



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Ligação por *Friction Stir Welding* de Chapas Finas em Junta Sobreposta

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

Autor

Francisco Miguel Neto Caldeira

Orientadores

Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues

Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro

Júri

Presidente	Professor Doutor Luís Filipe Martins Menezes Professor Catedrático da Universidade de Coimbra Professor Doutor Luís Alberto Proença Simões da Silva Professor Catedrático da Universidade de Coimbra Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro
Vogais	Professor Associado c/Agreg. da Universidade de Coimbra Professor Doutor Dulce Maria Esteves Rodrigues Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Mestre Carlos Miguel Almeida Leitão Aluno de Doutoramento da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



Cool Haven

Coimbra, Setembro, 2013

Os nossos conhecimentos são a reunião do raciocínio e experiências de numerosas mentes.

Ralph Waldo Emerson

Os trabalhos escolares são provas para o carácter, não para a inteligência. Quer se trate de ortografia, de poesia ou de cálculo, está sempre em causa aprender a querer.

Alain, em *Les Idées et les Âges*, 1927.

Aos meus pais.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

À Senhora Professora Doutora Dulce Rodrigues, responsável pela coordenação deste trabalho, fico grato pelo apoio científico, pela forma exigente e crítica como coordenou este estudo, pela disponibilidade e criatividade, sendo uma mais-valia para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Senhor Professor Doutor Altino Loureiro pela disponibilidade e apoio, pela partilha de conhecimentos e boa disposição.

Ao Mestre Carlos Leitão pelo apoio nas tarefas laboratoriais e na partilha de conhecimento que possibilitaram a aquisição de melhores resultados e conhecimentos, pela paciência e boa disposição.

Aos Mestres Filipe Fernandes e Ivan Galvão pela amizade e apoio em algumas situações.

Aos meus pais, Paulo e Luísa, pelo esforço, dedicação e apoio que me tem dado para que eu tenha a melhor educação e formação possível, sem eles isto tudo não seria possível. Por tudo isto, o meu MUITO OBRIGADO!

À minha irmã e cunhado, Ana e Ricardo, pelo apoio e incentivo ao longo destes anos.

À minha família pela dedicação, apoio e incentivo que me tem dado ao longo destes anos de trabalho. Um obrigado especial à Tia Gracita pela ajuda e disponibilidade na realização deste trabalho.

Aos meus colegas, pela boa disposição e ânimo demonstrados ao longo da realização deste trabalho.

A todos o meu sincero Obrigado.

Resumo

Nesta tese analisa-se a aplicação da tecnologia de soldadura por *Friction Stir Welding (FSW)* na ligação de chapas finas em junta sobreposta. Com este objetivo são estudadas soldaduras efetuadas em duas ligas de alumínio, uma tratável termicamente (6082-T6) e uma não-tratável termicamente (5754-H22), selecionadas por apresentarem mecanismos de endurecimento diferentes e, por isso, comportamentos mecânicos distintos a temperaturas elevadas, conduzindo a propriedades dissemelhantes em termos de soldabilidade.

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa da soldabilidade das duas ligas foram realizadas soldaduras numa gama alargada de condições de fabrico, obtidas variando quer a geometria e dimensões da ferramenta de soldadura, quer os parâmetros de soldadura, nomeadamente, as velocidades de rotação e de avanço, o ângulo de ataque e a penetração da ferramenta. Todas as soldaduras foram analisadas com vista a caracterizar a evolução da morfologia, microestrutura e resistência mecânica em função dos parâmetros de processo.

Esta análise permitiu concluir que a influência da penetração da ferramenta na qualidade superficial das soldaduras é notória, apresentando tendências diferentes para cada uma das ligas. Enquanto para a liga tratável termicamente se observou que, com a ferramenta de base cônica lisa, a penetração não deveria ultrapassar em muito a espessura da chapa superior, para a liga não-tratável termicamente os melhores resultados foram obtidos para penetrações da ferramenta próximas da espessura total de ambas as chapas. A análise metalográfica permitiu ainda revelar a presença de defeitos internos, do tipo *Hooking* e *Kissing-Bond*, para a todas as soldaduras analisadas, independentemente da liga em estudo.

A liga 5754-H22 apresentou em qualquer caso soldabilidade superior à da liga 6082-T6, pois permitiu obter soldaduras sem defeitos macroscópicos para uma gama mais alargada de condições de soldadura. Como esperado, atendendo à natureza das ligas, observaram-se também diferenças importantes entre os materiais base em termos da resistência mecânica final das ligações, a qual se verificou ser fortemente condicionada quer pela heterogeneidade de propriedades mecânicas nas soldaduras, relativamente ao metal

base, quer pela presença de defeitos do tipo *Hooking* em ambas as extremidades dos cordões de soldadura.

Palavras-chave: *Friction Stir Welding*, Junta Sobreposta, Ligas de Alumínio 6082-T6 e 5754-H22, Caracterização mecânica e microestrutural

Abstract

This thesis analyses the application of the technology of Friction Stir Welding (FSW) in connecting thin sheets in lap joint. Welds made in two aluminium alloys, a heat-treatable one (6082 - T6) and a non- heat treatable (5754 - H22) have been studied. These have been selected because they have different hardening mechanisms and therefore different mechanical behaviour at high temperatures, leading to dissimilar properties in terms of weldability.

In order to perform a comparative analysis of the weldability of the two alloys, welds in a wide range of manufacture conditions were made, obtained varying both the geometry and dimensions of the welding tool, and the welding parameters, namely the rotational and advancing speeds, the tilt angle and the penetration of the tool. All welds were analysed in order to characterize the evolution of the morphology, microstructure and mechanical strength according to the process parameters.

This analysis concluded that the influence of tool penetration in the surface quality of the welds is notorious, showing different trends for each of the alloys. As for the heat treatable alloy it was noted that with the smooth conical base tool, the penetration should not exceed much the thickness of the upper plate; for the non-heat treatable alloy the best results were obtained from tool penetration close to the total thickness of both plates. The metallographic analysis also allowed to reveal the presence of internal defects, such as Hooking and Kissing-bond, for all analysed welding, regardless of the alloy being studied.

The alloy 5754 - H22 presented in both cases higher weldability than the alloy 6082 -T6, since it was possible to obtain welds without macroscopic defects for a wider range of welding conditions . As expected, given the nature of the alloys, it was also observed significant differences between the base materials in terms of the final mechanical strength of the connections, which was found to be strongly influenced both by the heterogeneity of the mechanical properties in the weld according to the base metal, and the presence of defects of Hooking type in both ends of the weld beads.

Keywords Friction Stir Welding, Lap Joint, Aluminium Alloys 6082-T6 and 5754-H22, mechanical and microstructural characterization

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Simbologia e Siglas	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. Estado da arte.....	3
2.1. Soldadura por <i>Friction Stir Welding</i>	3
2.1.1. Caracterização do processo	3
2.1.2. Considerações teóricas sobre as ferramentas.....	5
2.1.3. Parâmetros de Soldadura	6
2.1.4. Caracterização microestrutural das soldaduras.....	13
2.1.5. Principais defeitos nas soldaduras por <i>FSW</i>	14
2.1.6. Considerações sobre ligação por <i>FSW</i> em junta sobreposta.....	17
2.1.7. Material de Base	19
3. Procedimento Experimental	21
3.1. Material de Base	21
3.2. Soldaduras.....	22
3.2.1. Ferramentas utilizadas	23
3.2.2. Parâmetros de soldadura.....	23
3.3. Análise Metalográfica.....	24
3.4. Caracterização Mecânica	26
3.4.1. Teste de Dureza	26
3.4.2. Ensaios de Tração.....	26
4. Apresentação e análise de resultados.....	29
4.1. Análise Metalográfica	29
4.1.1. Caracterização Macroscópica das soldaduras.....	29
4.1.2. Análise microscópica das soldaduras	32
4.2. Caracterização Mecânica das soldaduras.....	39
4.2.1. Medições de Dureza	39
4.2.2. Ensaios de Tração.....	42
5. Conclusão	51
6. Perspetivas de trabalho futuro	53
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática das diferentes fases do processo [2].....	4
Figura 2 - Ferramenta representativa para soldadura por FSW.....	5
Figura 3 - Parâmetros de Soldadura [6].....	7
Figura 4 – Fotografia e representação esquemática de uma ferramenta de base Côncava (adaptação do original [17])	8
Figura 5 - Representação esquemática de uma ferramenta com base estriada.....	8
Figura 6 - Representação esquemático do ângulo de ataque.....	12
Figura 7 - Representação das diversas configurações de junta para o processo FSW (original [5]); Soldadura topo-a-topo (a), (b) e (c); soldadura sobreposta (d), (e) e (f); soldadura canto (g).....	13
Figura 8 - Representação esquemática da microestrutura de uma soldadura por FSW (adaptação de [9]).....	13
Figura 9 - Imagem da secção transversal de soldaduras com o defeito de <i>Hooking</i> [10] ...	15
Figura 10 - Imagem do defeito <i>Kissing-bond</i> [10]	16
Figura 11 - Representação de uma soldadura com <i>Flash</i>	17
Figura 12 - Micrografias dos MB: (a) - Liga 6082-T6; (b) - Liga 5754-H22	22
Figura 13 - Representação de algumas das ferramentas utilizadas neste estudo.....	23
Figura 14 - Esquema das linhas de medição de dureza; (1) - Linha chapa superior; (2) - Linha de Interface; (3) - Linha chapa inferior.....	26
Figura 15- Esquema das dimensões dos provetes utilizados; (a) - Provetes de MB; (b) - Provetes das soldaduras na liga 6082-T6; (c) - Provetes das soldaduras na liga 5754-H22.....	27
Figura 16 - Equipamento de extensometria ótica (Gom Aramis 5M) [8]	27
Figura 17 - Provete para ensaio de tração após tintura.....	28
Figura 18 - Gráfico de defeitos macroscópicos das soldaduras na liga 6082-T6 com a ferramenta "L1"; círculos – soldaduras com defeito; quadrados – soldaduras sem defeito.....	30
Figura 19 - Gráfico de defeitos macroscópicos das soldaduras na liga 6082-T6 com a ferramenta "E1"; círculos – soldaduras com defeito; quadrados – soldaduras sem defeito.....	30
Figura 20 - Gráfico de defeitos macroscópicos das soldaduras na liga 5754-H22 com a ferramenta "L2"; círculos – soldaduras com defeito; quadrados – soldaduras sem defeito.....	31

Figura 21 - Gráfico de defeitos macroscópicos das soldaduras da liga 5754-H22 com a ferramenta "E1"; círculos – soldaduras com defeito; quadrados – soldaduras sem defeito.....	32
Figura 22- Secções transversais das soldaduras na liga 6082-T6 com a ferramenta “L1”: (a) - S.6_L1_5; (b) - S.6_L1_6; (c) - detalhe das zonas 1 e 2 da soldadura S.6_L1_6	34
Figura 23 - Secções transversais das soldaduras na liga 6082-T6 com a ferramenta “E1”: (a) - S.6_E1_11; (b) - S.6_E1_12.....	35
Figura 24 - Secção transversal de uma soldadura na liga 6082-T6: (a) - S.6_E1_19; (b) – detalhe das zonas 1 e 2	36
Figura 25 - Secções transversais das soldaduras na liga 5754-H22 com a ferramenta L2: (a) – S.5_L1_14; (b) – S.5_L2_16.....	37
Figura 26 - Detalhes do <i>Nugget</i> das soldaduras da Figura 25	38
Figura 27 - Secções transversais das soldaduras na liga 5754-H22 com a ferramenta E1: (a) - S.5_E1_18; (b) - S.5_E1_19	39
Figura 28 - Perfil de dureza das soldaduras realizadas na liga 6082-T6 com a ferramenta “L1”	40
Figura 29 - Perfil de durezas das soldaduras realizadas na liga 6082-T6 com a ferramenta “E2”	40
Figura 30 - Perfil de dureza das soldaduras realizadas na liga 5754-H22 com a ferramenta “L2”	41
Figura 31 - - Perfil de durezas das soldaduras realizadas na liga 5754-H22 com a ferramenta “E1”	42
Figura 32 - Gráfico Tensão-Deformação Convencional de soldaduras na liga 6082-T6 coma a ferramenta L1	43
Figura 33 - Diagrama da deformação obtida no extensómetro ótico: (a) - S.6_L1_6_TEST1; (b) - S.6_L1_5_TEST1	43
Figura 34 - Localização da Rutura dos provetes: (a) S.6_L1_6; (b) - S.6_L1_5	44
Figura 35 - Gráfico Tensão-Deformação Convencional de soldaduras na liga 6082-T6: (a) - Ensaio TEST1; (b) - Ensaio TEST2.....	45
Figura 36 - Localização da Rutura dos provetes: (a) S.6_E1_11; (b) S.6_E1_19.....	46
Figura 37 - Soldadura S.6_E1_11: (a) Gráfico Deformação Real – Tempo; (b) Diagrama Deformação	47
Figura 38 - Gráfico Tensão-Deformação Convencional de soldaduras na liga 5754-H22, para o ensaio TEST2	48
Figura 39 - Localização da Rutura dos provetes. (a) S.5_L2_14; (b) - S.5_L2_16	48
Figura 40 - Gráfico Tensão-Deformação Convencional de soldaduras na liga 5754-H22, para o ensaio TEST2	49
Figura 41 - Localização da Rutura dos provetes. (a) S.5_E1_18; (b) - S.5_E1_19	49

Figura 42 – Soldadura S.5_E1_19 (a) Gráfico Deformação Real-Tempo; (b) Diagramas Deformação 50

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Séries de ligas de alumínio	20
Tabela 2 - Composição química dos MB	21
Tabela 3 - Propriedades Mecânicas dos MB	22
Tabela 4 - Dimensões das ferramentas de base cônica.....	23
Tabela 5 - Parâmetros de soldadura utilizados	24
Tabela 6 - Composição química do reagente <i>Poulton</i>	25

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

w – Velocidade de Rotação [rpm]

v – Velocidade de Avanço [mm/min]

w/v – relação entre velocidade de rotação e a velocidade de avanço da ferramenta
[rpm/mm]

F – Força Axial [N]

Δp – Penetração do pino [mm]

α – Ângulo de Ataque

α_b – Ângulo de base

Siglas

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FSW – Friction Stir Welding

LR – Lado de Recuo

LA – Lado de Avanço

ZTMA – Zona Termo Mecanicamente Afetada

ZTA – Zona Termicamente Afetada

MB – Material Base

QREN – Quadro de Referência Estratégico Nacional

1. INTRODUÇÃO

Tal como o título da tese indica, o principal objetivo deste trabalho residiu no estudo da aplicação da tecnologia de soldadura por *Friction Stir Welding (FSW)* na ligação de chapas finas em junta sobreposta. Esta tecnologia de soldadura em estado sólido utiliza a mistura mecânica dos materiais a unir, sob intensa deformação plástica, para a produção da ligação. A soldadura é realizada utilizando uma ferramenta rotativa, constituída por uma base com um pino concêntrico, que promove o calor necessário à ligação e a mistura dos materiais na interface a unir. Soldaduras lineares, e não-lineares, podem ser produzidas deslocando a ferramenta em rotação ao longo da trajetória de ligação planeada.

A aplicação desta tecnologia no mundo industrial, apesar de ainda incipiente, tem vindo a crescer, devido à alternativa que esta representa face aos métodos tradicionais de soldadura, quer por fusão, quer em estado sólido. Com efeito, face aos processos de soldadura por fusão, o processo *FSW* apresenta várias vantagens, de entre as quais se pode destacar a redução da quantidade de calor adicionado aos materiais durante a soldadura, o que implica uma diminuição acentuada da área abrangida por alterações microestruturais e uma menor distorção dos elementos a unir. Face aos demais processos de soldadura em estado sólido, a tecnologia *FSW* apresenta a vantagem de permitir uma maior versatilidade em termos da geometria e extensão da ligação. A ausência de emissões de radiações e fumos, assim como o baixo consumo de energia, permitem também catalogar este processo como ecológico. Contudo, apesar das vantagens referidas, a aplicação industrial do processo é ainda muito limitada devido à ausência de conhecimento, e informação sistematizada, sobre a relação exata entre as geometrias de ferramenta, os parâmetros de processo e a qualidade da ligação, para uma gama alargada de materiais e configurações de junta.

O tema desta tese, que resulta de uma parceria com a empresa CoolHaven, no âmbito do projeto *QREN EcoSteel Painel – Habitações Modulares e Eco Sustentáveis*, insere-se neste contexto, tendo como objetivo a aplicação da tecnologia *Friction Stir Welding* na ligação de chapas finas em junta sobreposta. Com efeito, até à data, a aplicação do processo na vertente de junta sobreposta tem-se centrado, principalmente, na ligação de materiais dissimilares, como o alumínio-cobre, alumínio-aço, magnésio – aço e titânio – aço, ou ainda, diferentes ligas de alumínio (2xxx-7xxx, 2xxx-6xxx e 6xxx-5xxx), e na ligação

similar de ligas de alumínio das séries 2xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx, e ainda, de materiais como o Titânio, Magnésio e o Aço. Apesar da gama extremamente limitada de estudos, esta vertente do processo mostrou já ser uma forte alternativa aos processos tradicionais de ligação em junta sobreposta, como as ligações rebitadas e a soldadura por pontos, começando a ser aplicada na indústria automóvel para a construção de chassis, etc.

O presente estudo, realizado entre Fevereiro e Setembro de 2013, no âmbito da Dissertação de Mestrado, teve como missão a análise da influência dos parâmetros e procedimentos de soldadura na ligação similar, em junta sobreposta, de chapas finas das ligas de alumínio 6082-T6 e 5754-H22. Estas ligas, uma tratável termicamente, e a outra não-tratável termicamente, apresentam diferenças de soldabilidade consideráveis. Deste modo, com esta seleção de materiais base, foi possível realizar uma análise económica (devido à possibilidade de utilização de ferramentas de soldadura fabricadas em aço de ferramenta convencional) sobre a relação entre os parâmetros de processo, a qualidade das soldaduras e as propriedades mecânicas dos metais base, o que permitirá extrapolar os resultados deste estudo para uma gama mais vasta de materiais. É ainda de realçar que a análise da soldabilidade de chapas finas, em configuração de junta sobreposta, representa em si uma abordagem inovadora no campo da ligação por *FSW*.

O estudo de soldabilidade efetuado compreendeu a análise morfológica e microestrutural de todas soldaduras obtidas, assim como a sua caracterização mecânica com recurso a ensaios de dureza e tração. As soldaduras foram produzidas na empresa Sucorema e toda a análise laboratorial, necessária à caracterização das soldaduras, foi realizada no Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra (CEMUC).

2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo realiza-se uma breve abordagem teórica dos conceitos importantes para uma melhor perceção da problemática em estudo.

2.1. Soldadura por *Friction Stir Welding*

A tecnologia de soldadura *FSW*, que é um processo de ligação de materiais em estado sólido, foi desenvolvida em 1991 por *Wayne Thomas* no *Welding Institute*. Esta técnica veio suprimir alguns dos problemas vulgarmente associados às tecnologias de soldadura por fusão, permitindo a realização de ligações em materiais considerados difíceis de soldar, como o Alumínio, assim como a realização de ligações entre materiais dissimilares, como Alumínio-Cobre, Alumínio-Aço, etc. [1].

