de fadiga, o qual apresentou uma largura da ordem dos 75 nm, ou seja, demorou mais a propagar a fenda até fraturar, constatando-se dessa forma que teve uma velocidade de propagação da fenda de fadiga mais baixa.

De seguida, apresenta-se as imagens da superfície fraturada do provete de fadiga CRHP3 que fraturou aos 115.651 ciclos de fadiga.

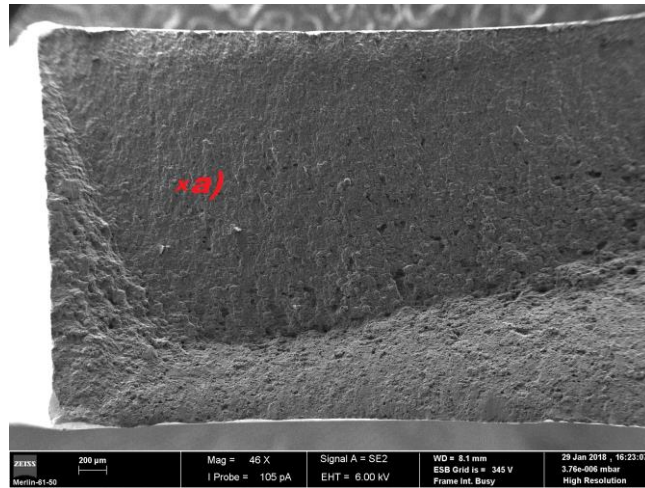


Figura 4.32 - Superfície fraturada CRHP3 aos 115.651 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa

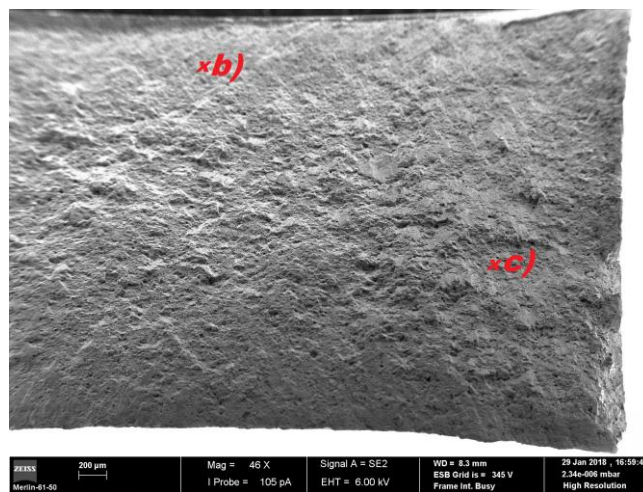


Figura 4.33 - Superfície fraturada CRHP3 aos 115.651 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa

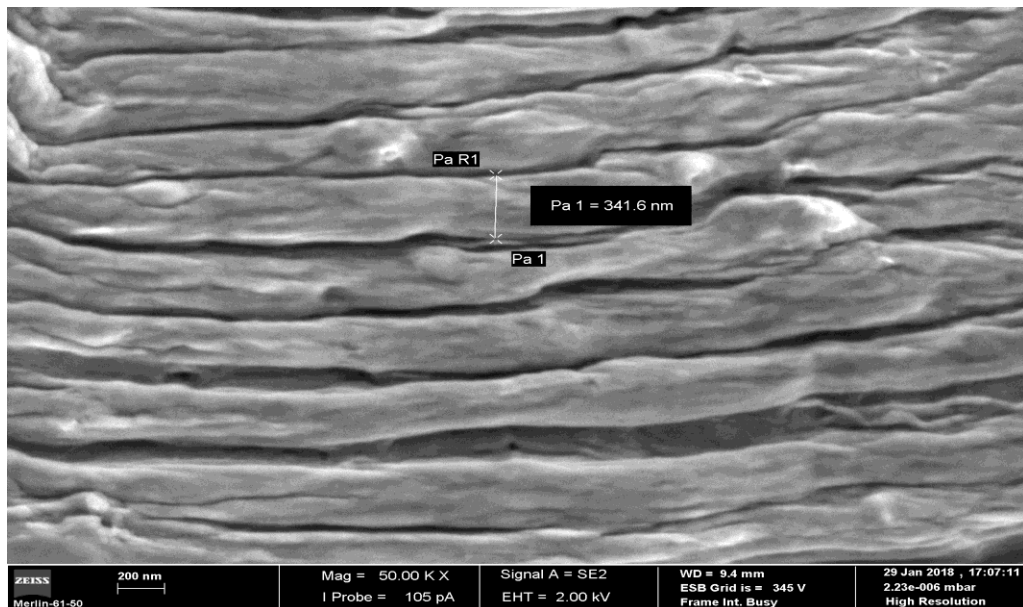


Figura 4.34 – Fratura por fadiga CRHP3 a) aos 115.651 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa

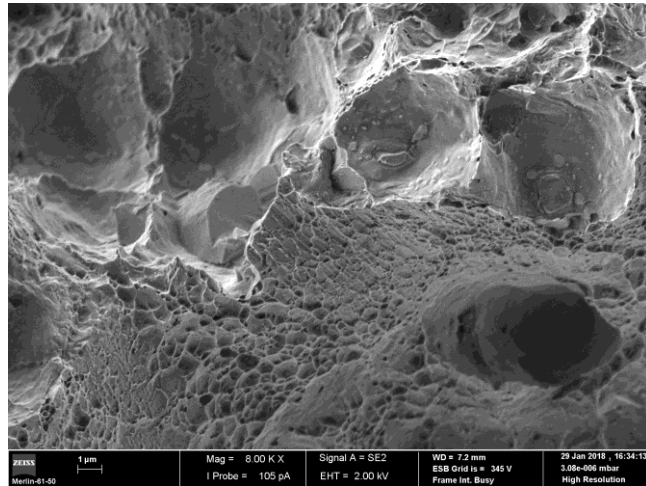


Figura 4.35 – Fratura por fadiga CRHP3 b) aos 115.651 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa

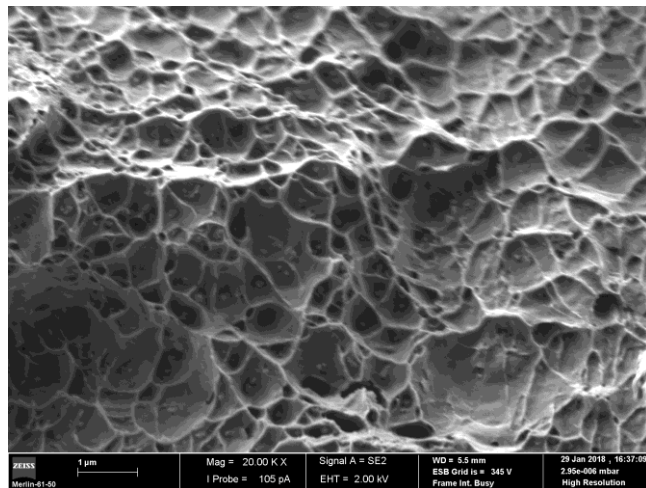


Figura 4.36 – Fratura dúctil CRHP3 c) aos 115.651 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa

O último provete de fadiga a ser analisado foi o provete CRHP3 que fraturou aos 135.458 ciclos de fadiga. Nas imagens das figuras 4.37 e 4.38 apresenta-se a superfície faturada do referido provete.

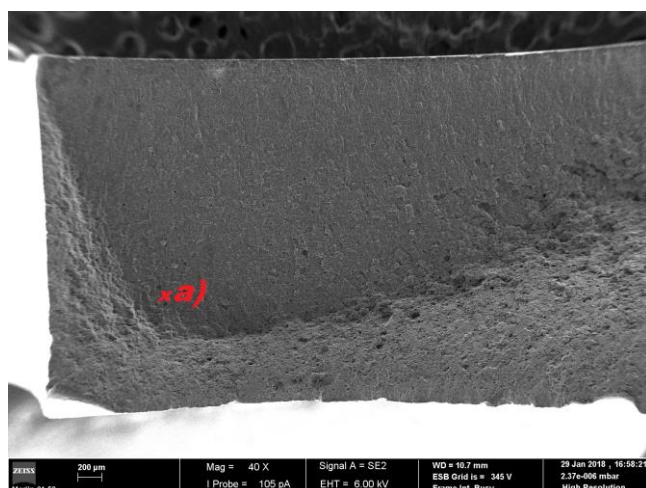


Figura 4.37 - Superfície fraturada CRHP3 aos 135.458 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa

