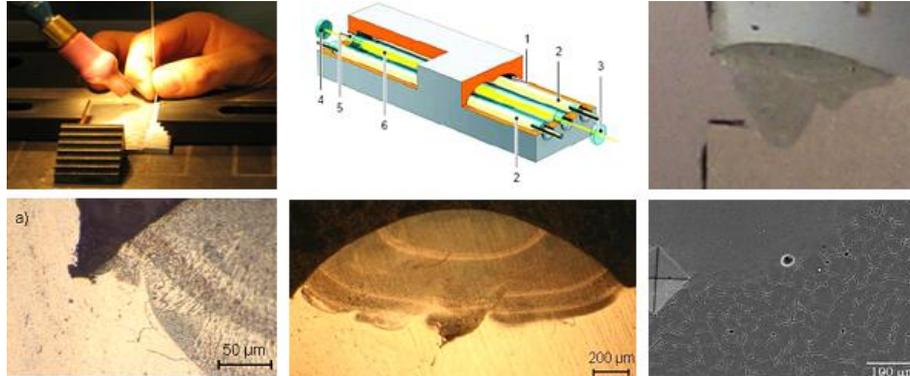




INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa



**SOLDADURA DE LIGAS DISSIMILARES DE ALUMÍNIO COM
MATERIAL DE ADIÇÃO
LASER PULSADO DE ND:YAG**

Luís Filipe Amaro Pinto

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Júri

Presidente: Professor Doutor Pedro Miguel dos Santos Vilaça da Silva

Orientador: Professora Doutora Maria Luísa Coutinho Gomes de Almeida

Co-Orientador: Professora Doutora Rosa Maria Mendes Miranda

Vogal: Professor Doutor Nuno Miguel Carvalho Pedrosa

Setembro de 2008

*Aos meus pais, Lurdes e Alcindo
E a ti Cinderela*

AGRADECIMENTOS

À professora Luísa Coutinho agradeço a possibilidade de realizar esta dissertação e de me ter orientado através dos seus conhecimentos, ao longo dos vários meses de trabalho, demonstrando sempre apoio e disponibilidade.

À professora Rosa Miranda agradeço todo o conhecimento transmitido nos domínios da engenharia dos materiais e mecânica e a disponibilidade e simpatia sempre demonstrada ao longo deste projecto.

Ao Eng.º Phill Carr que possibilitou a execução deste trabalho através da sua procura contínua de conhecimento, servindo-se dessa mais-valia num mercado global em constante expansão. A todos os seus colaboradores na empresa Carr's Welding Technologies Ltd. agradeço a simpatia e disponibilidade com que nos acolheram.

À professora Inês Pires pelas facilidades concedidas na utilização do laboratório e fornecimento de todo o material necessário para a execução das análises metalográficas.

A todos os colegas e amigos que encontrei nesta escola de conhecimento e de vida que é o Instituto Superior Técnico, um obrigado a todos eles e em especial ao Ivo, Miguel e André por todas as horas de estudo e de diversão partilhadas.

Quero expressar o meu sincero agradecimento ao meu colega e amigo Bernardo Borges o apoio e ajuda nas horas difíceis e companhia ao longo de todo o projecto.

A todos os meus amigos que me ajudaram a crescer como pessoa, gostaria de expressar o meu agradecimento pela amizade entre eles a grande amiga ao longo de vários anos Mara Campos e o grupo de amigos com quem partilho muitos momentos especiais Pedro, Ricardo, Vera, Vânia, Marta e Inês.

Um especial agradecimento à Helena pelo trabalho de revisão da tese e pelo apoio e afecto nos momentos mais difíceis e pela compreensão pelos momentos que deixei de poder estar com ela para realizar este projecto.

Aos meus pais quero prestar o mais profundo dos agradecimentos por todo o amor e apoio incondicional concedido ao longo de todos estes anos e que esta dissertação seja o concretizar das esperanças e sonhos sempre incutidos na minha pessoa.

Ao meu irmão Pedro por todos os momentos partilhados na infância e agora como confidente e amigo, o meu obrigado. E claro à pequena Margarida, a alegria da família.

RESUMO

As ligas de alumínio são materiais com enorme potencialidade devido à sua elevada resistência e baixo peso. No entanto, é um material que apresenta elevados problemas de soldadura de juntas dissimilares, daí a necessidade de recurso a material de adição.

Neste trabalho procedeu-se à soldadura de ligas dissimilares de alumínio da série 6xxx e da série 5xxx com 5xxx (principais elementos de liga Al, Mg e Si), com adição manual de fio. Estas ligas têm especial aplicação na indústria aeronáutica, militar e informática.

As soldaduras foram efectuadas com laser Nd:YAG de potência máxima pulsada de 5 kW, testando-se as ligas de adição 4047, 4047A, 4043 e 5356, em diferentes combinações de materiais base. Este trabalho de investigação visou a selecção do fio de adição que melhores resultados apresente na soldadura de ligas dissimilares de alumínio. A qualidade das soldaduras foi testada através de análises macrográficas e micrográficas. Procedeu-se também à análise por microscopia de varrimento e à medição dos perfis de dureza nas ligações.

Os resultados indicam que com materiais de adição com baixos teores de magnésio e elevado teor de silício obtêm-se soldaduras de qualidade, no entanto, deve-se assegurar a resistência mecânica para a aplicação pretendida.

Concluiu-se, para os materiais base estudados, que o fio de adição 4047 é o que permite obter maior qualidade, em cordões de soldadura de juntas dissimilares das séries 6xxx e 5xxx.

PALAVRAS-CHAVE

Soldadura laser pulsado de Nd:YAG

Material de adição

Ligas dissimilares de alumínio

Análise Metalográfica

Microscopia de varrimento – SEM

ABSTRACT

The aluminium alloys are materials with great potential because of its high strength and low weight. However, the welding of dissimilar aluminium alloys is difficult in autogeneous welding, due to these alloys are welding with filler material.

The present work focus on welding dissimilar 6xxx series, and 5xxx with 6xxx series (the main components of these alloys are Al, Mg and Si), with filler wire. These alloys have particular application in the aerospace, military and information technology industries.

A Nd:YAG laser, with a maximum pulsed power in PW mode of 5 kW was used to perform the welds. Fillers wires 4047, 4047A, 4043 and 5356 were tested for the different combinations of base materials. This research aimed at the selection of the filler wire that presents better performance in welding dissimilar Al alloys. The quality of welds was tested by macro graphic and microstructure analysis. Scanning electron microscope and hardness tests were also performed.

The results indicate that with filler wires with compositions with low magnesium and high silicon contents it is easier to achieve good quality welds though attention needs to be payed to the required mechanical to assure the adequate service performance of the part.

For the base materials studied, it is possible to conclude that the filler wire 4047 presented the best results in welding of dissimilar aluminium alloys series 6xxx and 5xxx.

KEY-WORDS

Welding with pulsed Nd:YAG Laser

Filler wire

Dissimilar aluminum alloys

Metallographic Analysis

Scanning Electron Microscope – SEM

ÍNDICE

| | |
|--|-------------|
| Agradecimentos | i |
| Resumo | ii |
| Palavras-Chave | ii |
| Abstract | iii |
| Key-Words | iii |
| Índice | iv |
| Índice de Figuras | viii |
| Índice de Tabelas | xii |
| Lista de Abreviaturas | xiv |
| 1 Objectivos e Motivação | 1 |
| 2 Estrutura da Tese | 2 |
| 3 Estado da Arte | 3 |
| 3.1 Alumínio e suas Ligas | 3 |
| 3.1.1 Classificação das ligas de Alumínio | 4 |
| 3.1.1.1 Ligas de alumínio para trabalho mecânico | 4 |
| 3.1.1.2 Ligas de fundição | 4 |
| 3.1.2 Nomenclatura dos tratamentos térmicos | 5 |
| 3.1.2.1 Tipo de ligas encruadas | 5 |
| 3.1.2.2 Designação dos tratamentos térmicos | 6 |
| 3.1.3 Propriedades Ligas | 6 |
| 3.1.3.1 Série 4xxx | 6 |
| 3.1.3.2 Série 5xxx | 7 |
| 3.1.3.3 Série 6xxx | 7 |
| 3.1.3.4 Ligas fundidas Alumínio – silício – cobre/magnésio (série 3xx.x) | 7 |
| 3.2 Processos de Ligação de Alumínios | 7 |
| 3.2.1 Soldadura por TIG | 8 |
| 3.2.2 Soldadura por MIG | 8 |
| 3.2.3 Soldadura por Fricção Linear | 9 |
| 3.3 Radiação Laser | 9 |
| 3.3.1 Princípio laser | 9 |
| 3.3.2 Propriedades do feixe laser | 10 |
| 3.4 Laser de Nd:YAG | 12 |
| 3.5 Soldadura de alumínio por Laser Nd:YAG | 14 |
| 3.5.1 Componentes de um sistema laser | 15 |
| 3.5.1.1 Laser | 15 |
| 3.5.1.2 Lentes de focagem | 15 |
| 3.5.1.3 Estação de trabalho | 16 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.5.1.4 | Dispositivos de segurança | 16 |
| 3.5.2 | Parâmetros Laser | 16 |
| 3.5.2.1 | Diâmetro do ponto focal | 16 |
| 3.5.2.2 | Duração do pulso | 17 |
| 3.5.2.3 | Potência de pulso..... | 17 |
| 3.5.2.4 | Forma de pulso | 17 |
| 3.5.2.5 | Densidade de potência..... | 17 |
| 3.5.2.6 | Frequência de pulso..... | 17 |
| 3.5.2.7 | Sobreposição de pulsos | 17 |
| 3.5.2.8 | Velocidade de soldadura..... | 17 |
| 3.5.3 | Soldadura laser Nd:YAG em modo pulsado | 18 |
| 3.5.4 | Soldadura laser Nd:YAG com material de adição..... | 18 |
| 3.6 | Problemas de soldadura de alumínio com laser Nd:YAG..... | 19 |
| 3.6.1 | Qualidade | 19 |
| 3.6.1.1 | Defeitos internos de soldadura | 20 |
| 3.6.1.2 | Defeitos externos e seus efeitos | 20 |
| 3.6.2 | Porosidades..... | 21 |
| 3.6.2.1 | Porosidade "fina" induzida pelo hidrogénio | 21 |
| 3.6.2.2 | Porosidade devida a variações de forma e tamanho do keyhole | 22 |
| 3.6.2.3 | Porosidade de dimensões elevadas, localizada tipicamente no fundo do keyhole | 22 |
| 3.6.3 | Fissuração a quente | 22 |
| 3.6.4 | Amaciamento da ZAC..... | 23 |
| 3.6.5 | Acções correctivas..... | 24 |
| 4 | Procedimento Experimental | 25 |
| 4.1 | Introdução | 25 |
| 4.2 | Equipamento utilizado | 26 |
| 4.2.1 | Estações de trabalho | 27 |
| 4.3 | Procedimento de execução das soldaduras | 29 |
| 4.4 | Ensaio de Caracterização..... | 29 |
| 4.4.1 | Análise visual..... | 30 |
| 4.4.2 | Análise de Líquidos Penetrantes | 30 |
| 4.4.3 | Análise Metalográfica | 30 |
| 4.4.4 | Microscopia de varrimento – SEM | 30 |
| 4.4.5 | Ensaio de dureza | 30 |
| 5 | Análise de Resultados..... | 31 |
| 5.1 | Soldadura – Liga LM 25 com 6061 | 31 |
| 5.1.1 | Material e suas características | 31 |
| 5.1.1.1 | Propriedades material base..... | 31 |
| 5.1.1.2 | Material de adição..... | 32 |
| 5.1.2 | Configuração da Junta..... | 33 |