A tecnologia *FSW* tornou-se, rapidamente, um processo de soldadura atrativo para diversas indústrias, pois necessita de menos energia e é mais ecológico que as tecnologias de soldadura convencionais. Não necessita, ainda, de mão-de-obra qualificada, originando menores custos [1].

O processo é já utilizado em diversas aplicações industriais, destacando-se a construção naval, na produção de painéis para pavimentos, mastros e lanças; a indústria automóvel, na produção de jantes e chassis, e ainda as indústria ferroviária e aeroespacial [1].

2.1.1. Caracterização do processo

Neste item é efetuada uma breve abordagem aos componentes utilizados no processo, mais precisamente, será caracterizada a ferramenta de soldadura, assim como o princípio geral de funcionamento do processo.

Na Figura 1 (adaptação da animação [2]) faz-se uma representação esquemática das várias etapas do processo de ligação topo-a-topo de chapas metálicas. Como a operação da tecnologia implica movimentos de rotação e translação, torna-se necessário a fixação rígida das partes a unir, como se mostra na Figura 1-1. Para tal são utilizados grampos e uma placa de apoio, que pode ser suprimida em algumas variantes do processo.

O processo inicia-se com o posicionamento da ferramenta, animada com movimento de rotação, na zona de ligação (Figura 1-2). Após o posicionamento, esta é pressionada contra as peças a unir, por uma força de compressão axial (Figura 1-3). Devido à força de compressão, o pino, existente na extremidade da ferramenta, penetra na zona de junção das peças, levando a base da ferramenta a entrar em contacto com a superfície das peças a unir (Figura 1-4). Nesta fase, o atrito gerado entre a ferramenta e a peça origina calor suficiente para o aquecimento e amaciamento dos materiais a soldar. O material base (MB) aquecido é então sujeito a intensa deformação plástica sob ação da ferramenta, dando origem ao escoamento dos metais a ligar em torno do seu eixo e à sua “mistura”, em estado sólido. Esta “mistura” é depositada, posteriormente, na parte de trás da ferramenta, onde surge a soldadura. Para obtenção de uma ligação contínua, a ferramenta em rotação desloca-se, em simultâneo, ao longo da junta (Figura 1-5). No final da soldadura, procede-se à remoção da ferramenta (Figura 1-6) [3].

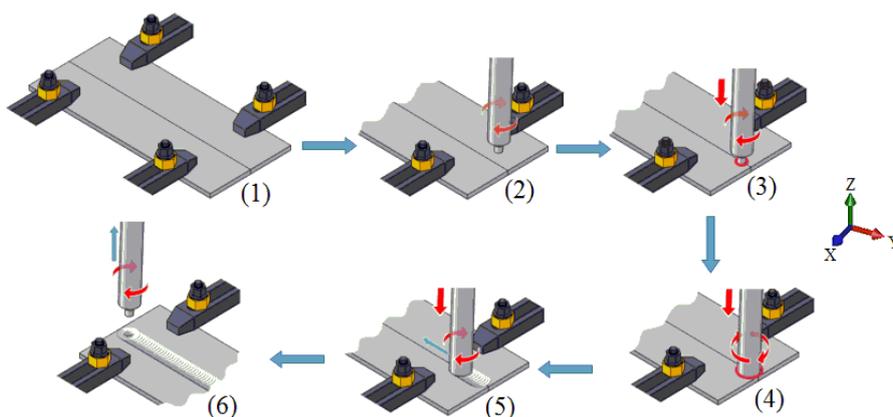


Figura 1 - Representação esquemática das diferentes fases do processo [2]

As soldaduras podem ser realizadas em duas condições de controlo distintas: em controlo de força ou em controlo de posição da ferramenta. Em controlo de força, a força axial exercida na ferramenta ao longo da soldadura é limitada a um máximo, o que é vantajoso quando existem irregularidades na superfície das peças a unir. Em controlo de posição, a posição da ferramenta, segundo o eixo z, é estabelecida no início da soldadura, relativamente a um referencial, permanecendo nessa posição até ao final da soldadura, o que é vantajoso em soldadura de chapas finas. Com efeito, nesta situação qualquer excesso de amaciamento do material poderá levar a afundamentos exagerados da ferramenta quando em controlo de força.

2.1.2. Considerações teóricas sobre as ferramentas

Na tecnologia *FSW* a ferramenta é o componente principal e mais importante de todo o processo, uma vez que é responsável pela produção de calor e pela deformação plástica dos materiais a unir. Sendo assim, ao longo da soldadura, as ferramentas são sujeitas a esforços mecânicos importantes e a temperaturas muito elevadas, levando a que os materiais usados na sua construção tenham de possuir propriedades específicas. Assim, os materiais das ferramentas têm que ter durezas superiores aos materiais a soldar, para não se desgastarem ao longo da soldadura, têm que apresentar elevada tenacidade, de modo a suportar choques e variações de carga, apresentar condutibilidade térmica elevada, de modo a dissiparem melhor o calor gerado durante a soldadura, e serem o mais inertes possível face ao material da soldadura [4].

As ferramentas para *FSW* apresentam diversas configurações, podendo-se identificar quatro zonas características: zona de aperto, corpo da ferramenta, base e pino. A Figura 2 mostra uma ferramenta de geometria característica onde podem ser visualizadas as diferentes zonas anteriormente descritas.

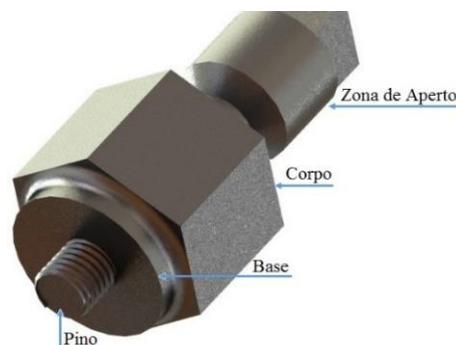


Figura 2 - Ferramenta representativa para soldadura por FSW

A zona de aperto e o corpo da ferramenta têm a função de transmitir o movimento de rotação, translação e força axial à base e ao pino. Desta forma, devem ter o maior diâmetro permitido pelo equipamento de soldadura de modo a maximizar a sua resistência. O corpo da ferramenta também tem a função de dissipar a parte do calor gerado durante o processo de soldadura que é transmitido à ferramenta, podendo, em alguns casos, apresentar alhetas para aumentar a área de dissipação.

A base e o pino, por seu lado, são os elementos funcionais por excelência da ferramenta, pois são aqueles que determinam a formação da soldadura.

A base da ferramenta é um dos elementos em contacto permanente com o material a soldar, tendo por funções a geração da maior parte do calor, durante a soldura, promover o fluxo de material à superfície das chapas, e finalmente, forjar o material na parte de trás da ferramenta impedindo que este seja expelido para fora da junta. Dependendo da aplicação em causa, esta parte da ferramenta pode apresentar diversas configurações, destacando-se as seguintes: configuração cónica, lisa, plana lisa, plana com estrias concêntricas ou plana estriada em espiral [4;5].

O pino da ferramenta é o outro elemento da ferramenta em contacto permanente com os materiais a soldar, tendo por função conduzir o fluxo de material no eixo da soldadura, de modo a obter uma mistura o mais uniforme possível em toda a espessura das chapas a unir. Sendo assim, o pino é a zona da ferramenta que está sujeita a maior desgaste e a maiores variações de carga durante o processo, tornando-se a zona com maiores probabilidades de rutura [4]. Atendendo à necessidade constante de substituição, este é normalmente concebido como um componente amovível da ferramenta para substituição regular.

De um modo geral, os pinos podem ser classificados de acordo com a sua geometria como: cilíndricos, cónicos ou facetados. Cada geometria pode apresentar configuração lisa ou roscada. A escolha do tipo de pino depende da configuração de junta (topo a topo ou sobreposta) e do tipo de material a soldar.

2.1.3. Parâmetros de Soldadura

Com vista a obter soldaduras isentas de defeitos e com características mecânicas, microestruturais e morfológicas satisfatórias, o processo de soldadura por *FSW* requiere uma cuidada relação dos parâmetros de soldadura. Podem-se, assim, destacar uma série de parâmetros operatórios do processo que influenciam diretamente a qualidade das soldaduras, como [3]:

- Geometria da base e pino da ferramenta;
- Velocidade de rotação (w);
- Velocidade de avanço ou translação (v);
- Força axial (F);
- Penetração do pino (Δp);
- Ângulo de ataque (α);

- Configuração da junta.

Na Figura 3, (adaptação do original [6]) onde se mostra um esquema da aplicação do processo na ligação de chapas em junta sobreposta, são ainda indicados alguns dos parâmetros de soldadura listados acima.

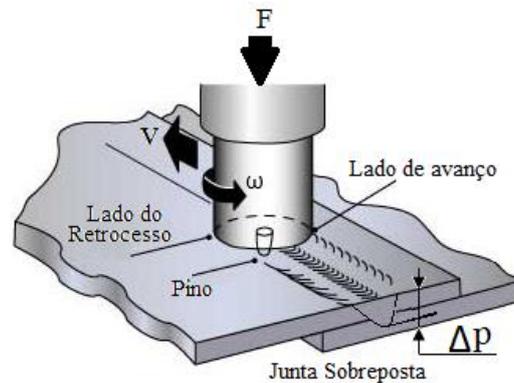


Figura 3 - Parâmetros de Soldadura [6]

Nos tópicos que se seguem realiza-se uma breve abordagem à influência de cada parâmetro mencionado anteriormente nos mecanismos termomecânicos subjacentes ao processo de ligação.

2.1.3.1. Parâmetros da ferramenta

As características geométricas da base e do pino são um dos parâmetros do processo que influencia, de forma determinante, as características finais das soldaduras. Como já referido, cada um destes componentes da ferramenta pode apresentar diferentes dimensões e configurações geométricas.

No que diz respeito à base da ferramenta destaca-se a base côncava lisa, como se mostra na Figura 4 – (a), que é caracterizada pela existência de uma pequena inclinação entre a extremidade da base e o pino, quantificada pelo ângulo de base (α_b), como se mostra na Figura 4- (b). Esta configuração permite um confinamento satisfatório do fluxo de material aquecido junto ao pino e promove uma mistura uniforme dos materiais a soldar, ao longo da soldadura, quando comparada com configurações de base plana ($\alpha_b=0$). Tem ainda a vantagem de ser uma geometria relativamente fácil de maquinar, o que diminui os custos de produção e torna apelativa a sua utilização em produção industrial. No entanto, necessita normalmente de operar com uma certa inclinação relativamente à direção de avanço linear, designada como ângulo de ataque (α), como se ilustra na Figura 4- (c). Este ângulo permite

um aumento gradual da pressão aplicada pela base sobre o fluxo de material, na parte de trás da ferramenta o que facilita o fecho das faces a unir e garante o bom acabamento superficial da soldadura [4;5;7;8].

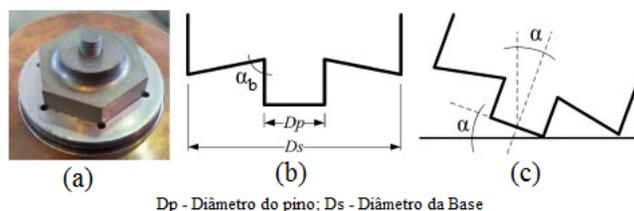


Figura 4 – Fotografia e representação esquemática de uma ferramenta de base Côncava (adaptação do original [17])

As ferramentas de base convexa, caracterizadas pela inclinação da base ser contrária à base côncava, não são muito utilizadas, uma vez que tendem a afastar o fluxo de material aquecido do pino, levando a soldaduras defeituosas. No entanto, com a adição de estrias a esta configuração, consegue-se orientar o fluxo de material aquecido para a proximidade do pino, tendo a vantagem de permitir uma maior flexibilidade na área de contacto entre a base e o material a soldar, uma vez que a extremidade da base não necessita de entrar em contacto com o material [4;7;8].

As bases estriadas de utilização mais comum são caracterizadas por terem canais concêntricos, ou em forma de espiral, orientados da extremidade da base para o pino, como se ilustra na Figura 5. Estes canais permitem orientar o fluxo de material aquecido desde a extremidade da base até ao eixo da ferramenta, aumentando deste modo a área de contacto entre a base e o material, o que promove um amaciamento e mistura mais eficientes dos materiais a unir e permite eliminar diversos defeitos característicos destas soldaduras. Esta ferramenta tem ainda a vantagem de não necessitar de ângulo de ataque, o que confere maior versatilidade ao processo e permite alterar a direção de soldadura no plano da chapa [4;7;8].

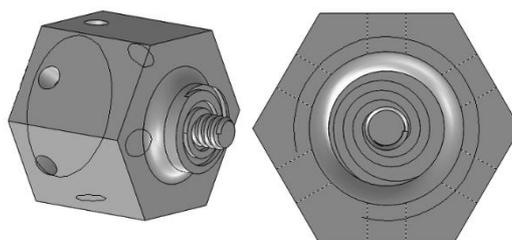


Figura 5 - Representação esquemática de uma ferramenta com base estriada

O pino, como já referido, é dos elementos de maior influência nas soldaduras por *FSW*, sendo responsável pela maior parte da extrusão e mistura dos materiais a soldar. O fluxo de material durante a soldadura está diretamente ligado à sua dimensão e configuração, uma vez que influencia a relação entre o volume de material extrudido pelo pino numa rotação e o seu volume, definida pela razão Volume Dinâmico/Volume Estático. Esta relação é de extrema importância para se conseguir um fluxo de material adequado durante a soldadura.

Os pinos cônicos permitem realizar a soldadura de componentes maiores espessuras e com velocidades superiores, uma vez que, devido à sua configuração, estão sujeitos a menores esforços transversais e concentram a carga máxima na base do cone onde são mais resistentes. Estes pinos aumentam também os efeitos de forjagem, originando soldaduras de maior qualidade relativamente aos pinos cilíndricos. A extremidade do pino plana permite deformar mais o material, uma vez que induz maiores velocidades superficiais associadas a atritos mais elevados, relativamente ao pino de extremidade convexa. Contudo, os pinos de extremidade convexa apresentam menor desgaste conferindo maior qualidade à raiz das soldaduras.

A introdução de rosca nos pinos permitiu aumentar a extrusão de material em torno da ferramenta, o seu transporte vertical, assim como o aumento da área de contacto entre material e ferramenta. Isto permite melhorar o efeito de amaciamento, levando a soldaduras com misturas mais homogêneas e de melhor qualidade. Por fim, o facetamento dos pinos permitiu uma diminuição das forças lineares de avanço sobre a ferramenta e adicionou uma componente de mistura extra ao fluxo de material, permitindo uma melhor eliminação das camadas de óxidos na interface a ligar [7;9].

2.1.3.2. Parâmetros de processamento

2.1.3.2.1. Velocidade de Rotação (w)

A principal fonte de calor durante a soldadura é proveniente da fricção entre a ferramenta e o material a soldar. Essa fricção é provocada pela rotação da ferramenta, ao longo de toda a soldadura, a qual é definida pelo número de rotações que a ferramenta dá sobre o seu eixo por unidade de tempo e é normalmente medida em rotações por minuto (rpm). Assim, velocidades de rotação mais elevadas originam temperaturas mais altas, uma vez que a energia libertada pelo atrito gerado entre a ferramenta e o material aumenta. Do

mesmo modo, velocidades de rotação baixas conduzem a temperaturas mais baixas, pois a energia libertada por atrito entre a ferramenta e o material é menor, promovendo um menor aquecimento do material [3].

2.1.3.2.2. Velocidade de avanço (v)

A velocidade de avanço da ferramenta, está associada ao movimento responsável pela produção de soldaduras contínuas, uma vez que leva a que a ferramenta percorra a junta a soldar. Esta velocidade é definida pela distância percorrida pela ferramenta por unidade de tempo, normalmente medida em milímetros por minuto (mm/min). Este movimento está ligado também ao escoamento de material que se realiza da parte da frente para a parte de trás da ferramenta, pelo que, para maiores velocidades de avanço da ferramenta se obtêm índices de produtividade superiores. Contudo, o aumento da velocidade de avanço reduz a quantidade de calor adicionado [3].

2.1.3.2.3. Relação w/v

Atendendo ao exposto nos itens anteriores, a relação entre a velocidade de rotação e a velocidade de avanço da ferramenta (w/v) é normalmente utilizada para aferir a geração de calor durante o processo de soldadura, sendo utilizada para caracterizar as condições de soldadura, como quentes ou frias. A adição de calor durante o processo de soldadura está na origem da maioria dos fenómenos metalúrgicos que determina a qualidade final da ligação. As transformações metalúrgicas e o seu impacto na resistência final das soldaduras, estão inteiramente ligadas ao calor adicionado durante o processo e à natureza do MB. Contudo, para qualquer material ou configuração de junta a extensão da zona afetada pelo calor está diretamente ligada à quantidade de calor gerado no processo. Então, condições de soldadura em que são utilizadas velocidades de rotação elevadas e velocidades de avanço baixas, às quais correspondem relações w/v elevadas, apresentam maiores quantidades de calor adicionado por unidade de distância. As soldaduras assim obtidas são qualificadas como soldaduras quentes, caracterizadas por possuírem zonas afetadas pelo calor mais extensas. Soldaduras realizadas com velocidades de rotação baixas e velocidade de avanço elevadas, às quais correspondem relações w/v reduzidas, apresentam menor quantidade de calor adicionado por unidade de comprimento de soldadura. Estas soldaduras apresentam zonas afetadas pelo calor mais reduzidas.

2.1.3.2.4. Força Axial (F)

A força axial exercida na ferramenta, segundo o seu eixo vertical, é responsável por manter a base da ferramenta em contacto permanente com o material a soldar e pela penetração do pino na interface a soldar. A força axial condiciona também a magnitude da pressão exercida pela ferramenta, ao longo da soldadura, contribuindo para a consolidação mais ou menos eficiente da soldadura. Com efeito, pressões elevadas podem conduzir ao sobreaquecimento do material a soldar originando afundamentos exagerados da ferramenta e, conseqüentemente, a reduções de espessura nocivas para a resistência da soldadura, assim como a um aumento da carga na ferramenta, o que contribui para diminuir a sua vida útil. Pressões demasiado baixas originam pouco atrito entre a ferramenta e o material a soldar conduzindo à produção de soldaduras com descontinuidades graves [3].

2.1.3.2.5. Penetração do pino (Δp)

A penetração do pino no material a soldar é um fator importante na soldadura por *FSW*, uma vez que penetrações insuficientes levam a que a base da ferramenta não entre em contacto com o material, gerando pouco calor, e amaciamento inadequados dos materiais a soldar, originando soldaduras com defeitos superficiais, como sulcos profundos à superfície, e defeitos internos, como ausências de ligação entre as partes a unir. Este problema é mais notório em soldaduras em junta sobreposta, para as quais a profundidade de penetração do pino na chapa inferior é determinante para a qualidade da soldadura. Por outro lado, penetrações excessivas levam a que a base da ferramenta afunde demasiado nos materiais a unir, fazendo com que o material aquecido seja expelido para fora da junta, originando rebarbas e reduções de espessura efetiva nas peças e, conseqüentemente, perda quer de resistência mecânica, quer de qualidade superficial das soldaduras [5;7].