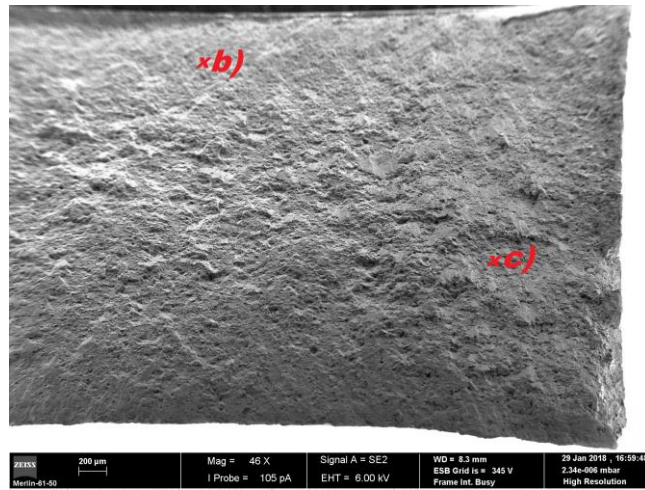


Figura 4.38 - Superfície fraturada CRHP3 aos 135.458 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa

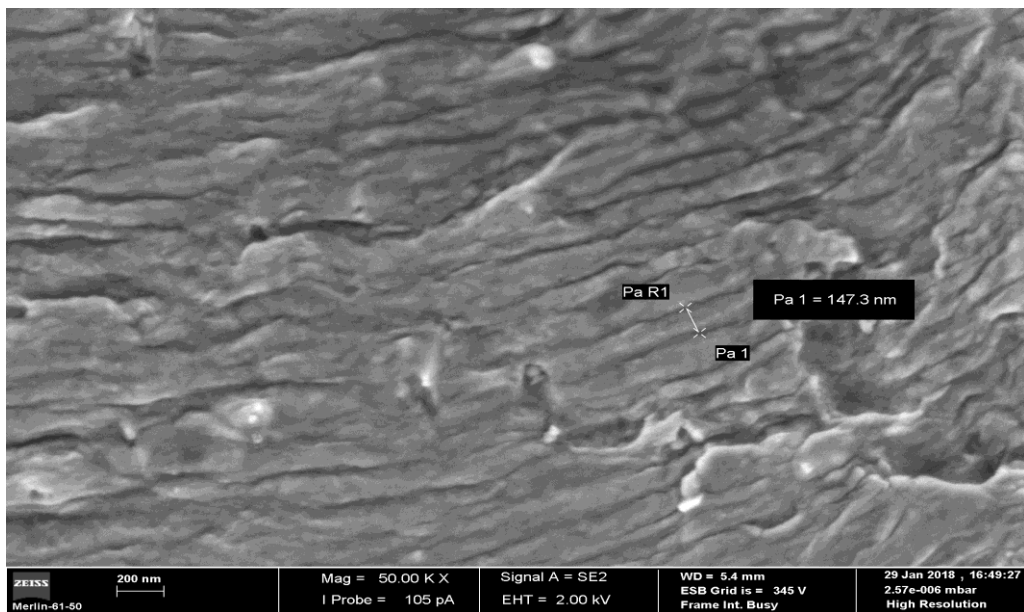


Figura 4.39 – Fratura por fadiga CRHP3 a) aos 135.458 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa

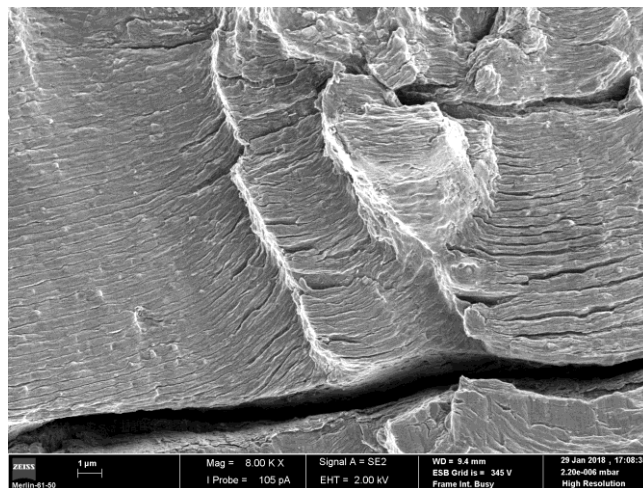


Figura 4.40 – Fratura por fadiga CRHP3 b) aos 135.458 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa

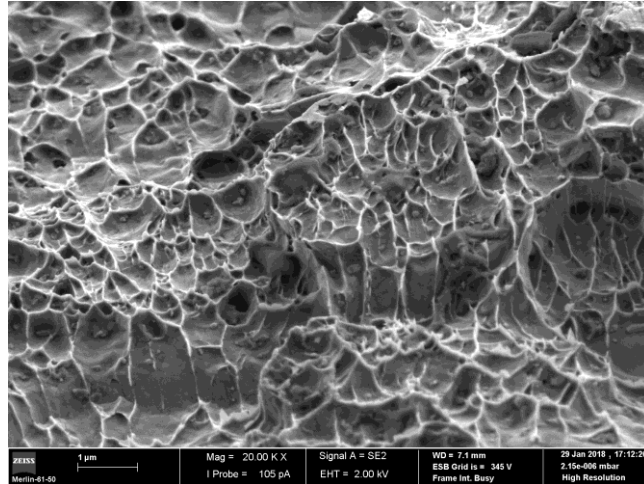


Figura 4.41 – Fratura dúctil CRHP3 c) aos 135.458 ciclos fadiga; gama tensão aplicada: 164.7 MPa

No caso dos provetes soldados com a ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva constata-se que, pese embora as superfícies de propagação de fendas de fadiga sejam muito similares em ambos os provetes, a largura das estrias do provete com maior resistência à fadiga é cerca de metade do tamanho da fenda do provete que fraturou com o menor número de ciclos.



## 5 Conclusões e trabalhos futuros

A primeira e grande conclusão a retirar do presente trabalho é que as soldaduras realizadas com ambas as ferramentas utilizadas não produziram defeitos, excetuando um dos coupons soldados, porventura devido à utilização de uma velocidade de rotação da ferramenta excessiva, sendo esta desprovida de pino na sua rosca. Estes resultados, por si só, revelam-se extremamente animadores, já que se percebe ser possível soldar ligas de alumínio para as indústrias aeronáutica e aeroespacial sem quaisquer defeitos, o que sem a utilização do processo de soldadura por fricção linear era impraticável. As ferramentas utilizadas neste trabalho já foram objeto de estudos e trabalhos de investigação e desenvolvimento anteriores, daí se poder concluir que a ausência de defeitos nas soldaduras realizadas pressupõe que as ferramentas utilizadas já foram objeto de sucessivos desenvolvimentos e melhoramentos, revelando-se atualmente ambas excelentes na obtenção de soldaduras desprovidas de defeitos.

Os resultados demonstraram que ambas as ferramentas poderão ser utilizadas nas soldaduras por FSW na liga de alumínio estudada, contudo, concluiu-se que a ferramenta cônica roscada helicoidal progressiva produziu melhores soldaduras do que a ferramenta piramidal progressiva. Os resultados de tração não evidenciaram grande diferença entre as ferramentas. Já os resultados obtidos nos ensaios de fadiga revelaram que a ferramenta com pino cônico suportou mais ciclos de fadiga que a ferramenta sem rosca no pino. Os resultados dos ensaios de dureza confirmaram esta conclusão.

Na análise às superfícies fraturas dos provetes dos ensaios de fadiga, conseguem-se observar perfeitamente as zonas que fraturaram devido à propagação de fendas de fadiga, conseguindo-se observar com bastante detalhe as diferentes zonas de rotura: a devida à propagação das fendas de fadiga e as zonas de rotura dúctil.

A análise metalográfica permitiu observar as diferentes microestruturas resultantes das soldaduras. Resultado transversal a todos os coupons é o facto de na zona do nugget os valores de dureza terem-se revelado superiores, aproximando-se do valor observado para a dureza no material base.

Relativamente a trabalhos futuros, propõe-se a realização de soldaduras em materiais dissimilares, contrariamente às soldaduras realizadas na presente dissertação, que foram realizadas no mesmo material. Propõem-se igualmente a realização de soldaduras envolvendo outro tipo de juntas, tentando-se entender a influência dos parâmetros do processo, quando se realizam soldaduras com diferentes tipos de junta.

## Referências

- [1] Mishra R.S. and Ma Z.Y. (2005), “Friction Stir Welding and Processing”, Materials Science and Engineering R 50 (2005), p. 1–78.
- [2] I. J. Polmear, Edward Arnold “Light Alloys - Metallurgy of the Light Metals”, 1995, 3ª Ed.
- [3] [http://www.aluminio100porcento.com/uploads/files/3\\_aplicações\\_do\\_alumínio\\_na\\_indústria\\_aeronáutica\\_e\\_aeroespacial.pdf](http://www.aluminio100porcento.com/uploads/files/3_aplicações_do_alumínio_na_indústria_aeronáutica_e_aeroespacial.pdf) (acedido a 02/02/2018).
- [4] C. Dawes, W. Thomas, TWI Bulletin 6, November/December 1995, p. 124.
- [5] Zhang, Y. N. Cao X., Larose S. and Wanjara P. - Review of Tools for Friction Stir Welding and Processing. Canadian Metallurgical Quarterly 2012 Vol. 51, n.º 3 p. 250-261.
- [6] Oliviecki, N. J. Beskow, A. B. “Analysis of the Parameters of Friction Welding Process of an Aluminum Alloy (junho 2013). PERSPECTIVA, Erechim. v.37, n.º 138, p. 15-29.
- [7] Loureiro A. “Friction Stir Welding: Parâmetros de processo e aplicações” (2013).
- [8] [http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM052/Prof.Sheid/Aula\\_Aluminio.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM052/Prof.Sheid/Aula_Aluminio.pdf) (acedido a 02/02/2018).
- [9] [www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/aluminio%5B1%5D.pdf](http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/aluminio%5B1%5D.pdf) (acedido a 02/02/2018).
- [10] <http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=108> (acedido a 02/02/2018).
- [11] Vianna, Filipi Damasceno “Tratamento térmico T4: solubilização e envelhecimento de ligas Al3, 5% Cu”, Jul. 2006.
- [12] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes, G.B. Patent Application No. 9125978.8 (December 1991).
- [13] Mishra, R. S.; Mahoney, M. W. Friction Stir Welding and Processing. Estados Unidos: ASM International, 2007.

