



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Daniel Filipe Mendes Ribeiro

**SOLDADURA DE LIGAS LEVES EM JUNTA T POR
*FRICION STIR WELDING***

VOLUME 1

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, no ramo de produção e projeto orientada pelo Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa e pelo Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão apresentada à Universidade de Coimbra/ Departamento de Engenharia Mecânica.

Setembro de 2022

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

SOLDADURA DE LIGAS LEVES EM JUNTA T POR FRICTION STIR WELDING

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

Autor

Daniel Filipe Mendes Ribeiro

Orientadores

José Domingos Moreira da Costa

Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão

Júri

Presidente Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes
Professor da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa
Professor Doutor da Universidade de Coimbra
Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão
Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia de
Lisboa

Vogais

Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria

Coimbra, Setembro, 2022

Agradecimentos

A terminar esta dissertação de mestrado, resta entregar os meus sinceros agradecimentos às pessoas que ajudaram a completar mais uma etapa da minha vida, sem as quais isto não seria possível.

Em primeiro lugar ao Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa e ao Professor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão, por todo o conhecimento transmitido, pela sua orientação e total disponibilidade ao longo da realização desta dissertação.

Também gostava de agradecer ao Professor Rui Manuel Ferreira Leal e ao Professor Carlos Leitão pela ajuda prestada na utilização devida dos equipamentos de laboratório, no tratamento de dados e no esclarecimento das dúvidas existentes durante todo o processo. Ao Sr. Fernando pela ajuda na fabricação das soldaduras, e preparação dos provetes para os ensaios.

De realçar, um agradecimento, a todos os que trabalham no grupo de tecnologia por gerarem um bom clima, com boa disposição e entreajuda,

Um agradecimento especial aos meus pais por toda a motivação, suporte e carinho demonstrados nos bons e maus momentos.

Aos meus amigos, aos que me apoiaram e incentivaram a alcançar este objetivo, todos os momentos vividos nestes anos jamais os esquecerei.

A todos, um muito obrigado.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo a análise da viabilidade de produção de juntas em T, em ligas de alumínio 7075 e magnésio AZ31, por *Friction Stir Welding*. Mais precisamente, em juntas T-lap para soldaduras heterogêneas de alumínio e magnésio e T-butt para as soldaduras homogêneas de magnésio. Foram usadas duas ferramentas, uma progressiva cônica roscada T-lap (PCRT-lap) e outra progressiva cônica roscada T-butt (PCRT-butt), tendo especial atenção à formação dos raios de concordância sem que se verificasse a redução da espessura do *skin*. Foi feita uma análise através do microscópio ótico e eletrônico e também de análise SEM, para estudar o fluxo de material e da existência de defeitos. Foi também analisado o comportamento à tração dos provetes extraídos das soldaduras homogêneas.

Nas soldaduras heterogêneas de alumínio e magnésio não ocorreu soldadura do *skin* e do *stringer*, produzindo soldaduras com defeitos na superfície e na secção transversal da soldadura. Enquanto, nas soldaduras homogêneas de magnésio produziram-se soldaduras sem qualquer tipo de defeito.

Observou-se que nas soldaduras heterogêneas houve perda de dureza em relação ao material base, enquanto, nas soldaduras homogêneas houve um aumento da dureza face ao material base.

Nos ensaios de tração das soldaduras homogêneas verificou-se uma eficiência de junta de aproximadamente 79 %, valor que diminui com a diminuição da velocidade de avanço.

Palavras-chave: Friction stir welding, Junta em T, Liga de alumínio 7075, Liga de magnésio AZ31, Resistência à tração, Dureza.

Abstract

This work aims to analyze the viability of producing T-joints, in aluminum alloys 7075 and magnesium AZ31, by Friction Stir Welding. More precisely, in T-lap joints for heterogeneous aluminum and magnesium welds and T-butt joints for homogeneous magnesium welds. Two tools were used, a progressive conical threaded T-lap (PCRT-lap) and another progressive conical threaded T-butt (PCRT-butt), paying special attention to the formation of the concordance fillets without the reduction of the skin thickness. An analysis was made through optical and electronic microscopy and SEM analysis, to study the material flow and the existence of defects. The tensile behavior of the specimens extracted from the welds was also analyzed.

In the heterogeneous welds of aluminum and magnesium, there was no welding of the skin and stringer, producing welds with defects on the surface and in the cross-section of the weld. Meanwhile, in the homogeneous magnesium welds, welds were produced without any type of defect.

It was observed that in the heterogeneous welds there was a loss of hardness in relation to the base material, while in the homogeneous welds there was an increase in hardness compared to the base material.

In the tensile tests of the homogeneous welds, a joint efficiency of approximately 79% was verified, a value that decreases with the decrease of the advance speed.

Keywords: Friction stir welding, T-joint, 7075 aluminum alloy, AZ31 magnesium alloy, Tensile strength, Hardness.

ÍNDICE

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Simbologia e Siglas	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Soldadura por Fricção Linear (FSW).....	3
2.1.1. Descrição do processo	3
2.1.2. Parâmetros do processo	4
2.1.3. Microestrutura	5
2.1.4. Fluxo de material	6
2.2. Soldadura por FSW em ligas alumínio e magnésio	7
2.3. Soldadura por FSW em juntas T	10
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	13
3.1. Materiais e configuração das juntas.....	13
3.2. Geometria da ferramenta.....	15
3.3. Execução das soldaduras.....	16
3.4. Análise morfológica.....	17
3.5. Análise da microdureza.....	17
3.6. Comportamento à tração	18
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	19
4.1. Morfologia das soldaduras.....	19
4.1.1. Soldadura alumínio magnésio	19
4.1.2. Soldadura magnésio.....	21
4.2. Microdureza	25
4.3. Comportamento à tração	28
4.3.1. Magnésio	28
4.3.2. Fractografia.....	30
5. CONCLUSÕES	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Representação esquemática do processo de FSW (adaptada de [28])	4
Figura 2.2. Representação esquemática das diferentes regiões microestruturais numa soldadura por FSW (adaptada de [29])	6
Figura 2.3-Microestrutura da secção transversal da soldadura: (a) visão geral de baixa ampliação da soldadura, (b)-(d) micrografia da região do material de base, zona de transição e zona de agitação, respetivamente	8
Figura 2.4-Dureza da secção transversal (a) e ensaio de tração (b) [16]	9
Figura 2.5-Diversas configurações de junta em T (Tavares et al, 2010).....	10
Figura 2.6-Defeito de túnel [6]	11
Figura 2.7-Defeito de kissing bond [6].....	11
Figura 3.1- Microestrutura da liga de magnésio AZ31	13
Figura 3.2- Montagem experimental para a realização das soldaduras.....	14
Figura 3.3-Configuração de junta T-lap (a) e T-butt (b).....	15
Figura 3.4-Esquema das ferramentas utilizadas: a) ferramenta progressiva piramidal para T-lap e b) ferramenta progressiva cónica roscada para T-butt.....	15
Figura 3.5-Esquema da análise de microdureza.....	17
Figure 3.6-Esquema do ensaio de tração e do provete.....	18
Figura 4.1-Aspetto superficial das soldaduras FSW Al-Mg: (a) D-870-60-6,9, (b) D-870-60-7 e (c) D-870-40-7.....	20
Figura 4.2- Macroestrutura da secção transversal das soldaduras: a) skin da D-870-60-7, b) skin da D-870-40-7, c) stringer da D-870-60-7 e d) stringer da D-870-40-7...	20
Figura 4.3-Aspetto superficial das soldaduras FSW de Mg: S-1500-90-7,1 (a), S-870-90-7,1 (b) e S-500-90-7,1 (c).....	21
Figura 4.4-Zona de agitação da soldadura S-1500-90-7,1: (a) secção transversal; (b-d) microestrutura das zonas 1,2 e 3	22
Figura 4.5-Zona de agitação da soldadura S-870-90-7,1: (a) secção transversal; (b-d) microestrutura das zonas 1,2 e 3.....	23
Figura 4.6-Zona de agitação da soldadura S-500-90-7,1: (a) secção transversal; (b-d)	

microestrutura das zonas 1,2 e 3.....	23
Figura 4.8-Perfil horizontal de dureza HV das amostras obtidas por FSW de ligas de Al-Mg.....	25
Figura 4.9-Perfil vertical de dureza HV das amostras obtidas por FSW entre ligas Al-Mg.....	26
Figura 4.10-Perfil horizontal de dureza HV das amostras obtidas por FSW de ligas de magnésio similares.....	26
Figura 4.11-Perfil vertical de dureza HV das amostras obtidas por FSW entre ligas Al-Mg (a) e ligas de magnésio similares (b).....	27
Figura 4.12-Zona de rotura de todos os provetes.....	28
Figura 4.13-Mapeamento das deformações locais, no instante próximo da rotura, nas soldaduras S-1500-90-7,1 (a), S-870-90-7,1 (b) e S-500-90-7,1 (c).....	30
Figura 4.14-Fratografias das soldaduras S-1500-90-7,1 (a), S-870-90-7,1 (b) e S-500-90-7,1 (c).....	31

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades das ligas de alumínio e magnésio.....	14
Tabela 2. Parâmetros do processo.....	16
Tabela 3. Tensão máxima e eficiência da junta de cada soldadura.....	29

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

ω – Velocidade de rotação em rpm

v – Velocidade de avanço em mm/min

p – Profundidade de penetração da ferramenta em mm

θ – Ângulo de inclinação da ferramenta em graus (°)

HV0,2 – Dureza Vickers [kgf/mm²]

σ_{max} – Tensão máxima [MPa]

$\sigma_{max,base}$ – Tensão máxima do material base [MPa]

Siglas

TWI – *The Welding Institute*

FSW – *Friction Stir Welding*

ZTMA – Zona termomecanicamente afetada

ZTA – Zona termicamente afetada

MB – Material Base

LA – Lado do Avanço

LR – Lado do Recuo

SZ- *Stir Zone*

TR-zona de transição

MIG – *Metal Inert Gas*

SEM – *Scanning Electron Microscope*

PCRT-lap- ferramenta progressiva cônica roscada T-lap

PCRT-butt- ferramenta progressiva cônica roscada T-butt

1. INTRODUÇÃO

Os processos de soldadura têm evoluído ao longo dos anos face às necessidades do mercado, que por sua vez tem ficado cada vez mais exigente e competitivo. Um claro exemplo desta evolução são os processos de soldadura tais como: fricção, explosão, ultrassom entre outros.

As ligas de alumínio e magnésio têm uma vasta aplicação no sector dos transportes e na indústria, visto que, oferecem uma adaptabilidade melhor que certos materiais atualmente utilizados, tem excelentes propriedades mecânicas, para além de uma ótima relação entre peso e resistência.

Contudo, um dos grandes problemas das placas formadas por estas ligas é a sua resistência à flexão, pelo que necessitam muitas vezes da aplicação de um reforço, ou seja, uma soldadura de junta em T. No entanto, a união destas ligas pelos processos convencionais mostra-se difícil, originando problemas tais como porosidades e fissuração.

Deste modo procuram-se alternativas fiáveis para a união destas ligas, sendo uma delas a soldadura por FSW (*Friction Stir Welding*).

Este trabalho tem como principal objetivo o estudo da influência dos parâmetros de soldadura na morfologia e resistência mecânica, em particular à tração, das soldaduras heterogéneas de alumínio e magnésio e das soldaduras homogéneas de magnésio, ambas em junta T.

O trabalho proposto encontra-se dividido em cinco capítulos. Iniciando-se pela introdução, no segundo capítulo apresenta-se o estado de arte, onde se refere o processo FSW e os seus parâmetros, o fluxo de material, a sua microestrutura, bem como a soldadura FSW nas ligas de alumínio e magnésio e em juntas T. No capítulo 3 descreve-se os materiais e os métodos utilizados para a execução experimental do projeto. No capítulo 4 caracterizam-se e analisam-se os resultados obtidos, mais concretamente a morfologia, dureza e resistência à tração. Por fim, o quinto capítulo é dedicado às principais conclusões do estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Soldadura por Fricção Linear (FSW)

A soldadura por fricção linear, foi criada e patenteada em 1991 pelo *The Welding Institute-TWI* no Reino Unido. Esta técnica de soldadura tem atraído um considerável interesse, pois permite a união dos materiais no estado sólido, sendo considerada por muitos, como uma das técnicas mais promissoras para este tipo de união de materiais [1].

Inicialmente foi desenvolvida para soldar ligas de alumínio similares. Graças as suas vantagens, tais como, baixa geração de calor e poluentes, baixas distorções e tensões residuais e obtenção de soldaduras com boas propriedades mecânicas [2], esta técnica está a ser estudada para soldar outros tipos de metais, polímeros, compósitos e até mesmo materiais dissimilares.

No entanto, devido à diferença entre as propriedades físicas e mecânicas, a união de materiais dissimilares é bem mais complexa, em contrapartida, este tipo de união tem vindo a ser alvo de estudos, motivados pela vasta gama de aplicações industriais disponíveis [3].