2.1.3.2.6. Ângulo de ataque (α)

O ângulo de ataque é definido entre o eixo vertical da ferramenta e a normal à superfície das peças a unir, como mostra a Figura 6. Esta inclinação permite redirecionar mais eficientemente o fluxo de material da parte da frente para parte de trás do pino, assim como aumentar a pressão exercida pela base sobre o material depositado na parte posterior do pino, promovendo um correto fecho da junta e bons acabamentos superficiais das

soldaduras. Normalmente, este ângulo é utilizado para soldaduras realizadas com ferramenta cônica.

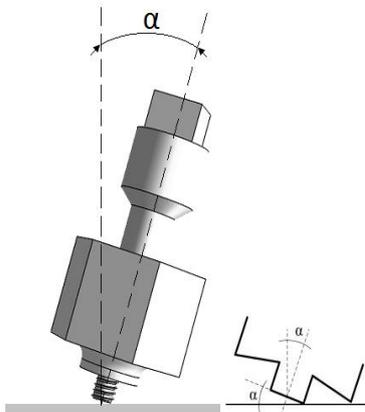


Figura 6 - Representação esquemático do ângulo de ataque

2.1.3.2.7. Configuração da junta

De acordo com a literatura, o processo de soldadura por *FSW* permite unir materiais em configurações de junta variadas, como se mostra na Figura 7. Contudo, a maioria das aplicações do processo, até à data, contemplaram a ligação de materiais em juntas de topo e sobrepostas.

A ligação de materiais em junta de topo é caracterizada pela união de duas chapas de igual espessura, de materiais similares ou dissimilares, fixas a uma base, deslocando-se a ferramenta pela interface das duas chapas, que é paralela ao eixo da ferramenta. A ligação de materiais em junta sobreposta é caracterizada pela colocação de uma chapa sobre a outra, sendo ambas fixas a uma base. O pino da ferramenta atravessa na totalidade a chapa superior, penetrando parcialmente na chapa inferior [5;7]. Neste tipo de junta, a base da ferramenta só entra em contacto com a superfície da chapa superior, estando esta sujeita a maiores temperaturas, quando comparada com a chapa inferior, onde apenas o pino é responsável pela adição de calor e deformação. Este tipo de junta tem sido utilizado na indústria automóvel, onde o processo de soldadura por *FSW* se estabeleceu como uma alternativa a outros processos de ligação de materiais, em junta sobreposta, como a soldadura por pontos e ligações rebitadas, apresentando em algumas solicitações resistências superiores [10;11].

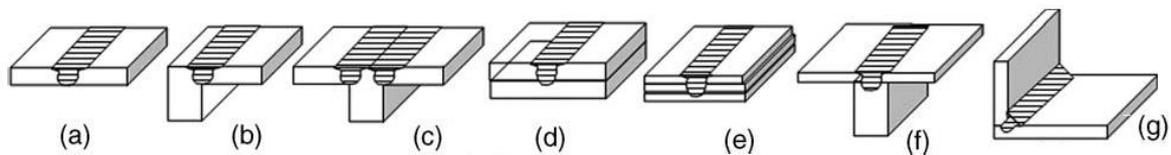


Figura 7 - Representação das diversas configurações de junta para o processo FSW (original [5]); Soldadura topo-a-topo (a), (b) e (c); soldadura sobreposta (d), (e) e (f); soldadura canto (g).

2.1.4. Caracterização microestrutural das soldaduras

O processo *FSW*, sendo um método de ligação no estado sólido, em que as temperaturas geradas são inferiores à temperatura de fusão dos materiais a unir, origina soldaduras com composição química semelhante à do MB, ao contrário do que ocorre para a generalidade dos processos de soldadura por fusão. Este processo provoca, no entanto, fortes alterações na microestrutura do MB na zona de ligação, devido ao aquecimento e deformações plásticas intensas sofridas durante a ligação. Para uma grande variedade de materiais, as alterações metalúrgicas induzidas pelo processo conferem excelentes características mecânicas à ligação final [3].

Em resultado dos fenómenos térmicos induzidos pelo processo de ligação, nas soldaduras por *FSW* é possível distinguir quatro zonas diferentes, ilustradas na Figura 8:

1. Nugget;
2. Zona termo-mecanicamente afectada (ZTMA);
3. Zona termicamente afetada (ZTA).
4. Material Base (MB).

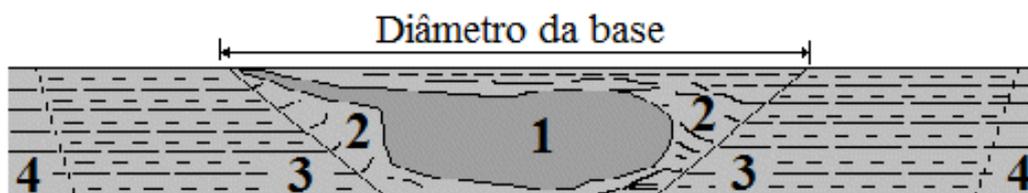


Figura 8 - Representação esquemática da microestrutura de uma soldadura por FSW (adaptação de [9])

Como mostra a Figura 8, o MB é todo o material da peça que não sofreu qualquer alteração de propriedades mecânicas e microestruturais após a soldadura.

O *Nugget* situa-se na zona central da soldadura, apresentando, normalmente, uma configuração de anéis concêntricos, que evidencia claramente a mistura e escoamento

dos materiais a unir em torno do pino, durante o processo de soldadura. Os anéis resultam da deposição de material em camadas, na parte de trás da ferramenta, sob o efeito sobreposto da velocidade de rotação e de avanço linear da ferramenta. A microestrutura presente nesta zona depende naturalmente das características do MB mas, devido aos fenómenos de recristalização dinâmica que tomam lugar nesta zona da soldadura, o *Nugget* apresenta sempre uma estrutura de grão mais fina do que do MB, sendo facilmente distinguível em qualquer secção transversal das soldaduras.

A Zona Termo Mecanicamente afetada (ZTMA) onde se inclui o *Nugget*, é constituída pela porção de MB que sofre intensa deformação plástica durante o processo de soldadura, assim como temperaturas elevadas. Contudo, na zona adjacente ao *Nugget*, ao contrário do que ocorre neste, as temperaturas atingidas nesta zona não são suficientes para promover a recristalização dinâmica durante o processo de soldadura, pelo que esta zona apresenta uma estrutura com grãos claramente deformados na direção do escoamento do material. De realçar que esta zona não é discernível para todos os materiais e condições de soldadura.

A zona termicamente afetada (ZTA), como indica a designação, é a zona em que não ocorre deformação plástica mas, devido à condução de calor proveniente do *Nugget*, existe uma elevação de temperatura suficiente para promover alterações microestruturais no MB, o que em algumas ligas pode resultar em perda de resistência mecânica. Com efeito, para as ligas de alumínio tratáveis termicamente, esta zona sofre uma diminuição significativa de dureza relativamente ao MB, soldaduras com reduzida resistência mecânica.

2.1.5. Principais defeitos nas soldaduras por FSW

A escolha correta dos parâmetros de soldadura por *FSW* conduz à obtenção de soldaduras isentas quer de defeitos internos, quer de defeitos superficiais. Contudo, como para qualquer tecnologia de soldadura, as soldaduras por *FSW* poderão apresentar defeitos que podem comprometer em maior ou menor escala a resistência mecânica das ligações, pelo que a identificação e caracterização desses defeitos é essencial para garantir a aplicabilidade industrial do processo. Dos trabalhos publicados até à data foi possível identificar os seguintes tipos de defeitos internos como sendo os mais comuns em ligações por *FSW* de junta sobreposta: *Hooking* e *Kissing-Bond*. Relativamente a defeitos superficiais, destaca-se o *Flash* e *Top Sheet Thinnig*.

2.1.5.1. Hooking

Este tipo de defeito, característico em junta sobreposta, tem origem sobre a interface das chapas na distorção e deformação exercida pela ferramenta, podendo aparecer em qualquer dos lados da soldadura [12].

Devido à sua origem, este defeito é caracterizado por uma fenda que se inicia na interface das chapas e propaga-se, em forma de gancho, através da interface entre a ZTMA e o *Nugget*. Dependendo das características do fluxo do material gerado pela ferramenta, poder-se-á propagar na direção ascendente, para a superfície da chapa superior, como mostra a Figura 9 –(a), ou na direção descendente, para a raiz da soldadura, como mostra a Figura 9– (b) [11].

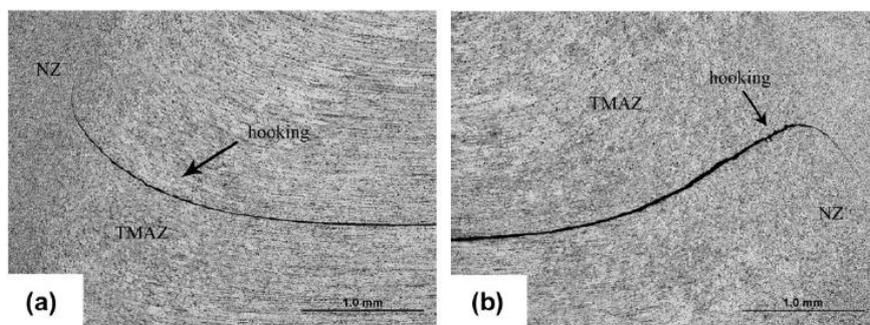


Figura 9 - Imagem da secção transversal de soldaduras com o defeito de *Hooking* [10]

Segundo a literatura, é dos defeitos mais críticos entre os presentes nas soldaduras por *FSW*, podendo diminuir consideravelmente a resistência mecânica das soldaduras, uma vez que não só reduz a espessura efetiva da ligação, como provoca concentração de tensões na extremidade da fenda, levando mais rapidamente as soldaduras à rutura, tanto em solicitações estáticas com dinâmicas [10].

2.1.5.2. Kissing-Bond

O defeito do tipo *Kissing-bond* resulta da deposição de uma camada de óxidos na interface entre a ZTMA e o *Nugget*, em resultado da dissolução e fragmentação insuficientes das camadas de óxido presentes na superfície dos materiais a unir. Em virtude disto, a formação deste defeito está diretamente ligado aos parâmetros de soldadura selecionados. Normalmente, as camadas de óxido formadas apresentam morfologias irregulares, como linha em *ZigZag*, como se mostra na Figura 10, padrões ondulados ou “lazy S”. Segundo Dubourg *et al* [12], este tipo de defeito é mais acentuado nas ligações em

junta sobreposta, do que nas ligações em junta topo-a-topo, devido ao facto de na ligação topo-a-topo a interface de ligação dos materiais estar paralela à ferramenta. Isto permite o contacto entre a superfície do material a unir e a base da ferramenta, levando à fragmentação por deformação plástica das camadas de óxidos. Já na ligação em junta sobreposta, a interface de ligação é perpendicular à ferramenta, o que reduz a deformação plástica na sua superfície, aumentando a probabilidade de a fragmentação e dissolução da camada de óxidos não ocorrer.

Atendendo à sua importância na resistência à fadiga das ligações, diversos autores dedicam-se ao estudo deste tipo de defeito. Segundo Cao *et al* [11], o defeito do tipo *Kissing-bond* surge mais facilmente em soldaduras realizadas com velocidades de avanço elevadas, devido à menor taxa de transferência de calor e, conseqüentemente, menor taxa de deformação plástica do material, provocando uma insuficiente fragmentação e dissolução da camada de óxidos. Para velocidades de avanço reduzidas, o calor adicionado ao material é maior, assim como o fluxo de material gerado em torno do pino da ferramenta, permitindo uma melhor fragmentação, dissolução e dispersão dos óxidos na soldadura. A geometria da ferramenta também apresenta influência no aparecimento do defeito, uma vez que comprimentos de pino superiores provocam maior agitação e mistura do fluxo de material aquecido, melhorando a dissolução e fragmentação dos óxidos. Segundo Xu *et al* [10], pré-tratamento de polimento da interface dos materiais, antes da soldadura, e a otimização de parâmetros de soldadura poderá prevenir a formação de *Kissing-Bond*.

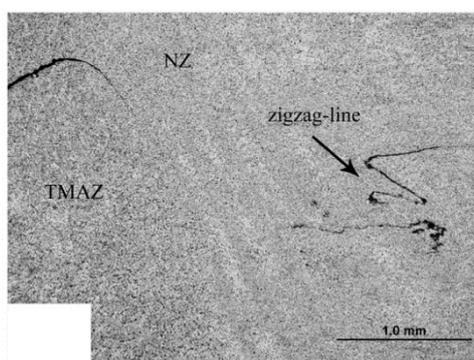


Figura 10 - Imagem do defeito *Kissing-bond* [10]

2.1.5.3. Flash

Este defeito superficial é registado quando ocorre expulsão de material, para o exterior da junta, durante o processo de soldadura, formando uma rebarba à superfície das

chapas, paralela às bordas das soldaduras. A Figura 11 mostra um excerto de uma soldadura onde se evidencia este defeito. Essa rebarba é provocada pelo excesso de afundamento da ferramenta, devido ao amaciamento excessivo do material a soldar ou a uma relação inadequada da força axial, no caso de soldadura em controlo de carga, ou do afundamento, no caso da soldadura em controlo de posição.



Figura 11 - Representação de uma soldadura com *Flash*

2.1.5.4. Top Sheet Thinning

O defeito *top sheet thinning* é caracterizado por uma redução da espessura efetiva da soldadura, apresentando uma forma côncava. Este defeito é provocado, principalmente, pelo excesso de penetração da base da ferramenta na superfície do material, podendo ser, ou não, acompanhado pela formação de rebarba.

2.1.6. Considerações sobre ligação por FSW em junta sobreposta

No início deste estudo foi realizada uma pesquisa bibliográfica, de modo a conhecer os trabalhos realizados, até à data, sobre soldadura por FSW em junta sobreposta. Essa revisão permitiu concluir que a maioria dos artigos publicados se centrava na soldadura de materiais dissimilares, como alumínio-cobre, alumínio-aço, magnésio – aço e titânio – aço, ou ainda, diferentes ligas de alumínio (2xxx-7xxx, 2xxx-6xxx e 6xxx-5xxx). No campo da soldadura de materiais similares destacam-se os trabalhos relativos à ligação das ligas de alumínio das séries 2xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx, e ainda, de materiais como o Titânio, Magnésio e o Aço. De salientar que a maioria desses trabalhos visam a ligação de chapas com espessuras superiores a 2mm.

A análise dos resultados relativos à soldadura de materiais dissimilares, permitiu concluir que a formação de compostos intermetálicos e defeitos do tipo *kissing-bond*, *hooking*, *top sheet thinning* e cavidades, constituem os maiores problemas de soldabilidade

reportados. De entre os trabalhos analisados, destaca-se o trabalho realizado por Dubourg *et al* [12], os quais investigaram a otimização do processo para ligação em junta sobreposta, de uma longarina de 1.5mm de espessura de alumínio 7075-T6 com uma chapa de 2.3mm de espessura de alumínio 2024-T3. Estes autores registaram a formação de defeitos do tipo *hooking*, *kissing-bond* e *top sheet thinning*. Concluíram que o aumento da relação v/w origina uma redução do defeito *hooking*, contudo, verificaram também que a variação da velocidade de avanço ou da velocidade de rotação da ferramenta não elimina por completo o defeito *hooking*. As soldaduras realizadas com dupla passagem apresentaram melhor qualidade, uma vez que diminui o efeito do *hooking*. A alteração da rotação da ferramenta para sentido anti-horário também permitiu inibir a defeito de *top sheet thinning*.

No campo da ligação de materiais similares destacam-se os trabalhos realizados por Yadava *et al* [13], Cao *et al* [11] e Xu *et al* [10], são os únicos a caracterizar de forma cuidada o comportamento mecânico das ligações.

Yadava *et al* [13], investigaram a aplicação da tecnologia *FSW* na ligação, em junta sobreposta, de chapas de 1mm de espessura de alumínio 6111. Estes autores registaram a formação de defeitos do tipo *hooking* e *top sheet thinning*. Concluíram que para velocidades de avanço baixas, se agrava a redução de espessura e a perda de resistência da soldadura. De acordo com estes autores os maiores valores de resistência são obtidos utilizando pinos de comprimento igual à espessura total das chapas. Com efeito, a relação v/w e o comprimento do pino foram consideradas as variáveis mais crítica para a resistência da ligação.

Cao *et al* [11] estudou os efeitos da velocidade de rotação da ferramenta e do comprimento do pino na qualidade das soldaduras realizadas por *FSW*, em junta sobreposta, em chapas de 2 mm de espessura de magnésio. Estes autores registaram a formação de defeitos do tipo *hooking*, *kissing-bond*, *top sheet thinning* e cavidades. Concluíram que a qualidade das soldaduras dependia do melhor compromisso na diminuição simultânea do *hooking* e do *kissing-bond*, embora o *hooking* seja o mais prejudicial. Com efeito, a resistência ao corte da ligação, de acordo com estes autores, depende da dimensão do defeito *hooking*, o que depende do comprimento do pino e da profundidade de penetração.

Xu *et al* [10] investigaram a microestrutura e as propriedades à fadiga de soldaduras por *FSW*, em junta sobreposta, de chapas de 5mm de espessura de alumínio 6061-T6. Estes autores também registaram a formação de defeitos do tipo *hooking* e *kissing-bond*.

Concluíram que o *hooking* é prejudicial na resistência à fadiga da ligação. As soldaduras realizadas com dupla passagem apresentaram um aumento do *hooking* e resistência à fadiga mais baixa quando comparadas com as soldaduras realizadas com uma só passagem.

2.1.7. Material de Base

2.1.7.1. Alumínio

O alumínio é dos metais de maior importância a nível industrial, possuindo uma combinação de propriedades que o tornam muito apetecível para inúmeras aplicações na engenharia. Este metal oferece à engenharia muitas propriedades úteis, como a baixa densidade, muito útil para a indústria de transportes, e a boa resistência à corrosão, devido à estabilidade da camada de óxido que se forma na superfície, muito útil na indústria alimentar, por exemplo. Apesar de no estado puro apresentar baixa resistência mecânica, quando combinado com elementos de liga, apropriados, permite obter ligas de alumínio que podem atingir resistências à tração próximas dos 690 MPa. O alumínio é um metal não tóxico, tornando-se excelente para a indústria de recipientes e embalagens para alimentos. Oferece também boas propriedades elétricas, sendo muito utilizado nesta indústria. Por ser um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, está disponível a baixo preço, tornando-o ainda mais apetecível pela indústria [14].

Segundo Smith, 1998 [14] as ligas de alumínio utilizadas na engenharia, que podem ser fornecidas sob a forma de chapas, extrudidos, varão ou fio, são classificadas consoante o elemento de liga em maior quantidade. Na Tabela 1 apresenta-se as diferentes ligas de alumínio e a sua designação, segundo a norma ISO 2107.