- [14] Mohamadreza, N., S. Abbas, and Y. Spiro, Taguchi Optimization of Process Parameters in Friction Stir Welding of 6061 Aluminum Alloy: A Review and Case Study. *Scientific Research*, 2011. 3: p. 144-155.
- [15] Rai, R., De, A., Bhadeshia, H. K. D. H., DebRoy, T. (2011), “Review: friction stir welding tools”, *Science and Technology of Welding & Joining*, 16, P. 325-342.
- [16] Gurel C, and Selcuk Mistikoglu - Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys (2014).
- [17] B. London, M. Mahoney, B. Bingel, M. Calabrese, D. Waldron, in: *Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding*, Kobe, Japan, 27–28 September, 2001.
- [18] Silva Ana C.F., Braga Daniel F.O., de Figueiredo M.A.V., Moreira P.M.G.P. (2014), “Friction stir welded T-joints optimization”, *Mater Des.* 2014;55: P. 120–127.
- [19] R. Leal and A. Loureiro; *Materials Science Fórum Vols.* 455-456 (2004).
- [20] Astarita A, Squillace A, Scala A and Prisco A. (2012), “On the critical technological issues of friction stir welding T-joint of dissimilar aluminum alloys”, p. 1763-1771.
- [21] <http://www.ugac.ca/ceeuqac/media/images/CTDA/2IllustrationsoudageANGLAIS.jpg> (accedido a 17/01/2018).
- [22] Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R., Withers, P. J. (2009), “Friction Stir Welding of Aluminium Alloys”, *International Materials Reviews*, 54, n.º2, p. 49-93.
- [23] S. Guerdoux and L. Fourment - A 3D numerical simulation of different phases of friction stir welding-, Jul. 2009.
- [24] Buffa, G., Shivpuri, R., Fratini, L. (2008), “Influence of material characteristics on plastomechanics of the FSW process for T-joints”, p. 2435-2445.
- [25] Nandam, R.; DebRoy, T.; Bhadeshia, H. K. D. H. *Recent Advances in Friction Stir Welding – Process, Weldment Structure and Properties. Progress in Materials Science, Estados Unidos*, Vol. 53 (2008), p. 980-1023.
- [26] Miranda, R.M.; Gandra, J.; Vilaca. P. - “Surface modification by friction based processes”, *Mod. Surf. Eng. Treat.* (2013).
- [27] Elangovan, K and Balasubramanian, V (2008), “Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy”, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 200 (1-3), p. 163-175, 2008.
- [28] Cuellar, Karen Johanna Quintana and Silveira, José Luis L. - *Analysis of Torque in Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 5052 by Inverse Problem Method* (2017).
- [29] W.M. Thomas, K.I. Johnson, C.S. Wiesner, *Adv. Eng. Mater.* 5 (2003).

- [30] FULLER, C. B. “Friction Stir Tool Materials and Designs”. In: Mishra R. S. Friction Stir Welding and Processing. 1ª edição. ASM Internacional, (2007).
- [31] Buffa, G., Hua, J., Shivpuri, R., Fratini, L. (2006), “Design of the friction stir welding tool using the continuum based FEM model”, *Materials Science and Engineering A*, 419, P. 381-388.
- [32] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, S.D. Smith, in: S.K. Das, J.G. Kaufman, T.J. Lienert (Eds.), *Aluminum 2001— Proceedings of the TMS 2001 Aluminum Automotive and Joining Sessions*, TMS, 2001.
- [33] Buffa, G., Micari F., Shivpuri, R., Fratini, L. (2008), “On the material flow in FSW T-joints: Influence of geometrical and technological parameters”, p. 570-578.
- [34] Cui Lei, Yang Xinqi, Xie Yonghui, Hou Xiaopeng, Song Youbao (2013), “Process parameter influence on defects and tensile properties of friction stir welded Tjoints on AA6061-T4 sheets”, p. 161-174.
- [35] Plaine Athos Henrique, de Alcântara Nelson Guedes “Prediction of Friction Stir Welding defect-free joints of AISI 304 austenitic stainless steel through axial force profile understanding (2014).
- [36] S. Sinhmar D.K. Dwivedi “Enhancement of mechanical properties and corrosion resistance of friction stir welded joint of AA2014 using water cooling, Dec. 2016.
- [37] A.P. Reynolds, T.U. Seidel, M. Simonsen, in: *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16, (1999).
- [38] A.P. Reynolds, *Sci. Technol. Weld. Joining* 5 (2000).
- [39] T.U. Seidel, A.P. Reynolds, *Metall. Mater. Trans. A* 32 (2001) 2879.
- [40] O.T. Midling, T.H. Sanders, Jr., E.A. Strake, Jr. (Eds.), *Proceedings of the Fourth International Conference on Aluminum Alloys*, vol. 1, Georgia Institute of Technology, School of Materials Science and Engineering, Atlanta, GA, USA, 1994, pp. 451–458.
- [41] S. Xu, X. Deng, A.P. Reynolds, T.U. Seidel, *Sci. Technol. Weld. Joining* 6 (2001).
- [42] Attallah, M., “Microstructure property development in friction stir welds of aluminum based alloys”, 2007, University of Birmingham. p. 65-66, 87-91.
- [43] Kundu Anupam “Deformation Induced Abnormal Grain Growth in Friction Stir Weld during Solution Heat Treatment”, (2016).
- [44] K.V. Jata, K.K. Sankaran, J.J. Ruschau, *Metall. Mater. Trans. A* 31 (2000) 2181.
- [45] P. Threadgill, "Friction Stir Welds in Aluminium Alloys: Preliminary Microstructural Assessment," *TWI Bulletin*, vol. 38, pp. 30-33, (1997).

- [46] Kvačakaj, T. and R. Bidulský, “Aluminium Alloys, Theory and Applications”, 2011, InTech: Croatia. p. 73-76.
- [47] Yutaka S. Sato, Hiroyuki Kokawa, Masatoshi Enomoto, and Shitetoshi Jogan “Microstructural Evolution of 6063 Aluminum during FrictionStir Welding”, (1999).
- [48] S. Benavides, Y. Li, L.E. Murr, D. Brown, J.C. McClure, Scripta Mater. 41 (1999).
- [49] <https://www.twi-global.com/> (acedido a 12/12/2017).
- [50] Gibson, B.T., et al., Friction stir welding: Process, automation, and control. Journal of Manufacturing Processes, 2013.
- [51] Tavares S.M.O., Castro R.A.S., V. Richter-Trummer, P. Vilaca, P.M.G.P. Moreira, and P.M.S.T. de Castro (2010), “Friction Stir Welding of T-joints with Dissimilar Aluminum Alloys: Mechanical Joint Characterization”, p. 312–318.
- [52] Acerra, F., Buffa, G., Fratini, L., Troiano, G. (2010), “On the FSW of AA2024-T4 and AA7075-T6 T-joints: An industrial case study”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 48, p. 1149-1157.
- [53] Zhao Yong, Zhou Lilong, Wang Qingzhao, Yan Keng, Zou Jiasheng (2014), “Defects and tensile properties of 6013 aluminum alloy T-joints by friction stir welding”, Journal of Materials & Design, Vol. 57, p. 146–155.
- [54] Delany Fred, Kallee Stephan W. and Russell Mike J., “Friction stir welding of aluminium ships”, (2004).
- [55] Williams, S. W. “Welding of Airframes using Friction Stir”. AIR & SPACE EUROPE, V. 3, p. 3, (2001).
- [56] E. Hoyosa, D. López, H. Alvarez - A phenomenologically based material flow model for friction stir welding – Dec. 2016.
- [57] D. Lohwasser, Z. Chen, Friction stir welding: From basics to applications, (2009).
- [58] Kallee Stephan “Application of friction stir welding in the shipbuilding industry” TWI Cambridge, UK, Feb. 2000.
- [59] <https://www.productionfrictionstirwelding.com/all-services/cnc-equipment> (acedido a 17/01/2018).