| | | |
|----------|--|----|
| 5.1.3 | Designação das amostras | 33 |
| 5.1.4 | Parâmetros de Soldadura | 34 |
| 5.1.4.1 | Velocidade de soldadura | 34 |
| 5.1.5 | Análise Visual | 36 |
| 5.1.6 | Análise de Líquidos Penetrantes | 36 |
| 5.1.7 | Análise de resultados | 37 |
| 5.1.8 | Análise Metalográfica | 37 |
| 5.1.8.1 | Análise Macrográfica | 37 |
| 5.1.8.2 | Análise Micrográfica | 39 |
| 5.1.9 | Análise de resultados | 42 |
| 5.1.10 | Microscopia de varrimento – SEM | 43 |
| 5.1.10.1 | Análise Micrográfica – SEM | 44 |
| 5.1.11 | Ensaio de dureza | 45 |
| 5.1.12 | Análise de resultados | 45 |
| 5.2 | Soldadura – Ligas 6063 com 6082 | 47 |
| 5.2.1 | Material e suas características | 47 |
| 5.2.1.1 | Propriedades material base | 48 |
| 5.2.1.2 | Material de adição | 48 |
| 5.2.2 | Configuração da Junta | 49 |
| 5.2.3 | Designação das amostras | 50 |
| 5.2.4 | Fixação das peças | 51 |
| 5.2.5 | Parâmetros de Soldadura | 51 |
| 5.2.6 | Análise Visual | 52 |
| 5.2.7 | Análise de resultados | 54 |
| 5.2.8 | Análise Metalográfica | 55 |
| 5.2.8.1 | Análise Macrográfica | 55 |
| 5.2.8.2 | Análise Micrográfica | 58 |
| 5.2.9 | Análise de resultados | 65 |
| 5.2.10 | Microscopia de varrimento – SEM | 66 |
| 5.2.10.1 | Análise Micrográfica – SEM | 66 |
| 5.2.11 | Ensaio de dureza | 67 |
| 5.2.12 | Análise Visual (Peça pretendida) | 70 |
| 5.2.13 | Líquidos Penetrantes (Peça pretendida) | 70 |
| 5.3 | Soldadura – Liga 6060 com 5154 ou 5754 | 71 |
| 5.3.1 | Material e suas características | 71 |
| 5.3.1.1 | Propriedades material base | 71 |
| 5.3.1.2 | Material de adição | 72 |
| 5.3.2 | Parâmetros de Soldadura | 72 |
| 5.3.3 | Configuração da Junta | 73 |
| 5.3.4 | Análise Visual | 73 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 5.3.5 | Análise de resultados | 74 |
| 5.3.6 | Análise Metalográfica | 74 |
| 5.3.6.1 | Análise Macrográfica | 74 |
| 5.3.6.2 | Análise Micrográfica | 75 |
| 5.3.7 | Análise de resultados | 78 |
| 5.3.8 | Microscopia de varrimento – SEM | 78 |
| 5.3.8.1 | Análise Micrográfica - SEM | 79 |
| 5.3.9 | Ensaio de dureza | 80 |
| 5.3.10 | Análise de resultados | 80 |
| 6 | Discussão de Resultados | 82 |
| 6.1 | Introdução | 82 |
| 6.2 | Soldadura – Liga LM 25 com 6061 | 82 |
| 6.3 | Soldadura – Liga 6063 com 6082..... | 83 |
| 6.4 | Soldadura – Liga 6060 com 5154 ou 5754 | 84 |
| 7 | Conclusões | 85 |
| 7.1 | Aplicação da liga de adição 4047 e 4047A | 85 |
| 7.2 | Aplicação da liga de adição 4043..... | 85 |
| 7.3 | Limitações das ligas de adição da série 4xxx | 85 |
| 7.4 | Aplicação da liga de adição 5356..... | 86 |
| 7.5 | Resumo conclusões..... | 86 |
| 7.6 | Propostas de trabalho futuro | 87 |
| 8 | Referências Bibliográficas..... | 88 |
| A. | Anexos | 1 |
| A.1 | Procedimento para a realização da análise metalográfica | 1 |
| A.2 | Especificações microscópio de varrimento – SEM | 2 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 3.1 – Excitação (esquerda) emissão espontânea (centro) emissão estimulada (direita) [16] | 9 |
| Figura 3.2 – Propriedades da luz: 1. Luz incandescente 2. Laser [16]..... | 10 |
| Figura 3.3 – Design e componentes do feixe laser [16] | 11 |
| Figura 3.4 – Constituição típica de um laser cilíndrico de Nd:YAG [16] | 13 |
| Figura 3.5 – Laser cilíndrico pulsado de Nd:YAG (Carr’s Welding Technologies Ltd.)..... | 13 |
| Figura 3.6 – Princípio da soldadura laser por condução | 15 |
| Figura 3.7 – Princípio da soldadura laser por “Keyhole” | 15 |
| Figura 3.8 – Componentes de um sistema laser [16]..... | 16 |
| Figura 3.9 – Esquema de soldadura com material de adição [16] | 19 |
| Figura 3.10 – Defeitos de soldadura [16] | 20 |
| Figura 3.11 – Defeitos nas juntas de soldadura [16]..... | 20 |
| Figura 3.12 – Porosidade em ligas de alumínio utilizando material de adição soldadura laser Nd:YAG [27]..... | 21 |
| Figura 3.13 – Sensibilidade à fissuração a quente dependendo do teor de silício e magnésio [28] | 23 |
| Figura 4.1 – Design funcional do sistema de soldadura laser | 26 |
| Figura 4.2 – Laser HL 124 P (Carr’s Welding Technologies Ltd.) | 27 |
| Figura 4.3 – Estação de trabalho 1 - Power Weld (Juntas de Canto)..... | 28 |
| Figura 4.4 – Estação de trabalho 2 (Juntas de Topo) | 28 |
| Figura 4.5 – Execução de soldadura laser Nd:YAG com fio de adição (CWT)..... | 29 |
| Figura 5.1 – Amostra Fornecida (TVA Body)..... | 31 |
| Figura 5.2 – Configuração de junta A | 33 |
| Figura 5.3 – Configuração de junta B | 33 |
| Figura 5.4 – Velocidade de soldadura [35]..... | 35 |
| Figura 5.5 – Aspecto superficial do cordão (A-7) | 36 |
| Figura 5.6 – Corte transversal (B-2) | 36 |
| Figura 5.7 – TVA Body ensaios de LP (A-4) | 36 |
| Figura 5.8 – Detecção de poros com LP (A-5) | 36 |
| Figura 5.9 – Macrografia da secção transversal configuração A (A-1-A) | 38 |
| Figura 5.10 – Macrografia da secção transversal configuração B (B-2-A) | 38 |
| Figura 5.11 – Macrografias das juntas soldadas com as configurações A (A-1-A) e B (B-2-A) respectivamente | 39 |
| Figura 5.12 – Microestrutura liga LM 25 | 39 |
| Figura 5.13 – Microestrutura liga 6061-T6 | 39 |
| Figura 5.14 – Soldadura junta A (amostra A-1-A); a) Ligação ZF à liga LM 25; b) Estrutura da ZF; c) Raiz do cordão ligação MA com MB; d) Micro fissuras na interface ZF com MB 6061 | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.15 – Soldadura junta B (B-2-A); a) Micro fissuras na ligação MA com liga 6061; b) Porosidades MA; c) Raiz do cordão evidencia falta de ligação entre passos de MA; d) Ligação MA com liga LM 25..... | 41 |
| Figura 5.16 – Espectro obtido pela análise SEM para a liga LM 25..... | 43 |
| Figura 5.17 – SEM – Micrografia ligação MA 4047 com liga LM 25 (B-2-A) | 44 |
| Figura 5.18 – SEM – Micrografia ligação MA 4047 com liga 6061 (B-2-A) | 45 |
| Figura 5.19 – Perfil de dureza de Vickers (A-1-C) | 45 |
| Figura 5.20 – Perfil de dureza de Vickers (B-2-A) | 45 |
| Figura 5.21 – Comparação dos perfis de dureza de Vickers entre junta A e B | 46 |
| Figura 5.22 – Peça a soldar (liga 6063 T6 com 6082 T6) | 47 |
| Figura 5.23 – Configuração e dimensões das juntas de canto..... | 50 |
| Figura 5.24 – Configuração e dimensões das juntas de topo | 50 |
| Figura 5.25 – Sistema de fixação – Juntas de Canto | 51 |
| Figura 5.26 – Sistema de fixação – Juntas de Topo | 51 |
| Figura 5.27 – Cordão de soldadura com material de adição 4047 | 52 |
| Figura 5.28 – Cordão de soldadura com material de adição 4047A..... | 53 |
| Figura 5.29 – Cordão de soldadura com material de adição 4043 | 53 |
| Figura 5.30 – Cordão de soldadura com material de adição 5356 | 53 |
| Figura 5.31 – Vista de topo cordão com MA 4047 | 54 |
| Figura 5.32 – Vista de topo cordão com MA 4047A | 54 |
| Figura 5.33 – Vista de topo cordão com MA 4043 | 54 |
| Figura 5.34 – Vista de topo cordão com MA 5356 | 54 |
| Figura 5.35 – Macrografia com MA 4047 | 55 |
| Figura 5.36 – Macrografia com MA 4047A | 55 |
| Figura 5.37 – Macrografia com MA 4043 | 55 |
| Figura 5.38 – Macrografia com MA 5356 | 55 |
| Figura 5.39 – Preparação de juntas com aplicação de pré-tensão: a) junta de canto; b) junta de topo; sistema de fixação junta de topo respectivamente [3]..... | 56 |
| Figura 5.40 – Macrografia da junta de topo MA 4047 | 56 |
| Figura 5.41 – Macrografia da junta de topo MA 4047A | 56 |
| Figura 5.42 – Macrografia com MA 4047 | 57 |
| Figura 5.43 – Macrografia com MA 4047A | 57 |
| Figura 5.44 – Macrografia com MA 4043 | 57 |
| Figura 5.45 – Macrografia com MA 5356 | 57 |
| Figura 5.46 – Macrografia com MA 4047 | 58 |
| Figura 5.47 – Macrografia com MA 4047A | 58 |
| Figura 5.48 – Micrografia liga 6063-T6 | 58 |
| Figura 5.49 – Micrografia liga 6082-T6 | 58 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.50 – Junta soldada com MA 4047; a) Estrutura da ZF; b) Estrutura da ZF na interface com a liga 6082; c) Micro fissuras na interface MB 6063 com ZF; d) Fissura no MA na raiz do cordão | 59 |
| Figura 5.51 – Junta soldada com MA 4047 A; a) Estrutura da ZF; b) Micro fissuras na interface MB 6063 com ZF; c) Estrutura da ZF na interface com a liga 6082; d) Falta de penetração da ZF na raiz do cordão | 60 |
| Figura 5.52 – Junta soldada com MA 4043; a) Estrutura da ZF; b) Porosidades e micro fissuras na ZF, interface com MB 6063; c) Micro fissuras MB 6082 na interface com a ZF; d) Raiz do cordão de soldadura..... | 61 |
| Figura 5.53 – Junta soldada com MA 5356; a) Ligação ZF com liga 6063; b) Micro fissuras na interface ZF com a liga 6063; c) Porosidades e fissuras na ZF; d) Micro fissuras na interface ZF com MB 6082 | 62 |
| Figura 5.54 – Junta soldada com MA 4047; a) Porosidades na ZF, interface ZF com MB 6082; b) Interface ZF com MB 6063; c) Passos de ligação MA; d) Interface ZF com liga 6063 falta de colagem na ZF | 63 |
| Figura 5.55 – Soldadura com MA 4047 A; a) Ligação MA a liga 6082 (x100); b) Estrutura de grão MA (x100); c) Micro fissuras MA com liga 6082 (x200); d) Estrutura de grão MA na ligação à liga 6063 (x100)..... | 64 |
| Figura 5.56 – SEM – Micrografia interface MA 4047 A com liga 6063 e interface MA 5356 com liga 6082 respectivamente (Juntas de canto) | 67 |
| Figura 5.57 – Perfil de dureza de Vickers MA 4047 | 67 |
| Figura 5.58 – Perfil de dureza de Vickers MA 4047A..... | 67 |
| Figura 5.59 – Perfil de dureza de Vickers MA 4043 | 67 |
| Figura 5.60 – Perfil de dureza de Vickers MA 5356 | 67 |
| Figura 5.61 – Comparação dos perfis de dureza de Vickers para as diversas ligas de adição.. | 68 |
| Figura 5.62 – Perfil de dureza de Vickers MA 4047 | 68 |
| Figura 5.63 – Perfil de dureza de Vickers MA 4047A..... | 68 |
| Figura 5.64 – Comparação dos perfis de dureza de Vickers para MA 4047 e 4047A..... | 68 |
| Figura 5.65 – Peça pretendida soldada (liga 6063-T6 com 6082-T6) | 70 |
| Figura 5.66 – Ensaio de líquidos penetrantes à peça soldada (liga 6063-T6 com 6082-T6)..... | 70 |
| Figura 5.67 – Peça a soldar (série 6000 com 5000)..... | 71 |
| Figura 5.68 – Configuração da junta liga 6060 com 5754 | 73 |
| Figura 5.69 – Soldadura sem material de adição (Autogéneo) | 73 |
| Figura 5.70 – Soldadura com fio de adição 4043 | 73 |
| Figura 5.71 – Soldadura com fio de adição 4047 | 74 |
| Figura 5.72 – Macrografia com MA 4043 | 75 |
| Figura 5.73 – Macrografia com MA 4047 | 75 |
| Figura 5.74 – Micrografia liga 5754 | 75 |
| Figura 5.75 – Micrografia liga 6060 | 75 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.76 – Junta soldada com MA 4043; a) Porosidades na ZF; b) Zona de refusão de grão no MA; c) Falta de ligação na interface ZF com material base 6060; d) Micro fissuras na ligação ZF à liga 5754 | 76 |
| Figura 5.77 – Junta soldada com MA 4047; a) Interface ZF com a liga 5754; b) Micro fissuras na ligação ZF com a liga 6060; c) Estrutura da ZF; d) Falta de ligação na raiz do cordão à liga 6060 | 77 |
| Figura 5.78 – SEM – Ligação MA 4043 com liga 5754 | 79 |
| Figura 5.79 – SEM – ligação MA 4043 com a liga 6060..... | 79 |
| Figura 5.80 – SEM – raiz do cordão MA 4047 com liga 6060 e 5754 | 80 |
| Figura 5.81 – Perfil de dureza de Vickers MA 4043 | 80 |
| Figura 5.82 – Perfil de dureza de Vickers MA 4047 | 80 |
| Figura 5.83 – Comparação dos perfis de dureza de Vickers para MA 4043 e 4047 | 80 |
| Figura A.1 – Microscópio de varrimento - SEM Hitachi S-2400 [48]..... | 2 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 – Classificação das ligas de alumínio para trabalho mecânico | 4 |
| Tabela 3.2 – Classificação das ligas de alumínio fundidas | 4 |
| Tabela 3.3 – Designação tratamentos térmicos e mecânicos de ligas de alumínio | 5 |
| Tabela 3.4 – Designação dos tratamentos de endurecimento por trabalho mecânico | 5 |
| Tabela 3.5 – Designação dos tratamentos térmicos | 6 |
| Tabela 3.6 – Tipos de laser e aplicações [16;18] | 12 |
| Tabela 3.7 – Vantagens e limitações dos sistemas lasers [16;17;18] | 12 |
| Tabela 3.8 – Vantagens, desvantagens e parâmetros de soldadura laser em modo pulsado [22; 23] | 18 |
| Tabela 3.9 – Resumo de defeitos na soldadura laser e acções correctivas [3]..... | 24 |
| Tabela 4.1 – Propriedades Lasers Trumpf série HL [16]..... | 26 |
| Tabela 4.2 – Especificações para o laser Trumpf HL 124 P [30]..... | 27 |
| Tabela 4.3 – Características estação de trabalho Power Weld [30] | 28 |
| Tabela 5.1 – Composição química materiais base [34]..... | 32 |
| Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas dos materiais base [9;34] | 32 |
| Tabela 5.3 – Designação implementada e estado das amostras fornecidas pela CWT..... | 34 |
| Tabela 5.4 – Parâmetros de soldadura TVA Body | 34 |
| Tabela 5.5 – Cálculo velocidade de soldadura..... | 35 |
| Tabela 5.6 – Observações resultantes da análise visual das soldaduras TVA Body | 37 |
| Tabela 5.7 – Observações resultantes da análise metalográfica das amostras | 42 |
| Tabela 5.8 – Composição química ligas obtida pela análise SEM | 44 |
| Tabela 5.9 – Valores de dureza médios para as ligas base e de adição | 46 |
| Tabela 5.10 – Dimensões fios de adição | 47 |
| Tabela 5.11 – Composição química materiais base [34]..... | 48 |
| Tabela 5.12 – Propriedades mecânicas materiais base [34]..... | 48 |
| Tabela 5.13 – Composição química das ligas de adição [34] | 49 |
| Tabela 5.14 – Parâmetros de soldadura (Juntas de canto/topo)..... | 52 |
| Tabela 5.15 – Observações resultantes da análise visual dos cordões soldados..... | 54 |
| Tabela 5.16 – Observações resultantes da análise metalográfica das amostras | 65 |
| Tabela 5.17 – Composição química ligas obtida pela análise SEM | 66 |
| Tabela 5.18 – Valores de dureza médios para as ligas utilizadas..... | 69 |
| Tabela 5.19 – Composição química materiais base [34]..... | 72 |
| Tabela 5.20 – Propriedades mecânicas dos materiais base [34;45] | 72 |
| Tabela 5.21 – Parâmetros de soldadura da liga 6060 com 5154 ou 5754 | 72 |
| Tabela 5.22 – Observações resultantes da análise visual dos cordões | 74 |
| Tabela 5.23 – Observações resultantes da análise metalográfica das amostras | 78 |
| Tabela 5.24 – Composição química ligas obtida pela análise SEM | 78 |
| Tabela 5.25 – Valores de dureza médios para as ligas utilizadas..... | 81 |
| Tabela 6.1 – Resultados soldadura: liga LM 25 com 6061 | 82 |