Tabela 1 - Séries de ligas de alumínio

Composição	Designação
Alumínio puro (99%)	1xxx
Ligas de Alumínio ordenadas segundo o principal elemento de liga:	
Cobre	2xxx
Manganês	3xxx
Silício	4xxx
Magnésio	5xxx
Manganês e Silício	6xxx
Zinco	7xxx
Outros elementos	8xxx
Série livre	9xxx

Estas ligas de alumínio podem ainda ser sujeitas a trabalho mecânico e/ou tratamentos térmicos de modo a obter as propriedades mecânicas desejadas. As designações básicas dos tratamentos possíveis são [14]:

- F – Como fabricado. Sem controlo de encruamento e sem limites estabelecidos para as propriedades mecânicas;
- O – Recozimento e recristalização. Tratamento para menor resistência mecânica e maior ductilidade;
- H – Endurecimento por deformação;
- T- Endurecimento por tratamentos térmicos.

De acordo com os mecanismos de endurecimento é possível dividir as ligas de alumínio em dois grandes grupos diferentes: as ligas tratáveis termicamente e as ligas não tratáveis termicamente [14]. As ligas tratáveis termicamente são submetidas a tratamentos térmicos de endurecimento por precipitação dos elementos de liga presentes na sua composição, de modo a obter uma dispersão, densa e fina, de precipitados na matriz do alumínio. Estes precipitados vão atuar como obstáculos às deslocações, aumentando a resistência mecânica da liga. As ligas tratáveis termicamente são das séries 2xxx, 6xxx e 7xxx. As ligas não tratáveis termicamente são apenas endurecidas por deformação a frio, pertencendo às séries 1xxx, 3xxx e 5xxx.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Material de Base

Neste estudo foram utilizados como MB duas ligas de alumínio com características distintas, uma do grupo das ligas não tratáveis termicamente (5xxx) e outra do grupo das ligas tratáveis termicamente (6xxx).

A liga não tratável termicamente pertence à serie 5xxx, em que o magnésio é o principal elemento de liga, sendo adicionado em quantidades até 5% para promover o endurecimento por solução sólida. A liga selecionada tem a designação, segundo a norma ISO 2107, 5754 – H22, apresentando a composição química, que está representada na Tabela 2. A designação do tratamento a que a liga foi sujeita é “H2”, pelo que foi endurecida por encruamento e sujeita a recozimento parcial [14].

A liga tratável termicamente pertence à serie 6xxx, onde os elementos de maior importância são o magnésio e o silício, que se combinam para originarem um composto intermetálico, cuja precipitação endurece as ligas deste grupo. A liga selecionada tem a designação, segundo a norma ISO 2107, 6082 – T6, a composição química desta liga, está representada na Tabela 2. A designação do tratamento a que a liga foi sujeita é “T6”, pelo que a liga foi sujeita a solubilização seguida de envelhecimento artificial [14].

Tabela 2 - Composição química dos MB

Composição Química (% Wt.)									
Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
5754 – H22	0,40	0,40	0,10	0,50	2,6 a 3,6	0,20	0,15	0,30	Restante
6082-T6	0,7 a 1,3	0,5	0,1	0,4 a 1	0,6 a 1,2	0,2	0,1	0,25	Restante

No decorrer deste estudo foi efetuada uma caracterização mecânica dos materiais de base, com recurso a ensaios de tração e medições de dureza, que serão descritos em detalhe mais à frente neste capítulo.

Na Tabela 3 apresenta-se as propriedades mecânicas obtidas, para cada uma das ligas, pelos ensaios mecânicos realizados.

Tabela 3 - Propriedades Mecânicas dos MB

<i>Liga</i>	<i>Tensão de Cedência [MPa]</i>	<i>Tensão Máxima [MPa]</i>	<i>Deformação [%]</i>	<i>Dureza [Vickers]</i>
<i>5754-H22</i>	170	256	17	70
<i>6082-T6</i>	280	343	14	111

Na Figura 12, mostra-se a microestrutura dos MB. A Figura 12-(a) representa a microestrutura característica da liga 6082-T6 e a Figura 12- (b) representa a microestrutura característica da liga 5754-H22.

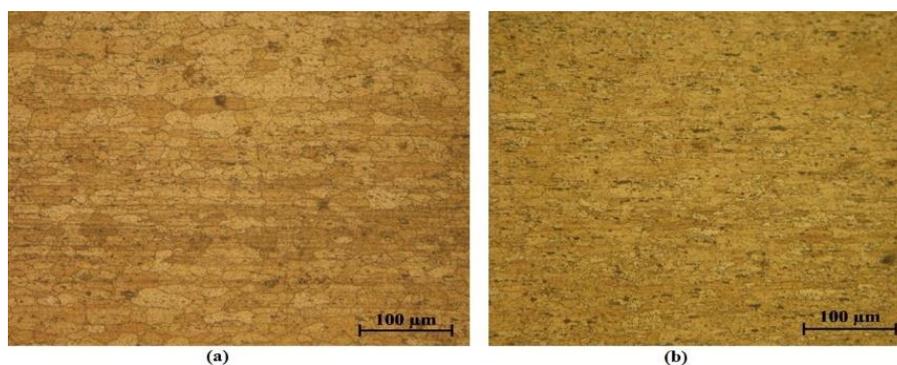


Figura 12 - Micrografias dos MB: (a) - Liga 6082-T6; (b) - Liga 5754-H22

3.2. Soldaduras

As soldaduras analisadas neste estudo foram produzidas em parceria com as empresas *Sucorema* e *CoolHaven*. Foram soldadas chapas dos MB com as seguintes dimensões 12.5 cm x 25 cm e 1 mm de espessura.

Foi utilizado como equipamento de soldadura uma fresadora convencional, a operar em controlo de posição. As soldaduras foram realizadas com recurso a diferentes ferramentas, utilizando-se duas de base cónica lisa e uma de base estriada.

Por fim, é importante referir que para a liga 6082-T6 foram fabricadas 17 soldaduras: 9 com a ferramenta de base cónica lisa e 8 com a ferramenta de base plana estriada. Para a liga 5754-H22 foram fabricadas 11 soldaduras: 5 com a ferramenta de base cónica lisa e 6 com a ferramenta de base plana estriada.

3.2.1. Ferramentas utilizadas

As três ferramentas utilizadas neste estudo foram fabricadas no aço-ferramenta H13. Duas dessas ferramentas foram produzidas com base cônica lisa (Figura 13-(a)), mas com dimensões diferentes para o diâmetro da base. A outra ferramenta foi fabricada com base plana estriada (Figura 13- (b)). Independentemente da geometria da base, utilizaram-se sempre pinos cilíndricos roscados. As características de cada ferramenta são apresentadas na Tabela 4.

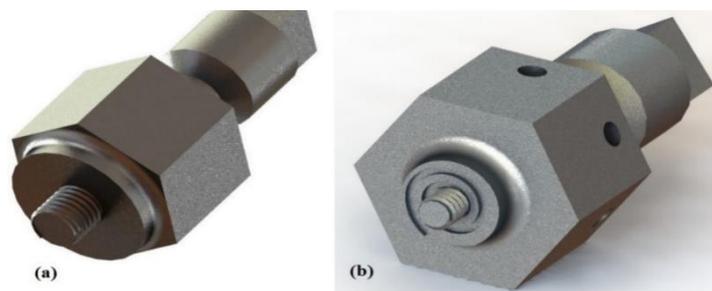


Figura 13 - Representação de algumas das ferramentas utilizadas neste estudo

Adotou-se a seguinte designação para identificação das diferentes ferramentas: a primeira letra identifica a configuração da base, “L” lisa e “E” estriada, os números identificam as dimensões de cada ferramenta.

Tabela 4 - Dimensões das ferramentas de base cônica

Base	Cônica Lisa “L”			
<i>Dimensões</i>	\varnothing_{base} [mm]	\varnothing_{pino} [mm]	L_{pino} [mm]	ab (°)
1	10	3	1.3	5
2	12	4	1.3	5
Base	Plana Estriada “E”			
<i>Dimensões</i>	\varnothing_{base} [mm]	\varnothing_{pino} [mm]	L_{pino} [mm]	ab (°)
1	12	4	1.3	0

3.2.2. Parâmetros de soldadura

Foi testada uma série variada de parâmetros de soldadura, fazendo-se variar a velocidade de rotação (w), a velocidade de avanço (v) e a penetração (Δp), de modo a

conseguir uma panóplia de combinações que permita otimizar o processo. Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros utilizados na produção das soldaduras analisadas neste trabalho.

Tabela 5 - Parâmetros de soldadura utilizados

Série	w [rpm]	v [mm/s]	α [°]	dp [mm]
1	1800	150	3	1,1
2				1,2
3	2000	75	2	1,2
4		150		1,1
5				1,15
6				1,2
7	1200	350	0	1,1
8		150		1,4
9				1,7
10				1,8
11				1,9
12	1400	150		1,9
13	1200	250	2,5	1,8
14	1200			1,9
15	1400			1,9
16	1600			1,9
17	1800			1,9
18	1200	150	0	2
19	1400			2
20	1600			
21	1600			
22	1600	350		2

No decorrer do estudo foi adotada uma designação específica para identificar as diferentes soldaduras, desta forma cada soldadura terá uma designação idêntica a “S.a_b_c”, em que “a” representa a liga soldada, o “b” identifica a ferramenta utilizada e o “c” identifica a série de parâmetros de soldadura.

3.3. Análise Metalográfica

Numa primeira fase efetuou-se uma inspeção visual das soldaduras identificando-se possíveis defeitos superficiais e selecionando-se as que apresentavam condições para se efetuar uma análise microestrutural.

Posto isto, efetuou-se o corte em guilhotina, com recurso a equipamento instalado no departamento de engenharia civil, de uma pequena amostra de cada soldadura com aproximadamente 8 mm de largura. Posteriormente, fez-se a montagem das amostras em resina para se proceder ao polimento. Numa primeira fase, as amostras foram polidas, com recurso a lixas de granulometria decrescente, de acordo com a sequência 180, 600, 1000, e por fim, 2500. Na transição de lixa para lixa, as amostras sofreram rotações de 90°, a fim de se eliminar mais facilmente os riscos provocados pelo polimento anterior. Por fim, todas as amostras foram polidas com recurso a pasta de diamante de 3µm e 1µm.

A fim de se obter a contrastação da microestrutura das soldaduras, efetuou-se um ataque químico às amostras, utilizando-se o reagente “*Poulton Modificado*”, cuja composição química é apresentada na Tabela 6. As condições do ataque variaram de amostra para amostra, até se obter uma contrastação que satisfizesse o que se pretendia, pelo que, não foi possível catalogar as variantes do ataque.

Tabela 6 - Composição química do reagente *Poulton*

<i>Poulton</i>	
HCl	12ml
HNO ₃	6ml
HF	1ml
H ₂ O	1ml
<i>Poulton Modificado</i>	
Reagente de <i>Poulton</i>	50ml
HNO ₃	25ml
H ₂ O	25ml
Ácido Crómico	12g

Foi feita a análise da microestrutura das soldaduras, com recurso a um microscópio ótico, da marca *Carl Zeiss*, modelo *Axiotech 100 HD*, com ampliações de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x. Por fim, registou-se fotograficamente a microestrutura das soldaduras com recurso a uma máquina fotográfica da marca *Canon*, modelo *Power Shot G5*.

3.4. Caracterização Mecânica

Neste estudo, foram realizados testes de dureza e ensaios de tração com o intuito de se avaliar a resistência mecânica das soldaduras, assim como a heterogeneidade de propriedades ao longo da secção transversal. Esta análise foi efetuada tanto às soldaduras como aos MB.

3.4.1. Teste de Dureza

Para a realização das medições de dureza utilizou-se um microdurómetro *Shimadzu Microhardness Tester*. As indentações foram realizadas com uma carga de 50g e tempo de indentação de 15s. Efetuaram-se numerosas indentações espaçadas de 500µm.

Com o objetivo de se obter o máximo de informação possível, as medições de dureza foram realizadas em três linhas horizontais ao longo da soldadura. Na Figura 14 apresenta-se uma imagem ilustrativa das linhas de medição de dureza. Após a execução das indentações, cada uma foi visualizada e fotografada, com recurso ao equipamento utilizado na análise metalográfica, para posterior medição. Por fim, registaram-se as dimensões de cada indentação numa folha template do Excel e efetuou-se o cálculo da dureza em *Vickers*. As medições foram efetuadas com um *software* disponibilizado pela *Carl Zeiss*, denominado *AxioVision*.



Figura 14 - Esquema das linhas de medição de dureza; (1) - Linha chapa superior; (2) - Linha de Interface; (3) - Linha chapa inferior

3.4.2. Ensaios de Tração

Para análise da resistência mecânica do MB e das soldaduras foram realizados uma série de ensaios de tração, tracionando-se provetes com a geometria indicada na Figura 15 – (a), no caso dos metais base, e nas Figura 15 – (b) e (c), no caso das soldaduras. Como se indica na Figura 15, foram apenas ensaiados provetes transversais das soldaduras. De realçar que cada provete de tração transversal é constituído por duas chapas ligadas por uma

soldadura em junta sobreposta. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, com uma velocidade de deslocação da amarra de 3mm/min, para os ensaios do MB, e de 5mm/min, para os ensaios das soldaduras. A fim de validar os resultados, testou-se mais do que um provete para cada situação.

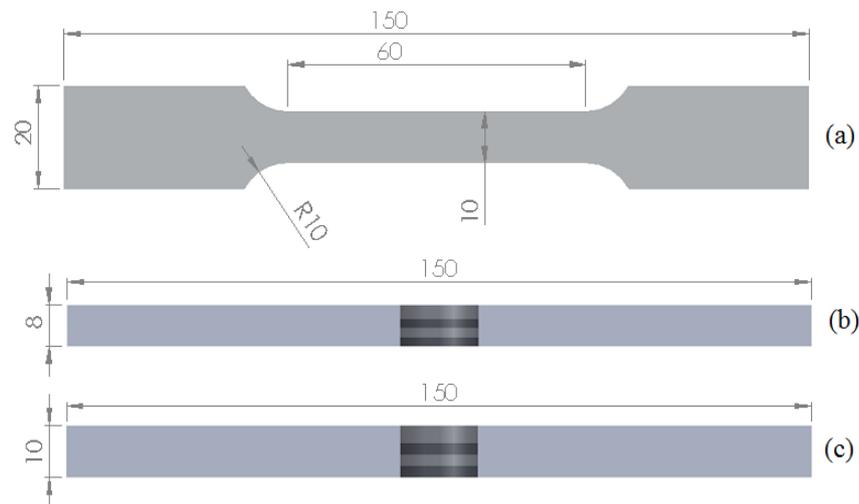


Figura 15- Esquema das dimensões dos provetes utilizados; (a) - Provetes de MB; (b) - Provetes das soldaduras na liga 6082-T6; (c) - Provetes das soldaduras na liga 5754-H22

Para a realização dos ensaios de tração utilizou-se um equipamento da marca *Shimadzu*, modelo *Autograph AG-X*, com uma célula de carga de 5 kN de capacidade máxima. Foi utilizado também um extensómetro ótico da marca alemã *Gom*, modelo *Aramis 5M*, como mostra a Figura 16, permitindo, assim, a aquisição da deformação local ao longo das amostras. A utilização deste equipamento requereu uma preparação antecipada de todos os provetes, tendo-se de aplicar sobre a superfície em estudo uma máscara uniforme de tinta branca, salpicada com pequenas gotas de tinta preta, de modo a obter um padrão aleatório, o mais fino possível, em cada provete.



Figura 16 - Equipamento de extensometria ótica (Gom Aramis 5M) [8]

A Figura 17 mostra um provete depois de pintado. De notar que, antes de se iniciar cada série de testes, teve que se proceder à correta calibração do extensómetro ótico.



Figura 17 - Provete para ensaio de tração após tintura

Foram realizadas duas séries de ensaios às soldaduras. Na primeira série, os provetes foram tracionados até à rutura de uma das chapas, terminando-se, de imediato o ensaio. Na segunda série, os provetes foram tracionados até se dar a rutura de ambas as chapas.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados da análise morfológica, microestrutural e mecânica das soldaduras, procedendo-se à sua discussão. Nos dois primeiros itens serão apresentados os resultados da análise morfológica e microestrutural das soldaduras, identificando-se os principais defeitos superficiais e internos, assim como as diferentes zonas constituintes das soldaduras. No último item serão apresentados os resultados da caracterização mecânica das soldaduras, começando-se pela análise de durezas e terminando com a análise dos resultados dos diversos ensaios de tração realizados.

4.1. Análise Metalográfica

4.1.1. Caracterização Macroscópica das soldaduras

Numa primeira fase deste trabalho procedeu-se à inspeção superficial das soldaduras obtidas, de modo a ter uma ideia geral da qualidade superficial e catalogar possíveis defeitos macroscópicos. Nas Figura 18 a 21 são apresentados os resultados da inspeção visual realizada, ordenados em função da profundidade de penetração do pino (Δp) e da relação (w/v), representativa da entrega térmica durante o processo de soldadura. De notar também que foram utilizadas valores diferentes para o ângulo de ataque na execução das soldaduras, o que é assinalado nas figuras.

Na Figura 18, referente às soldaduras realizadas na liga 6082-T6, utilizando a ferramenta L1 (Tabela 4), pode observar-se a existência de soldaduras com defeitos macroscópicos graves, como *flash* e sulcos superficiais, destacando-se apenas duas soldaduras com boa qualidade superficial, a soldadura S.6_L1_6 e a soldadura S.6_L1_5. Para $w/v = 12$ e $\alpha = 3^\circ$, independentemente da penetração do pino, obteve-se inúmeras soldaduras com defeitos macroscópicos, o que indica que a entrega térmica foi insuficiente para promover o correto arrastamento do material. Para $w/v = 13.3$ e $\alpha = 2^\circ$, nota-se uma melhoria significativa na qualidade superficial das soldaduras. Contudo, para $\Delta p \leq 1.1$ pode-se observar, ainda, a existência de um sulco superficial na soldadura S.6_L1_4, devido à penetração insuficiente da ferramenta. Para $w/v = 26.7$ observa-se boa qualidade superficial,

no início da soldadura. Contudo, com a concentração de calor na junta, houve degradação da superfície da soldadura, surgindo *flash* excessivo, como é visível na soldadura S.6_L1_3.