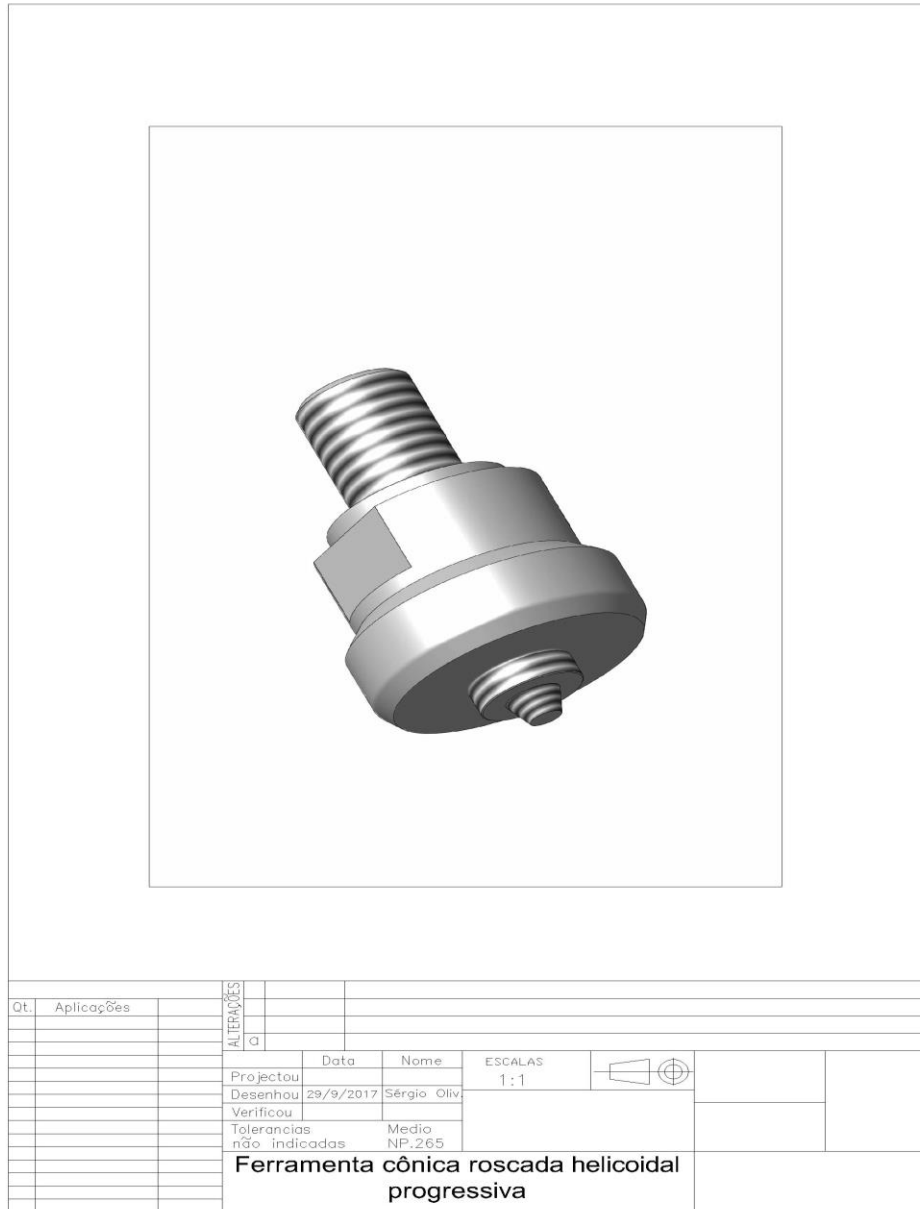


Figura A.2 - Ferramenta Cônica Roscada Helicoidal Progressiva

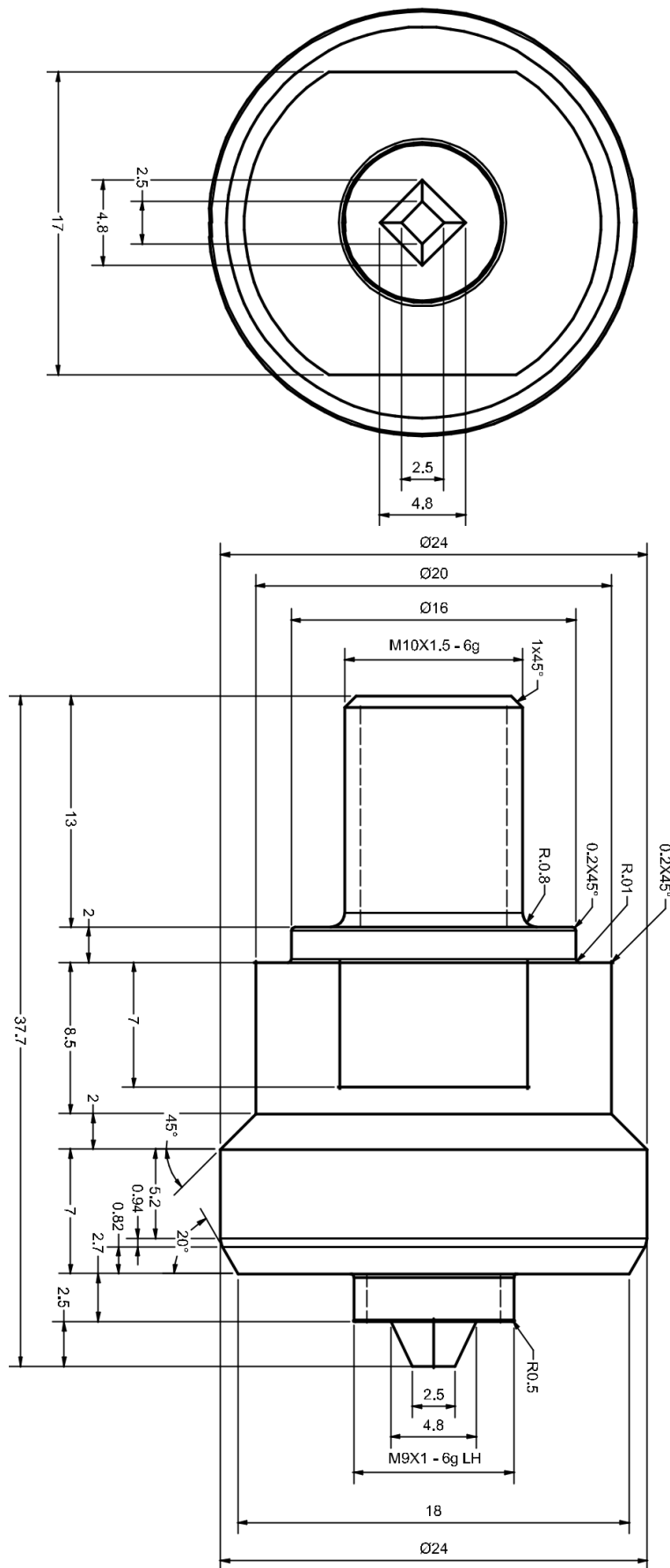


Figura A.3 - Ferramenta Piramidal Progressiva