2.1.1. Descrição do processo

Em FSW a ferramenta desempenha um papel crucial no processo de soldadura, por este motivo, esta tem sido repetidamente melhorada e aprimorada, de forma que, a qualidade da soldadura e a eficiência do processo aumentem constantemente [4].

O processo de FSW, ilustrado na Figura 2.1, executa-se através de uma ferramenta rotativa, não consumível e animada de movimento linear, constituída por um pino e uma base, que é feita penetrar na zona de união das duas placas a soldar. O calor gerado pela fricção promove a deformação plástica e o amaciamento das placas a soldar. Como resultado, o movimento da ferramenta, arrasta o material em estado plástico ao longo de toda a junta [5].

As temperaturas atingidas durante todo o processo não deverão atingir o ponto de fusão, deste modo, o processo é considerado como soldadura em estado sólido.

Durante os vários estudos realizados, notou-se que a soldadura por FSW é assimétrica, existindo um lado de avanço, onde a ferramenta empurra o material para a frente, e um lado de recuo, onde o material é arrastado para trás.

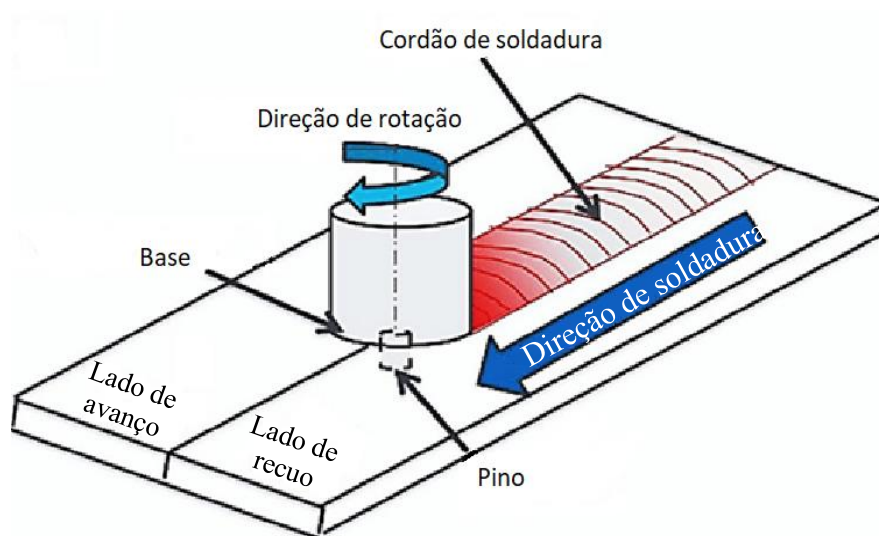


Figura 2.1-Representação esquemática do processo de FSW (adaptada de [28]).

2.1.2. Parâmetros do processo

Os principais fatores que influenciam a qualidade e a eficiência da junta durante o processo FSW são a velocidade de avanço (v), velocidade de rotação (ω), profundidade de penetração (p), o design da ferramenta e o ângulo de inclinação (α). Os parâmetros adequados diferem de acordo com o tipo de material a soldar.

A velocidade de rotação e a velocidade de avanço, ao longo da junta são considerados como parâmetros fulcrais para a consolidação das soldaduras por FSW.

Estes dois parâmetros influenciam maioritariamente a quantidade de calor gerado durante o processo, afetando as propriedades e a estrutura da soldadura. Com o aumento da velocidade de rotação da ferramenta, ocorre um aumento da quantidade de calor gerado, o que por sua vez, aumenta o fluxo plástico de material, contudo este aumento de temperatura pode ser nocivo para as propriedades mecânicas da soldadura. O aumento da velocidade de avanço aumenta a produtividade, mas reduz o calor adicionado por unidade de tempo, visto que o material fica sujeito menos tempo às altas temperaturas, por conseguinte, há uma redução do fluxo plástico de material e um aumento da probabilidade de ocorrência de defeitos.

Não menos importante, o ângulo de inclinação representa o ângulo que o eixo da ferramenta faz com a normal ao plano de trabalho. Um ângulo de inclinação da ferramenta apropriado, promove a retenção do material forjado abaixo da base da ferramenta, favorece a formação de um fluxo de material idêntico durante a soldadura e aumenta a temperatura em volta da área da ferramenta no lado de avanço da peça de trabalho [6].

Outro parâmetro igualmente importante é a penetração da ferramenta na peça de trabalho. A profundidade de penetração do pino esta relacionada com a altura do pino. Quando a profundidade de penetração é demasiado grande a base da ferramenta mergulha no material a soldar, causando a formação de rebarba, produzindo uma soldadura com forma concava. De maneira contraria quando a penetração é demasiado superficial, a base não entra em contacto com as superfícies das peças de trabalho, gerando um movimento insuficiente de material da frente do pino para a sua parte de trás, originando uma soldadura com um sulco na superfície ou um canal interno.

A ferramenta executa um papel fundamental no processo de FSW, pois influencia a geração de calor, o grau de deformação plástica do material, o fluxo dos materiais durante a soldadura e conseqüentemente as características finais da soldadura [7].

A base entra em contacto com superfície das peças a serem unidas, promovendo a geração de calor através de atrito, tornando o material plástico. Além disso tem como objetivo, impedir a expulsão do material da zona de soldadura, evitando a formação de defeitos, conhecidos como vazios.

O pino possibilita a deformação plástica e a mistura do material das peças a soldar, por meio de movimentos de rotação e translação, no decorrer da soldadura.

A utilização de uma ferramenta com características adequadas diminui a probabilidade de ocorrência de defeitos durante a soldadura.

2.1.3. Microestrutura

A microestrutura das soldaduras realizadas pelo processo FSW, tem sido alvo de diversos estudos e testes, devido às suas grandes diferenças em relação aos processos de soldadura por fusão. Em FSW, usualmente é possível identificar 3 zonas principais, como mostra na Figura 2.2, com características distintas. O *Nugget* que devido à intensa deformação plástica e ao calor gerado, origina uma zona recristalizada de grão fino e

equiaxial. A zona termomecanicamente afetada (ZTMA), próxima ao *Nugget*, caracterizada pela forte deformação plástica causada pela ferramenta, a temperatura e deformação exercidas nesta zona são inferiores às exercidas no *Nugget*, não se verificando o fenómeno de recristalização. A zona afetada termicamente (ZTA), comum com outros processos de soldadura, esta zona apenas esta sujeita a um ciclo térmico, não ocorrendo deformação plástica, durante a soldadura. Nesta zona as temperaturas são mais baixas que na ZTMA, mas continua a ter um efeito significativo na microestrutura da soldadura.

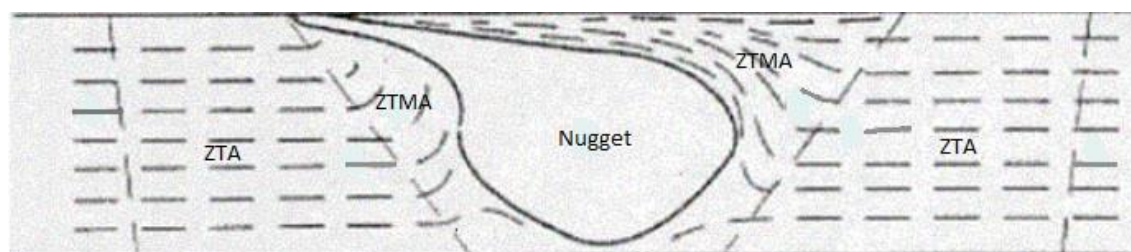


Figura 2.2-Representação esquemática das diferentes regiões microestruturais numa soldadura por FSW (adaptada de [29]).

2.1.4. Fluxo de material

Ao longo dos anos vários estudos foram feitos, para analisar o fluxo de material durante o processo de FSW. Em 1999 [8], utilizou esferas de aço, como marcadores na soldadura, mais tarde, em 2007 [9], realizaram soldaduras utilizando plasticina de variadas cores, a fim de, estudar o deslocamento do material durante o processo. Contudo a informação obtida por estes estudos não chega para explicar fenómenos específicos, tais como a diferença de contraste entre bandas [10].

Com o estudo de [8], de um modo geral, pode-se observar que o material da zona superior da peça é deslocado para zonas mais profundas da peça, ao mesmo tempo que, o material das zonas intermedias é puxado para cima. Com este estudo foi possível verificar também que o material na zona do pino e o material no lado de avanço, é deslocado com a rotação da ferramenta, depositando-se atrás da mesma. Nos sobranes casos, o material é extrudido em torno do pino na direção de rotação da ferramenta. [8] demonstrou, ainda que, a altura de deposição do material varia de acordo com a liga a ser soldada e que o material exatamente abaixo do pino, sofre pouca ação por parte do mesmo.

[11], afirmam que o fluxo de material durante o processo de FSW é bastante intrincado, dependendo de vários fatores tais como os parâmetros do processo, a geometria da ferramenta e do material a ser soldado. As características do fluxo de material são de extrema importância para obter soldaduras com elevada eficiência estrutural. Isto promove a realização de várias investigações sobre o comportamento do fluxo de materiais durante a FSW.

2.2. Soldadura por FSW em ligas alumínio e magnésio

O processo de FSW em ligas de alumínio e magnésio tem demonstrado grande importância industrial e científica, devido às propriedades e qualidade da soldadura obtida. A aplicação destas ligas oferece uma adaptabilidade melhor que certos materiais atualmente utilizados, pois possui um baixo valor de densidade, excelente propriedade de amortecimento, alta condutividade térmica, alta maquinabilidade e melhor capacidade de blindagem contra interferência eletromagnética [12]. Graças a estes fatores, estas ligas são muito desejadas por diversos setores, como automóvel, aeroespacial e marítimo. Contudo a ligação destas ligas por técnicas convencionais é uma tarefa árdua, devido à ocorrência de vários defeitos durante e após a soldadura [13]. Como a soldadura por FSW é capaz de unir os materiais sem os fundir é possível eliminar os problemas relacionados à solidificação e criar assim soldaduras sem defeitos [14].

A pensar nas diversas aplicações possíveis para esta liga, vários estudos são feitos de forma a tentar obter uma soldadura com as melhores propriedades e qualidade possível.

A seleção de parâmetros ou estratégias inadequadas de soldagem levam a vários defeitos de soldadura. Entre todos os defeitos associados a este tipo de soldadura, os mais ocorrentes são os defeitos de *kissing bond* que ocorrem devido à má agitação do material, defeitos de túnel que afetam consideravelmente as propriedades mecânicas da soldadura, defeitos como *voids*, *flash*, macro e microfissuras entre outros. Todos estes defeitos afetam negativamente as propriedades mecânicas da soldadura.

Em 2003 [15], estudaram a evolução da microestrutura e das propriedades mecânicas durante a soldadura por FSW em ligas de Mg AZ61. Com os resultados obtidos concluíram que é possível distinguir três zonas distintas na secção transversal, uma *stir zone* (SZ) com forma de pepita elíptica, uma zona fora da zona de agitação (BM) que corresponde à região

do material base que não foi afetada e a zona de transição entre as duas (TR), como mostra na Figura 2.3 (a). Na Figura 2.3 (b)-(d) são apresentadas respectivamente as micrografias das zonas “BM”, “TR” e “SZ”. Na zona do material base é possível observar grãos equiaxiais desenvolvidos com uma média de tamanho de grão de 14 μm , é possível também detetar que foram formados precipitados grosseiros nas fronteiras de grão, Figura 2.3 (b). Observando a Figura 2.3 (c) e (d), percebe-se que tanto a região de transição como a região de agitação possuem grãos com tamanho semelhante e estrutura equiaxial, formados através de recristalização durante o FSW, sendo estes menores que os grãos existentes na região do material base.

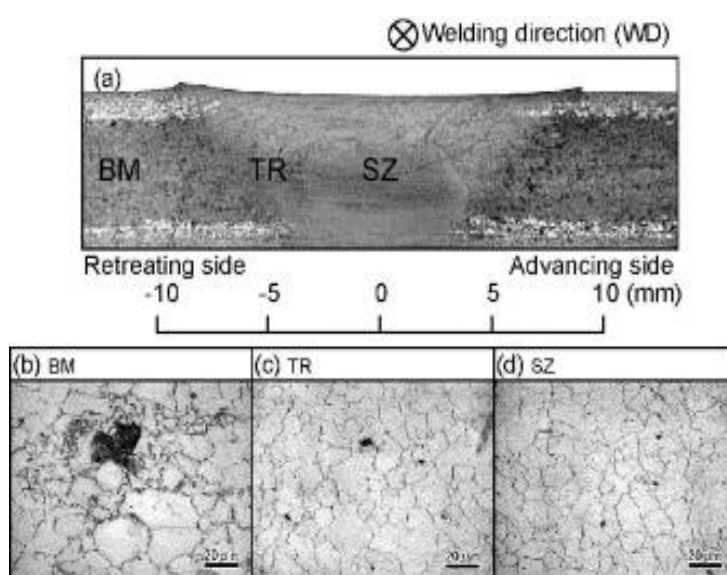


Figura 2.3-Microestrutura da secção transversal da soldadura: (a) visão geral de baixa ampliação da soldadura, (b)-(d) micrografia da região do material de base, zona de transição e zona de agitação, respectivamente.