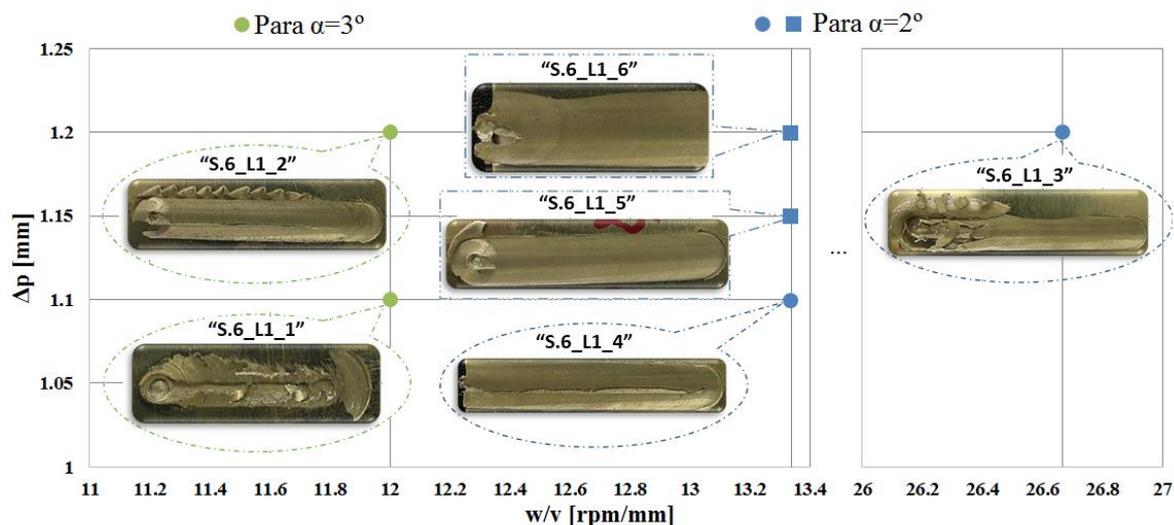


Figura 18 - Gráfico de defeitos macroscópicos das soldaduras na liga 6082-T6 com a ferramenta "L1"; círculos – soldaduras com defeito; quadrados – soldaduras sem defeito

Na Figura 19, referente às soldaduras realizadas na liga 6082-T6, utilizando a ferramenta E1 (Tabela 4), pode ver-se que, para $3.4 \leq w/v \leq 8$ e $1.1 \leq \Delta p \leq 1.7$ obtiveram-se soldaduras com defeitos graves, como se verifica pelas soldaduras S.6_E1_7, S.6_E1_9 e S.6_E1_8. Para $8 \leq w/v \leq 9.4$ e $1.7 < \Delta p \leq 2$ observa-se uma melhoria significativa na qualidade superficial das soldaduras, não havendo registo de defeitos macroscópicos.

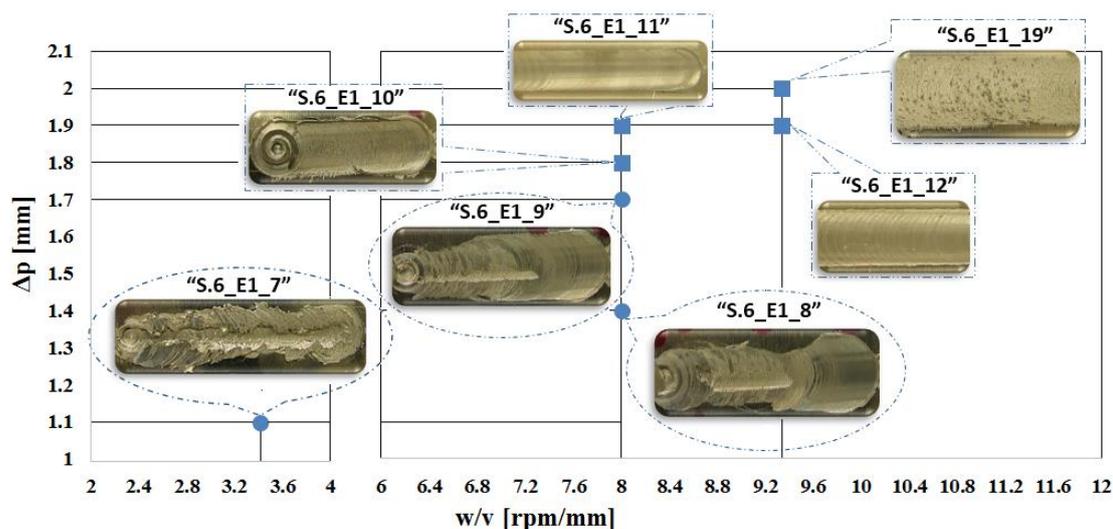


Figura 19 - Gráfico de defeitos macroscópicos das soldaduras na liga 6082-T6 com a ferramenta "E1"; círculos – soldaduras com defeito; quadrados – soldaduras sem defeito

Podemos assim concluir que independentemente da ferramenta, para a liga 6082-T6 existe um leque muito restrito de parâmetros de soldadura para o qual é possível obter soldaduras com qualidade.

Na Figura 20 apresentam-se agora os resultados obtidos para as soldaduras realizadas na liga 5754-H22, utilizando a ferramenta L2 (Tabela 4). Pela análise do gráfico, para $4.8 \leq w/v \leq 7.2$ e $\Delta p = 1.9$, verifica-se que a maioria das soldaduras produzidas apresenta bom acabamento superficial, não se tendo registado qualquer defeito macroscópico grave com a variação da relação w/v . De notar apenas a existência de pequenos sulcos superficiais na soldadura S.5_L2_13, fabricada com $\Delta p \leq 1.8$.

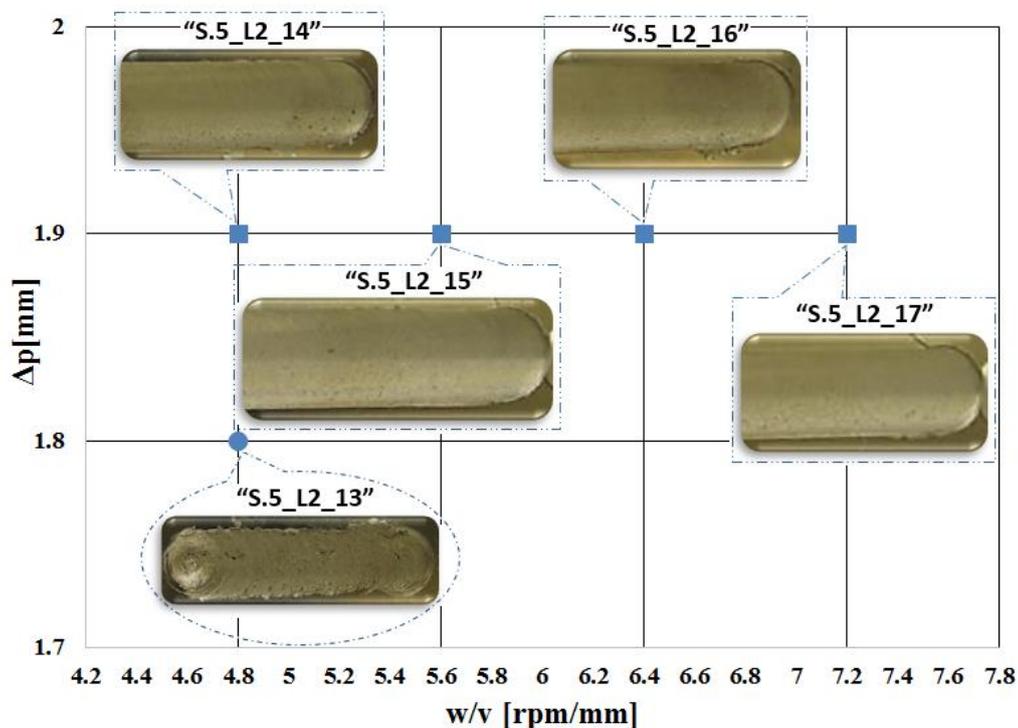


Figura 20 - Gráfico de defeitos macroscópicos das soldaduras na liga 5754-H22 com a ferramenta "L2"; círculos – soldaduras com defeito; quadrados – soldaduras sem defeito

Na Figura 21 apresenta-se um gráfico onde se podem observar os resultados relativos às soldaduras realizadas com a liga 5754-H22, utilizando a ferramenta E1 (Tabela 4). A análise do gráfico permite verificar que as soldaduras apresentam boa qualidade superficial, destacando-se apenas a soldadura S.5_E1_12, obtida para $\Delta p \leq 1.9$, que apresenta pequenos sulcos superficiais ao longo do cordão de soldadura. Para $\Delta p = 2$, não se registaram defeitos superficiais. Poder-se-á mesmo dizer que a variação da relação w/v não afetou de forma assinalável a morfologia superficial das soldaduras.

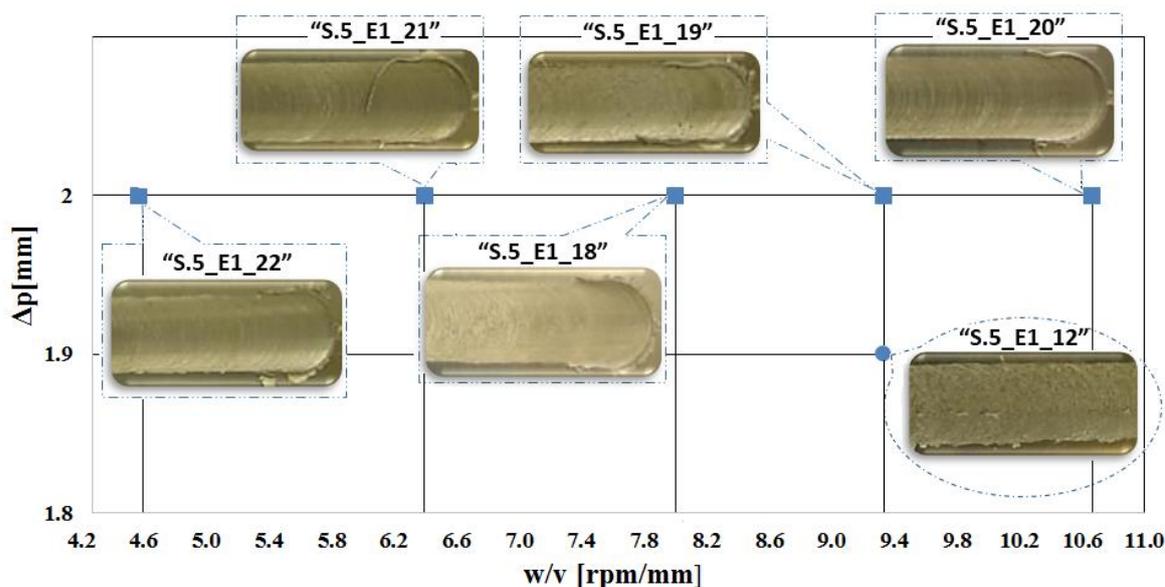


Figura 21 - Gráfico de defeitos macroscópicos das soldaduras da liga 5754-H22 com a ferramenta "E1";
círculos – soldaduras com defeito; quadrados – soldaduras sem defeito

De um modo geral, a maioria das soldaduras realizadas na liga 5754-H22 apresentaram boa qualidade superficial, não se verificando a incidência de graves defeitos macroscópicos com a variação de parâmetros de soldadura e com a variação da ferramenta.

A análise macroscópica das soldaduras permitiu-nos concluir que, para a gama de parâmetros selecionados, a liga 6082-T6 apresentou maior incidência de defeitos superficiais do que a liga 5754-H22, independentemente da ferramenta utilizada, o que segundo Leitão *et al* [15] se deve às diferenças no comportamento plástico a altas temperaturas das duas ligas. Conclui-se, assim, que a liga de alumínio da série 6xxx apresenta maiores problemas de soldabilidade do que a liga de alumínio da série 5xxx, quando utilizada a configuração de junta sobreposta. Estes resultados são contrários, aos registados por Leitão *et al* [15], num estudo realizado com ligas pertencentes às mesmas séries, mas para juntas topo-a-topo.

4.1.2. Análise microscópica das soldaduras

Com base na análise macroscópica selecionaram-se as soldaduras que apresentavam melhor qualidade superficial para a análise metalográfica. Nas figuras seguintes será apresentada a microestrutura da secção transversal das soldaduras selecionadas, procedendo-se à identificação e caracterização das diferentes zonas constituintes.

4.1.2.1. Soldaduras na liga 6082-T6

Na Figura 22 apresenta-se a secção transversal das soldaduras *S.6_L1_5* e *S.6_L1_6*, ambas realizadas com a mesma ferramenta, com w/v de 13.3 e, respetivamente, penetrações da ferramenta de 1,15 e 1,2. Analisando a Figura 22-(a) conclui-se que apesar de não ter sido registado qualquer defeito aquando a inspeção visual da soldadura *S.6_L1_5* (Figura 18), esta não apresenta uma ligação com características regulares em toda a secção transversal. Com efeito, a análise da secção transversal da soldadura permite constatar que a região deformada plasticamente se restringe ao diâmetro do pino. O material sob a base da ferramenta não apresenta alterações microestruturais significativas, o que leva a concluir que a penetração da ferramenta foi insuficiente para promover o arrastamento do material pela base da ferramenta. Apesar da irregularidade evidenciada em termos microestruturais, apresenta uma boa mistura entre os MB na zona de ligação

Para a soldadura *S.6_L1_6* (Figura 22 – (b)), produzida com uma maior penetração da ferramenta, pode observar-se a presença de um *Nugget* com a configuração típica de anéis concêntricos, que se estende desde a zona de atuação do pino, até à zona de atuação de base, o que denota uma intersecção correta dos fluxos de material promovidos por ambos os componentes da ferramenta.

Na Figura 22- (b) pode-se observar também um ligeiro aumento de espessura do lado de avanço e a formação de uma pequena rebarba, facto que, segundo Leal, 2010 [8], se deve à presença de camadas de material arrastado pela base à superfície das chapas e por material movimentado em trajetória ascendente pelo pino, em conjunto com alguma expulsão de material para fora da ação da ferramenta. Além disso é possível observar a existência de um defeito interno, de ambos os lados da soldadura, denominado na revisão bibliográfica como *Hooking*. Neste caso, podemos observar que, do lado de recuo, o fluxo gerado pela ferramenta direcionou a fenda na direção do *Nugget*, enquanto que, do lado de avanço, a fenda se propagou em forma de gancho na direção ascendente.

Comparando as duas soldaduras da Figura 22 verifica-se que a base da ferramenta tem influência no fluxo de material, direcionando o material arrastado à superfície, e parte do movido pelo pino, do lado de recuo para o lado de avanço. Pode-se concluir também que em soldadura com configuração de junta sobreposta, pequenas variações na penetração do pino podem conduzir a importantes diferenças na qualidade da soldadura. Facto importante no caso de soldaduras de chapas finas para as quais, pequenos

empenos ou variações de espessura nas chapas podem originar variações importantes no espaçamento entre chapas e, conseqüentemente, alterações na posição da ferramenta provocando diferenças entre soldaduras. Naturalmente, este problema pode ser evitado com a realização das soldaduras em controlo de força.

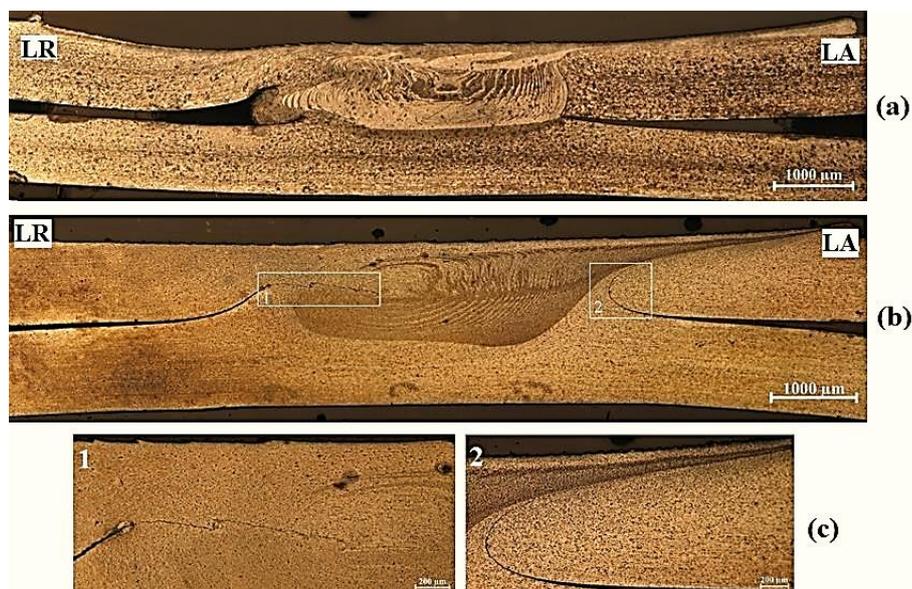


Figura 22- Secções transversais das soldaduras na liga 6082-T6 com a ferramenta “L1”: (a) - S.6_L1_5; (b) - S.6_L1_6; (c) - detalhe das zonas 1 e 2 da soldadura S.6_L1_6

Na Figura 23 apresenta-se a secção transversal de soldaduras realizadas na liga 6082-T6 com a ferramenta de base estriada. A soldadura *S.6_E1_11* e a *S.6_E1_12* foram realizadas com a mesma penetração de ferramenta, $\Delta p = 1.9$, e respetivamente com w/v de 8 e 9,4. Pela Figura 23 observa-se, em ambas as soldaduras, a existência de uma zona mais escura em forma de língua, que se estende do centro da soldadura para o lado de avanço, identificada por *Nugget*, a qual apresenta uma microestrutura mais uniforme do que a observada nas soldaduras da Figura 22. Comparando as soldaduras, *S.6_E1_11* e *S.6_E1_12*, é visível um aumento da dimensão do *Nugget* na soldadura *S.6_E1_12*, facto justificado pelo aumento da relação w/v de 8 para 9,4, levando a uma maior deformação e adição de calor na soldadura. Podemos constatar também a presença do defeito de Hooking, de ambos os lados das soldaduras. Neste caso, a fenda localizada do lado do recuo foi direcionada para a superfície da chapa superior. De notar que na soldadura *S.6_E1_12* a fenda do lado do recuo apresenta uma inclinação mais acentuada na direção da superfície, facto devido ao aumento da relação w/v , a qual origina uma maior intensidade no fluxo de material gerado pela

ferramenta. Do lado de avanço, a fenda apresenta a forma de um gancho que se propaga também para a superfície da chapa superior, idêntico em ambas as soldaduras.



Figura 23 - Secções transversais das soldaduras na liga 6082-T6 com a ferramenta “E1”: (a) - S.6_E1_11; (b) - S.6_E1_12

Já para a soldadura S.6_E1_19, ilustrada na Figura 24, o ataque efetuado não revelou com tanto pormenor a região do *Nugget*, que apresenta, no entanto, morfologia semelhante ao das soldaduras da Figura 23. Contudo, para esta soldadura, podemos observar que a transição existente entre a ZTMA e a ZTA, do lado de avanço, é caracterizada por uma transição abrupta, ao contrário do verificado do lado de recuo, onde se pode observar uma transição suave e gradual no sentido do fluxo gerado pela ferramenta. Algo também verificado por Leal, 2010 [8], e justificado com a extrusão de material realizado pela ferramenta de base estriada ao longo da soldadura. Na Figura 24- (b), ilustra-se com maior ampliação as regiões 1 e 2, assinaladas na Figura 24-(a), representando a região 1, a zona de transição entre a ZTMA e a ZTA, do lado de recuo, onde se pode observar que a zona demarcada como ZTA não sofreu deformação plástica, sendo constituída por grãos não deformados. A zona demarcada como ZTMA foi dividida em duas subzonas constituídas por diferentes estruturas de grão. A subzona “a” é constituída por grãos deformados mas não recristalizados, enquanto a subzona “b” é constituída por grãos fortemente deformados e recristalizados, constituintes do *Nugget*.