## Apêndice B

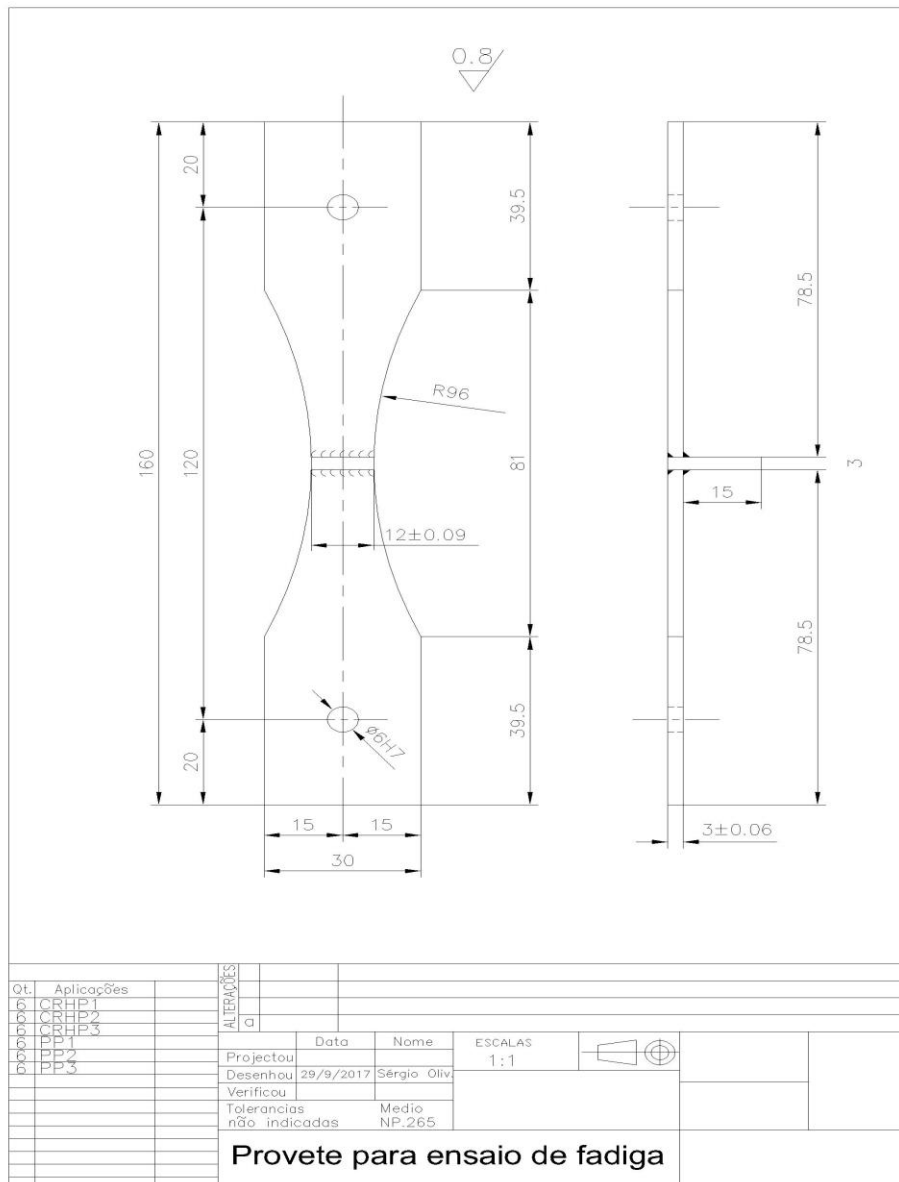


Figura B.1 – Provete para ensaio de fadiga

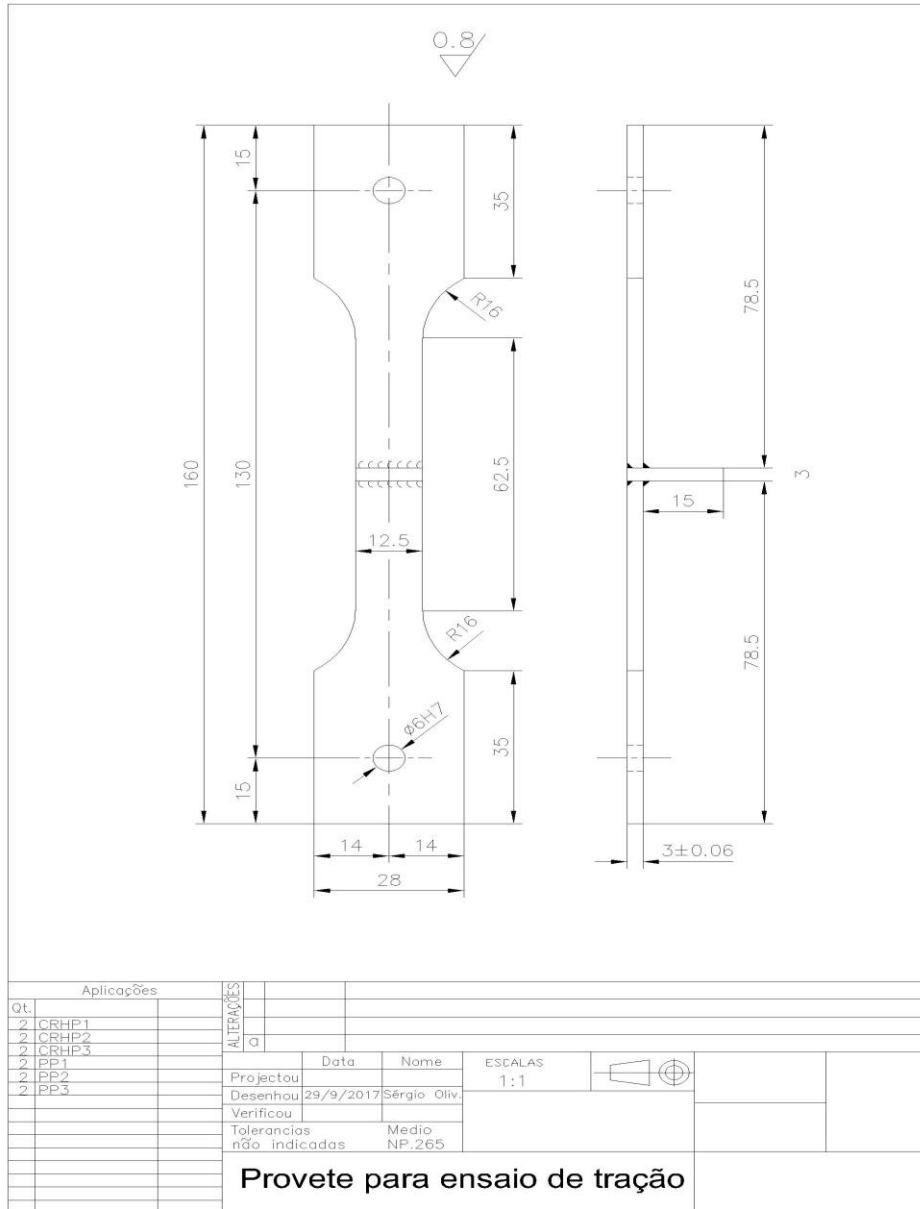


Figura B.2 – Provete para ensaio de tração

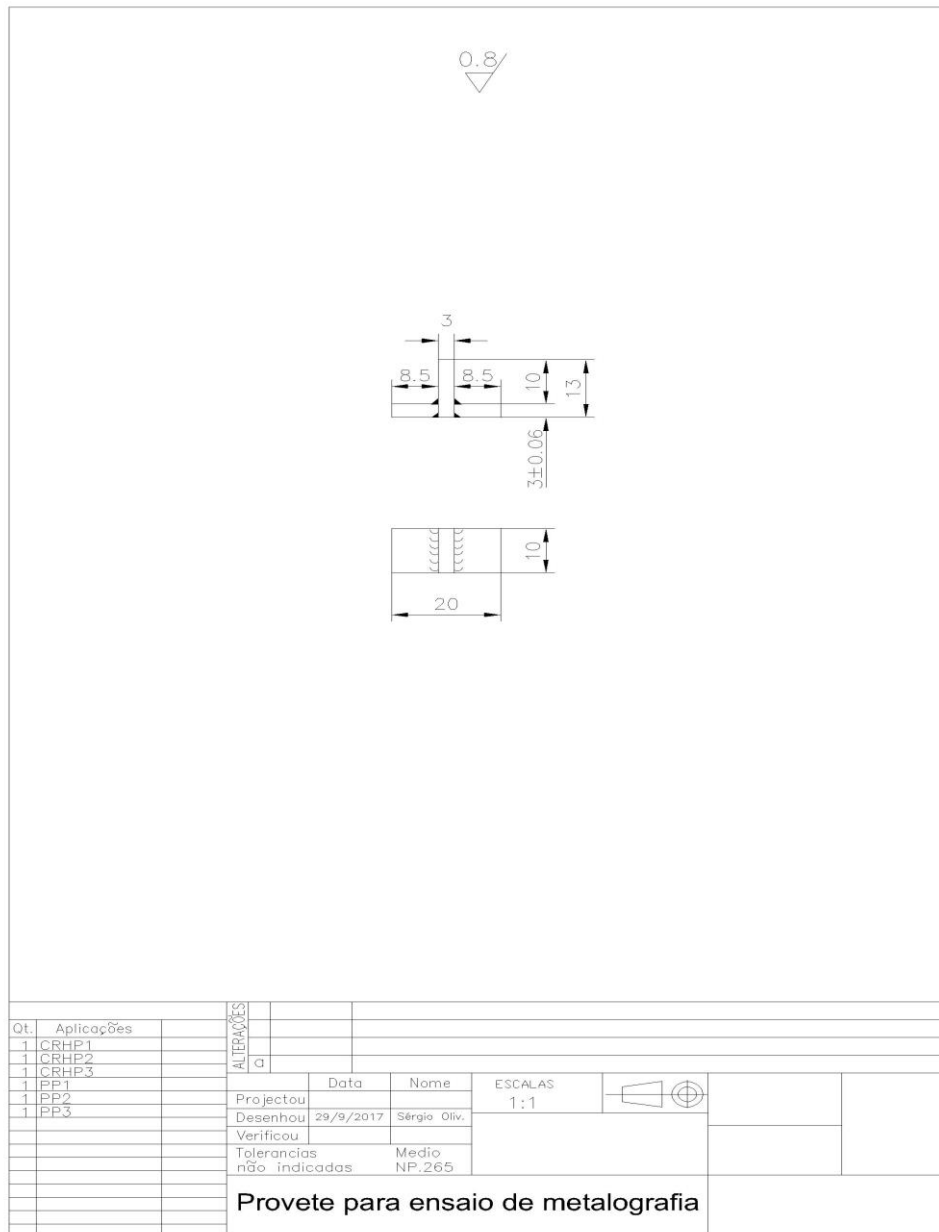