[16], analisaram na soldadura topo a topo de uma liga de alumínio o efeito de vários parâmetros na sua morfologia e propriedades mecânicas. Concluíram que com a redução da velocidade de avanço, a geração de calor diminuiu, levando à formação de um *nugget* de maiores dimensões, e que a utilização de uma ferramenta com dimensões superiores e com uma rosca mais grossa, leva ao aumento do fluxo do material a soldar, misturando melhor os materiais, aumentando assim a resistência mecânica da soldadura.

A Figura 2.4 a) mostra variação da dureza na secção transversal de soldaduras realizadas com várias velocidades de avanço. Observa-se que ocorre uma redução da dureza para lá da zona de contato entre a ferramenta e o material e também que a zona com dureza

mínima se encontra no *nugget*. [16], concluíram também que a perda de dureza ocorre por efeito térmico e que a rotura ocorre na zona termicamente afetada. Verificaram também que durante a soldadura a velocidade de avanço não afeta a perda de dureza máxima, contudo, afeta o tamanho da zona em que ocorre a perda de dureza máxima. Uma vez que a base da ferramenta é o principal parâmetro na geração de calor, a geometria do pino não influencia na redução de dureza na zona do *nugget*.

O material base quando laminado a frio, exhibe grãos com forma alongada e fina com uma subestrutura densa, apresentando assim uma dureza superior à exibida na zona de soldadura. Na zona da soldadura ocorre recristalização, tornando os grãos equiaxiais, com baixa densidade de deslocamentos.

Na Figura 2.4 b) é possível observar que no decorrer do ensaio de tração da liga de alumínio, a deformação plástica do material ocorre principalmente na zona em que ocorre perda de dureza, ou seja, na zona do *nugget* enquanto o material base sofre pequena deformação [16].

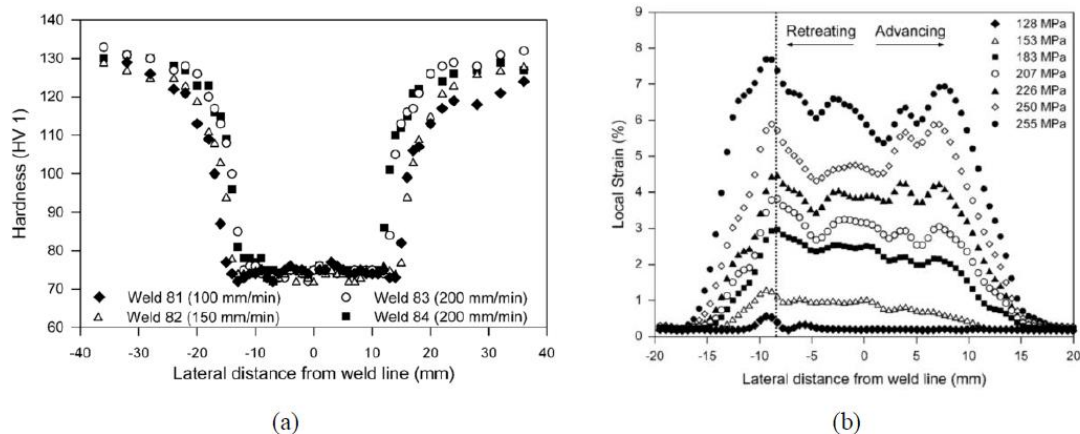


Figura 2.4-Dureza da secção transversal (a) e ensaio de tração (b) [16].

2.3. Soldadura por FSW em juntas T

A maior parte dos resultados acima abordados foram obtidos através de soldaduras em juntas de topo ou juntas sobrepostas, no entanto, as juntas T têm uma vasta aplicação na indústria naval e aeronáutica. Tipicamente este tipo de soldaduras são realizadas pelo processo MIG, contudo neste tipo de soldadura a união de materiais dissimilares é bem mais complexa, levando a uma perda de resistência e propriedades mecânicas. A soldadura por FSW de juntas T apresenta algumas dificuldades, porém é uma opção mais viável e económica que os métodos convencionais. O tipo de configuração de junta utilizado na soldadura afeta o tipo e orientação dos defeitos que se irão encontrar no final. A Figura 2.5 ilustra algumas das configurações de junta em T mais frequentemente encontradas.

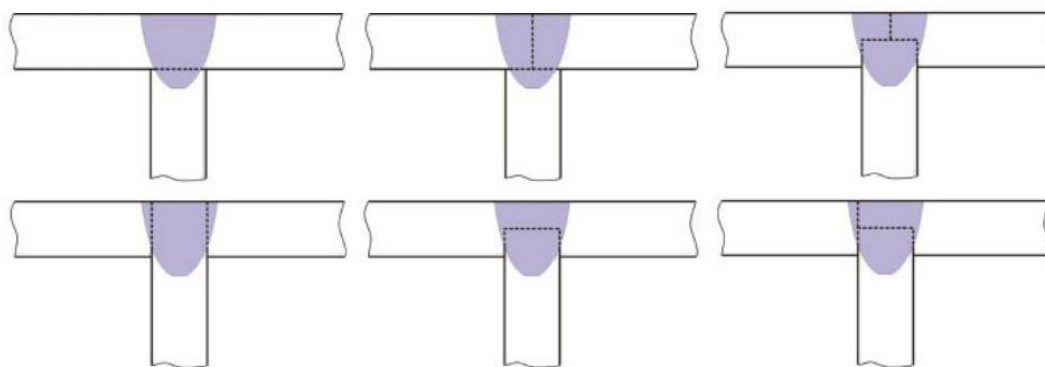


Figura 2.5-Diversas configurações de junta em T [26]).

Até à data de hoje não se encontram estudos relevantes acerca da soldadura em juntas T na liga AZ31, ainda assim, encontram-se vários estudos acerca de soldadura por FSW em juntas T noutras ligas como por exemplo ligas de alumínio.

Nas soldaduras em junta T é necessário que se formem raios de concordância entre o *skin* e o *stringer* de forma a reduzir a concentração de tensões existentes na junta, para isso é necessário extrudir material para essas zonas de concordância. O material extrudido será originário de outras zonas, pelo que será necessária uma penetração maior por parte da ferramenta sobre o material [17]. A literatura [18], recomenda a utilização de ferramentas com diâmetro da base maior para uma geração de calor superior.

As soldaduras por FSW em juntas T possuem alguns defeitos característicos, tais como defeitos de túnel, como mostra na Figura 2.6, que aparecem no lado de avanço junto à zona do raio de concordância, causados pelo baixo fluxo de material. O fluxo de material ocorre

conjuntamente na direção vertical e horizontal, contudo como o stringer esta mais afastado da base da ferramenta a geração de calor nesta zona é menor o que provoca uma diminuição do fluxo de material originando-se cavidades. Verificou-se que com a redução da velocidade de avanço relativamente à velocidade de rotação diminui a geração deste tipo de defeitos.

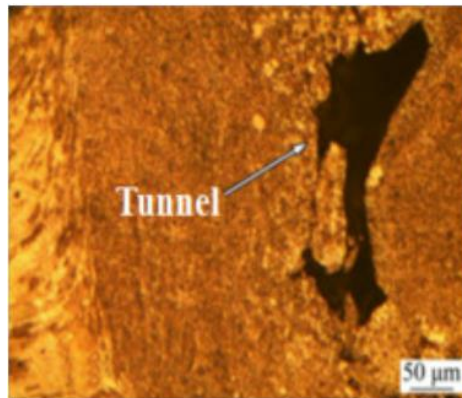


Figura 2.6-Defeito de túnel [6].

Outro tipo de defeito normalmente encontrado neste tipo de junta é o kissing bond, que se criam devido à formação de óxidos. Apesar da previa limpeza do material a soldar, a sua oxidação devido à exposição térmica antes da ação da ferramenta é irremediável. A zona de soldadura face a sua posição inicial, move-se para zonas mais baixas e laterais, formando este tipo de defeitos, estendendo-se desde a zona da interface original até à zona do raio de concordância do lado de recuo. Durante os ensaios de tração esta é a zona mais comum de ocorrência de rotura. O tamanho deste defeito acentua-se com o aumento da velocidade de avanço da ferramenta, enquanto, o aumento da velocidade de rotação faz o defeito diminuir de tamanho e mover-se mais para a zona de recuo [19].

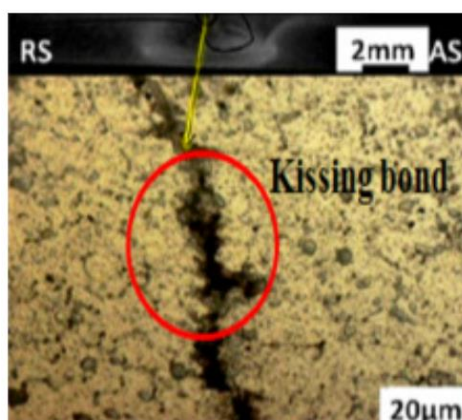


Figura 2.7-Defeito de kissing bond [6].

O fluxo de material e a deformação diminuem ao longo da espessura da chapa, reduzindo o efeito mecânico do pino da ferramenta. O fluxo vertical descendente de material é mais significativo no lado de recuo do que no lado de avanço. O calor gerado também não é uniforme em toda a secção, pois a base da ferramenta é o maior responsável pela geração de calor. Verificando-se assim um crescimento de grão menor no *stringer* do que no *skin*.

[17], concluiu que para materiais diferentes, o fluxo de material e a geração de calor também será diferente e que o aumento da velocidade de rotação aliado à diminuição da velocidade de avanço, promove a geração de defeitos devido à perda da capacidade de extrusão do material.

De acordo com [17], a utilização de um pino cónico promove uma melhor formação dos raios de concordância, bem como um fluxo vertical mais acentuado.

A soldadura por FSW de juntas T ainda necessita de mais estudos, visto que ainda é difícil realizar soldaduras em juntas T sem apresentar defeitos

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Materiais e configuração das juntas

No presente trabalho foram realizadas soldaduras heterogêneas de alumínio e magnésio e soldaduras homogêneas de magnésio, ambas em junta T. A liga de alumínio utilizada foi a 7075 e a liga de magnésio utilizada foi a AZ31.

A Figura 3.1 ilustra a micrografia do material base, com uma ampliação de 200 vezes, onde é possível observar a forma, orientação e tamanho do grão que o compõem. Apenas está ilustrada a micrografia da liga de magnésio, porque as soldaduras Al-Mg não foram sujeitas a estudo microestrutural.

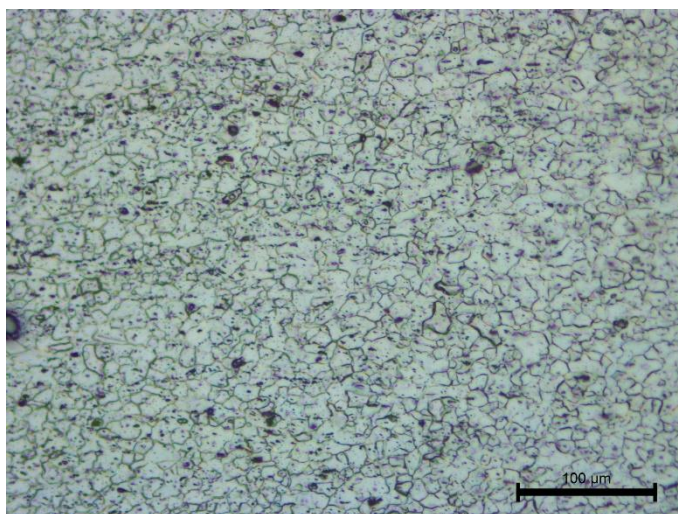


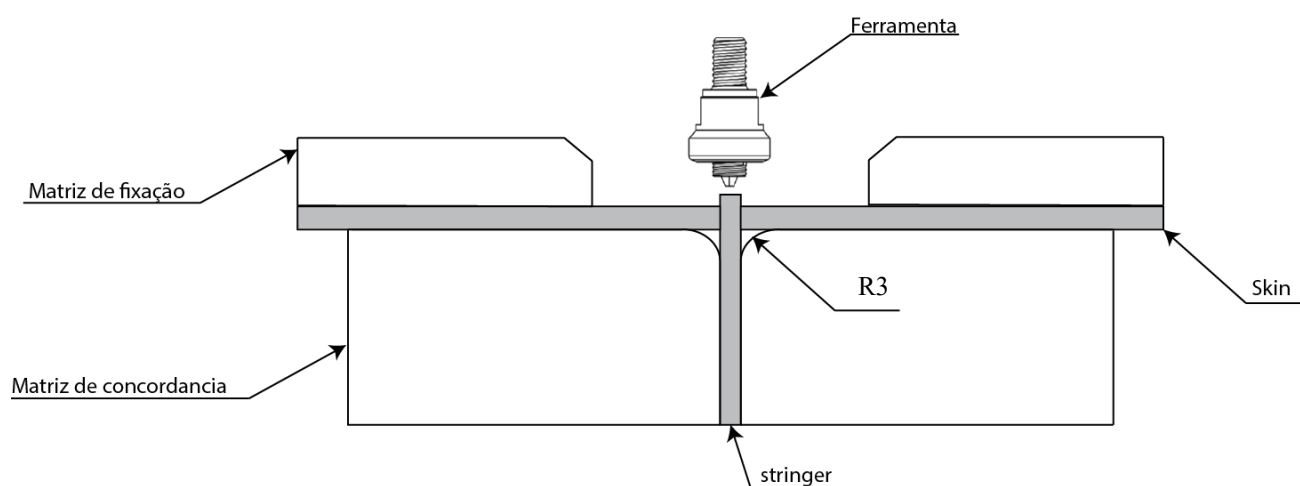
Figura 3.1- Microestrutura da liga de magnésio AZ31

Na Tabela 1 estão evidenciadas as principais propriedades mecânicas das ligas de Al-7075 e Mg-AZ31:

Tabela 1-Propriedades das ligas de alumínio e magnésio

Liga	σ_{max} [MPa]	Dureza [HV]
7075	254,8	187
AZ31	248,2	55

Na realização das soldaduras foi utilizada uma montagem, tal como mostra na Figura 3.2, de forma a garantir a fixação das chapas durante o processo e a formação dos raios de concordância.