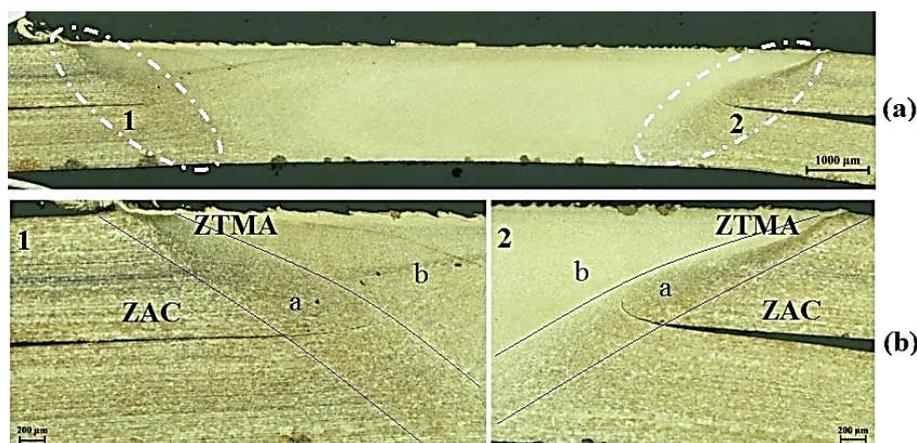


Figura 24 - Secção transversal de uma soldadura na liga 6082-T6: (a) - S.6_E1_19; (b) – detalhe das zonas 1 e 2

Comparando as soldaduras S.6_E1_12, ilustrada na Figura 23- (b), e S.3_E1_19, ilustrada na Figura 24-(a), pode concluir-se que o aumento de penetração da ferramenta de 1.9 para 2 mm não induziu grandes alterações estruturais nas soldaduras. Contudo é possível observar que o defeito *Hooking* na soldadura da Figura 24 apresenta menores dimensões, facto explicado pelo aumento da força de forjagem, provocado pelo aumento de penetração da ferramenta, que levou a uma maior restrição na zona de intersecção das chapas.

De salientar que o defeito de *Hooking* foi observado em todas as amostras recolhidas das soldaduras realizadas com a ferramenta de base estriada, assim como se verificou com a ferramenta de base cónica lisa. Segundo Dubourg *et al* [12], verifica-se que o defeito de *Hooking* pode ser associado ao fluxo gerado pelo pino roscado na interface de ligação entre as chapas, fazendo com que nas extremidades da ZTMA se origine uma fenda, com início na interface não deformada das chapas, propagando-se no sentido do fluxo de material para a superfície da chapa superior. Contudo, comparando as soldaduras realizadas com as diferentes bases observa-se que a base estriada, devido à intensidade de movimento que provoca no material, origina do lado de avanço uma fenda em forma de gancho com uma curvatura mais acentuada e mais profunda, enquanto, do lado de recuo, a fenda se propaga de forma mais linear para a superfície da chapa superior.

4.1.2.2. Soldaduras na liga 5754-H22

Na Figura 25 - (a) e (b) estão representadas, respetivamente, as secções transversais das soldaduras S.5_L2.14 e S.5_L2_16, realizadas na liga 5754-H22 com a

ferramenta de base cônica lisa, para a mesma penetração da ferramenta ($\Delta p = 1.9$), com w/v de 4.8 e 6.4, respetivamente.

Tal como já foi descrito anteriormente para as soldaduras na liga 6082-T6, é possível observar na Figura 25- (a) e (b), um ligeiro aumento da espessura e formação de uma pequena rebarba no lado de avanço. É também possível observar que a transição entre a ZTMA e a ZTA, de ambos os lados da soldadura, se realiza de forma suave, assim como uma ligeira redução de espessura na parte central da soldadura, resultante da utilização de um ângulo de ataque de $2,5^\circ$. De salientar que também foi identificado o defeito Hooking, de ambos os lados das soldaduras, como se verificou para a liga 6082-T6, apresentando as mesmas características.

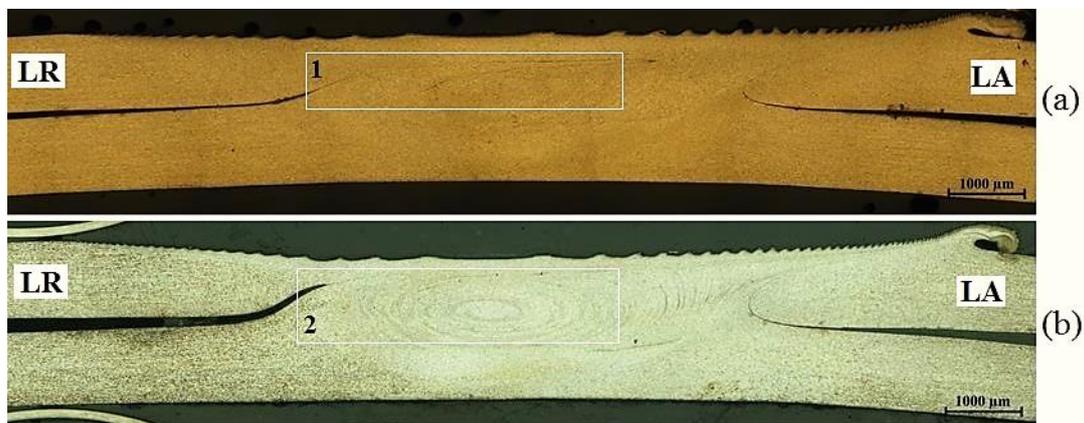


Figura 25 - Secções transversais das soldaduras na liga 5754-H22 com a ferramenta L2: (a) – S.5_L1_14; (b) – S.5_L2_16

No detalhe da zona do Nugget da soldadura S.5_L2_14, representado na Figura 26 – (1), é possível observar a presença de uma linha de óxidos que se inicia na extremidade do defeito *Hooking* e se propaga ao longo da ZTMA, formando na zona central do *Nugget* um *ZigZag*. Este foi já identificado na revisão bibliográfica como *Kissing-Bond*. Segundo Dubourg *et al* [12] e Cao *et al* [11], o defeito de *Kissing-Bond* está associado ao tipo de configuração de junta e à utilização de relações w/v baixas, que promovem menor transferência de calor e, conseqüentemente, uma insuficiente fragmentação e dissolução da camada de óxido na soldadura. Analisando o detalhe do *Nugget* da soldadura S.5_L2_16, representado na Figura 26 - (2), é possível confirmar que o aumento da relação w/v de 4.8 para 6.4 levou a uma fragmentação e dispersão mais eficiente da camada de óxido levando a que esta se distribua segundo o sentido do fluxo de material. Podemos assim verificar que

o defeito de *Kissing-Bond* está diretamente relacionado com a escolha de parâmetros de soldadura.

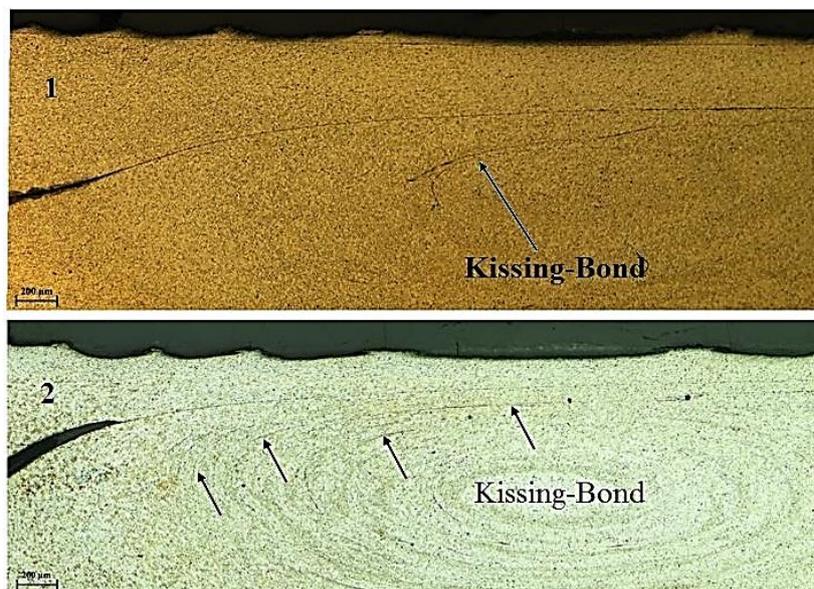


Figura 26 - Detalhes do *Nugget* das soldaduras da Figura 25

Na Figura 27 são apresentadas, respetivamente, as secções transversais das soldaduras S.5_E1_18 e S.5_E1_19, realizadas na liga 55754-H22 com a ferramenta E1 (Tabela 4), para a mesma penetração da ferramenta, $\Delta P = 2$, e com w/v de 8 e 9.33, respetivamente. É possível observar, em ambas as soldaduras, que a zona do *Nugget* é constituída por uma estrutura de grão refinado, sob a forma de anéis concêntricos. Contudo, na Figura 27 – (a), é possível também observar que a transição entre a ZTMA e a ZTA, do lado de avanço, é realizada de forma mais repentina, do que do lado de recuo, efeito associado ao fluxo de material característico da ferramenta utilizada. Enquanto que, na Figura 27 – (b) observa-se que a transição entre a ZTMA e a ZTA se realiza de forma mais gradual, de ambos os lados da soldadura. Este efeito é possível devido ao aumento da relação de w/v de 8 para 9.33. De salientar que também em ambas as soldaduras é visível o defeito de *Hooking*, de ambos os lados da soldadura. De notar que o aumento da relação w/v neste caso levou a um ligeiro agravamento do *Hooking* do lado de avanço da soldadura S.5_E1_19 quando comparado com a soldadura S.5_E1_18.

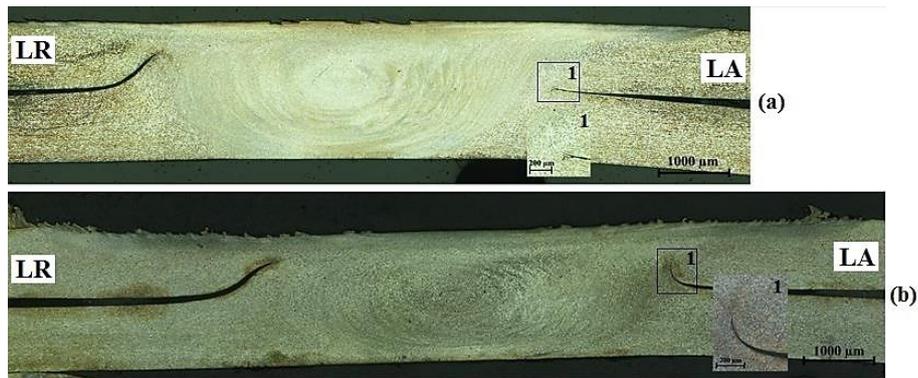


Figura 27 - Secções transversais das soldaduras na liga 5754-H22 com a ferramenta E1: (a) - S.5_E1_18; (b) - S.5_E1_19

Da análise microestrutural das soldaduras podemos concluir que o defeito predominante, sendo registado em todas as soldaduras realizadas, foi o *Hooking*. Verificou-se também que a realização das soldaduras com a ferramenta de base estriada é menos sensível a variações de penetração da ferramenta permitindo utilizar valores muito próximos da espessura total das chapas sem que se observe reduções de espessura na zona da soldadura.

4.2. Caracterização Mecânica das soldaduras

4.2.1. Medições de Dureza

No texto que se segue apresentam-se os perfis de dureza das soldaduras realizadas na liga 6082-T6 e na liga 5754-H22, correspondentes às linhas de medição, ilustradas na Figura 13 do capítulo 3 - Procedimento Experimental. De acordo com a Figura 13, a linha 1 e 3 representam o perfil de dureza na chapa superior e inferior, respetivamente. A linha 2 representa o perfil de dureza na região do *Nugget*, segundo a linha horizontal de interface entre as chapas.

Na Figura 28 apresenta-se o perfil de dureza de uma soldadura da liga 6082-T6 realizada com a ferramenta L1 (Tabela 4). No gráfico, a linha a tracejado representa o valor médio da dureza do MB (111 HV 0.05). São ainda representadas através de linhas verticais as dimensões da ferramenta utilizada, de modo a se observar a zona de influência da base e do pino. Pela análise do gráfico constata-se que houve uma redução de dureza do material, na região da soldadura, relativamente ao material de base, na ordem dos 35 %. Na linha 1 e 3 pode observar-se que o perfil de dureza é semelhante nas duas chapas, embora a chapa

inferior esteja sujeita a uma menor influência da base da ferramenta, estando a sua ação restringida à secção do pino. A linha 3 mostra que a diminuição de dureza é mais acentuada, nesta zona, que corresponde à ligação entre as duas chapas.

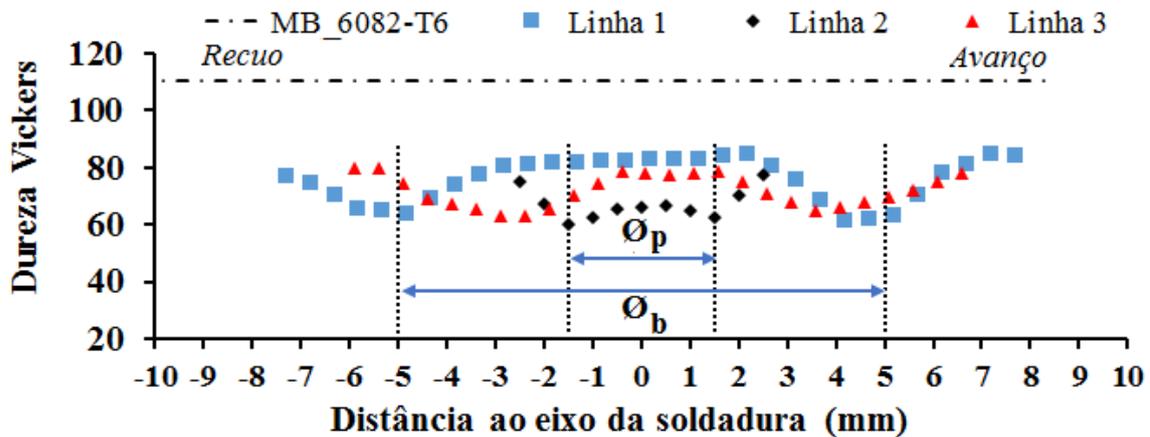


Figura 28 - Perfil de dureza das soldaduras realizadas na liga 6082-T6 com a ferramenta “L1”

Na Figura 29 apresenta-se o perfil de durezas de uma das soldaduras da liga 6082-T6 realizada com a ferramenta E1 (Tabela 4). Pela análise do gráfico observa-se que na região da soldadura houve uma diminuição de dureza, comparativamente ao MB, da ordem de 25 %. Verifica-se também que o perfil de dureza nas chapas superior e inferior, representado pelas linhas 1 e 3, respetivamente, é muito semelhante, o que é possível devido à utilização de 2mm na penetração da ferramenta. A linha 3, na interface de ligação entre as chapas, apresentou valores de dureza iguais aos registados para ambas as chapas na zona do *Nugget*.

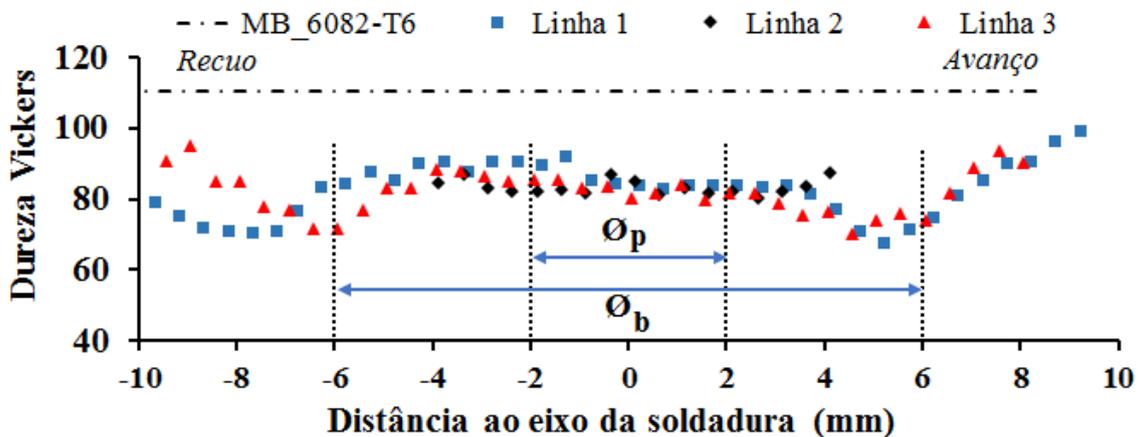


Figura 29 - Perfil de durezas das soldaduras realizadas na liga 6082-T6 com a ferramenta “E2”

Pela análise das Figura 28 e Figura 29 é visível a perda de resistência do material na zona da soldadura. Este facto deve-se à natureza da liga utilizada, uma vez que esta liga é endurecida por precipitação e, quando aquecida, os precipitados endurecedores tendem a dissolver-se completamente na zona do *Nugget*, e parcialmente na ZTA, o que conduz à perda de resistência mecânica registada nos ensaios de dureza.

Na Figura 30 e Figura 31 apresentam-se, agora, os perfis de dureza das soldaduras da liga 5754-H22. Nos gráficos, a linha a tracejado representa, mais uma vez, o valor médio da dureza do MB, que neste caso é de 70 HV 0.05. Pela análise do gráfico da Figura 30 podemos concluir que o perfil de dureza das soldaduras realizadas com a ferramenta L2 (Tabela 4) não apresenta variações significativas quando comparado com a dureza média do MB. Facto registado por Leal, 2010 [8], para uma liga da mesma série, associando-o à compensação do endurecimento originado pela deformação plástica e refinamento do grão na zona do *Nugget*, face ao amaciamento provocado pela restauração e recristalização sofrida durante o arrefecimento.

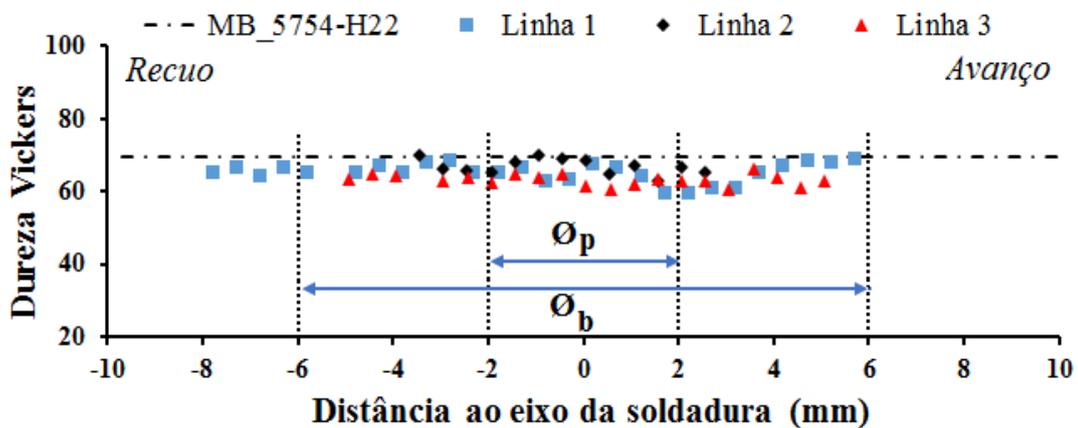


Figura 30 - Perfil de dureza das soldaduras realizadas na liga 5754-H22 com a ferramenta “L2”

A análise dos perfis de dureza da soldadura realizada com a ferramenta E1 (Tabela 4), representado na Figura 31, permite concluir que há um aumento da dureza na região da soldadura, relativamente ao material de base, na ordem dos 11%. Este aumento é observado em soldaduras realizadas com base estriada numa liga da série 5000, e justificado por Leal, 2010 [8], pela sobreposição do encruamento por deformação plástica ao amaciamento provocado pela restauração e recristalização do material da soldadura.