| | |
|---|----|
| Tabela 6.2 – Resultados soldadura: liga 6063 com 6082..... | 83 |
| Tabela 6.3 – Resultados soldadura: liga 6060 com 5754..... | 84 |
| Tabela 7.1 – Resumo das conclusões obtidas para os materiais de adição utilizados | 86 |
| Tabela A.1 – Solução de contrastação aplicada nas ligas de alumínios [36] | 1 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-----------------|--|
| 4043 | Designação ISO: AlSi5 [12] |
| 4047 | Designação ISO: AlSi12 [12] |
| 4047A | Designação ISO: AlSi12(A) [12] |
| 5356 | Designação ISO: AlMg5Cr [12] |
| Al | Alumínio |
| Ar | Árgon |
| ASME | American Society of Mechanical Engineers |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| Cr | Crómio |
| CWT | Empresa Carr's Welding Technologies Ltd. |
| EDS | Energy Dispersive Spectroscopy |
| Fe | Ferro |
| GMAW | Gas Metal Arc Welding |
| GTAW | Gas Tungsten Arc Welding |
| I | Amperes |
| ISO | International Organization for Standardization |
| LASER | Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation |
| LM 25 | Nomenclatura inglesa para a liga A356.0 [8]; Designação ISO: AlSi ₇ Mg [12] |
| LP | Líquidos Penetrantes |
| MA | Material de adição |
| MAG | Metal Active Gas |
| MB | Material Base |
| Mg | Magnésio |
| MIG | Metal Inert Gas |
| Nd-YAG | Neodymium-doped: Yttrium Aluminum Garnet |
| SEM | Scanning Electron Microscope |
| SFL | Soldadura por Fricção Linear |
| Si | Silício |
| TIG | Tungsten Inert Gas |
| TWI | The Welding Institute |
| V | Volts |
| ZAC | Zona Afectada pelo Calor |
| ZF | Zona Fundida |

1 OBJECTIVOS E MOTIVAÇÃO

O presente trabalho teve como objectivo estudar a soldadura de ligas dissimilares de alumínio com utilização de fio de adição. Devido à sua baixa densidade e elevadas propriedades mecânicas as ligas de alumínio têm uma vasta área de aplicações, tais como na indústria aeronáutica, automóvel e militar.

De entre todas as técnicas de soldadura utilizadas hoje em dia, a soldadura com laser Nd:YAG pulsado é dos processos mais promissores na soldadura de ligas dissimilares de alumínio e com uma vasta margem de evolução.

Assim esta investigação visa a selecção do fio de adição que evite defeitos típicos de soldadura de ligas dissimilares como: porosidades e fissuras e conseqüentemente garanta a qualidade e fiabilidade dos cordões de soldadura.

Este trabalho revestiu-se de um elevado sentido prático, pois todos os casos estudados são problemas concretos com que se deparam os técnicos da empresa Carr's Welding Technologies Ltd. (CWT), uma "Jobshop" que desenvolve trabalhos de soldadura com tecnologia laser Nd:YAG pulsado, no Reino Unido.

2 ESTRUTURA DA TESE

Nesta secção descreve-se a distribuição dos diversos temas abordados ao longo dos capítulos que entregam esta dissertação.

No capítulo 3 apresenta-se o estado da arte, que serviu de base e enquadramento ao trabalho realizado. A pesquisa bibliográfica encontra-se dividida em 7 pontos que enquadram o trabalho realizado, nomeadamente: 1) a caracterização genérica dos materiais em estudo, as ligas de alumínio; 2) apresenta-se o método de classificação de ligas de alumínio, tratamentos térmicos e mecânicos e propriedades das séries utilizadas; 3) descrição dos processos de ligação relacionados com este material; 4) o princípio de funcionamento laser e propriedades do feixe; 5) características e funcionamento de um laser sólido de Nd:YAG; 6) aplicação de laser Nd:YAG à soldadura de aluminios, os componentes de um sistema laser, principais parâmetros, funcionamento no modo pulsado e com material de adição; 7) factores limitativos de soldadura dissimilares de ligas de aluminios com laser de Nd:YAG e acções correctivas.

O capítulo 4 descreve o procedimento experimental, realizado na empresa Carr's Welding Technologies Ltd. (CWT), e as características do equipamento laser utilizado. São também descritas as análises efectuadas no Instituto Superior Técnico (IST) de caracterização das amostras e os equipamentos utilizados nessas análises. As análises não destrutivas efectuadas foram de inspecção visual e líquidos penetrantes. Os ensaios destrutivos realizados correspondem à análise metalográfica, a nível macroscópico e microscópico. Foram ainda traçados os perfis de dureza Vickers de modo a compreender as alterações de dureza associadas às diferentes zonas dos cordões de soldadura.

O capítulo 5 encontra-se dividido nos três casos práticos estudados que fundamentam a execução desta dissertação: 1) soldadura dissimilar – liga LM 25 com 6061, com a liga de adição 4047 em que são descritos os materiais base e de adição em que são comparadas duas geometrias para a execução da soldadura, sendo avaliada a qualidade dos cordões obtidos através dos ensaios de caracterização descritos no capítulo anterior; 2) soldadura – liga 6063 com 6082 testando geometrias de canto e topo, com quatro materiais de adição diferentes procurando interpretar as vantagens e limitações de cada um deles; 3) soldadura – liga 6060 com 5154 ou 5754 em que se testa a soldadura autogénea destas ligas e com recurso às ligas de adição 4043 e 4047 caracterizando as amostras obtidas.