**Figura 3.2**- Montagem experimental para a realização das soldaduras.

Durante o processo de soldadura por FSW, a pressão axial exercida pela ferramenta sobre o material, possibilita a sua extrusão para a zona dos raios de concordância, promovendo uma diminuição da espessura da chapa superior (*skin*), o que levará à diminuição da resistência mecânica da junta [11].

De modo a resolver este problema foram utilizadas duas configurações de junta, T-lap para soldaduras heterogêneas e T-butt para as soldaduras homogêneas, como ilustrado na Figura 3.2.

A Junta T-lap, Figura 3.3 a) é constituída por três chapas, um *stringer* e um *skin* ambos com 3 milímetros de espessura e uma chapa que será sobreposta ao *skin* com 1,4 milímetros de espessura. Para o *stringer* será utilizada uma liga de magnésio AZ31 enquanto que para o *skin* e a chapa de sobreposição será utilizada uma liga de alumínio 7075.

A junta T-butt, é composta por um *skin* e um *stringer*, com 3 milímetros de espessura, em que as chapas que constituem o *skin* serão colocadas lateralmente ao *stringer*, como

mostra na Figura 3.3 b). O *stringer* é saliente 1,4 milímetros acima das chapas do *skin*. Para ambas as chapas será utilizada a liga de magnésio AZ31.

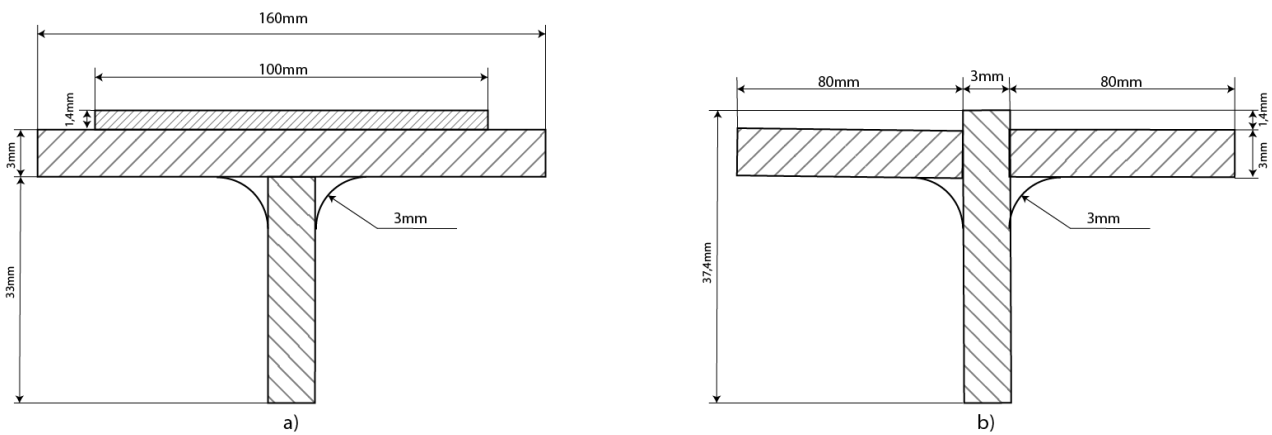


Figura 3.3-Configuração de junta T-lap (a) e T-butt (b).

3.2. Geometria da ferramenta

As soldaduras foram realizadas utilizando duas ferramentas, uma progressiva cônica roscada T-lap (PCRT-lap) e outra progressiva cônica roscada T-butt (PCRT-butt), como mostra na figura 3.4. Estas ferramentas foram fabricadas a partir de aço para ferramentas de trabalho a quente – H13 e posteriormente temperadas e revenidas de forma a obter uma dureza superficial de 50 HRC. A ferramenta PCRT-lap apresenta um pino com um comprimento total de 6,7 mm enquanto, a PCRT-butt apresenta um pino com 5,7 mm de comprimento, ambas possuem um *shoulder* com 18 mm de diâmetro e uma concavidade com ângulo de 5°. Estas ferramentas foram selecionadas com base nos resultados obtidos em ensaios anteriores.

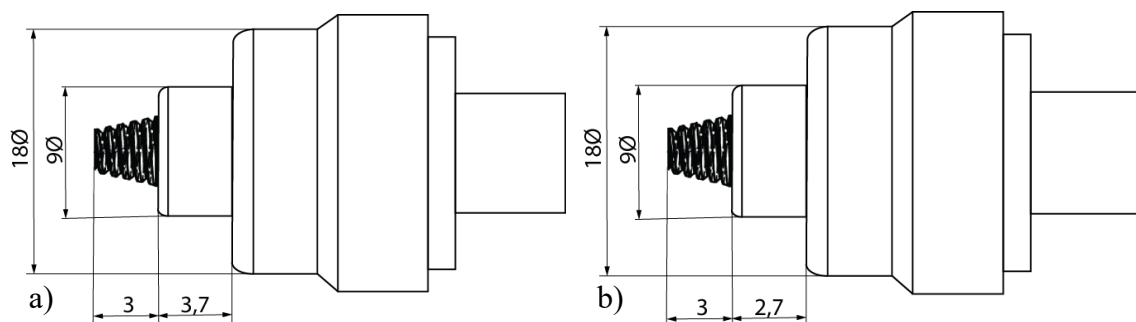


Figura 3.4-Esquema das ferramentas utilizadas: a) ferramenta progressiva piramidal para T-lap e b) ferramenta progressiva cônica roscada para T-butt.

3.3. Execução das soldaduras

As soldaduras na configuração T-lap foram realizadas utilizando placas de alumínio e magnésio com 3 mm de espessura, com dimensões de 160x330 mm (*skin*), 33x330 mm (*stringer*) respetivamente e placas de alumínio com 1,4 mm de espessura e dimensões de 100x330mm. Para a realização das soldaduras na configuração T-butt foram utilizadas placas de magnésio com 3 mm de espessura e dimensões 160x330 mm (*skin*) e 37.4x330 mm (*stringer*).

As soldaduras foram efetuadas com auxílio de uma fresadora universal Cincinnati Milacron 207Mk.

Para cada soldadura foram estabelecidos os valores de velocidade de rotação, velocidade de avanço, ângulo de inclinação da ferramenta e profundidade de penetração, tendo como base os resultados obtidos em ensaios anteriores, para soldadura homogénea de Al [20]. Os parâmetros utilizados em cada soldadura encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2-Parâmetros do processo utilizados.

Soldadura	V. rotação [rpm]	V. avanço [mm/min]	Penetração [mm]	Angulo de inclinação	Configuração da junta	Ferramenta	Material		
							Skin	Stringer	Chapa de topo
D-870-60-6,9	870	60	6,9	0°	T-Lap	PCRT-lap	Al	Mg	Al
D-870-60-7	870	60	7	3°	T-Lap	PCRT-lap	Al	Mg	Al
D-870-40-7	870	40	7	3°	T-Lap	PCRT-lap	Al	Mg	Al
S-1500-90-7,1	1500	90	7,1	2°	T-butt	PCRT-butt	Mg	Mg	-
S-870-90-7,1	870	90	7,1	3°	T-butt	PCRT-butt	Mg	Mg	-
S-500-90-7,1	500	90	7,1	3°	T-butt	PCRT-butt	Mg	Mg	-

As series de soldaduras foram designadas através de uma nomenclatura constituída por quatro grupos de caracteres. No primeiro grupo de caracteres utilizou-se um D ou um S, referentes aos materiais com que as soldaduras foram realizadas, D para dissimilares e S para similares. Os restantes grupos de caracteres fazem alusão aos parâmetros com que as soldaduras foram realizadas, mais propriamente, velocidade de rotação, velocidade de avanço, e profundidade de penetração.

No final as soldaduras obtidas foram cortadas com recurso a uma serra de fita, em amostras para a análise morfológica, microestrutural e mecânica.

3.4. Análise morfológica

A análise morfológica foi efetuada em duas frentes: a morfologia da superfície e a morfologia da secção transversal das soldaduras. Para a primeira, utilizou-se inspeção visual e inspeção com estereomicroscópio (lupa) e registo fotográfico. Para a segunda, as amostras foram polidas com recurso a lixas com granulometrias decrescentes (P320 a P2500) e posteriormente com suspensão de diamante de 6 e 3 μm . Por forma a revelar a sua microestrutura, as amostras referentes às soldaduras homogéneas de magnésio, foram sujeitas a ataque químico, através de uma solução composta por ácido acético, ácido pícrico, água e etanol. Após os ataques químicos realizou-se a análise morfológica com a utilização do microscópio ótico Leica DM4000 M LED, com ampliações entre 12,5 e 1000 vezes.

3.5. Análise da microdureza

O perfil de dureza Vickers de cada amostra foi medido com auxílio da máquina HMV-G da SHIMADZU, aplicando uma carga de 0,2 kg durante 15 segundos. O perfil horizontal de dureza foi analisado a meia espessura do *skin*, com espaçamento entre indentações de 1mm. O perfil de dureza vertical foi medido no centro da soldadura. Acima do ponto central o espaçamento entre pontos foi de 0,5 mm e a baixo do ponto central o espaçamento foi de 1mm, conforme ilustrado na Figura 3.5.

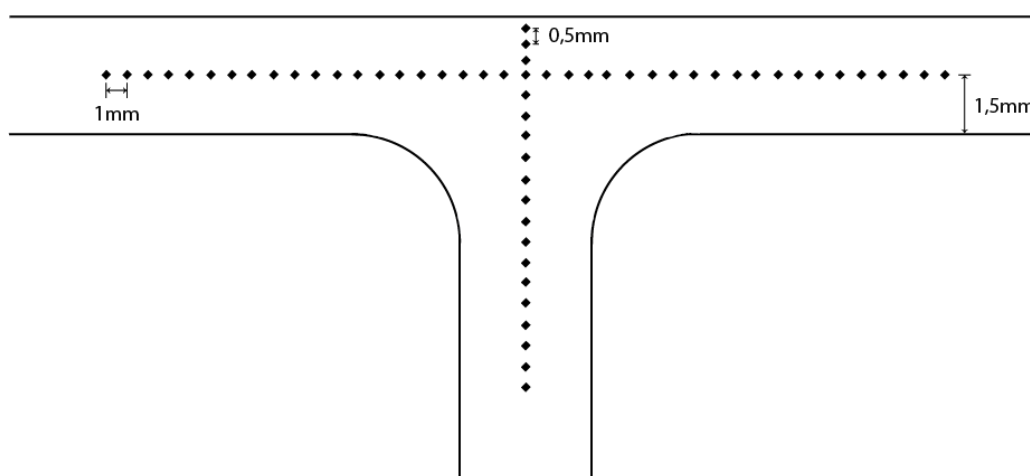


Figura 3.5-Esquema da análise de microdureza.