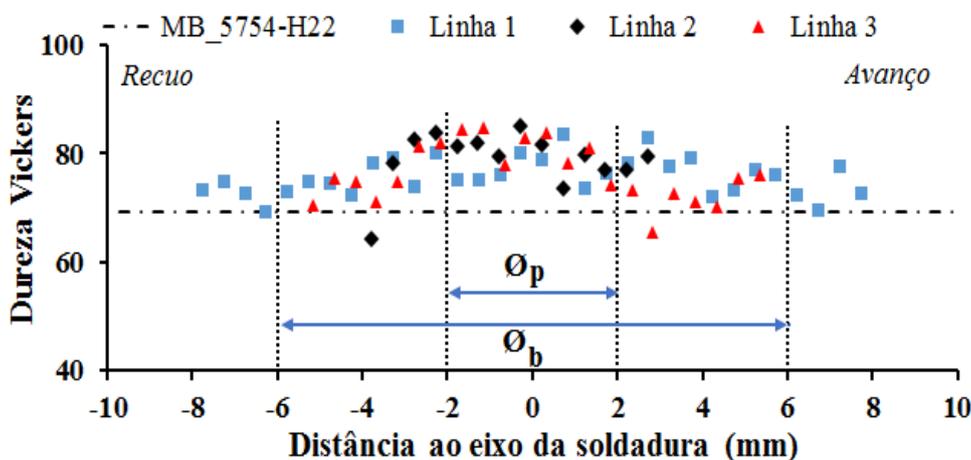


Figura 31 - - Perfil de durezas das soldaduras realizadas na liga 5754-H22 com a ferramenta “E1”

4.2.2. Ensaios de Tração

Neste item são apresentadas as curvas tensão – deformação convencional obtidas nos ensaios de tração realizados às amostras de MB e das diferentes soldaduras recolhidas. Tal como referido no procedimento experimental, foram realizadas duas séries de testes. Na primeira série de testes os provetes de soldadura foram ensaiados até à rutura de uma das chapas, terminando-se de imediato o ensaio. Os resultados destes testes serão designados por TEST1. Na segunda série de testes, as amostras foram tracionadas até à rutura de ambas as chapas, designando-se os resultados destes ensaios por TEST2. Na apresentação de resultados, para cada material, será utilizada a série de testes que possibilitar a melhor compreensão e análise dos resultados obtidos. De salientar também que foi realizada uma avaliação da dimensão do defeito de *Hooking*, presente nas soldaduras testadas, com o objetivo de se avaliar a sua influência nas propriedades mecânicas. Essa avaliação teve como suporte a metodologia utilizada por Yazdanian *et al* [16].

4.2.2.1. Soldaduras na liga 6082-T6

Na Figura 32 são traçadas as curvas tensão- deformação convencional, referentes à liga 6082-T6, de duas soldaduras realizadas com a ferramenta L1 (Tabela 4). É possível verificar, pelas curvas obtidas, que as duas soldaduras testadas apresentam resistência mecânica inferior à do MB, confirmando a perda de resistência registada no perfil de durezas. Com efeito, de acordo com os gráficos, todos os provetes de soldadura fraturaram sem que ocorresse deformação plástica, para valores médios de tensão da ordem de 200MPa, ou seja,

para valores de tensão 35% inferiores à tensão limite de elasticidade do MB. De notar que a realização dos ensaios TEST2 permitiu observar que, após a rutura da chapa superior, a chapa inferior continua a deformar-se até atingir a rutura, numa região da amostra correspondente à ZTA, para valores próximos de 260 MPa. Conclui-se, assim, que esta também sofreu perda de resistência com a soldadura.

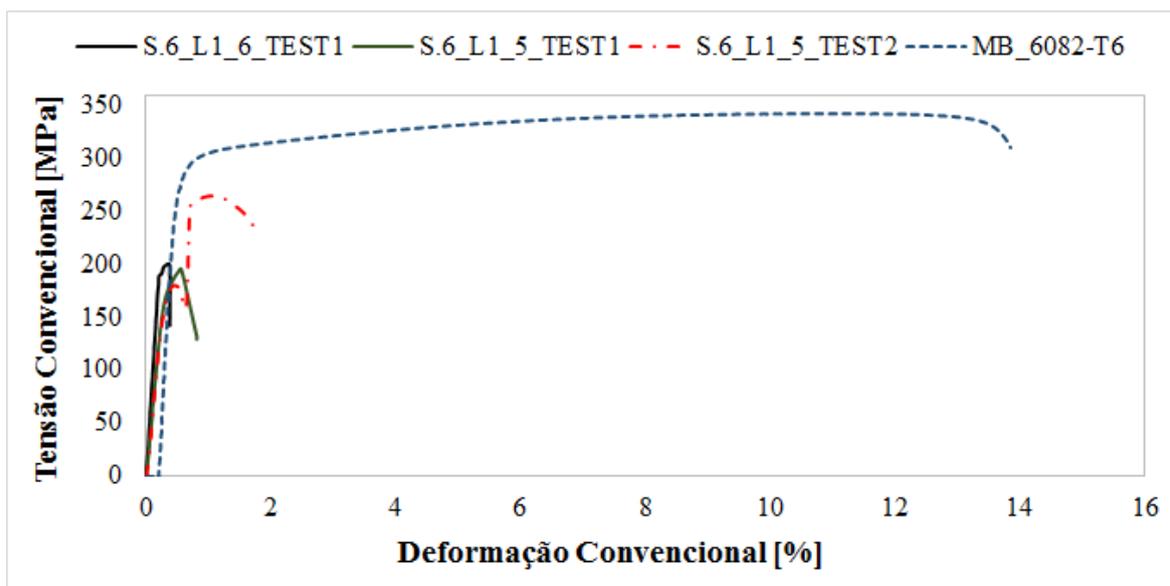


Figura 32 - Gráfico Tensão-Deformação Convencional de soldaduras na liga 6082-T6 com a ferramenta L1

Com o recurso ao extensómetro ótico foi possível registar, tal como se mostra na Figura 33, a distribuição da deformação na chapa inferior durante o ensaio. Os isovalores de deformação plástica na figura correspondem à deformação plástica no provete, aquando da carga máxima de rutura da chapa superior. Esta figura permite confirmar que a rutura da chapa superior ocorre para valores de deformação plástica, na chapa inferior, praticamente nulos, mesmo na região central da soldadura, onde se registaram valores mínimos de dureza.

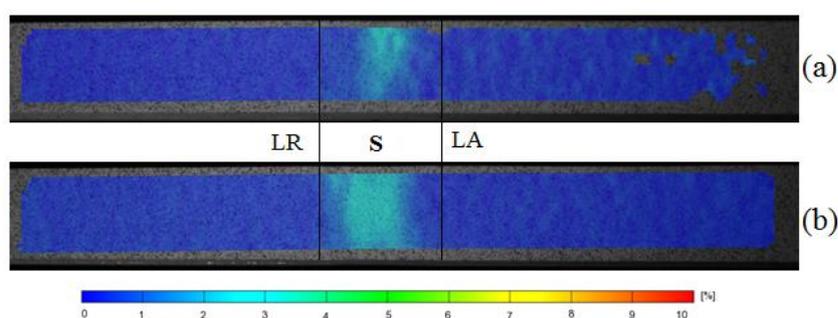


Figura 33 - Diagrama da deformação obtida no extensómetro ótico: (a) - S.6_L1_6_TEST1; (b) - S.6_L1_5_TEST1

De salientar que todos os provetes fraturam na chapa superior, na região correspondente à extremidade do *Hooking*, onde se verifica uma concentração de tensões.

Na Figura 34 é representada a zona de rutura dos provetes das soldaduras *S.6_L1_5* e *S.6_L1_6*. Na Figura 34-(a) pode-se observar que a rutura da chapa superior se localizou na ZTMA, do lado de avanço da soldadura, segundo a geometria do defeito *Hooking*, contribuindo assim para a redução da resistência mecânica da ligação. Na Figura 34- (b) verifica-se que a rutura da chapa superior ocorreu do lado do recuo, onde a espessura útil da chapa era menor devido aos defeitos na soldadura. Contudo, é de referir que para a generalidade das amostras a rutura ocorreu do lado do avanço.

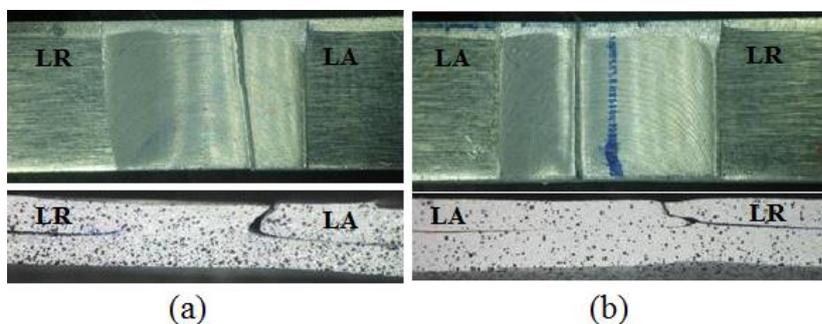
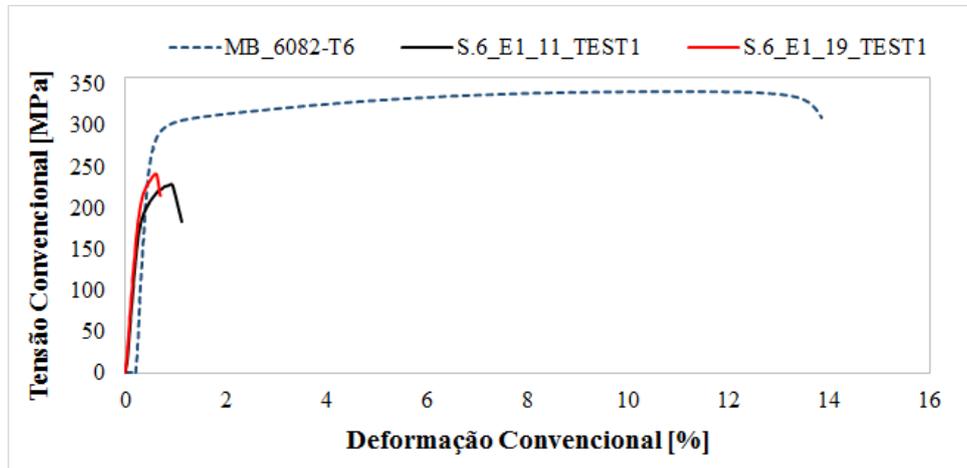


Figura 34 - Localização da Rutura dos provetes: (a) *S.6_L1_6*; (b) - *S.6_L1_5*

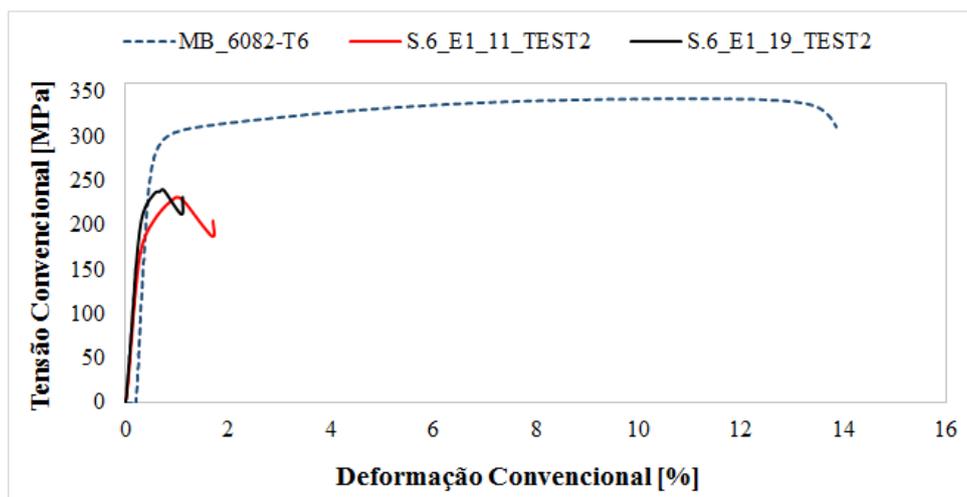
Na Figura 35-(a) são apresentadas as curvas tensão-deformação dos ensaios de tração da série *TEST1*, correspondentes às soldaduras *S.6_E1_11* e *S.6_E1_19*. Nesta figura é possível observar que ambas as soldaduras apresentam uma diminuição de resistência mecânica e ductilidade comparativamente ao MB, o que era esperado com base na análise do perfil de durezas destas soldaduras, apresentada na Figura 32. Também nestes provetes a rutura ocorreu sem se observar deformação plástica significativa do material, para valores de tensão na ordem de 250MPa.

Na Figura 35- (b) são apresentadas as curvas tensão-deformação dos ensaios de tração das soldaduras identificadas anteriormente, mas para a série *TEST2*. Neste gráfico é possível observar que a chapa inferior apresenta valores de tensão de rutura próximos dos registados aquando da rutura da chapa superior. Podemos assim concluir que, nas soldaduras realizadas com a ferramenta de base estriada, os efeitos nocivos da alteração estrutural sofrida pelo material de base na região da soldadura são a principal causa da perda de resistência do material. Contudo, verifica-se que a concentração de tensões provocada pela

presença do *Hooking* na chapa superior faz com que esta entre em rutura primeiro que a chapa inferior.



(a)



(b)

Figura 35 - Gráfico Tensão-Deformação Convencional de soldaduras na liga 6082-T6: (a) - Ensaio TEST1; (b) - Ensaio TEST2

Na Figura 36 está representada a zona de rutura dos provetes de tração das soldaduras *S.6_E1_11* e *S.6_E1_19*. Estas imagens permitem confirmar que a rutura da chapa superior ocorreu, em ambas as soldaduras, na ZTMA, do lado de avanço da soldadura, segundo a direção do *Hooking*. Por seu lado, a rutura da chapa inferior localizou-se na ZTA, que corresponde à região onde foram registados os menores valores de dureza.

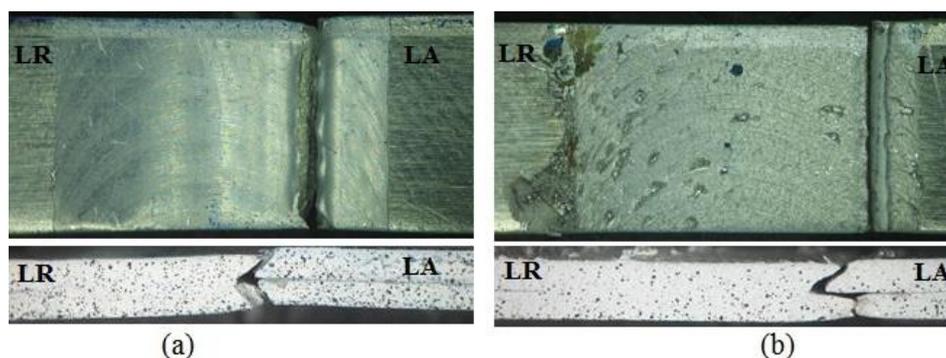


Figura 36 - Localização da Rutura dos provetes: (a) S.6_E1_11; (b) S.6_E1_19

Finalmente, na Figura 37 – (a) apresentam-se as curvas de deformação real-tempo, correspondentes a quatro pontos em regiões distintas de um provete de tração da soldadura S.6_E1_11. Na Figura 37- (b) ilustra-se a distribuição de deformação nas diferentes regiões da amostra, aquando da carga máxima. Nesta imagem os pontos identificados com os números 1 e 4 representam as regiões do provete correspondentes ao MB e os pontos 2 e 3 identificam zonas da soldadura. Pela análise das curvas da Figura 37-(a) é possível confirmar que as regiões do MB não deformam plasticamente durante o ensaio. A região da soldadura começa a deformar passados 35 s do início do ensaio, verificando-se uma concentração da deformação na região identificada pelo ponto 2 correspondente à zona de rutura, deixando a restante região da soldadura, identificada pelo ponto 3, de deformar. Na Figura 37- (b) é possível observar que a deformação plástica se localizou na região da soldadura, pontos 2 e 3, estando a região do MB, pontos 1 e 4 no domínio elástico, pelo que, podemos concluir que ocorreu rutura frágil da chapa superior, devido à concentração de tensões exercida pela presença do defeito *Hooking*.

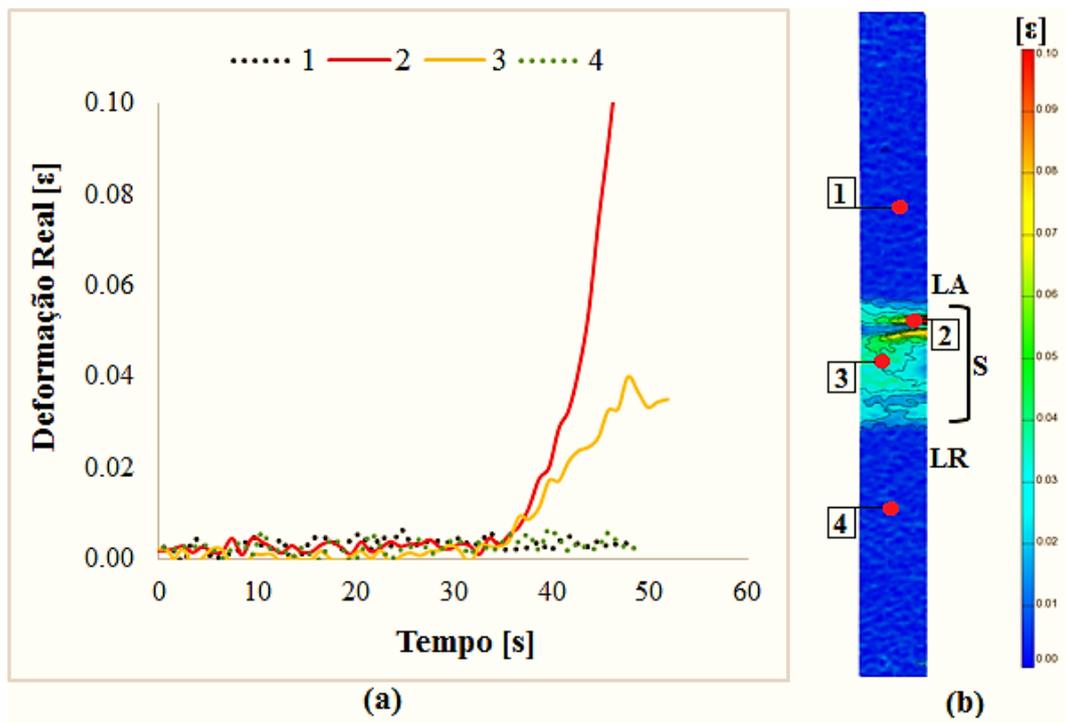


Figura 37 - Soldadura S.6_E1_11: (a) Gráfico Deformação Real – Tempo; (b) Diagrama Deformação

4.2.2.2. Soldaduras na liga 5754-H22

Na Figura 38 apresentam-se as curvas tensão-deformação, correspondente à série TEST2, das soldaduras *S.5_L2_14* e *S.5_L2_16*, realizadas com a ferramenta L2 (Tabela 4). Pela figura é possível observar que todas as curvas, incluindo as relativas às soldaduras, apresentam o serrilhado característico do efeito de *Portevin-Le-Châtelier* [8]. Este comportamento é característico das ligas de alumínio da série 5000, resultando da restrição, ao movimento das deslocções, provocada pelos átomos de Mg durante a deformação plástica do material. É possível concluir que a rutura da chapa superior ocorre para valores de tensão da ordem de grandeza da tensão limite de elasticidade do MB, o que demonstra a boa resistência da ligação apesar da presença do defeito do tipo *Hooking*, de ambos os lados da soldadura. A figura permite também constatar que, após a rutura da chapa superior, o provete continua a deformar plasticamente, agora na região correspondente à chapa inferior, a qual apresenta um comportamento e resistência mecânica semelhante ao MB. Contudo, devido à concentração de tensões na região do entalhe originado pela rutura da chapa superior, o provete acaba por sofrer rutura para valores de deformação plástica muito reduzidos.