O capítulo 6 mostra os principais resultados dos três casos estudados, propondo-se acções correctivas para implementação da melhoria de qualidade das soldaduras efectuadas.

No capítulo 7 enquadra conclusões abrangentes a partir dos resultados obtidos à soldadura de ligas dissimilares da série 6000 e da série 6000 com a 5000, assim como, propostas para trabalho futuro a partir das conclusões retiradas.

Por último, têm-se as referências bibliográficas que serviram de base e de consulta para a execução desta dissertação.

3 ESTADO DA ARTE

3.1 Alumínio e suas Ligas

A existência do alumínio foi postulada por Sir Humphrey em 1808, mas só em 1825 este viria a ser isolado por Hans Christian Oersted. No entanto, durante os 30 anos que se seguiram o alumínio não teve grande utilização comercial [1;2].

Em 1886 a produção comercial do alumínio tornou-se num processo industrial viável a partir da extracção do seu minério a bauxite. Este processo em que alumina é dissolvida em criolite fundida e decomposta electroliticamente, foi descoberto por Paul Heroult em França e Charles M. Hall nos E.U.A. e continua a ser utilizado nos nossos dias, sendo actualmente o único processo de produção de alumínio em quantidades comerciais [1;2;3].

O alumínio é um elemento metálico de símbolo químico Al, brilhante e leve que apresenta uma estrutura cristalina cúbica de faces centradas. Constitui um sólido, de densidade 2,7 com temperatura de fusão de 660 °C, sendo um bom condutor de calor e electricidade [1]. O alumínio é um dos 92 elementos metálicos que existem desde que a Terra foi formada, sendo o 3º elemento cristalino e que compõe quase 8% da crosta terrestre (depois do oxigénio 47% e o silício 27%) e 7,3% em massa da terra. Na natureza, no entanto, ele só existe em combinações muito estáveis com outros materiais (nomeadamente em silicatos e óxidos). A bauxite, que consiste essencialmente em óxidos de alumínio hidratados, é o minério comercialmente mais importante na produção de alumínio [2;4;5].

O alumínio puro é um metal dúctil de baixa densidade, que quando misturado com pequenas quantidades de outros materiais, tais como, ferro, silício, zinco, cobre, magnésio, estanho, titânio, lítio, crómio, tungsténio, manganês, níquel, zircónio e boro torna possível produzir ligas com propriedades específicas, para diversas aplicações [3].

O alumínio é conhecido pela sua baixa densidade (1/3 da densidade do aço), e pela resistência à corrosão ao ar, à água, óleo e muitas substâncias químicas. Esta propriedade é essencialmente devida à fina camada de óxido, alumina, que se forma numa superfície de alumínio puro exposto ao ar [2;6]. A oxidação dá-se de forma espontânea. O alumínio em contacto com o ar forma a película protectora de fina espessura (1-80 µm) que impede a continuação da oxidação. Este óxido, a alumina, é muito tenaz e refractário, insolúvel no alumínio líquido e que impede a molhagem deste. Assim, tem de ser removido antes ou durante a operação de soldadura para facilitar a molhabilidade e a fusão [7].

A produção de alumínio primário em 2006 foi cerca de 34 milhões de toneladas e a produção de alumínio reciclado (alumínio secundário) cerca de 16 milhões de toneladas. O total de aproximadamente 50 milhões de toneladas compara com 17 milhões de toneladas de cobre, 8 milhões de toneladas de chumbo e 0,4 milhões de toneladas de estanho produzidos em 2006. Tornando-se assim o segundo metal mais utilizado no mundo após o aço [2].

Embalagens e recipientes são o maior mercado de alumínio, transportes (automóveis, caminhões, aviões, comboios) é o segundo, seguido da construção. Actualmente, este metal está presente em todos os lugares, sendo um material muito comum e importante [2].

3.1.1 Classificação das ligas de Alumínio

A *Aluminium Association*, estabeleceu um sistema de designação, adoptado pela comunidade científica e indústria em geral baseado nas características de cada liga, tais como, a capacidade de responder a tratamentos térmicos e/ou mecânicos ou ao elemento de liga primário adicionado [8;9].

3.1.1.1 Ligas de alumínio para trabalho mecânico

As ligas de alumínio para trabalho mecânico (por exemplo, chapa fina, chapa grossa, extrudido, varão e fio) são classificadas de acordo com o elemento de liga em maior quantidade. Usa-se uma designação de quatro dígitos para identificar as ligas de alumínio para trabalho mecânico. O primeiro (Xxxx) indica o grupo de ligas que contêm elementos de liga específicos, os dois últimos dígitos identificam a liga de alumínio ou indicam o grau de pureza do alumínio, e o segundo indica modificações da liga original ou limites de impurezas. De acordo com a tabela seguinte: [8;9]

| Série | Elementos de Liga Principais |
|-------|--|
| 1xxx | Alumínio Puro (Al) (mínimo 99%) |
| 2xxx | Cobre (Cu) (série designada por duralumínio) |
| 3xxx | Manganês (Mn) |
| 4xxx | Silício (Si) |
| 5xxx | Magnésio (Mg) |
| 6xxx | Magnésio (Mg) e Silício (Si) |
| 7xxx | Zinco (Zn) |
| 8xxx | Lítio (Li) (e eventualmente Magnésio (Mg)) |
| 9xxx | Série não utilizada |

Tabela 3.1 – Classificação das ligas de alumínio para trabalho mecânico

3.1.1.2 Ligas de fundição

A classificação de ligas fundidas de alumínio foi igualmente desenvolvida pela *Aluminum Association*, e baseia-se também em quatro dígitos, estando o terceiro dígito separado do quarto por um ponto. O primeiro dígito indica a série de acordo com o principal elemento de liga como indicado na Tabela 3.2, os dois dígitos seguintes para a série 1xx.x indicam o grau de pureza. Nas restantes séries os dois dígitos seguintes representam as diferentes ligas do grupo.

| Série | Elementos de Liga Principais |
|-------|--|
| 1xx.x | Alumínio Puro (Al) (mínimo 99%) |
| 2xx.x | Cobre (4% a 4,6%) |
| 3xx.x | Silício (5% a 17%) + cobre ou magnésio |
| 4xx.x | Silício (5% a 12%) |
| 5xx.x | Magnésio (4% a 10%) |
| 6xx.x | Série não utilizada |
| 7xx.x | Zinco (6,2% a 7,5%) |
| 8xx.x | Estanho |
| 9xx.x | Reservada para outro elemento |

Tabela 3.2 – Classificação das ligas de alumínio fundidas

O último dígito indica a forma do produto fundido: designado por “.0” quando a composição da liga é para fundição final, ou para lingotes (designado por .1 ou .2 dependendo do limite de impurezas) [8;9].

3.1.2 Nomenclatura dos tratamentos térmicos

As ligas tratáveis termicamente são aquelas que apresentam a característica de reagir a tratamento térmico e, desse modo conseguem um aumento apreciável de resistência mecânica. O calor gerado durante a soldadura reduz as propriedades mecânicas destas ligas. Contudo, as ligas tratadas termicamente podem ser retratadas após a soldadura, desde que a aplicação justifique esta operação e caso existam condições disponíveis. Os tratamentos térmicos que permitem o aumento de resistência mecânica destas ligas são a solubilização seguida de envelhecimento [1].

As ligas tratáveis termicamente contêm na sua composição química elementos de liga cuja solubilidade de um elemento ou grupo no elemento aumenta com a temperatura, e o limite de solubilidade é excedido à temperatura ambiente ou a temperaturas baixas. Ao aquecer-se a liga, esses elementos entram em solução sólida, podendo ser mantidos na solução à temperatura ambiente desde que a liga seja arrefecida rapidamente (solubilização) [10].

Após a solubilização, a liga encontra-se em situação instável, os elementos de liga tendem a sair da solução sólida, formando compostos intermetálicos precipitados na matriz. Esses precipitados são finos, bem distribuídos, e propiciam o endurecimento da liga. Essa precipitação (envelhecimento) pode ocorrer em temperatura ambiente (envelhecimento natural), para períodos mais longos (dias ou meses), ou ser acelerado pelo aquecimento na faixa 120 a 200°C, por algumas horas (envelhecimento artificial) [11].

Designações básicas dos tratamentos térmicos e mecânicos aplicados nas ligas de alumínio [1;8]:

| Designação | Descrição |
|------------|--|
| F | Estado conforme fabricado |
| O | Recozimento e recristalização |
| H | Endurecimento por trabalho mecânico |
| W | Tratamento térmico para obter estruturas instáveis |
| T | Tratamento térmico para obter estruturas estáveis |

Tabela 3.3 – Designação tratamentos térmicos e mecânicos de ligas de alumínio

3.1.2.1 Tipo de ligas encruadas

| Designação | Significado do 1º dígito |
|------------|-----------------------------------|
| H1 | Encruamento simples |
| H2 | Encruamento e recozimento parcial |
| H3 | Encruamento e estabilização |

Tabela 3.4 – Designação dos tratamentos de endurecimento por trabalho mecânico

3.1.2.2 Designação dos tratamentos térmicos

| Designação | Significado do 1º dígito |
|------------|--|
| T1 | Envelhecimento natural. O produto é arrefecido desde a temperatura elevada a que foi enformado e envelhecido naturalmente até um estado razoavelmente estável. |
| T2 | Arrefecimento desde a temperatura de enformação, seguido de trabalho a frio e envelhecimento natural até um estado razoavelmente estável. |
| T3 | Tratamento térmico de solubilização, deformação a frio e envelhecimento natural para um estado razoavelmente estável. |
| T4 | Tratamento térmico de solubilização e envelhecimento natural para um estado razoavelmente estável. |
| T5 | Arrefecimento desde a temperatura de enformação seguido de envelhecimento artificial. |
| T6 | Tratamento térmico de solubilização seguida de envelhecimento artificial. |
| T7 | Tratamento térmico de solubilização seguida de estabilização. |
| T8 | Tratamento térmico de solubilização, seguido de deformação a frio e envelhecimento artificial. |
| T9 | Tratamento térmico de solubilização, seguido de envelhecimento artificial e trabalho a frio |
| T10 | Arrefecimento desde a temperatura elevada de enformação, seguido de trabalho a frio e envelhecimento artificial. |

Tabela 3.5 – Designação dos tratamentos térmicos

3.1.3 Propriedades Ligas

As ligas de alumínio para trabalho mecânico dividem-se em dois grupos: não tratáveis termicamente e tratáveis termicamente. No grupo das ligas não tratáveis inserem-se as ligas das séries 1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx, sendo ligas endurecidas através de trabalho mecânico. Por sua vez, as ligas de alumínio das séries 2xxx, 6xxx, 7xxx, e 8xxx inserem-se no grupo de ligas tratáveis termicamente [8;9].

3.1.3.1 Série 4xxx

A série 4xxx é a única que tem algumas ligas que pertencem ao grupo de ligas tratáveis termicamente e outras pertencentes às ligas não tratáveis termicamente. Estas ligas têm como elemento de liga principal o silício, que pode variar entre 0,6 e 21,5%. Ligas alumínio-silício forma uma mistura eutética de alumínio silício (12,6% de silício) com um ponto de fusão de 577°C, não se formando componentes intermetálicos. O silício, quando adicionado ao alumínio, reduz a temperatura de fusão e aumenta a fluidez características desejáveis para utilização como material de adição, tanto em soldadura por fusão como em brasagem. Quando o silício é adicionado individualmente, este comporta-se como liga não tratável termicamente. Contudo, algumas destas ligas com silício contêm também adições de outros elementos de liga, como o magnésio e o cobre, que lhes conferem uma resposta favorável aos tratamentos térmicos.