3.6. Comportamento à tração

Com o objetivo de analisar a resistência mecânica do material base e das soldaduras efetuadas, foram realizados ensaios de tração aos provetes extraídos do material base e das soldaduras. Para cada ligação, foram removidos 3 provetes de tração, perpendicularmente à direção de soldadura, tendo sido maquinados de acordo com a norma ASTM E8/E8M para ensaio de materiais metálicos [21] a preparação dos provetes para análise por correlação digital de imagem foi efetuada de acordo com os procedimentos descritos em [22]. Os ensaios foram realizados numa máquina SHIMADZU AGSX-100 kN, com velocidades de 5 mm/min para o material base e de 3 mm/min para os provetes provenientes das soldaduras. As deformações locais foram medidas recorrendo ao sistema ótico ARAMIS da GOM-Optical Measuring Techniques. Os ensaios foram realizados como ilustrado na Figura 3.6. Posteriormente, os resultados obtidos foram tratados e analisados recorrendo ao Excel, obtendo-se as curvas da tensão-deformação.

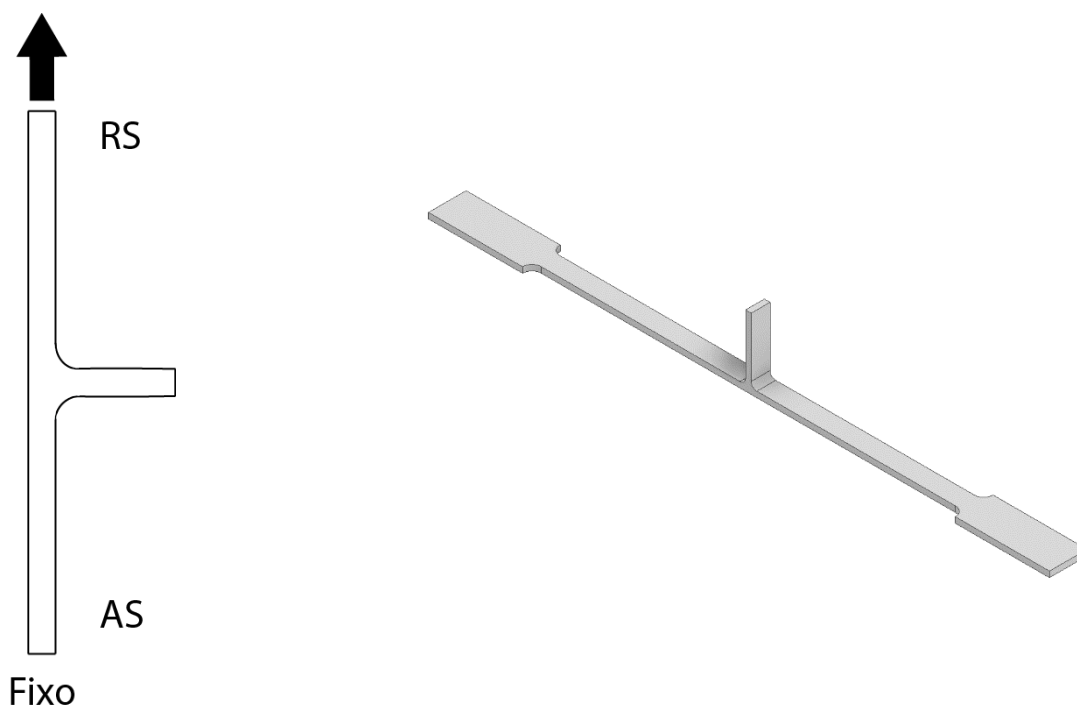


Figure 3.6-Esquema do ensaio de tração e do provete.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos e sua análise, com destaque na morfologia, microdureza e resistência à tração das juntas soldadas.

4.1. Morfologia das soldaduras

Nesta secção, vão ser analisadas as macro e micrografias de todas as soldaduras realizadas. Recordando, como anteriormente referido, foram realizadas soldaduras com dois tipos de configuração diferentes, T-lap utilizando chapas de alumínio e magnésio e T-butt utilizando apenas chapas de magnésio. É importante também referir que todas as macrografias apresentadas, apresentam o lado de recuo do lado direito e o lado de avanço do lado esquerdo.

4.1.1. Soldadura alumínio magnésio

Nesta secção descrevem-se os aspetos morfológicos das soldaduras D-870-60-6,9, D-870-60-7 e D-870-40-7, realizadas na configuração T-lap com a ferramenta PCRT-lap.

Observa-se pela Figura 4.1 que todas as soldaduras Al-Mg realizadas apresentam defeitos na sua superfície, mais propriamente defeitos de túnel e também a formação de rebarba, que de acordo com [23] a geração de calor excessivo provoca uma plastificação excessiva de material, o que faz com que o material saia da zona da base da ferramenta, criando um défice de material atrás do pino e como este material é insuficiente para preencher a soldadura, ocorre a formação de defeitos de túnel e a formação de rebarba. Outro aspeto relevante é penetração da ferramenta que pode não estar corretamente ajustada levando à formação de defeitos na superfície.

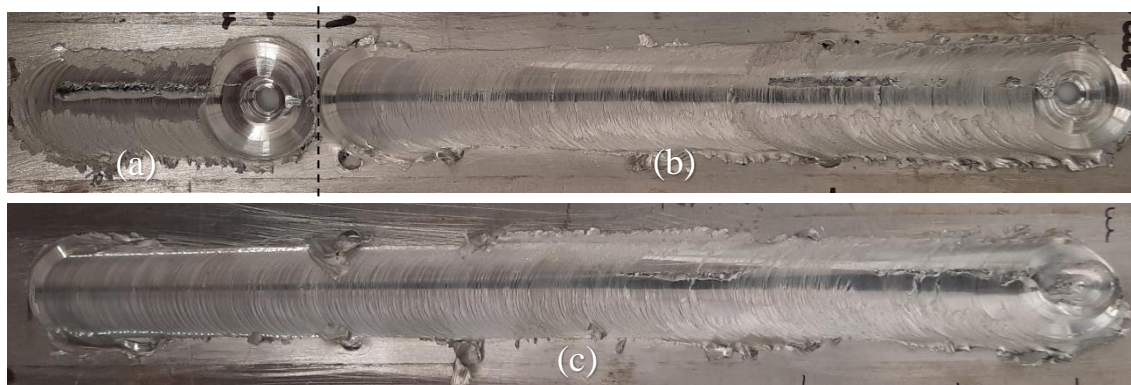


Figura 4.1-Aspetto superficial das soldaduras FSW Al-Mg: (a) D-870-60-6,9, (b) D-870-60-7 e (c) D-870-40-7.

Através das macrografias destas soldaduras, Figura 4.2, é possível verificar que em nenhuma das soldaduras Al-Mg realizadas ocorreu soldadura do *skin* ao *stringer*. É evidente também que a chapa colocada sobre o *skin* e o próprio *skin* não ficaram devidamente soldadas, devido a defeitos no fluxo, associados à baixa capacidade de interação entre os dois fluxos. As macrografias mostram também que ambas as soldaduras apresentam defeitos de túnel e vazios na zona do *nugget* que segundo [6] podem ocorrer devido a velocidade de rotação da ferramenta ser muito baixa, o ângulo de inclinação da ferramenta ser inadequado ou a pressão exercida pela ferramenta durante a soldadura ser inadequada. No entanto é possível observar que com o aumento da velocidade de avanço, ocorre um aumento do número de defeitos no centro da soldadura.

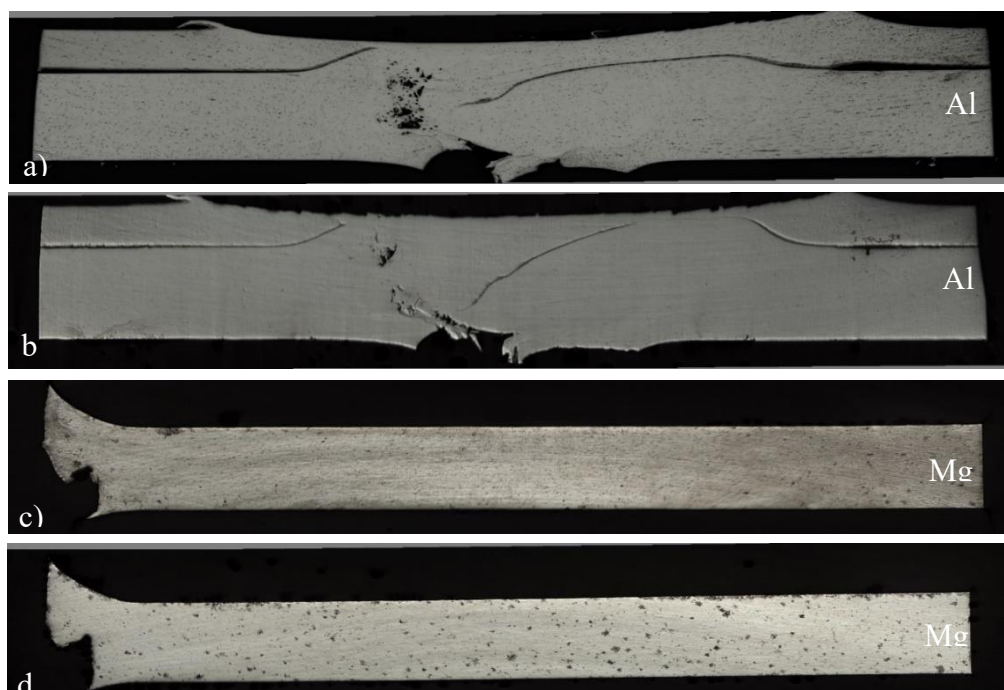


Figura 4.2- Macroestrutura da secção transversal das soldaduras: a) *skin* da D-870-60-7, b) *skin* da D-870-40-7, c) *stringer* da D-870-60-7 e d) *stringer* da D-870-40-7.

4.1.2. Soldadura magnésio

A Figura 4.3 mostra o aspeto superficial das soldaduras S-1500-90-7,1, S-870-90-7,1 e S-500-90-7,1, realizada na configuração T-butt, utilizando uma ferramenta PCRT-butt. Como é visível, não são detetáveis defeitos na superfície de nenhuma das soldaduras, apresentando uma superfície com estrias regulares. Contudo houve uma formação de rebarba significativa. Observa-se também que com a diminuição da velocidade de rotação a qualidade do acabamento superficial da soldadura aumenta.

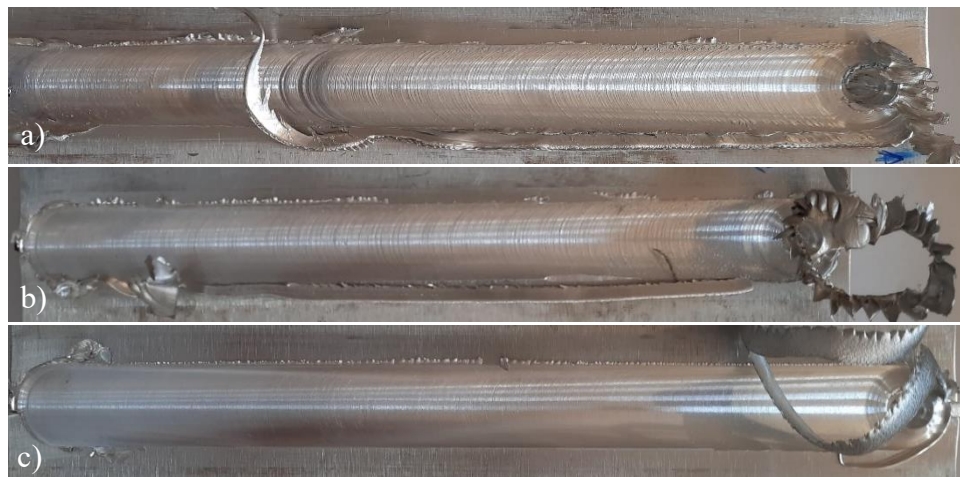


Figura 4.3-Aspeto superficial das soldaduras FSW de Mg: S-1500-90-7,1 (a), S-870-90-7,1 (b) e S-500-90-7,1 (c).

Observando as macrografias das três soldaduras representadas nas Figuras 4.4 (a), 4.5 (a) e 4.6 (a) é possível verificar que a soldadura S-1500-90-7,1 apresenta um defeito na zona abaixo do *nugget* (zona circulada a vermelho). Este defeito foi gerado devido à incrustação de alumínio proveniente de resíduos presentes na ferramenta, resultantes de uma má limpeza da mesma após os ensaios anteriores. Enquanto as restantes soldaduras não apresentam nenhum defeito na sua secção transversal. Através da configuração utilizada percebe-se que os raios de concordância foram perfeitamente formados e não houve perda de espessura no *skin* em nenhuma das soldaduras.

As macrografias das três soldaduras não apresentam grandes diferenças entre elas, sendo possível observar, em todas, a presença de dois fluxos, um criado pela base da ferramenta e outro criado pelo pino, marcados nas Figuras pelas letras f1 e f2 e delimitados pela linha a tracejado.