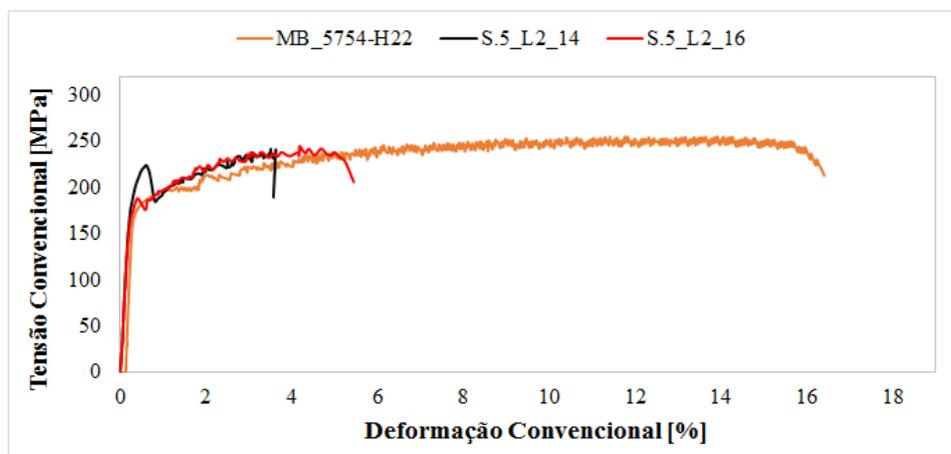


Figura 38 - Gráfico Tensão-Deformação Convencional de soldaduras na liga 5754-H22, para o ensaio TEST2

Na Figura 39 está representada a secção de rutura, dos provetes de tração das soldaduras *S.5_L2_14* e *S.5_L2_16*. A partir das imagens pode concluir-se que a rutura da chapa superior, em ambas as soldaduras, ocorreu na ZTMA do lado de recuo, possivelmente, devido ao ligeiro aumento de espessura ocorrido do lado de avanço e à concentração de tensões associadas ao *Hooking* do lado de recuo. No que diz respeito à chapa inferior é visível que, no caso da soldadura *S.5_L2_16*, a rutura ocorreu na zona próxima da soldadura, segundo uma inclinação próxima dos 45° com o eixo de tração e na soldadura *S.5_L2_14*, a rutura da chapa inferior ocorreu próximo da amarra da máquina de tração, facto que pode ser justificado com alguma imprecisão na geometria do provete.

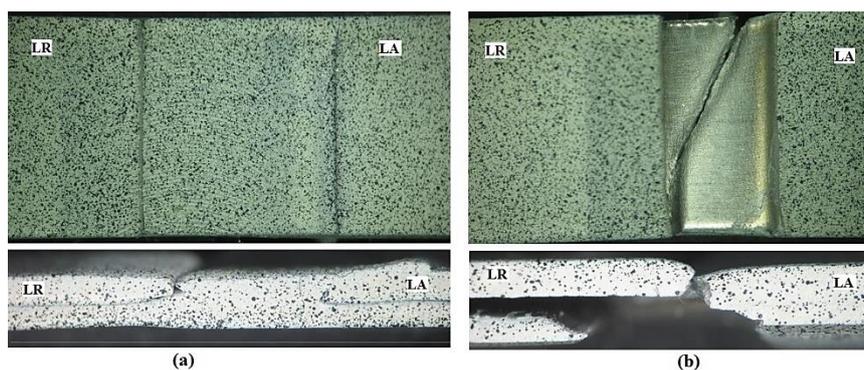


Figura 39 - Localização da Rutura dos provetes. (a) *S.5_L2_14*; (b) - *S.5_L2_16*

Na Figura 40 apresentam-se as curvas tensão-deformação correspondentes à série TEST2 das soldaduras *S.5_E1_18* e *S.5_E1_19*, realizada com a ferramenta E1 (Tabela 4). É possível concluir que a rutura da chapa superior ocorre para valores de tensão ligeiramente superiores à tensão limite de elasticidade do MB, o que demonstra um ligeiro ganho de resistência mecânicas da soldadura mesmo com a presença do *Hooking* de ambos

os lados da soldadura. A figura permite também verificar que após a rutura da chapa superior o provete continuou a deformar plasticamente, agora na região da chapa inferior. Contudo, devido à concentração de tensões originada pela rutura da chapa superior, a chapa inferior acaba por sofrer rutura para valores de deformação plástica muito reduzidos.

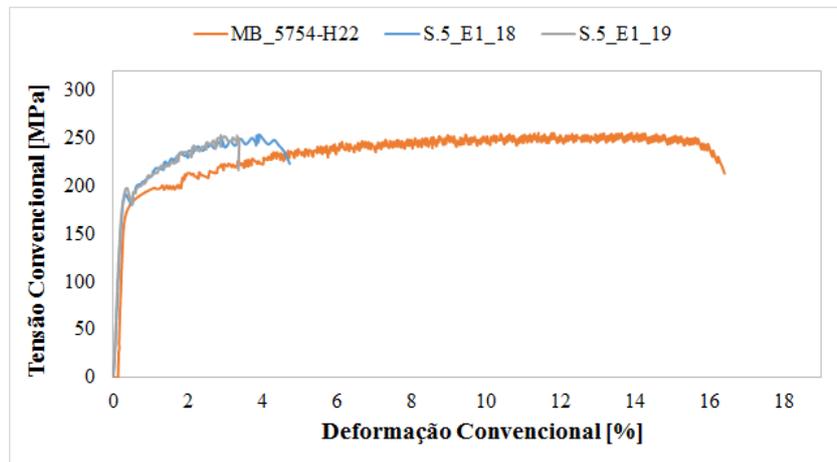


Figura 40 - Gráfico Tensão-Deformação Convencional de soldaduras na liga 5754-H22, para o ensaio TEST2

Na Figura 41 está representada a secção de rutura dos provetes de tração das soldaduras S.5_E1_18 e S.5_E1_19. Nesta figura é possível observar que a rutura da chapa superior, em ambas as soldaduras, ocorreu na ZTMA do lado do recuo, segundo a direção do *Hooking*. Na chapa inferior a rutura ocorreu no MB, próximo da soldadura, do lado do recuo, segundo uma inclinação próxima do 45° com o eixo de tração.

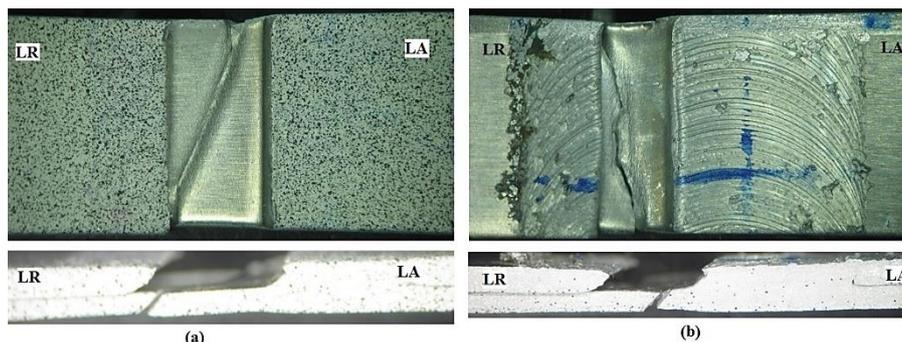


Figura 41 - Localização da Rutura dos provetes. (a) S.5_E1_18; (b) - S.5_E1_19

Na Figura 42 – (a) apresentam-se as curvas deformação real-tempo, correspondentes a cinco pontos em regiões distintas de um provete de tração da soldadura S.5_E1_19. Na Figura 42- (b) ilustra-se a distribuição da deformação, nas diferentes regiões do provete, aquando da carga máxima. Nesta imagem os pontos identificados com os números 1 e 5 representam as regiões do provete correspondentes ao MB e os pontos 2,3 e

4 representam pontos na zona da soldadura. Pela análise das curvas da Figura 42-(a) é possível concluir que o MB não deforma plasticamente durante o ensaio, assim como a zona da soldadura identificada pelo ponto 2, a qual apresenta um comportamento igual ao do MB. Tal como se vê na Figura 42 – (a) a deformação concentra-se na zona de rutura identificada pelos pontos 3 e 4.

Na Figura 42- (b) é possível verificar que a deformação plástica se localizou na região da soldadura, concentrando-se na zona de rutura da chapa superior, pontos 3 e 4, estando a região do MB e a zona da soldadura demarcada pelo ponto 2 no domínio elástico. Deste modo, pode-se concluir que ocorreu rutura frágil da chapa superior, devido à concentração de tensões provocada pela presença do *Hooking*.

Pela análise das curvas obtidas com os ensaios de tração das soldaduras em ambas as ligas, conclui-se que, efetivamente, a chapa superior apresenta menor resistência mecânica do que a chapa inferior, facto explicado pela concentração de tensões originada pelas alterações estruturais mais intensas e pela propagação do *Hooking*. Observa-se também que existe uma diferença de comportamento entre as ligas em estudo, verificando-se que as soldaduras na liga 5754-H22 não apresentam alterações de resistência mecânica relativamente ao MB, enquanto que, para a liga 6082-T6 é visível uma diminuição importante de resistência mecânica das soldaduras da liga 6082-T6 relativamente ao MB.

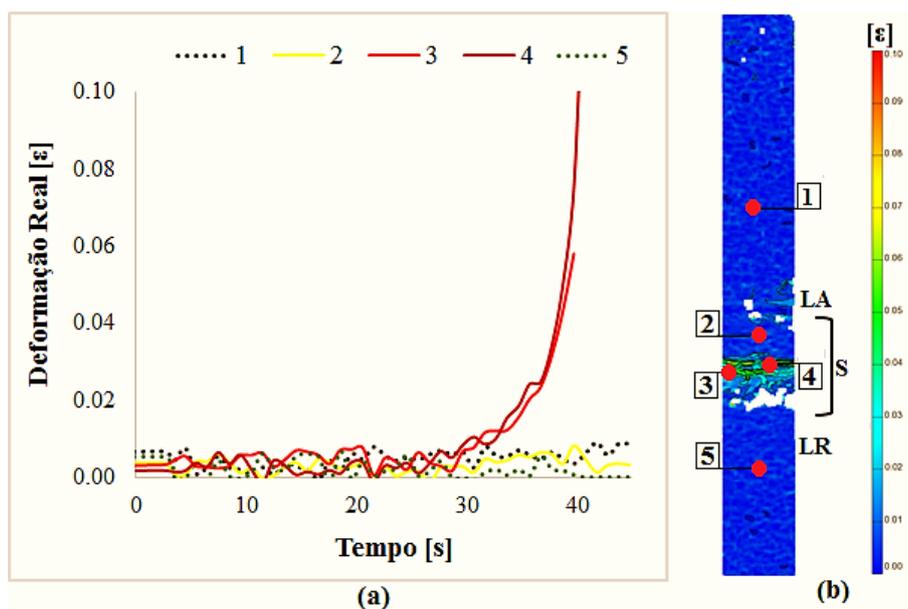


Figura 42 – Soldadura S.5_E1_19 (a) Gráfico Deformação Real-Tempo; (b) Diagramas Deformação

5. CONCLUSÃO

A realização deste trabalho permitiu analisar a soldabilidade por *Friction Stir Welding (FSW)* das ligas de alumínio 6082-T6 e 5754-H22, em soldadura em junta sobreposta de chapas de 1mm de espessura.

A análise morfológica das soldaduras permitiu identificar e catalogar os principais defeitos superficiais, destacando-se a formação de *flash* e sulcos, em soldaduras de ambas as ligas estudadas. O estudo permitiu ainda concluir que a formação destes defeitos está intimamente ligada com a penetração da ferramenta na superfície dos materiais, com a entrega térmica durante o processo de soldadura e com as características dos metais base. Com efeito, quando comparadas soldaduras realizadas para a mesma gama de parâmetros, as soldaduras da liga 6082-T6 apresentaram uma maior incidência de defeitos superficiais do que as soldaduras efetuadas na liga 5754-H22.

A análise microscópica da secção transversal das soldaduras revelou ainda a existência de defeitos internos, para todas as soldaduras, independentemente da liga soldada, e algumas diferenças em termos da morfologia da ligação, entre as soldaduras efetuadas com as ferramentas de base lisa e a de base estriada. De entre os defeitos internos identificados, destacam-se a diminuição de espessura da chapa superficial e a formação de *Kissing-Bond* e *Hooking*.

A análise metalográfica revelou que a formação de *Kissing-Bond*, que é considerada determinante para a resistência à fadiga destas ligações, está intimamente ligada com a relação w/v utilizada na produção das soldaduras. Com efeito, observou-se que aumentando a relação w/v permitiu a fragmentação e distribuição da linha de óxidos pela soldadura, diminuindo assim os seus potenciais efeitos nefastos. O defeito do tipo *Hooking* revelou ser o defeito predominante nas soldaduras realizadas para ambas as ligas e o único determinante para a resistência mecânica em tração da ligação. Apesar da sua importância, não foi possível estabelecer uma relação direta entre os parâmetros e procedimentos de soldadura e a sua incidência.

Através da realização de ensaios de dureza foi possível analisar a evolução das propriedades mecânicas nas diferentes soldaduras, em função dos parâmetros de soldadura. Concluiu-se que a liga 6082-T6 sofre uma perda considerável de dureza na soldadura,

independentemente das condições de soldadura, a qual se reflete de forma nefasta na resistência à tração da ligação. Todas as soldaduras efetuadas nesta liga sofreram rotura, na região da ZTA, para valores de tensão aplicada inferiores à tensão limite de elasticidade do metal base.

Para a liga 5754-H22, por outro lado, independentemente das condições de soldadura, não foi registada qualquer diminuição de dureza, tendo-se mesmo observado, para as soldaduras realizadas com a ferramenta de base estriada, um ganho de dureza na região central da soldadura. Os resultados dos ensaios de tração das soldaduras nesta liga permitiram concluir que todas as soldaduras sofreram rotura, na região do *Hooking*, do lado de recuo, para valores de tensão aplicada da ordem de grandeza da tensão limite de elasticidade do metal base. De todas as soldaduras testadas, aquelas que apresentaram melhor resistência foram as realizadas com a ferramenta de base estriada, para penetrações da ferramenta entre 1.8 e 2 mm e relações w/v entre 6 e 10 rpm/mm.

6. PERSPETIVAS DE TRABALHO FUTURO

Como foi referido na revisão bibliográfica a soldadura por FSW em junta sobreposta, apesar de incipiente, tem vindo a crescer no mundo industrial. Pelo que, seria uma mais-valia a continuação do estudo neste tipo de soldaduras.

Posto isto, deixo algumas sugestões para a continuação do trabalho aqui apresentado, nomeadamente, a análise de um leque mais seletivo de parâmetros de soldadura e testar novas geometrias da ferramenta.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TWI Ltd, “Friction Stir Welding.” [Online]. Available: <http://www.twi.co.uk/technologies/welding-coating-and-material-processing/friction-stir-welding/>. [Accessed: 17-Aug-2013].
- [2] Westunitis.co.Ltd, “FSW movie,” 2004. [Online]. Available: <http://www.m-osaka.com/fsw/en/movie/movie.html>. [Accessed: 18-Aug-2013].
- [3] D. Rodrigues, “Soldadura por Fricção Linear,” Texto de apoio às aulas teórico-práticas da disciplina de Tecnologia dos Processos de Ligação, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2006.
- [4] R. Rai, a De, H. K. D. H. Bhadeshia, and T. DebRoy, “Review: friction stir welding tools,” *Science and Technology of Welding & Joining*, vol. 16, no. 4, pp. 325–342, May 2011.
- [5] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, “Friction stir welding and processing,” *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 50, no. 1–2, pp. 1–78, Aug. 2005.
- [6] TWI Ltd, “Frequently Asked Questions - Can friction stir welding be used to make lap joints?” [Online]. Available: <http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-can-friction-stir-welding-be-used-to-make-lap-joints/>. [Accessed: 17-Aug-2013].
- [7] I. Galvão, “Caracterização de soldaduras Al/Cu por fricção linear,” Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2009.
- [8] R. Leal, “Soldadura por fricção Linear de elementos de baixa espessura,” Tese Doutoramento, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2011.
- [9] A. Lopo, “Caracterização mecânica e microestrutural de soldaduras por fricção linear realizadas em ligas de alumínio da série AA 5182-H111.,” Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- [10] X. Xu, X. Yang, G. Zhou, and J. Tong, “Microstructures and fatigue properties of friction stir lap welds in aluminum alloy AA6061-T6,” *Materials & Design*, vol. 35, pp. 175–183, Mar. 2012.

- [11] X. Cao and M. Jahazi, “Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy,” *Materials & Design*, vol. 32, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2011.
- [12] L. Dubourg, a. Merati, and M. Jahazi, “Process optimisation and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin,” *Materials & Design*, vol. 31, no. 7, pp. 3324–3330, Aug. 2010.
- [13] M. K. Yadava, R. S. Mishra, Y. L. Chen, B. Carlson, and G. J. Grant, “Study of friction stir joining of thin aluminium sheets in lap joint configuration,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 15, no. 1, pp. 70–75, Jan. 2010.
- [14] W. F. Smith, *Princípios de Ciências e engenharia dos Materiais*, 3ª Edição. Amadora: McGraw-Hill, 1998.
- [15] C. Leitão, R. Louro, and D. M. Rodrigues, “Analysis of high temperature plastic behaviour and its relation with weldability in friction stir welding for aluminium alloys AA5083-H111 and AA6082-T6,” *Materials & Design*, vol. 37, pp. 402–409, May 2012.
- [16] S. Yazdanian and Z. W. Chen, “Effect of friction stir lap welding conditions on joint strength of aluminium alloy 6060,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 4, p. 012021, Aug. 2009.
- [17] D. M. Rodrigues, C. Leitão, R. Louro, H. Gouveia, and a. Loureiro, “High speed friction stir welding of aluminium alloys,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 15, no. 8, pp. 676–681, Nov. 2010.