Consequentemente, as ligas de alumínio desta série devido à sua alta fluidez e baixa sensibilidade à fissuração a quente são predominantemente utilizadas como materiais de adição na soldadura de ligas dissimilares de alumínio [3;11;12].

3.1.3.2 Série 5xxx

As ligas em que o elemento principal adicionado é o magnésio, são as ligas da série 5xxx. Estas ligas têm teores de magnésio que podem variar entre 0,2 e 6,2%, sendo do grupo de ligas não tratáveis termicamente as que apresentam maior resistência mecânica. Devido ao facto de estas ligas serem facilmente soldáveis, são utilizadas numa grande variedade de aplicações, como a construção naval, os transportes, os recipientes sobre pressão, as pontes e edifícios. As ligas desta série com percentagem de magnésio acima de 3% não são recomendadas para utilizações a temperaturas acima de 65 °C, devido à sua tendência para a sensibilização e conseqüente susceptibilidade à corrosão sob tensão [11;12].

3.1.3.3 Série 6xxx

As ligas da série 6xxx têm como elementos de liga principais o magnésio e o silício, tipicamente com percentagem até 1%. Amplamente utilizadas para aplicações soldadas, a adição de magnésio e silício (formando um componente intermetálico Mg_2Si de segunda fase) ao alumínio promove a capacidade desta liga para o tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, com o objectivo de aumentar a sua resistência mecânica. Estas ligas têm tendência para a fissuração a quente, por este motivo não é aconselhável a utilização autogénea, sem material de adição, na sua ligação. As soldaduras devem ser realizadas com materiais de adição com elevados teor de silício para evitar a fissuração a quente [5].

3.1.3.4 Ligas fundidas Alumínio – silício – cobre/magnésio (série 3xx.x)

As ligas fundidas da série 3xx.x são tratáveis termicamente, apresentam alta resistência, baixa ductilidade, boa resistência ao desgaste, boa fluidez, boa maquinabilidade e verifica-se uma diminuição de resistência à corrosão em ligas contendo cobre. Entre as principais aplicações encontram-se componentes de automóveis, blocos, cilindros, cabeça, rodas, acessórios de aviões e partes de bombas e compressores [8;9].

3.2 Processos de Ligação de Alumínios

O alumínio e as suas ligas podem ser soldados pela maior parte dos processos de fusão ou por soldadura no estado sólido, assim como por brasagem e sodobrasagem.

A soldadura por fusão é habitualmente executada por MIG/MAG, TIG e resistência. A soldadura por plasma e por feixe de electrões pode ser realizada em algumas aplicações particulares. As soldaduras com eléctrodos revestidos e oxiacetilénica podem ser utilizadas em aplicações em que a resistência e a qualidade de junta não são requisitos essenciais para a junta soldada. Os processos de soldadura no estado sólido mais eficientes são: fricção, difusão, explosão, alta-frequência e a frio. Estes processos são ainda adequados na união de alumínio e outros materiais em soldaduras dissimilares. O uso de adesivos combinado com soldadura por resistência por pontos permite obter juntas de resistência superior à obtida por cada um dos processos isoladamente [7].

Os problemas mais comuns nas soldaduras de ligas de alumínio, com processos de soldadura por fusão, passam pela formação e retenção de porosidade e fissuração na

solidificação. Um outro problema é a diminuição de resistência, nas ligas endurecidas por trabalho mecânico, nas zonas afectadas pelo calor (fenómeno conhecido pelo amaciamento da ZAC). Mesmo para as ligas em que possuem uma boa soldabilidade por fusão, o resultado final depende fortemente das precauções em termos de preparação superficial, escolha do material de adição, tratamentos térmicos de pré e pós soldadura, para além das condições ambientais e da experiência do operador, no caso de soldadura não automatizada [7;10].

3.2.1 Soldadura por TIG

A soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) também conhecida como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) é um processo no qual a união das peças a soldar é obtido pela fusão dos materiais por um arco estabelecido entre um eléctrodo não consumível de tungsténio e a peça. A protecção do processo é efectuada com a utilização de um gás inerte, normalmente árgon ou hélio, ou uma mistura deles para aumentar a penetração. Este processo pode ser autogéneo ou utilizar material de adição.

Este processo é normalmente utilizado na soldadura de elementos de baixa espessura (1 a 3 mm), apresenta, contudo, alguma sensibilidade à formação de porosidades na soldadura de ligas de alumínio, se bem que as misturas com Ar+He+N₂ possam melhorar a qualidade e produtividade das soldaduras.

Sobre peças bem preparadas (desoxidadas e desengorduradas) é fácil aplicar este processo. Para isso deve-se usar corrente alterna para facilitar a remoção da película de alumina (Al₂O₃) e gases de protecção secos e puros (Ar ou He).

O processo apresenta excelente controlo do banho de fusão, é de fácil mecanização e automação, permite soldaduras em todas as posições, no entanto, tem uma produtividade relativamente baixa quando comparada com a soldadura MIG [7;11].

3.2.2 Soldadura por MIG

A soldadura MIG (Metal Inert Gas) também designada por GMAW (Gas Metal Arc Welding) é um processo em que a fusão dos materiais a ligar é obtida por arco eléctrico estabelecido entre o eléctrodo metálico, contínuo e consumível, e a peça. A soldadura é protegida da contaminação atmosférica por um fluxo de gás inerte ou por uma mistura gasosa. Este processo permite a obtenção de elevada densidade de corrente dado o pequeno diâmetro do fio eléctrodo consumível, o que ocasiona uma elevada taxa de fusão do fio. Quanto aos materiais de adição, os fios devem ser isentos de sódio ou potássio para evitar instabilidades no arco [7;11].

O processo MIG com corrente alterna pulsada é usado por exemplo na indústria automóvel, na soldadura robotizada de elementos finos. Este processo apresenta um bom controlo da penetração, elevada tolerância à variação da folga e deformações que podem ser consideradas aceitáveis em alguns casos. Apresenta contudo elevada sensibilidade à formação de porosidades em soldaduras em ligas de alumínio, além da degradação das propriedades mecânicas, a qual é função da energia adicionada.

O processo MIG pode ser associado ao processo laser designando-se por processo híbrido, na soldadura de ligas de alumínio, para atingir velocidades de soldadura acima de 2 m/min, sem que ocorra falta de penetração [11].

3.2.3 Soldadura por Fricção Linear

O processo de soldadura por fricção linear (SFL) foi inventado e patenteado em 1991 pelo TWI (The Welding Institute) em Cambridge, Reino Unido, com a criação da patente por Thomas, W [13].

Na SFL, a ligação metálica realiza-se a temperaturas inferiores à temperatura de fusão dos materiais envolvidos, do que se conclui tratar-se de um processo de ligação que não implica a fusão dos materiais e ocorre no estado sólido, o que em comparação com os processos de soldadura por fusão, resulta em menores distorções e tensões residuais, como consequência directa da menor entrega térmica envolvida.

Na base desta tecnologia, encontra-se a utilização de uma ferramenta que é constituída por um pino localizado no centro de uma base, sendo o diâmetro desta superior ao do pino. A base tem como objectivo pressionar o material em movimento, enquanto o pino origina a sua mistura. A geometria de junta mais usual é topo a topo, no entanto os desenvolvimentos recentes no domínio da robótica e automação tem permitido a aplicação do processo noutras geometrias [10;14].

3.3 Radiação Laser

A palavra laser é um acrónimo de “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação) [15]. Em 1917 foram realizados, por Albert Einstein, os primeiros trabalhos que conduziram à invenção de um feixe de laser. O primeiro laser foi construído em 1960 por Theodore Maimann, nos laboratórios de investigação Hughes na Califórnia. Tratava-se de um laser no estado sólido, de rubi, excitado por uma lâmpada fluorescente de vapor de mercúrio de filamento helicoidal [15].

O princípio de funcionamento de qualquer laser é idêntico, desde o apontador laser do tamanho de uma caneta, ou o laser sólido de alta potência para soldadura, todos os lasers seguem o mesmo princípio físico para gerar luz laser [16].

3.3.1 Princípio laser

Num laser o que acontece é a emissão estimulada. Um fóton (onda de luz) embate no átomo excitado, provocando a emissão de um fóton com as mesmas propriedades. Ambos os fótons continuam estimulados, no mesmo sentido e com o mesmo comprimento de onda [16].

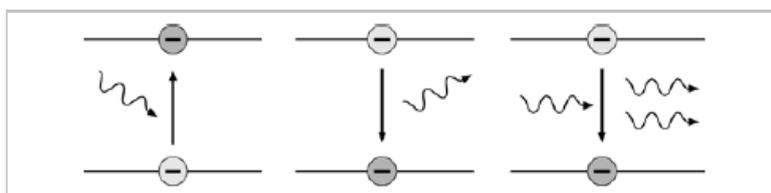


Figura 3.1 – Excitação (esquerda) emissão espontânea (centro) emissão estimulada (direita) [16]

3.3.2 Propriedades do feixe laser

As propriedades especiais do feixe laser fazem com que o laser seja parte integrante no quotidiano para o processamento de materiais.

A luz laser é:

- Monocromática – todas as ondas de luz tem o mesmo comprimento de onda.
- Coerente – todas as ondas de luz estão em fase, produzindo um feixe laser contínuo.
- Direccional – quase todas as ondas de luz têm exactamente a mesma direcção.

Esta última propriedade é especialmente importante para o processamento de materiais. A luz laser forma um feixe compacto, com enorme poder. Pode ser guiado ao longo de longas distâncias e pode ser precisamente focado. No ponto focal, toda a potência do feixe laser está concentrada sobre a peça a processar. A densidade de potência (energia por unidade de área), do ponto focal é dez milhões de vezes superior à de uma lâmpada incandescente [15;16].

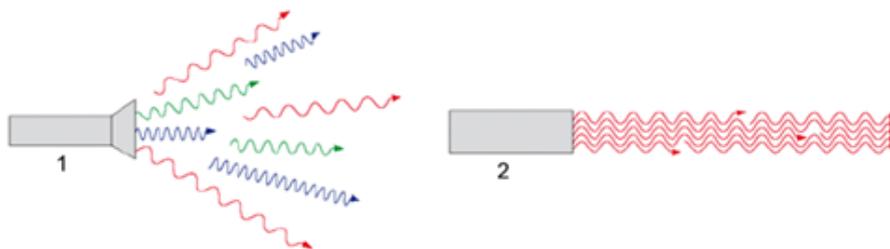


Figura 3.2 – Propriedades da luz: 1. Luz incandescente 2. Laser [16]

Primeiro, é necessário um meio que tenha um nível de energia apropriado para suportar a acção do laser. Esse meio pode ser um gás, um cristal sólido isolante, um líquido ou então um cristal semiconductor.

Dependendo do meio activo, os lasers classificam-se em:

- **Lasers gasosos:** meio activo gasoso
- **Lasers sólidos:** meio activo sólido
- **Lasers semicondutores ou de díodos:** meio activo semiconductor

Para ser estabelecida uma inversão da “população” do meio é necessário fornecer ou “bombear” energia ao meio activo através de uma fonte de excitação ou bombardeamento. Aqui, entende-se por “população” todos os electrões presentes na cavidade ressonante. Para haver inversão da população significa que deve haver mais electrões no estado excitado que no estado fundamental, que é a condição necessária para haver emissão estimulada de luz que constitui o principio fundamental de qualquer laser. Diz-se inversão porque contraria a tendência energética natural, que seria haver mais electrões no estado de menor energia.

O método de fornecimento desta energia varia com o meio activo:

- Em meios gasosos a excitação das moléculas é feita normalmente por uma descarga eléctrica através do gás.
- Nos meios sólidos o fornecimento energético é conseguido mediante a radiação intensa provocada por lâmpadas de flash ou através de lasers de díodos.
- Nos lasers semicondutores a excitação molecular é feita através da injeccção de corrente eléctrica no meio.