A microestrutura da zona de agitação resulta de condições termomecânicas complexas, em que os materiais envolvidos estão a temperaturas e taxas de deformação que variam com a localização da pepita. As Figuras 4.4 (b) 4.5 (b) e 4.6 (b) mostram que houve um grande refinamento de grão em toda esta zona quando comparada com o material base. Após a soldadura por FSW os grãos irregulares, como mostra no material base, tornaram-se equiaxiais e sofreram recristalização na zona de agitação e na zona de transição entre a zona afetada termomecânicamente e a zona de agitação. Na Figura 4.5 (c) e 4.6 (c) é possível ver a zona de transição entre o material base e a zona de agitação, onde se percebe a clara diminuição do tamanho de grão.

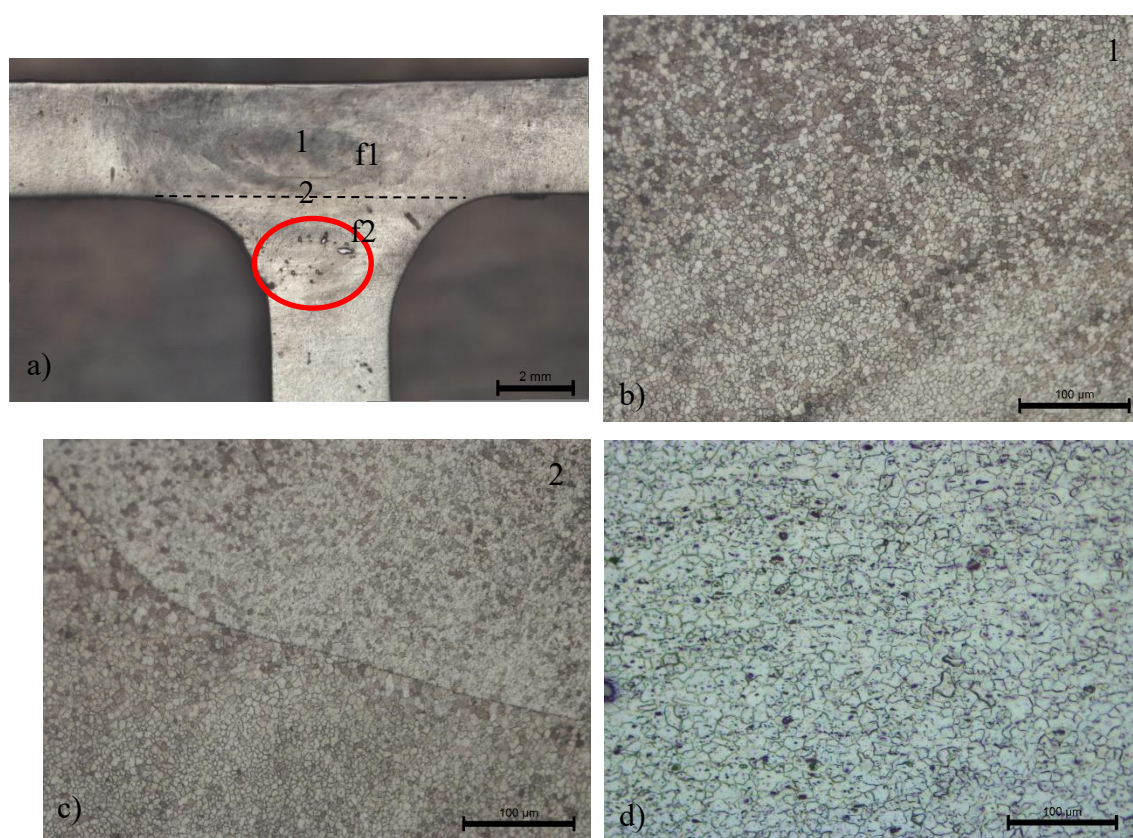


Figura 4.4-Zona de agitação da soldadura S-1500-90-7,1: (a) secção transversal; (b-c) microestrutura das zonas 1,2; material base (d).

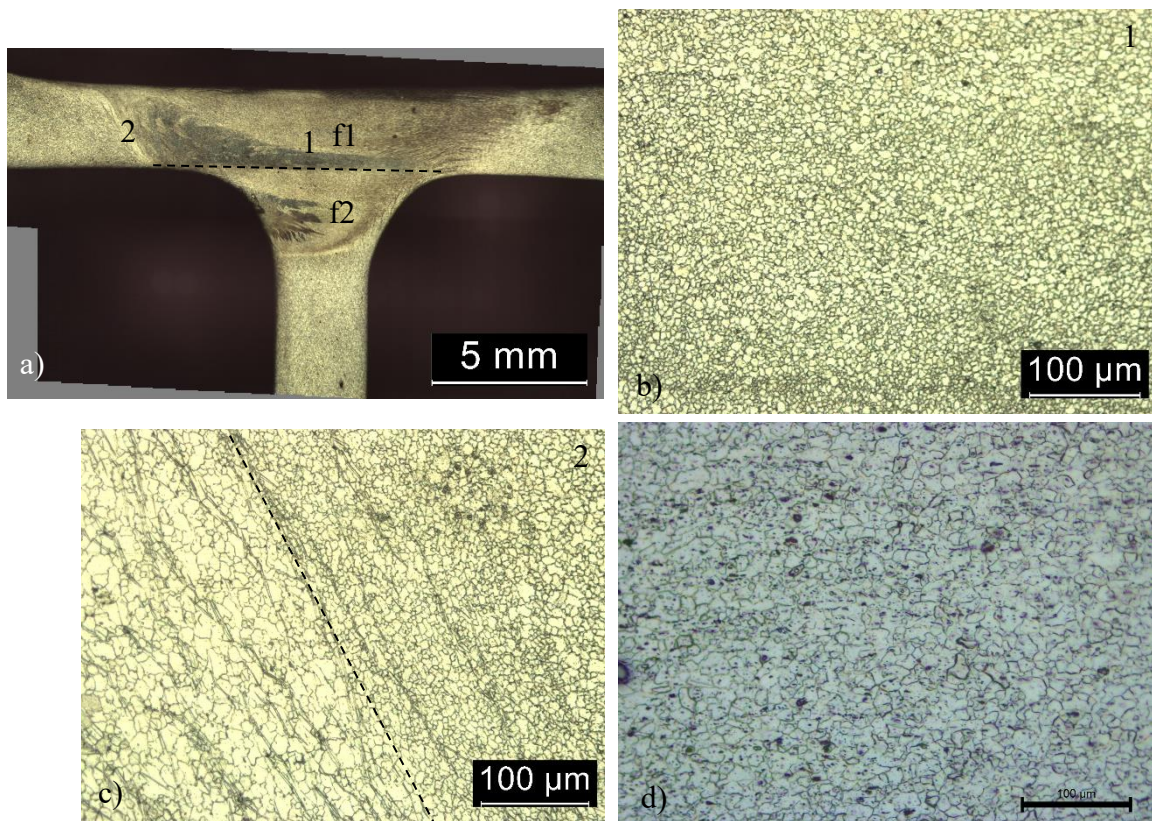


Figura 4.5-Zona de agitação da soldadura S-870-90-7,1: (a) secção transversal; (b-c) microestrutura das zonas 1,2; material base (d).

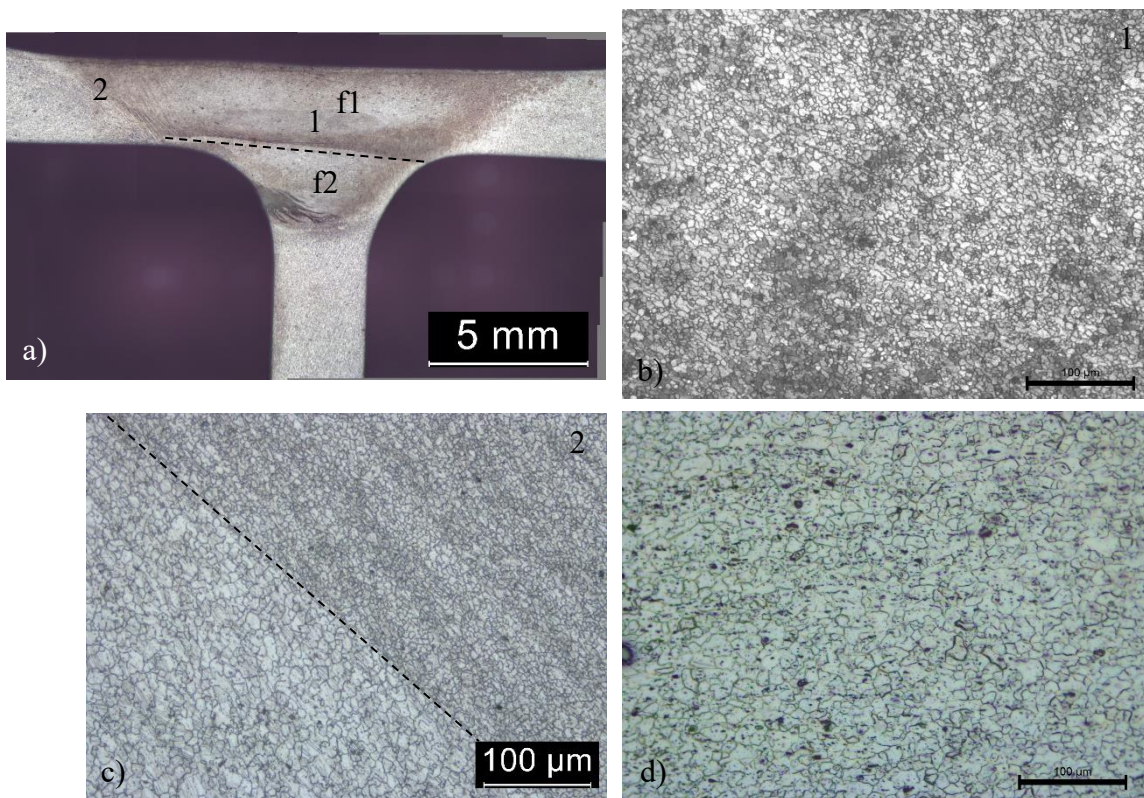


Figura 4.6-Zona de agitação da soldadura S-500-90-7,1: (a) secção transversal; (b-c) microestrutura das zonas 1,2; material base (d).

O aumento da velocidade de rotação promove a geração de calor, que por sua vez, faz aumentar o tamanho de grão, contudo através da Figura 4.7 conseguimos observar que isto não acontece. A soldadura S-1500-90-7,1 possui um tamanho de grão inferior às outras duas soldaduras o que não era expectável. Uma justificação possível para este caso é a taxa de deformação ser de tal forma superior que compensa o efeito do aumento de temperatura. Ou seja, o grão fica muito mais pequeno e o aumento de temperatura que sofre não permite que se torne tão grosseiro como nos restantes. Para as soldaduras S-870-90-7,1 e S-500-90-7,1 verifica-se que com o aumento velocidade de rotação há um aumento do tamanho de grão. Na Figura 4.7 é possível observar também as zonas de fluxo de material, que são bandas onde a deformação foi de tal forma superior que levou a um aumento da formação de grãos [24].

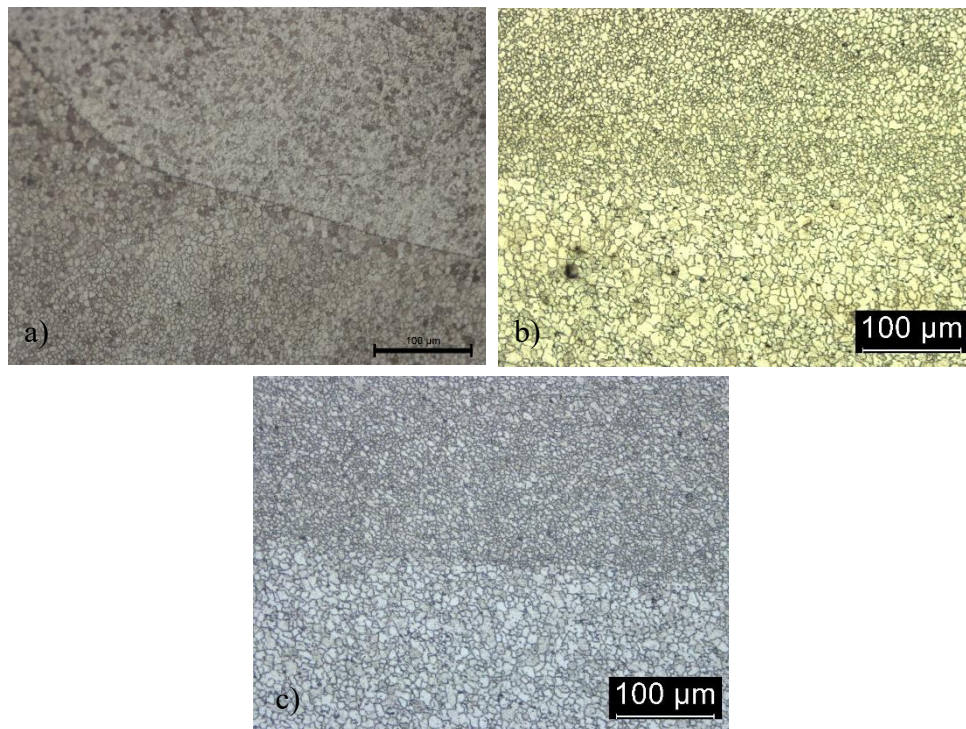


Figura 4.7-Microestrutura das soldaduras: S-1500-90-7,1 a), S-870-90-7,1 b) e S-500-90-7,1 c).