Figura B.3 – Provete para ensaio de metalografia



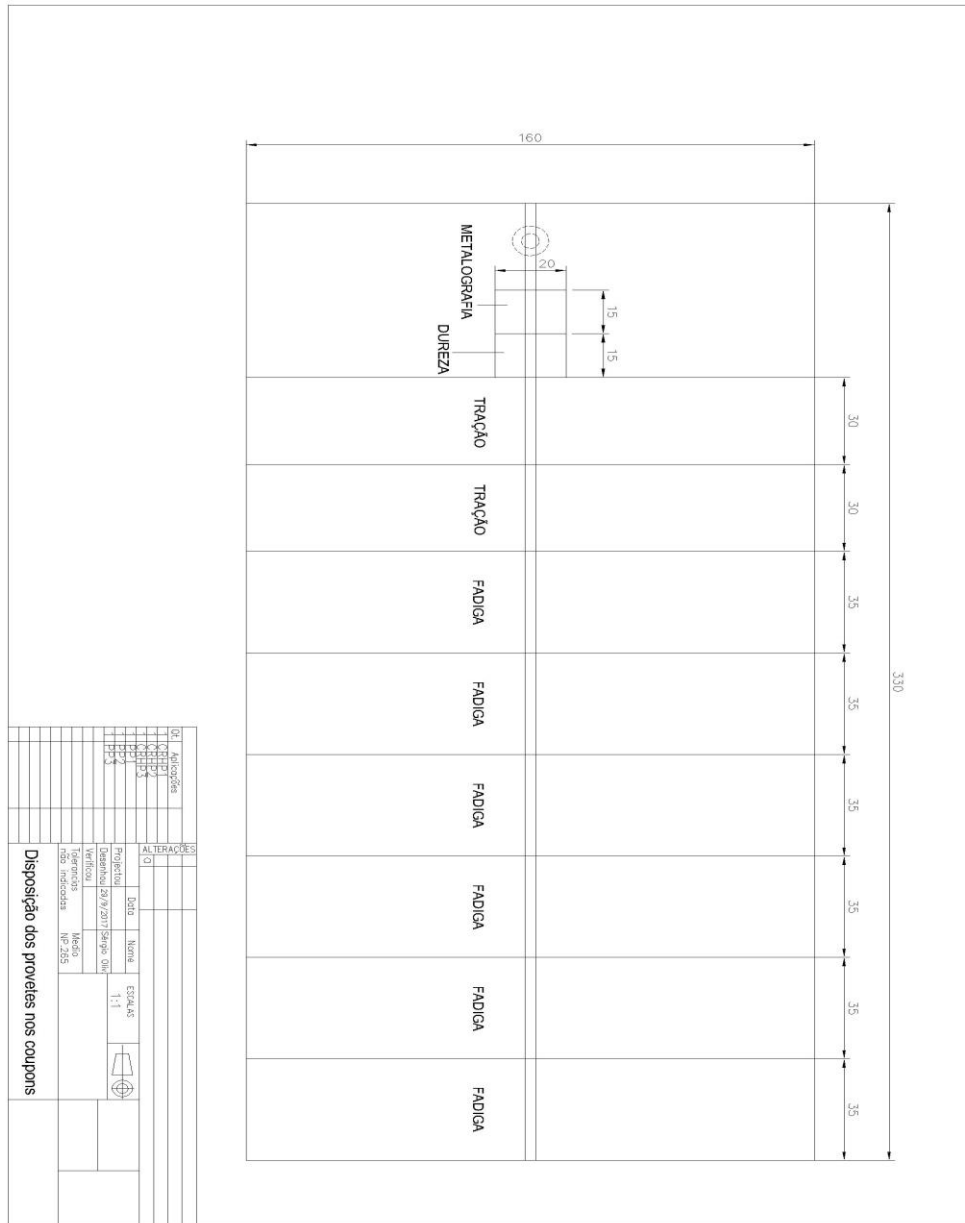


Figura B.5 – Disposição dos provetes nos coupons



## Apêndice D

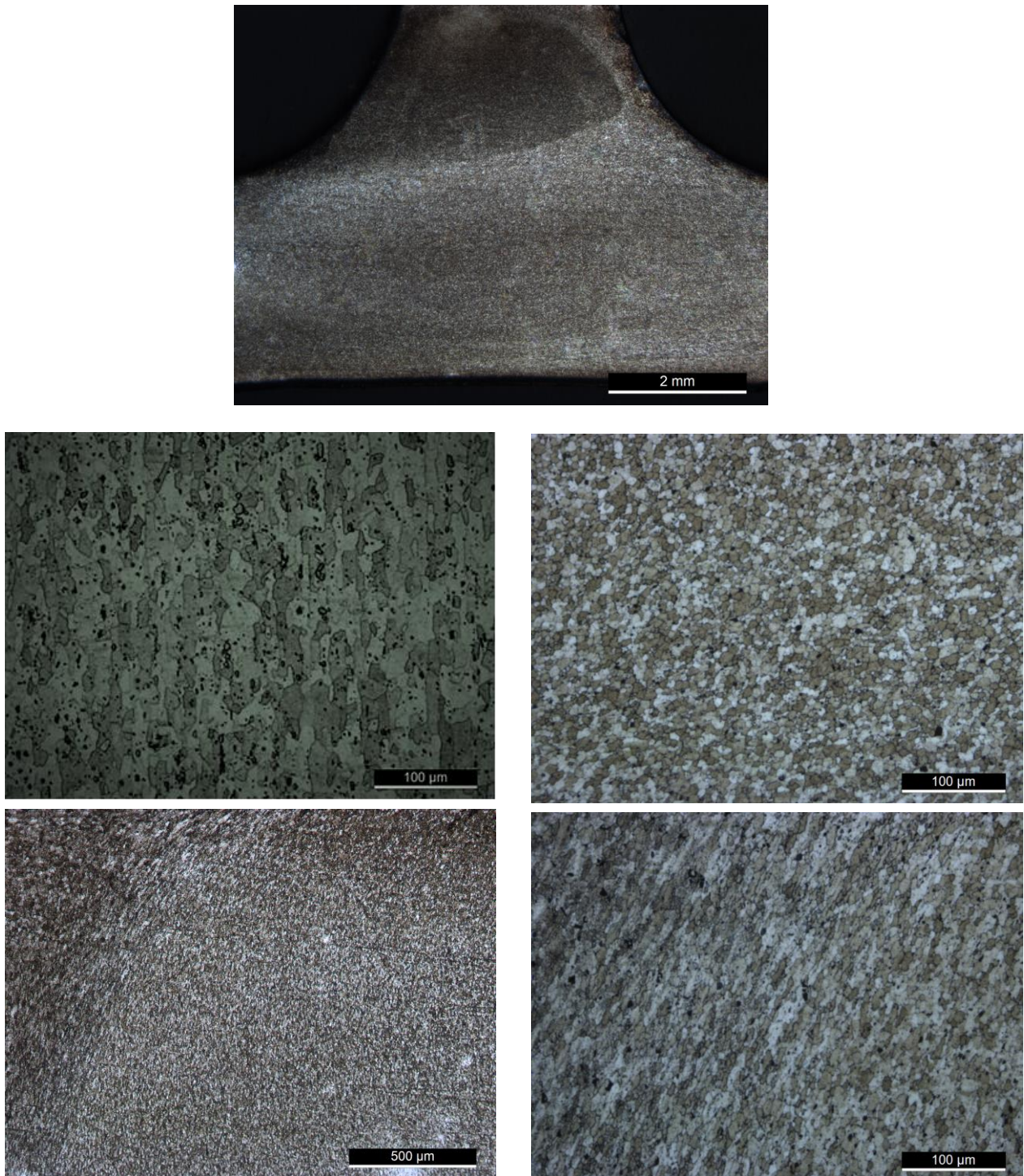


Figura D.1 – Microestrutura do coupon CRHP1