Finalmente é necessário um mecanismo onde se possa introduzir uma regeneração óptica do sistema, e assim manter os ganhos energéticos acima das perdas, só assim fará sentido a construção do dispositivo laser. Este mecanismo (Figura 3.3) é conseguido, limitando o sistema por dois espelhos reflectores, um 100% reflector e o outro parcialmente reflector, formando assim a denominada cavidade ressonante. Nesta cavidade é delimitado o volume que contém os fótons ou a radiação laser produzida, permitindo a oscilação dos mesmos, que estão a ser emitidos pelo processo de emissão estimulada, conseguindo assim obter um valor de energia bastante elevado [17].

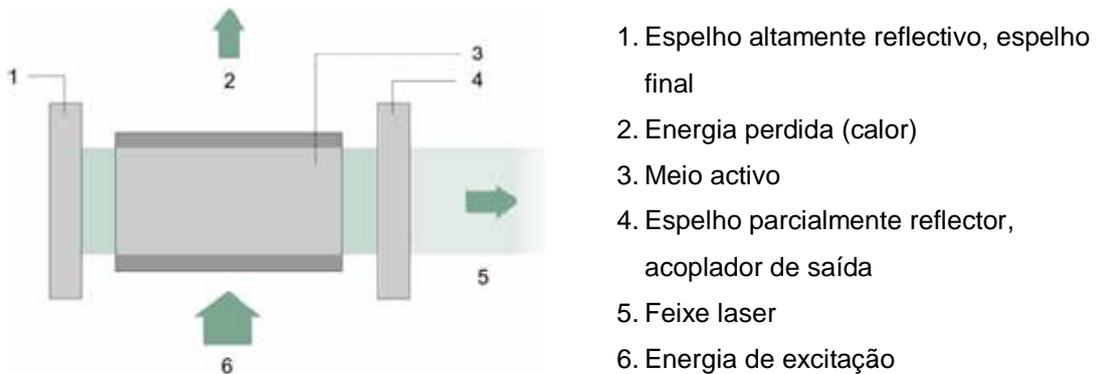


Figura 3.3 – Design e componentes do feixe laser [16]

Existe um elevado número de tipos de laser (Tabela 3.6), mas apenas alguns são úteis para o processamento de materiais. Os mais utilizados são os lasers gasosos de CO₂ e os sólidos de Nd:YAG. Comparativamente ao laser de CO₂, o laser de Nd:YAG apresenta um comprimento de onda 10 vezes inferior (Nd:YAG 1,064 μm; CO₂ 10,64 μm). Os laser CO₂ são aqueles que oferecem a maior potência. Contudo, a radiação emitida por um laser de CO₂ tem um comprimento de onda 10,64 μm a qual é pouco absorvida pela maior parte dos materiais metálicos, exigindo assim, potências elevadas para efectuar o seu processamento. Existem sistemas de alta potência com valores na ordem dos 50 kW, mas o mais comum a nível industrial é o uso de lasers abaixo dos 15 kW e a maioria com potências de 3 kW. Este tipo de lasers permite uma produtividade elevada e são frequentemente seleccionados pela indústria automóvel, aeroespacial e outros sectores para o processamento de metais [3;17].

Dependendo do tipo de laser a ser utilizado, a soldadura do alumínio por este processo pode ser mais ou menos fácil de executar. Assim e dada a elevada reflectividade do alumínio e ao comprimento de onda do laser de CO₂ é difícil soldar este material por este processo. É mais adequado o laser de Nd:YAG emitindo a 1,06 μm em que a absorvidade do alumínio é bastante superior [7].

| Tipo de Laser | Meio Activo | Exemplos típicos e comprimentos de onda | Áreas típicas de aplicação |
|-------------------------|--|---|--|
| Lasers gasosos | Gases ou mistura de gases | CO₂ (carbon dioxide) 10,6 μm | Principalmente corte e soldadura de metais. Também: endurecimento e marcação. |
| Lasers sólidos | Cristal ou vidro dopado com iões activos | Nd:YAG (neodymium: yttrium aluminum garnet) 1,064 μm Yb:YAG (ytterbium: yttrium aluminum garnet) 1,03 μm , Nd:YLF (neodymium: yttrium lithium fluoride) 1,047 μm Laser de Fibras (1,07-1,08 μm) | Principalmente soldadura de metais, corte, brasagem, marcação. Também: furação, ablação, scanner 3D |
| Lasers de díodos | Semicondutores | GaInP (gallium indium phosphide) 0,67-0,68 μm GaAs (gallium arsenide) 0,78-0,98 μm | Aplicação directa: brasagem, endurecimento, soldadura por condução Aplicação indirecta fonte óptica para bombear laser no estado sólido |

Tabela 3.6 – Tipos de laser e aplicações [16;18]

Na Tabela 3.7 são descritas as vantagens e limitações dos sistemas laser.

| Vantagens | Desvantagens |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ Elevada densidade de energia ➤ Baixa e concentrada entrega térmica ➤ Baixas distorções e pequenas dimensões ZAC's ➤ Boa qualidade do cordão ➤ Produtividades elevadas ➤ Possibilidade de soldadura de materiais dissimilares ➤ Não existe contacto mecânico entre o equipamento laser e a peça ➤ Reduzido trabalho após soldadura ➤ Baixo custo de consumíveis (pode funcionar em autogéneo) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Custo elevado dos equipamentos e de manutenção ➤ Capacidade reduzida de preenchimento de intervalos, elevados requisitos na preparação da junta ➤ Limitação nas posições de soldadura ➤ Baixo rendimento eléctrico (2% lasers de CO₂, 10% lasers de Nd:YAG) ➤ Ocasionalmente surgem problemas metalúrgicos devido à alta taxa de arrefecimento |

Tabela 3.7 – Vantagens e limitações dos sistemas lasers [16;17;18]

3.4 Laser de Nd:YAG

De entre os lasers que utilizam um cristal como meio activo os lasers de Nd:YAG são sem dúvida os mais usados no processamento de materiais. Surgiram no início dos anos 70 e são de entre os lasers de estado sólido, aqueles que permitem produzir potências de feixe mais elevadas. Estes lasers emitem a 1,06 μm , isto é, num comprimento de onda em que os materiais metálicos absorvem cerca de 95% de energia incidente, o que permite trabalhar com baixas potências emitidas. A maior parte dos materiais não metálicos são contudo transparentes a este comprimento de onda do espectro da radiação [17].

Os lasers Nd:YAG são constituídas por um varão sólido de YAG (Yttrium Aluminium Garnet ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)) dopado com Nd^{3+} (1%) que constitui o elemento activo. O varão é montado numa cavidade óptica. O bombardeamento é feito com lâmpadas de flash (Kripton ou Xénon)

cujo número e disposição dependem da potência máxima emitida e condicionam a qualidade do feixe [15;19].

A Figura 3.4 mostra a estrutura de um laser cilíndrico pulsado. Para produzir uma radiação laser, a emissão estimulada deverá ser amplificada numa cavidade ressonante e depois apontada. A luz laser é então produzida no varão cilíndrico de Nd:YAG. Quanto maior for o varão cilíndrico maior será a potência máxima que o laser dispõe. Tipicamente os varões têm diâmetro de vários milímetros e um comprimento máximo de 20 centímetros.

As lâmpadas de flash servem para excitar o cristal e são dispostas paralelamente ao varão cilíndrico. As lâmpadas e a vareta estão fechadas dentro de um meio altamente reflectivo denominado cavidade. As lâmpadas emitem luz em todas as direcções. A secção transversal da cavidade tem a forma de dupla elipse para maximizar a quantidade de luz de excitação do cristal cilíndrico, sendo a luz reflectida pelas paredes da cavidade, permitindo a passagem várias vezes pelo varão que está centrado no centro da linha focal.

Nas extremidades opostas da cavidade, são colocados dois espelhos de elevada reflectividade. Contudo, um dos espelhos é parcialmente reflector de forma a deixar-se passar pela radiação. Durante a operação, as luzes e os cristais aquecem e têm de ser arrefecidos. Cada um deles é cercado por um tubo através do qual a água de arrefecimento é encaminhada. [16;19]

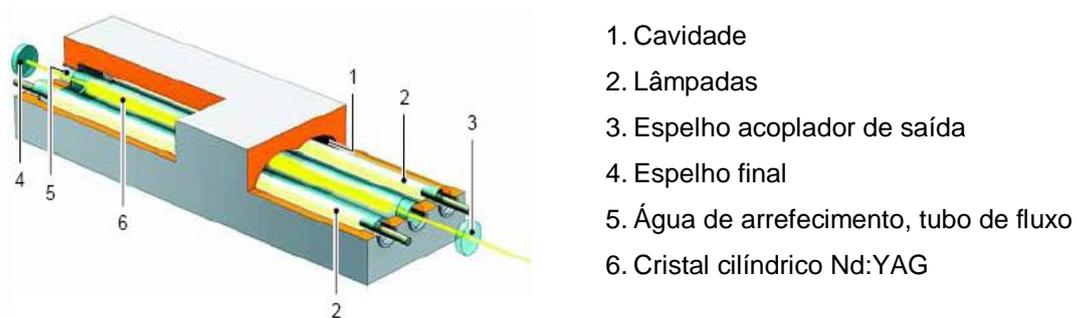


Figura 3.4 – Constituição típica de um laser cilíndrico de Nd:YAG [16]

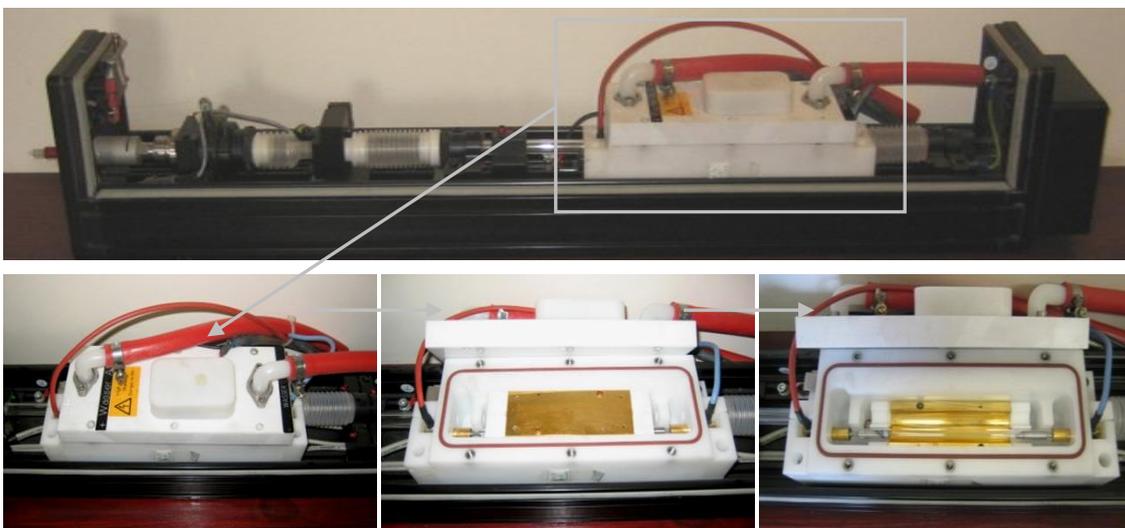


Figura 3.5 – Laser cilíndrico pulsado de Nd:YAG (Carr's Welding Technologies Ltd.)

Os dois factores de maior influência na potência do feixe laser gerados são: o volume do varão e a potência de excitação. Quanto maior o varão e maior potência de excitação das lâmpadas maior será a potência do feixe laser. A potência de pulso máxima pode ser aumentada para mais de 10 kW e potência média máxima de mais de 500 W.