4.2. Microdureza

Nesta secção, podem-se observar os perfis de dureza, na direção horizontal e vertical, das amostras recolhidas. A dureza média do material base foi obtida, tendo sido registados valores de 187,5 HV para a liga de alumínio 7075 e 55,07 HV para a liga de magnésio AZ31, com um desvio padrão de 4,25 HV e 2,19 HV respetivamente. Foram analisadas as amostras D-870-60-7, D-870-40-7, S-1500-90-7,1, S-870-90-7,1 e S-500-90-7,1.

Nas amostras analisadas foi possível observar uma variação significativa da dureza face ao material base.

A Figura 4.8 mostra o perfil horizontal de dureza das amostras D-870-60-7 e D-870-40-7, obtidas por FSW entre ligas Al-Mg, sendo a primeira soldada com uma velocidade de avanço de 60 mm/min e a segunda a 40 mm/min, mantendo-se iguais os restantes parâmetros. Nestas amostras não se observa uma variação significativa da dureza entre as mesmas, contudo, existe uma grande variação relativamente à dureza do material base. Como é possível observar, verifica-se uma perda significativa da dureza em todo o *skin*, pois, como se trata de uma liga 7000 endurecida por precipitação, ocorre coalescência dos precipitados na zona afetada pelo calor. Outros fatores que podem levar à diminuição dos valores de dureza são, existir algum magnésio na ZTMA, cuja dureza é muito inferior à do Al e a presença de uma baixa fração volumétrica de compostos intermetálicos nesta zona [25].

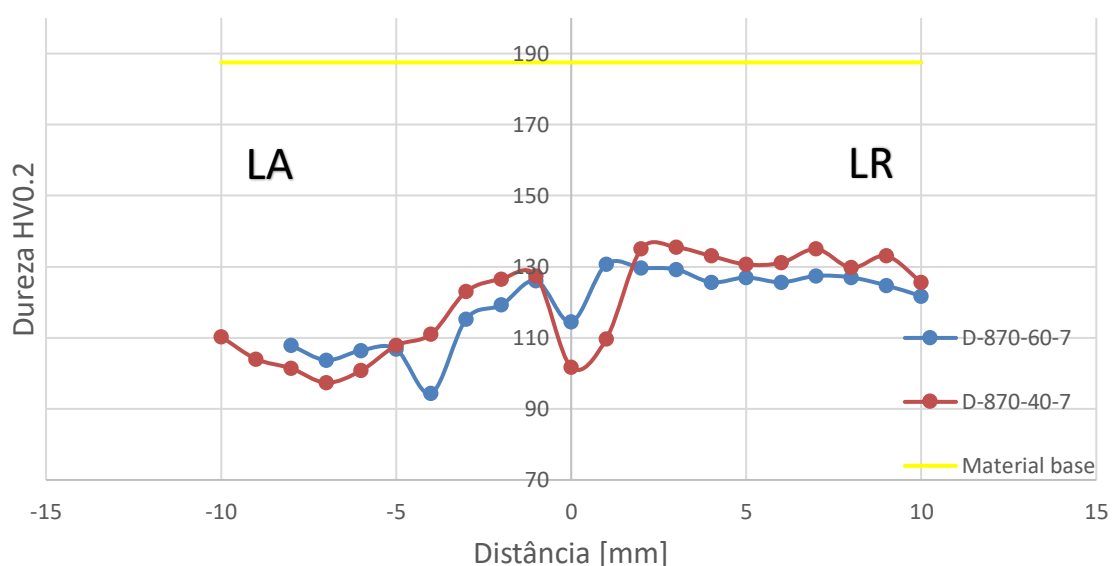


Figura 4.8-Perfil horizontal de dureza HV das amostras obtidas por FSW de ligas de Al-Mg.

A figura 4.9 mostra os perfis verticais de dureza para as soldaduras Al-Mg, para os quais não se observa uma variação significativa da dureza.

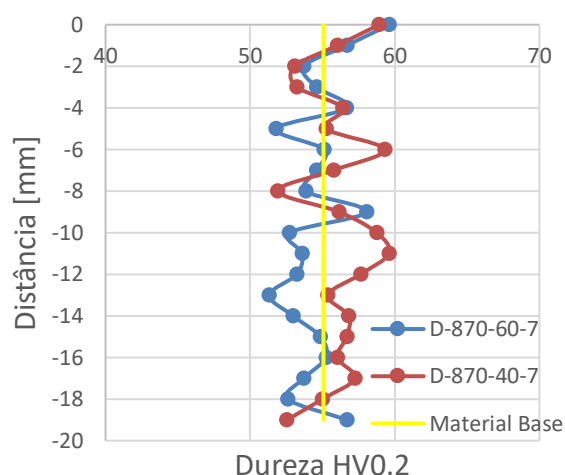


Figura 4.9-Perfil vertical de dureza HV das amostras obtidas por FSW entre ligas Al-Mg.

A Figura 4.10 mostra o perfil horizontal de dureza HV das amostras S-1500-90-7,1, S-870-90-7,1 e S-500-90-7,1 obtidas por FSW entre ligas de magnésio similares. É possível observar, um aumento de dureza na zona termomecanicamente afetada, maioritariamente no lado de avanço da amostra, face ao material base, sendo a zona abrangida por este aumento maior para valores de velocidade de rotação superiores. Como refere [6], o aumento da dureza deve-se à recristalização e consequente diminuição do tamanho de grão, devido às altas taxas de deformação do material nessa zona.

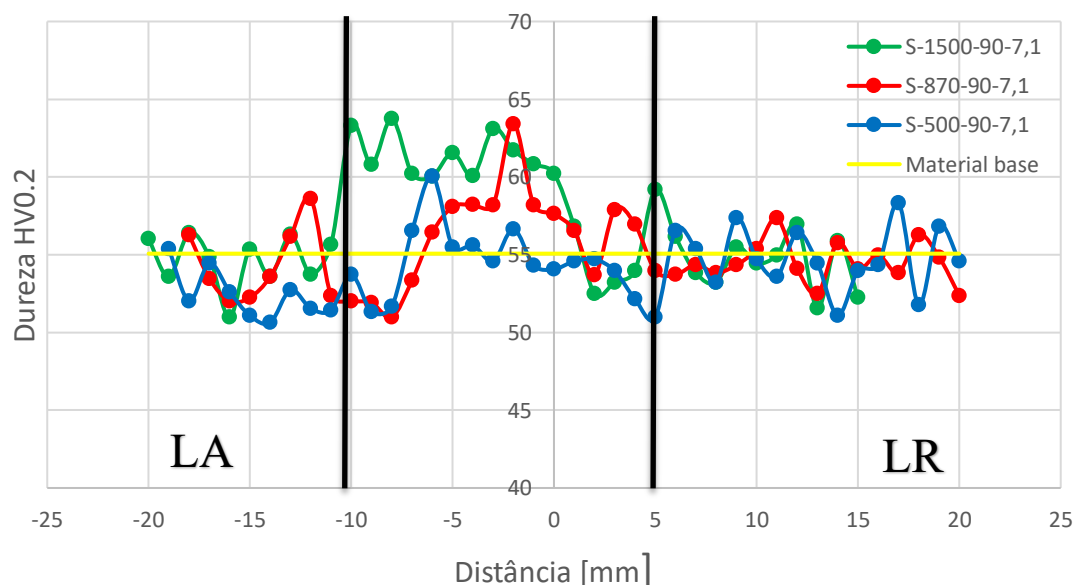


Figura 4.10-Perfil horizontal de dureza HV das amostras obtidas por FSW de ligas de magnésio similares.

A figura 4.11 mostra os perfis verticais de dureza para as soldaduras entre ligas de magnésio similares, observando-se um aumento da dureza na zona do *nugget*.

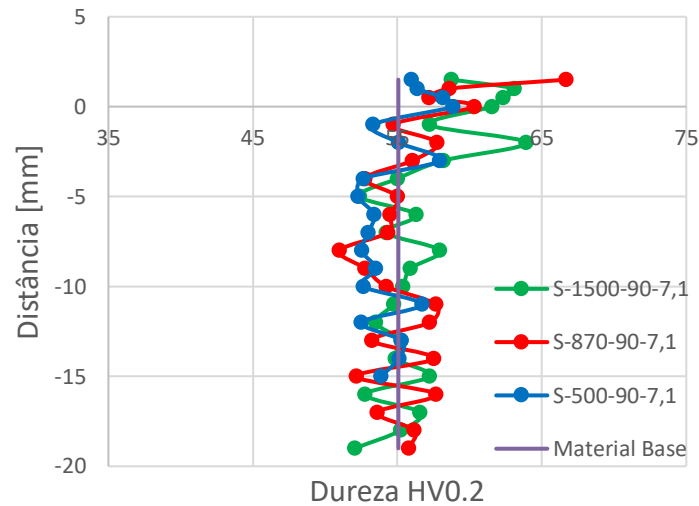


Figura 4.11-Perfil vertical de dureza HV das amostras obtidas por FSW entre ligas Al-Mg (a) e ligas de magnésio similares (b).

Assim, percebe-se que, nas condições estudadas, ocorre variação significativa da dureza, durante o processo de soldadura FSW. É possível também notar que, nas amostras obtidas por FSW entre ligas de magnésio similares, obtiveram-se valores de dureza superiores para velocidades de rotação mais elevadas, pois, a alta velocidade de rotação criou uma taxa de deformação de tal forma superior que compensou o efeito do aumento da temperatura, ou seja, o grão fica muito mais pequeno, como pode ser visto na Figura 4.7 e o aumento de temperatura que sofre não permite que se torne tão grosseiro como nas restantes soldaduras.

4.3. Comportamento à tração

4.3.1. Magnésio

Nesta secção serão analisados apenas os resultados obtidos dos ensaios de tração das soldaduras homogéneas de magnésio, visto que, nas soldaduras heterogéneas de alumínio e magnésio o *skin* e o *stringer* não ficaram devidamente soldados o que impossibilitou o teste à tração das mesmas.

Para cada soldadura em estudo, realizaram-se 3 ensaios de tração longitudinais. Ensaíram-se amostras das séries S-1500-90-7,1, S-870-90-7,1 e S-500-90-7,1 em que a diferença entre elas é a velocidade de rotação utilizada na sua fabricação. Realizaram-se também 3 ensaios de tração para caracterizar o material base.

A partir da Figura 4.12, observa-se que a região de rotura nas amostras da soldadura S-1500-90-7,1 é sempre do mesmo lado, enquanto, nas outras duas soldaduras a região de rotura variam, sendo que a rotura em todas as soldaduras, ocorre na zona termomecanicamente afetada.



Figura 4.12-Zona de rotura de todos os provetes.

A Tabela 3 resume os valores de tensões máximas das soldaduras realizadas e do material base bem como a eficiência da junta soldada de cada soldadura. Fazendo a análise dos melhores resultados de cada soldadura obtida, concluímos que todas as soldaduras possuem uma tensão máxima bastante inferior à obtida no material base, a soldadura que apresenta melhor resultado é a S-1500-90-7,1 com uma eficiência de junta de 78,9%. Já tanto a serie S-870-90-7,1 como a S-500-90-7,1 apresentam pior comportamento à tração, cerca de 69,3% e 55,4% de eficiência respectivamente. Tendo em conta que não se verificou uma variação significativa na dureza entre as soldaduras e como anteriormente referido um aumento da velocidade de rotação provoca um aumento de geração de calor levando à diminuição da resistência mecânica, não é fácil explicar o motivo pelo qual a serie S-1500-90-7,1 mostra melhores resultados. Surgem duas explicações possíveis, primeiro, baixas velocidades de rotação promovem uma má mistura do material criando microdefeitos não observáveis e na segunda hipótese, o acabamento superficial na soldadura S-1500-90-7,1 ser de superior qualidade, dificultando a inicialização da fenda.

Tabela 3-Tensão máxima e eficiência da junta de cada soldadura.

amostra	σ_{max} [MPa]	$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{max,base}}$ [%]
Mat. Base	248,2	-
S-1500-90-7,1-a)	196	78,9
S-1500-90-7,1-b)	158,2	63,7
S-1500-90-7,1-c)	150	60,4
S-870-90-7,1-a)	138,9	56
S-870-90-7,1-b)	140,3	56,5
S-870-90-7,1-c)	172	69,3
S-500-90-7,1-a)	134,3	54,1
S-500-90-7,1-b)	137,6	55,4
S-500-90-7,1-c)	135,9	54,7

Na Figura 4.13 esta representada a distribuição do campo de deformações locais dos vários provetes, mais propriamente das séries S-1500-90-7,1, S-870-90-7,1 e S-500-90-7,1 respectivamente, ensaiados à tração. O mapa de cores, foi obtido com utilização do sistema ótico ARAMIS. Os resultados ilustrados mostram que existem zonas do mapa de

deformações, que apresenta uma maior magnitude de deformações, estando essas zonas marcadas a vermelho. É possível observar que é na zona termomecanicamente afetada que se concentra a deformação de cada provete, zona pelo qual ocorreu a rotura dos mesmos. Observa-se também que com o aumento da velocidade de rotação à um aumento da deformação ao longo do skin.