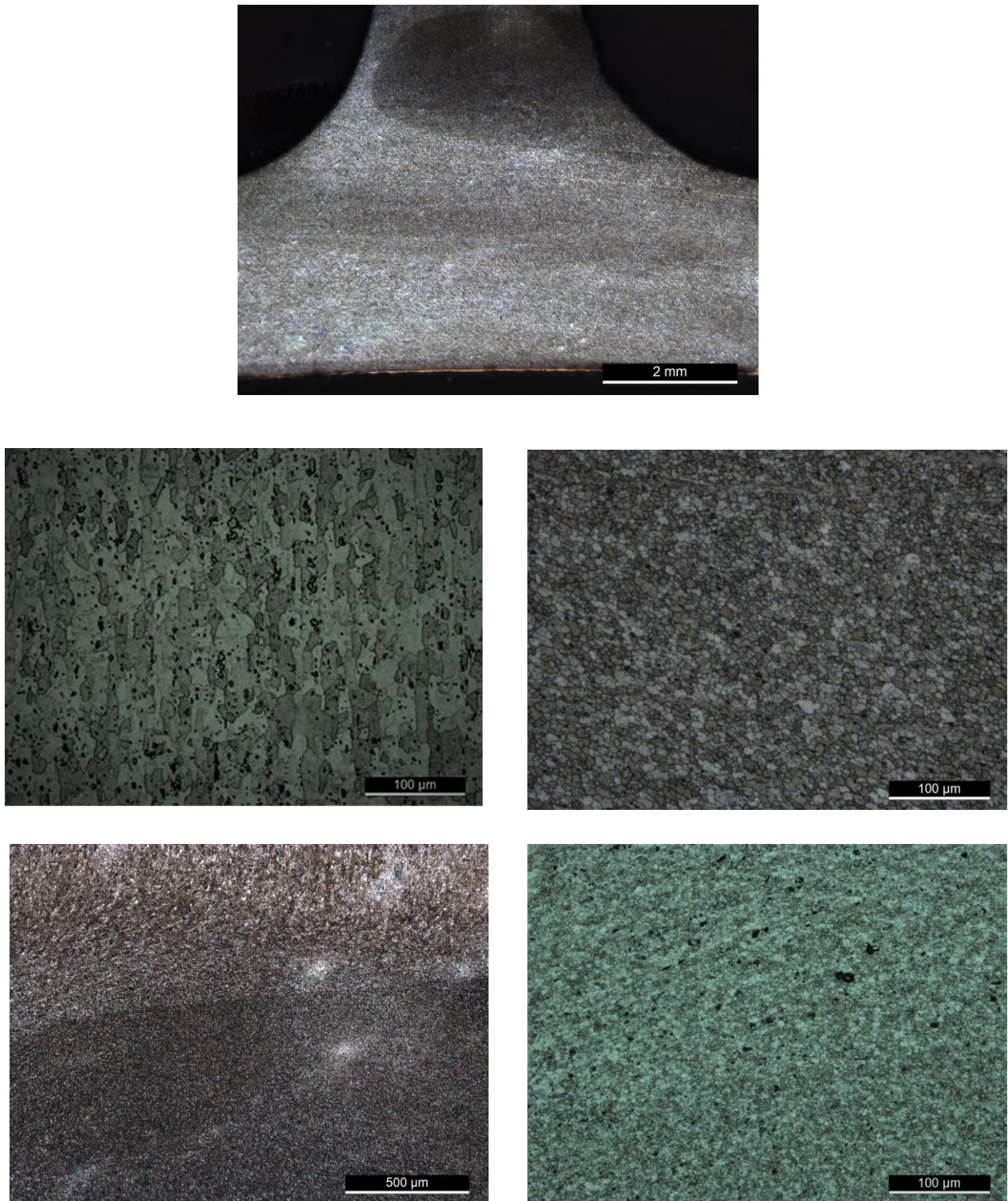


Figura D.2 – Microestrutura do coupon CRHP2

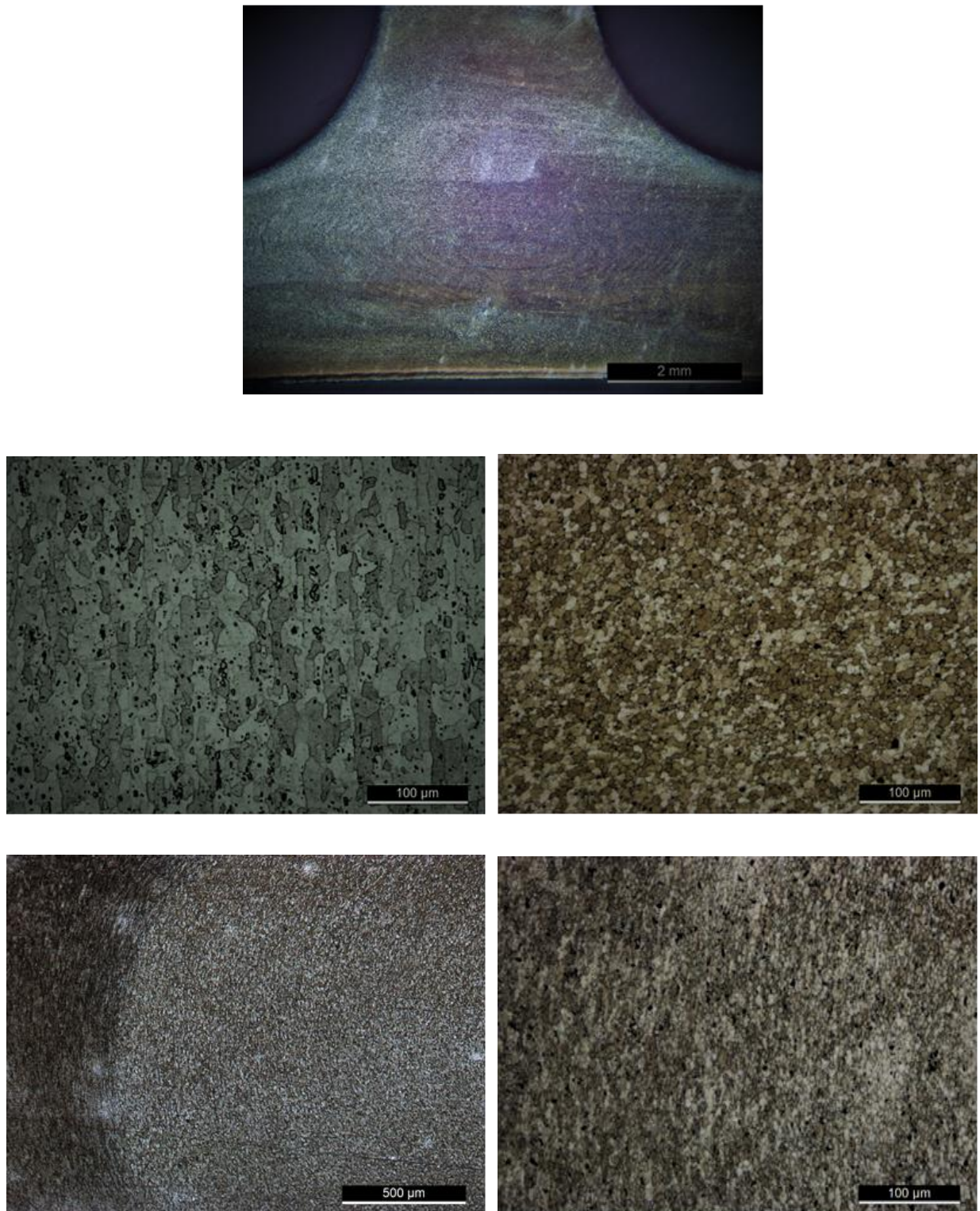


Figura D.3 – Microestrutura do coupon CRHP3

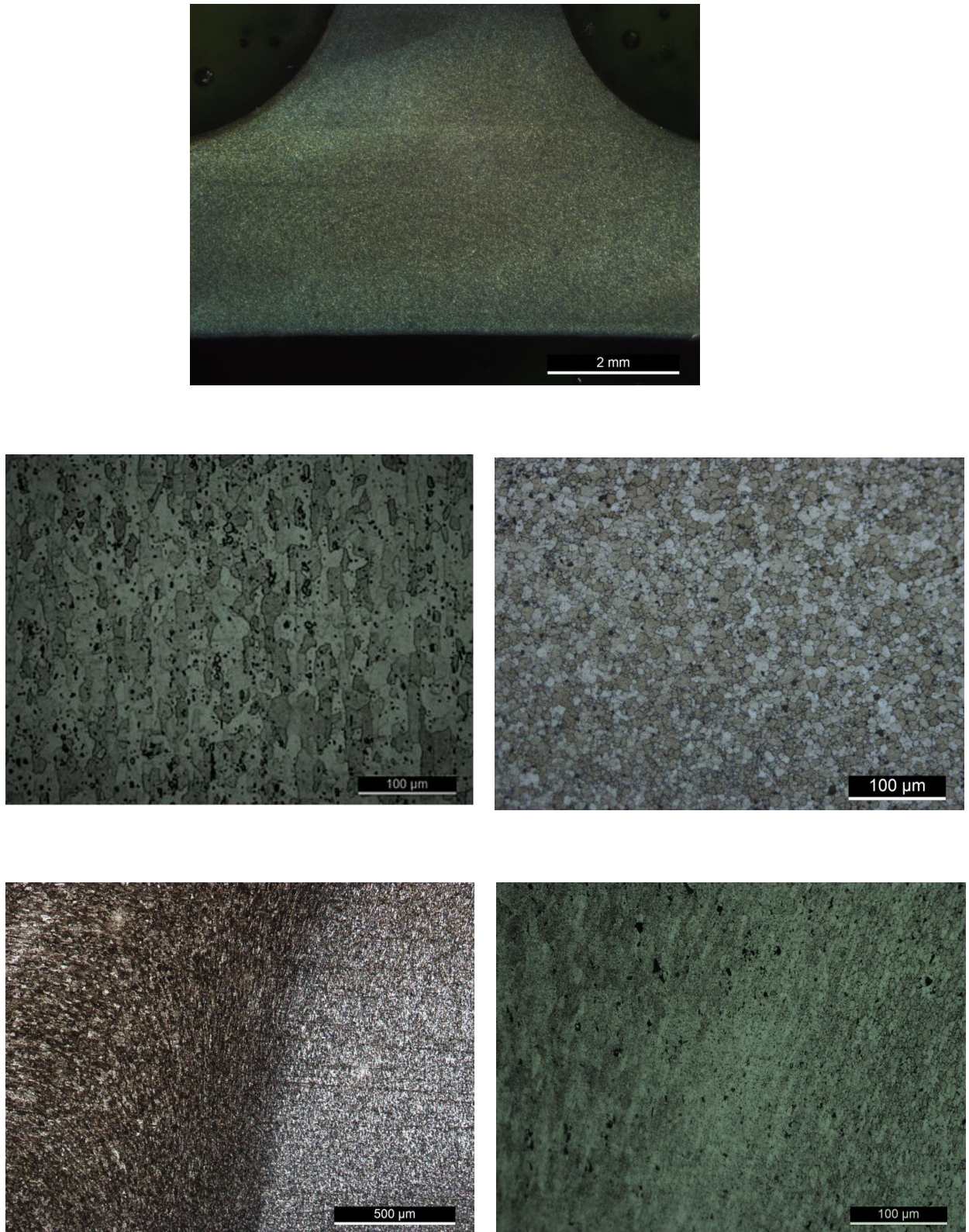