Recentemente, observaram-se várias vantagens na utilização de laser de díodos como fonte de excitação ou bombeamento. A utilização de lasers de díodos no bombeamento oferece uma maior eficiência total no sistema que pode mesmo chegar aos 8% (no caso de serem utilizadas lâmpadas de flash a eficiência total decresce para os 1-2%). Contudo, o preço dos lasers de Nd:YAG bombeados por díodos continua a ser um factor limitativo. No entanto, apesar do elevado custo, o bombeamento do feixe laser Nd:YAG através dos lasers de díodos é muitas vezes preferido devido a produzir muito menos calor no meio activo (relativamente à fonte de alternativa das lâmpadas de flash) e apresentar uma eficiência total significativamente maior.

O laser de Nd:YAG foi inicialmente comercializado principalmente em modo pulsado, cujos elevados picos de potência obtidos eram vantajosamente utilizados em aplicações como perfuração, corte e marcação. Nesse modo, os lasers podem também ser utilizados em soldadura de diversos materiais (aços C-Mn, aços inoxidáveis, ligas de alumínio, titânio e de molibdénio) utilizando preferencialmente interruptores-Q (Q-switchs) que são inseridos na cavidade do laser e aguardam pela inversão de população máxima criada pelo Nd^{3+} antes de aqueles serem abertos [16;18;20].

3.5 Soldadura de alumínio por Laser Nd:YAG

De entre todas as técnicas de soldadura utilizadas hoje em dia, a soldadura por laser de Nd:YAG é dos processos mais promissores na soldadura de alumínio porque permite alta produtividade, soldaduras de alta qualidade, grandes velocidades de soldadura, elevada penetração, baixa entrega térmica, baixa distorção e flexibilidade e facilidade de automação do processo.

A soldadura laser de alumínio apresenta um elevado potencial devido à elevada densidade de energia do feixe laser e à consequente obtenção de cordões de soldadura de elevada razão penetração/largura em alumínio, comparativamente ao que ocorre noutros processos de soldadura por fusão. Por outro lado a produtividade obtida em soldadura laser é mais elevada. A utilização de lasers Nd-YAG, devido à flexibilidade de transporte do feixe e à elevada potência que actualmente apresentam abre novas perspectivas no campo de utilização desta tecnologia [21].

Consoante a densidade de potência adicionada, o processo de soldadura a laser pode apresentar dois modos distintos: por condução e por “Keyhole”.

Na soldadura laser por condução, a densidade de potência ($< 10^6 \text{ W/cm}^2$) é suficiente para fundir o material a soldar, mas não suficiente para atingir a vaporização de alguns dos seus elementos de liga. Com este processo a penetração é menor [11].

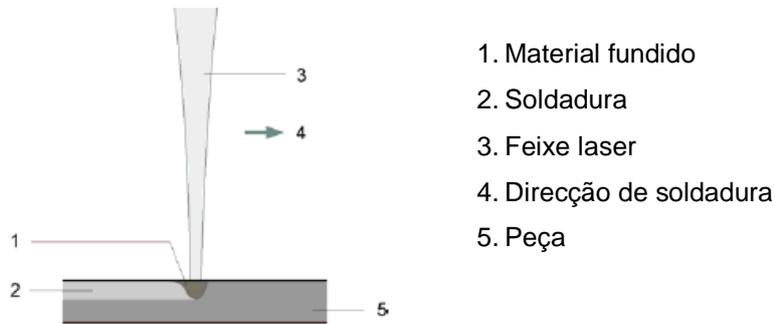


Figura 3.6 – Princípio da soldadura laser por condução

Na soldadura por “Keyhole”, a densidade de potência ($> 10^6 \text{ W/cm}^2$) é suficientemente elevada, aquecendo o material a soldar de tal modo que, não só funde a superfície, como também vaporiza o material [11].



Figura 3.7 – Princípio da soldadura laser por “Keyhole”

3.5.1 Componentes de um sistema laser

Independentemente do processo tecnológico em que se utiliza laser como: corte, soldadura, furação, marcação, são necessários outros componentes para funcionar em conjunto com o dispositivo laser. Assim, um sistema laser contém um sistema de alimentação de energia, sistemas ópticos de direcção do feixe, estação de trabalho, sistema de sucção, dispositivos de protecção e o sistema de arrefecimento [16].

3.5.1.1 Laser

O laser é o núcleo do sistema laser é onde o feixe laser é produzido. Ele contém o laser com sistema de alimentação e de arrefecimento, os componentes ópticos de direcção do feixe laser, como fibras ópticas, direccionam o raio laser para a estação de trabalho onde se encontra a peça.

3.5.1.2 Lentes de focagem

As lentes de focagem controlam a direcção e focagem do feixe laser na peça, convertendo o laser numa ferramenta para as diferentes aplicações no processamento de materiais. Sensores e operadores acompanham o processo de soldadura de forma a intervir quando necessário.

3.5.1.3 Estação de trabalho

A estação de trabalho é onde está fixa a peça. A soldadura pode ser realizada com a peça em movimento ou com a peça fixa e o movimento é assegurado pelo movimento da mesa ou pelo movimento do sistema de focagem do feixe laser. Este processo é feito com o recurso a equipamentos de fixação e movimento, tais como, estações de trabalho ou robots.

3.5.1.4 Dispositivos de segurança

Os principais riscos envolvidos na soldadura laser de Nd:YAG são: ópticos (o feixe pode queimar a pele ou danificar a retina se focado acidentalmente no olho), eléctricos e a geração de fumos. Assim, dispositivos de segurança são necessários para garantir que nem radiação laser, nem subprodutos, tais como, vapores escapem durante o processo de soldadura. Estes dispositivos incluem revestimentos de protecção para o operador da radiação laser e sistema de sucção de vapores.

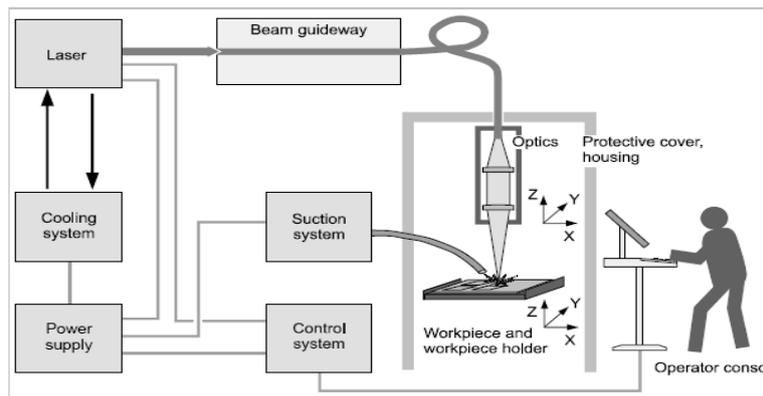


Figura 3.8 – Componentes de um sistema laser [16]

3.5.2 Parâmetros Laser

Assim como a forma e metais de enchimento devem ser adaptados em relação às exigências feitas para a soldadura, os parâmetros laser, também devem ser adaptados em relação às exigências da soldadura. Para obter soldaduras livres de fissuras depende em muito dos parâmetros utilizados [16;20].

O soldador pode controlar os seguintes parâmetros:

- Diâmetro do ponto focal (área activa)
- Duração dos pulsos laser (duração activa)
- Potência do pulso laser (força do efeito)
- Frequência de repetição do pulso (frequência do efeito)
- Sobreposição de pulsos

3.5.2.1 Diâmetro do ponto focal

Entende-se por diâmetro do ponto focal a área activa do feixe laser em contacto com a peça. Assim, para fios de um diâmetro maior é exigido um maior ponto focal. O diâmetro do ponto focal deve ser maior do que o diâmetro do fio, uma vez que, o material base deve-se

misturar com o fio. Da experiência prática, o diâmetro focal deve ter duas vezes o diâmetro do fio de adição.

3.5.2.2 Duração do pulso

A duração do pulso indica quanto tempo o poder de um pulso laser actua sobre a peça, no ponto focal. Quanto maior for este tempo activo, maior é o volume que passa a fusão, mas também significa longos períodos de aquecimento e arrefecimento.

3.5.2.3 Potência de pulso

A potência de pulso indica a força com que o feixe laser trabalha no interior do ponto focal. A selecção de maior potência de pulso é feita para materiais em que a superfície activa aquece rapidamente. Um rápido aquecimento do material aumenta o risco de desenvolvimento de fissuras, por isso, a potência de pulso deve ser seleccionada para o valor mais baixo possível.

3.5.2.4 Forma de pulso

A forma de pulso determina o curso temporal tomado pela potência de laser dentro de um pulso. Por exemplo, pode-se executar pulsos em forma de rampa no início ou no fim, se esta configuração for a mais favorável, ou moldar o rectângulo do pulso de forma a melhorar os resultados obtidos.

3.5.2.5 Densidade de potência

Uma vez que a potência é distribuída ao longo de toda a área focal, para maiores diâmetros de ponto focal maior terá de ser a densidade de potência seleccionada. Em qualquer caso a potência em relação à área (densidade de potência) deve exceder o valor mínimo de fusão dos materiais de forma a garantir o ponto de fusão em todos os materiais.

3.5.2.6 Frequência de pulso

A frequência de repetição de pulso designa o número de pulsos que o laser emite por segundo. A frequência máxima possível depende da potência e duração de pulso seleccionados, bem como da máxima potência média do dispositivo laser. Os valores típicos de repetição de pulso estão entre as frequências de 5 Hz e 20 Hz.

3.5.2.7 Sobreposição de pulsos

A sobreposição de pulso indica em que grau o ponto de soldadura de um laser sobrepõe o ponto de soldadura do pulso anterior. A sobreposição de pulsos determina a uniformidade do cordão de soldadura. Este valor é normalmente indicado em percentagem, valores práticos oscilam entre 60% e 85%.

3.5.2.8 Velocidade de soldadura

A velocidade de processamento é o produto da frequência de pulso com a sobreposição de pulso. A velocidade diminui com o aumento da sobreposição de pulso assumindo que a

frequência de pulso se mantém constante e aumenta com o aumento da frequência de pulso, para sobreposição de pulso constante.

3.5.3 Soldadura laser Nd:YAG em modo pulsado

A Tabela 3.8 apresenta as vantagens, desvantagens e os parâmetros na soldadura laser em modo pulsado.

| | |
|------------------------------|---|
| Vantagens | <ul style="list-style-type: none"> ➤ A limitação temporal de energia incidente no alvo, resultando numa diminuição de transmissão de calor por condução em profundidade, e na redução de aquecimento no material base obtendo-se assim, soldaduras de maior qualidade. ➤ O elevado pico de potência e maior intensidade obtidas permite a melhoria de feixe do raio laser em alguns materiais, especialmente metais melhorando o seu processamento. |
| Desvantagens | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Diminuição da capacidade de processamento (corte, ou velocidades de soldadura) |
| Principais parâmetros | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Comprimento de onda do raio laser ➤ Tempo de pulso (comprimento do pulso, potência do pico, forma do pico) ➤ Taxa de repetição ➤ Distribuição de energia do feixe ➤ Geometria do feixe (tamanho do foco, profundidade do foco) |

Tabela 3.8 – Vantagens, desvantagens e parâmetros de soldadura laser em modo pulsado [22; 23]

3.5.4 Soldadura laser Nd:YAG com material de adição

Tal como nos processos de soldadura convencionais, o uso de fio de adição possibilita novos campos de aplicação do processo de soldadura laser. As características especiais da soldadura por feixe laser exigem certos procedimentos a ter em conta, o pequeno diâmetro do feixe de laser, e o intervalo da junta, são parâmetros que devem ser ajustados cuidadosamente [3]. Quando é utilizado fio como material de adição é possível soldar maiores espessuras entre juntas. O material de enchimento não só contribui para colmatar as lacunas, mas também permite uma adicional absorção do laser, que passaria através do intervalo entre superfícies se não houvesse utilização de material de adição [20].