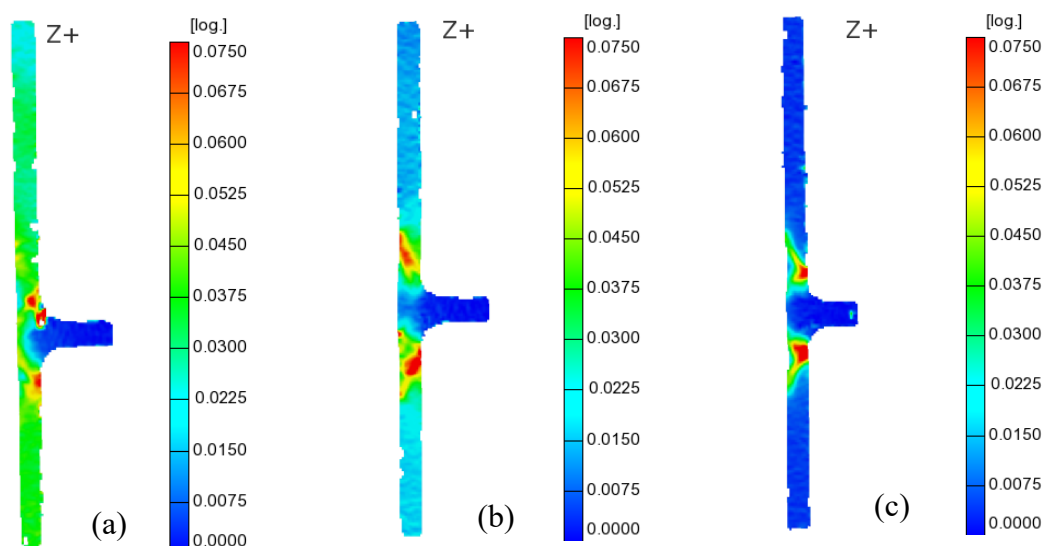


Figura 4.13-Mapeamento das deformações locais, no instante próximo da rotura, nas soldaduras S-1500-90-7,1 (a), S-870-90-7,1 (b) e S-500-90-7,1 (c).

4.3.2. Fractografia

As zonas de fratura de cada provete foram sujeitas a análise por SEM.

A Figura 4.14 mostra as fractografias dos provetes de tração das soldaduras S-1500-90-7,1, S-870-90-7,1 e S-500-90-7,1. Em todos os provetes a rotura ocorreu na zona termomecanicamente afetada. Na Figura 4.14 (a) e (b) foi observada coalescência de vazios indicando que nestas regiões ocorreu fratura dúctil, ou seja, em um modo de falha estático com deformação plástica intensa, contendo *dimples*. Por fim na Figura 4.14 (c) observa-se fratura por quasi-clivagem caracterizada pela presença de facetas com aspeto de degraus correspondentes aos planos cristalográficos [26], [27].

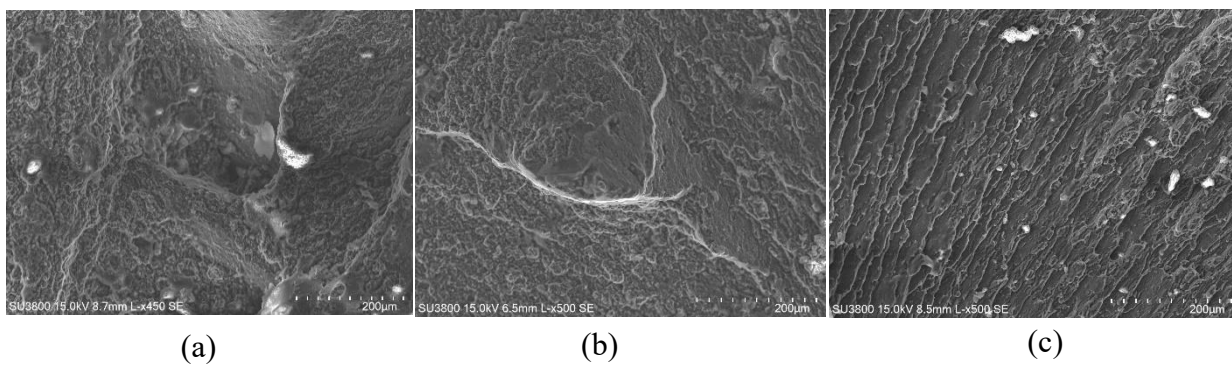


Figura 4.14-Fractografias das soldaduras S-1500-90-7,1 (a), S-870-90-7,1 (b) e S-500-90-7,1 (c).

5. CONCLUSÕES

A primeira conclusão que se retira deste trabalho é que é possível produzir soldaduras por FSW em junta T, em ligas de magnésio AZ31, sem defeitos. No entanto, nas soldaduras heterogêneas de alumínio e magnésio não houve união do *stringer* e do *skin* produzindo soldaduras com defeitos.

Através da montagem e configuração de junta utilizada foi possível obter soldaduras com bons raios de concordância sem ocorrer redução de espessura do *skin*.

Os perfis de dureza do *skin* indicam que se verificou uma perda de dureza nas soldaduras heterogêneas de alumínio e magnésio, enquanto, nas soldaduras homogêneas de magnésio ocorreu um aumento de dureza. Nos perfis de dureza do *stringer* das soldaduras heterogêneas não se observou variação significativa de dureza, porém nas soldaduras homogêneas ocorreu um aumento de dureza na zona do *nugget*.

Em todos os provetes ensaiados à tração, a rotura ocorreu na zona termomecanicamente afetada. De todos os testes realizados, verificam-se melhores resultados na soldadura S-1500-90-7,1.

De uma forma geral os resultados obtidos são melhores na soldadura S-1500-90-7,1 realizada com velocidade de rotação superior às outras soldaduras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. K. Mugada and K. Adepu, “Influence of ridges shoulder with polygonal pins on material flow and friction stir weld characteristics of 6082 aluminum alloy,” *J Manuf Process*, vol. 32, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.03.034.
- [2] S. Eslami, T. Ramos, P. J. Tavares, and P. M. G. P. Moreira, “Effect of Friction Stir Welding Parameters with Newly Developed Tool for Lap Joint of Dissimilar Polymers,” in *Procedia Engineering*, 2015, vol. 114. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.059.
- [3] A. Boşneag, M. A. Constantin, E. Nițu, and M. Iordache, “Friction Stir Welding of three dissimilar aluminium alloy used in aeronautics industry,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 252, no. 1. doi: 10.1088/1757-899X/252/1/012041.
- [4] A. R. S. Essa, M. M. Z. Ahmed, A. K. Y. A. Mohamed, and A. E. El-Nikhaily, “An analytical model of heat generation for eccentric cylindrical pin in friction stir welding,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 5, no. 3, 2016, doi: 10.1016/j.jmrt.2015.11.009.
- [5] V. Gupta *et al.*, “Linking process and structure in the friction stir scribe joining of dissimilar materials: A computational approach with experimental support,” *J Manuf Process*, vol. 32, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.03.030.
- [6] V. P. Singh, S. K. Patel, A. Ranjan, and B. Kuriachen, “Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium–magnesium alloys: A critical review,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 3, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.01.008.
- [7] A. Banik, B. Saha Roy, J. Deb Barma, and S. C. Saha, “An experimental investigation of torque and force generation for varying tool tilt angles and their effects on microstructure and mechanical properties: Friction stir welding of AA 6061-T6,” *J Manuf Process*, vol. 31, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.11.030.
- [8] K. Colligan, “Material flow behavior during friction stir welding of aluminum,” *Welding Journal (Miami, Fla)*, vol. 78, no. 7, 1999.
- [9] B. C. Liechty and B. W. Webb, “The use of plasticine as an analog to explore material flow in friction stir welding,” *J Mater Process Technol*, vol. 184, no. 1–3, 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.10.049.
- [10] A. Tongne, C. Desrayaud, M. Jahazi, and E. Feulvarch, “On material flow in Friction Stir Welded Al alloys,” *J Mater Process Technol*, vol. 239, 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.08.030.
- [11] 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, 2010, doi: 10.1179/136217109X12537145658733.
- [12] P. Sevel and V. Jaiganesh, “Effect of Tool Shoulder Diameter to Plate Thickness Ratio on Mechanical Properties and Nugget Zone Characteristics During FSW of Dissimilar Mg Alloys,” *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 68, 2015, doi: 10.1007/s12666-015-0602-0.
- [13] L. Liu and C. Dong, “Gas tungsten-arc filler welding of AZ31 magnesium alloy,” *Mater Lett*, vol. 60, no. 17–18, 2006, doi: 10.1016/j.matlet.2005.12.120.

- [14] R. Nandan, T. DebRoy, and H. K. D. H. Bhadeshia, "Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties," *Progress in Materials Science*, vol. 53, no. 6. 2008. doi: 10.1016/j.pmatsci.2008.05.001.
- [15] S. H. C. Park, Y. S. Sato, and H. Kokawa, "Effect of micro-texture on fracture location in friction stir weld of Mg alloy AZ61 during tensile test," *Scr Mater*, vol. 49, no. 2, 2003, doi: 10.1016/S1359-6462(03)00210-0.
- [16] M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss, and P. J. Withers, "Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds," *Acta Mater*, vol. 51, no. 16, 2003, doi: 10.1016/S1359-6454(03)00319-7.
- [17] L. Fratini, G. Buffa, F. Micari, and R. Shivpuri, "On the material flow in FSW of T-joints: Influence of geometrical and technological parameters," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 44, no. 5–6, 2009, doi: 10.1007/s00170-008-1836-3.
- [18] F. Acerra, G. Buffa, L. Fratini, and G. Troiano, "On the FSW of AA2024-T4 and AA7075-T6 T-joints: An industrial case study," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 48, no. 9–12, 2010, doi: 10.1007/s00170-009-2344-9.
- [19] L. Cui, X. Yang, Y. Xie, X. Hou, and Y. Song, "Process parameter influence on defects and tensile properties of friction stir welded T-joints on AA6061-T4 sheets," *Mater Des*, vol. 51, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.04.013.
- [20] N. Manuel, D. Beltrão, I. Galvão, R. M. Leal, J. D. Costa, and A. Loureiro, "Influence of tool geometry and process parameters on torque, temperature, and quality of friction stir welds in dissimilar al alloys," *Materials*, vol. 14, no. 20, 2021, doi: 10.3390/ma14206020.
- [21] I. Mecausta, "Norma ASTM E8/E8M – ingmecausta," *Norma ASTM E8/E8M*, 2015.
- [22] C. Leitão, I. Galvão, R. M. Leal, and D. M. Rodrigues, "Determination of local constitutive properties of aluminium friction stir welds using digital image correlation," *Mater Des*, vol. 33, no. 1, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.07.009.
- [23] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Materials Science and Engineering R: Reports*, vol. 50, no. 1–2. 2005. doi: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
- [24] N. Afrin, D. L. Chen, X. Cao, and M. Jahazi, "Microstructure and tensile properties of friction stir welded AZ31B magnesium alloy," *Materials Science and Engineering A*, vol. 472, no. 1–2, 2008, doi: 10.1016/j.msea.2007.03.018.
- [25] L. Liu, D. Ren, and F. Liu, "A review of dissimilar welding techniques for magnesium alloys to aluminum alloys," *Materials*, vol. 7, no. 5. 2014. doi: 10.3390/ma7053735.
- [26] S. M. O. Tavares, R. A. S. Castro, V. Richter-Trummer, P. Vilaça, P. M. G. P. Moreira, and P. M. S. T. de Castro, "Friction stir welding of T-joints with dissimilar aluminium alloys: Mechanical joint characterisation," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 15, no. 4, 2010, doi: 10.1179/136217109X12562846839114.
- [27] N. Manuel, J. M. Costa, and A. Loureiro, "Effect of Material Properties and Process Parameters on Morphology and Strength of Friction-Stir-Welded Dissimilar T-Joints," *J Mater Eng Perform*, vol. 28, no. 8, 2019, doi: 10.1007/s11665-019-04240-7.
- [28] M. S. M. Isa *et al.*, "Recent research progress in friction stir welding of aluminium and copper dissimilar joint: a review," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15. 2021. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.09.037.

- [29] P. L. THREADGILL, “Friction Stir Welding – The State of Art,” *TWI. Rep. n 678*, 1999.