Figura D.6 – Microestrutura do coupon PP1

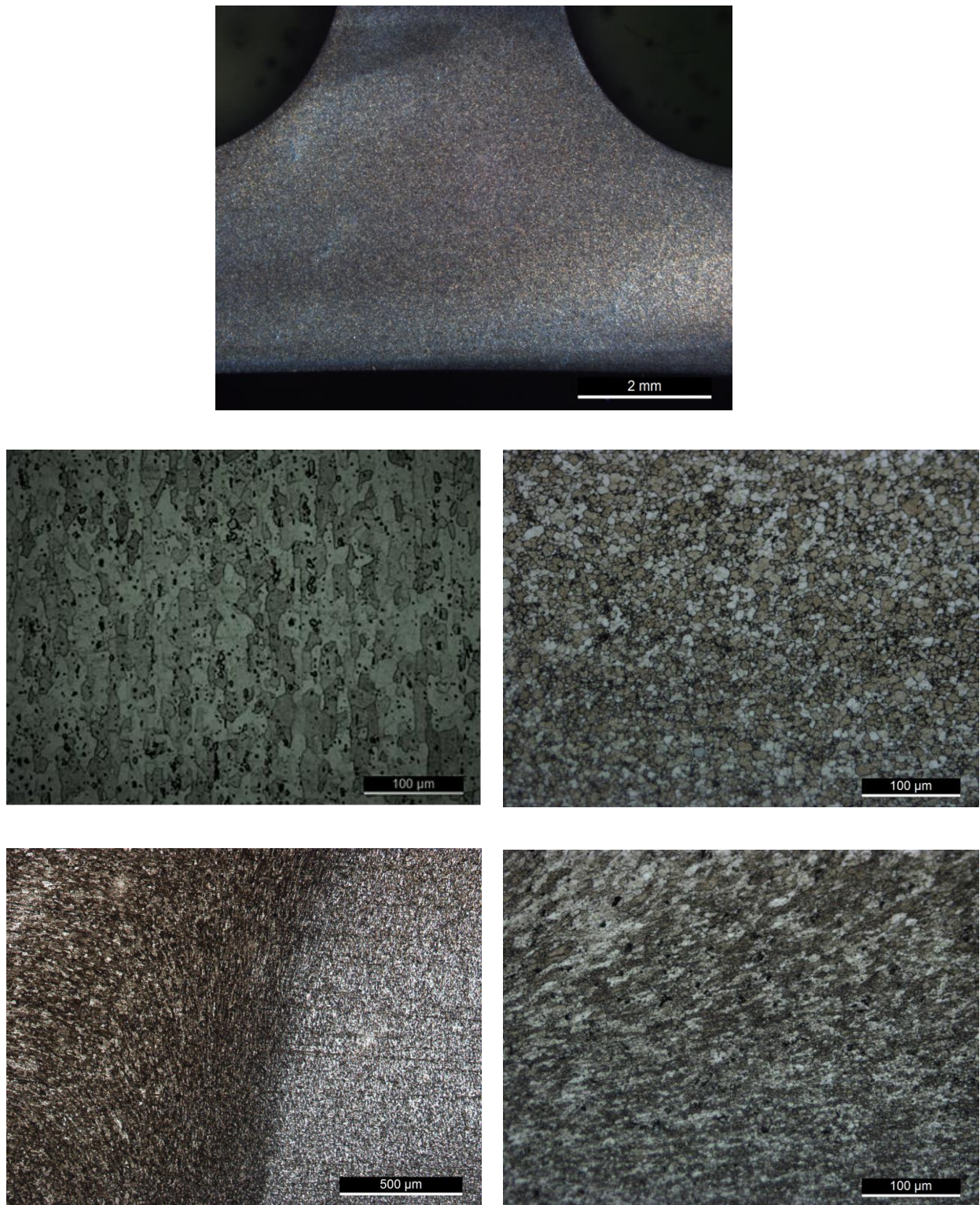


Figura D.5 – Microestrutura do coupon PP2

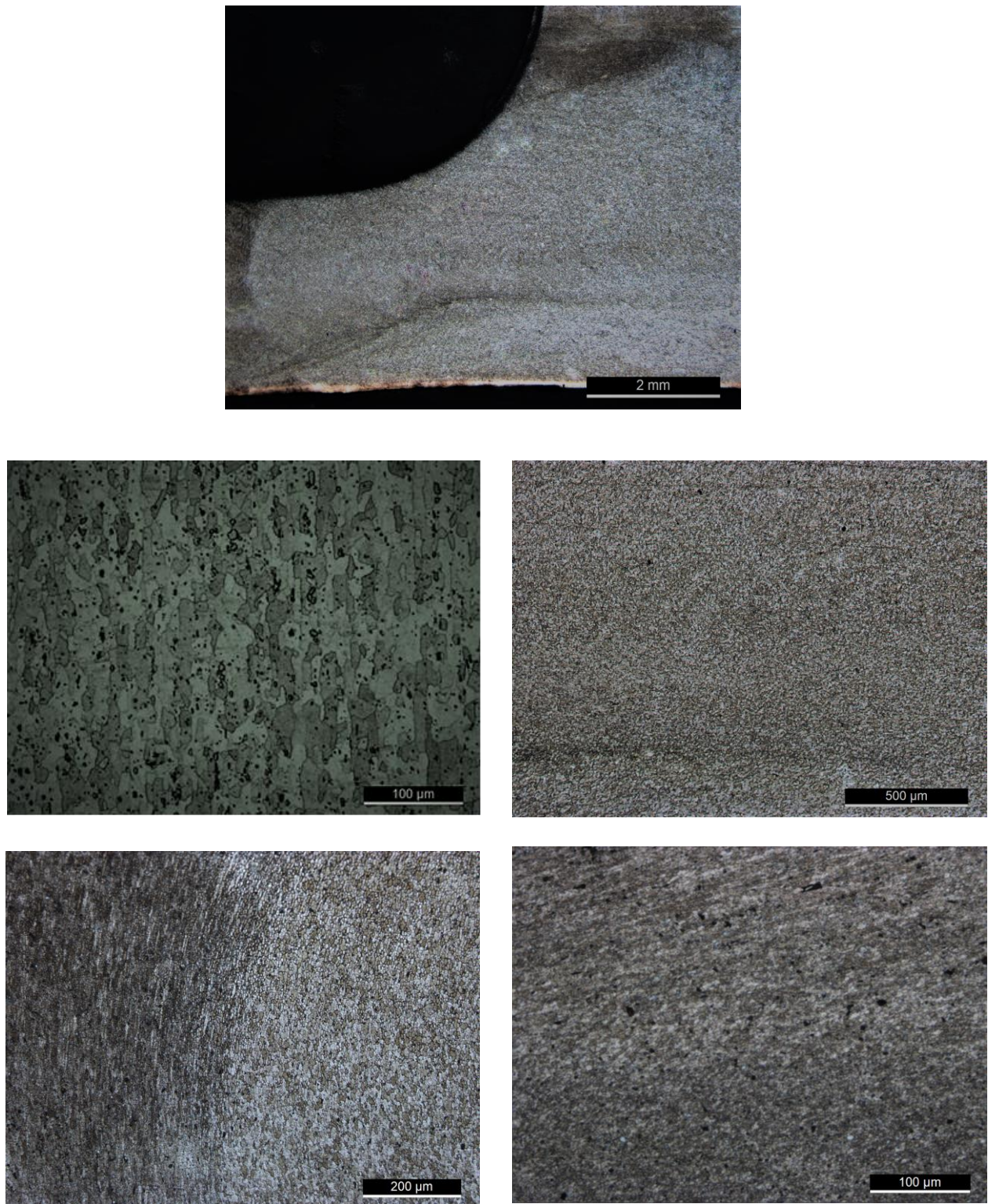


Figura D.6 – Microestrutura do coupon PP3