A condição básica para a determinação do intervalo máximo que pode ser obtido na soldadura tem a ver com o facto do diâmetro do feixe tem de ser maior do que a largura do intervalo $a \leq 0,7d_s$ em que “ d_s ” é o diâmetro do feixe laser e “ a ” o intervalo entre os materiais a ligar [20].

Apesar da soldadura laser ser geralmente utilizada na forma autogénea, existem casos específicos em que é desejável e/ou essencial o uso de material de adição.

A importância da utilização de material de adição na soldadura laser passa por:

- Compensar a falta de enchimento nas peças.
- Modificar quimicamente a zona de fusão, de forma a alcançar propriedades desejadas na soldadura.
- Minimizar a distorção e contracção durante o processo de soldadura.

➤ Combinação dos factores anteriores.

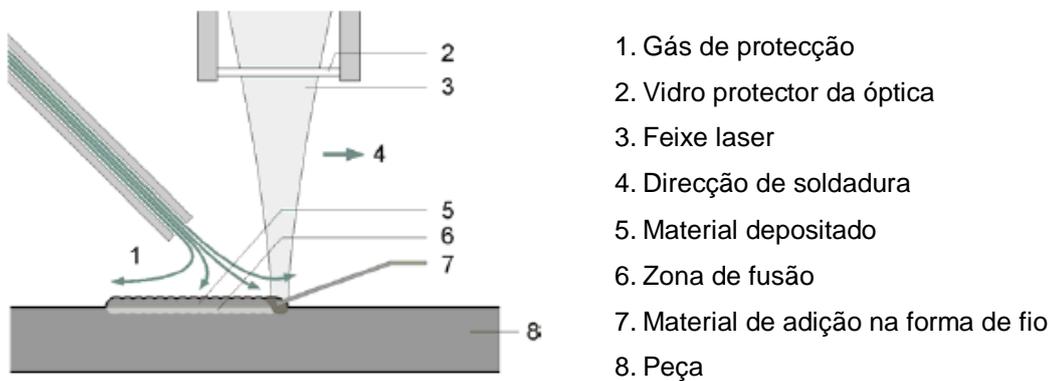


Figura 3.9 – Esquema de soldadura com material de adição [16]

A utilização de fio como material de adição melhora a soldadura de ligas de alumínio aumentando a absorção e melhorando deste modo o início da soldadura, permitindo penetrações mais profundas.

Os elementos de liga utilizados no material de adição fornecem propriedades importantes na soldadura a laser, o manganês aumenta a força da ligação, magnésio e zircónio aumentam a resistência à corrosão e propriedades mecânicas, o estanho melhora as propriedades mecânicas. Por sua vez a tendência para a fractura a quente é reduzida com o uso de silício, cobre e manganês [20;24].

Diversas literaturas apresentam tabelas com as ligas base dissimilares e quais os melhores materiais adição em função da aplicação pretendida ou defeito que se pretende minimizar [25].

3.6 Problemas de soldadura de alumínio com laser Nd:YAG

3.6.1 Qualidade

O objectivo de qualquer controlo de qualidade é de verificar se a peça vai executar a função para que foi concebida de forma fiável. Na soldadura os critérios de qualidade são centrados sobre as propriedades da soldadura e o efeito do processo de soldadura na peça. As soldaduras necessitam de preencher dois requisitos básicos:

A largura e a profundidade do cordão deve ser conforme especificado, estes determinam a secção transversal do cordão e deste modo a resistência de soldadura.

A qualidade metalúrgica: a estrutura interna da soldadura deve ser tão uniforme quanto possível e ter o grão o mais fino possível.

Existem normas técnicas como exemplo a EN ISO 13919-1 e EN 288 parte 15, especificam critérios de classificação de tipos de defeitos de soldadura. Outras organizações como a ASME IX apresentam exigências em processo de ensaio de homologação de soldaduras laser [3].

Os defeitos estão divididos em internos e externos, a Figura 3.10 e 3.11 mostram alguns desses defeitos.

3.6.1.1 Defeitos internos de soldadura

Tipicamente os defeitos internos de soldadura são:

- Fusão incompleta: intervalos de juntas incompletamente preenchidos.
- Poros: ar ou pequenas bolhas de gás são retidas na soldadura.
- Fissuras no interior ou na superfície de soldadura ou na peça.

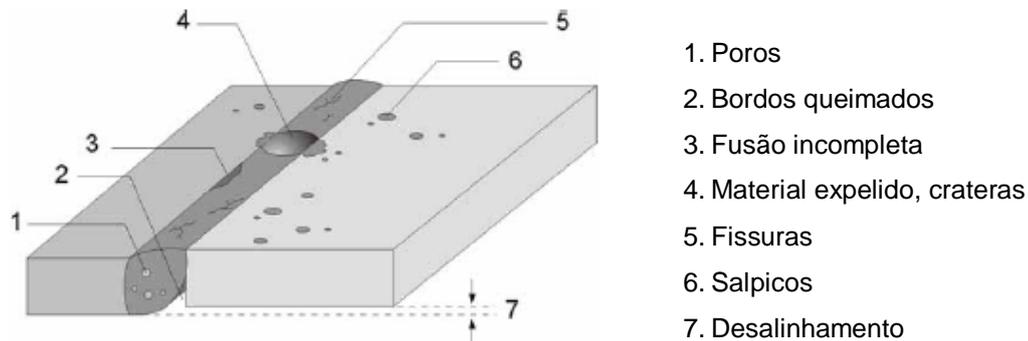


Figura 3.10 – Defeitos de soldadura [16]

3.6.1.2 Defeitos externos e seus efeitos

- Imperfeições de forma do cordão, como bordos queimados produzem pontos de fragilidade onde podem ocorrer fissuras.
- Material fundido expelido: formação de crateras devido ao material fundido expelido que faz diminuir a resistência do cordão e forma cordões porosos.
- Colapso do cordão e concavidade da raiz, assim como o desalinhamento das peças em juntas de topo e crateras no final do cordão e reduz a secção transversal da soldadura reduzindo a resistência do cordão.

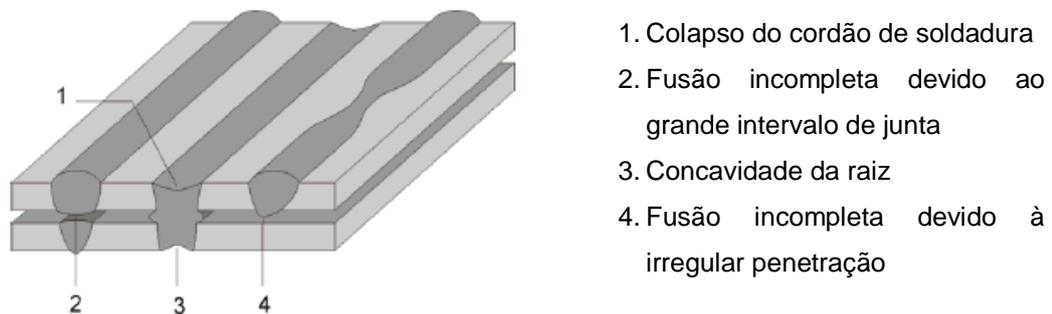


Figura 3.11 – Defeitos nas juntas de soldadura [16]

As ligas de alumínio têm, para além disso, algumas características particulares que afectam a sua soldabilidade, como por exemplo a facilidade de formação de óxidos, a solubilidade do hidrogénio e os problemas de fissuração. Outros aspectos, como a elevada condutividade térmica e eléctrica, a reflectividade e a não alteração de cor quando aquecida e o baixo ponto de ebulição dos elementos de liga, afectam também a realização das soldaduras [16]. Estes problemas têm impedido a realização consistente de soldaduras em alumínio e promovem os principais problemas de soldabilidade destas ligas.

3.6.2 Porosidades

Os principais tipos de porosidade obtida, na soldadura laser de ligas de alumínio são:

- Porosidade "fina", induzida pelo hidrogénio
- Porosidade devida a variações de forma e tamanho do keyhole
- Porosidade de dimensões elevadas, localizada tipicamente no fundo do keyhole

3.6.2.1 Porosidade "fina" induzida pelo hidrogénio

O hidrogénio dissolve-se muito rapidamente no alumínio fundido e nas suas ligas. Esta é uma das principais causas de formação de porosidade na soldadura de ligas de alumínio (Figura 3.12). A elevada temperatura atingida no banho de soldadura permite que grande quantidade de hidrogénio seja dissolvida e, à medida que o banho vai solidificando, a solubilidade do hidrogénio no metal vai diminuindo substancialmente. Quando o hidrogénio excede o limite de solubilidade fica retido durante a solidificação do banho de fusão, dando origem à formação de porosidades [21;26].

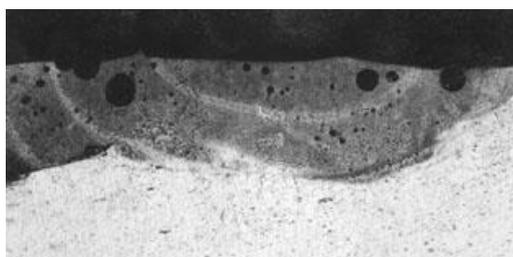


Figura 3.12 – Porosidade em ligas de alumínio utilizando material de adição soldadura laser Nd:YAG [27]

A solubilidade do hidrogénio no alumínio líquido é função exponencial da temperatura, razão pela qual as porosidades são um problema muito maior na soldadura laser devido às temperaturas atingidas, mais altas face aos processos convencionais. Uma solução possível é baixar a temperatura do gás de protecção (para cerca de 223 K) e proceder à remoção da camada de óxidos, existente à superfície [21]. Existe possivelmente também uma velocidade de soldadura crítica na qual o crescimento e formação de porosidades de hidrogénio podem ser evitados. Além disso, outra maneira de reduzir as porosidades é aumentar a potência, porque mantém o keyhole estável, aumentando o tempo de solidificação, permitindo a fuga do hidrogénio.

A composição da liga também é importante para a formação de porosidades, pois ligas com elevados teores de magnésio aumenta a solubilidade do hidrogénio no alumínio fundido durante a solidificação. Durante a solidificação uma grande quantidade de gás de hidrogénio gera bolhas na interface sólido-líquido, interagindo com o magnésio.

Níveis normais de hidrogénio em alumínio fundido variam de cerca de 0,10 a 0,40 mL/100g. No entanto, para que componentes aeroespaciais sejam aprovados em inspecções de qualidade o nível de hidrogénio tem de ser inferior a 0,06mL/100g [26].

Qualquer fonte de hidrogénio, como óleos, humidades na superfície ou óxidos hidratados, no material de base ou de adição, deve ser eliminada, de modo a minimizar o aparecimento de porosidades [11].

3.6.2.2 Porosidade devida a variações de forma e tamanho do keyhole

Especialmente em modo contínuo, verifica-se uma instabilidade no keyhole, isto é, variação na forma e tamanho. Esta instabilidade é devida à reflexão da radiação, da parede anterior para a posterior. Verifica-se assim, a propagação da cavidade, no sentido inverso à soldadura, a partir da parede posterior do keyhole. O keyhole deixa de ter uma forma aproximadamente cilíndrica, para passar a ter uma forma de "gota" irregular (variando com o tempo) que provoca porosidades [21].

O número de porosidades é fortemente influenciado por parâmetros, tais como, a energia por unidade de profundidade, focagem do raio laser e o comprimento de onda. A estabilidade é superior para menores comprimentos de onda (Nd:YAG) comparativamente aos raios laser de maior comprimento de onda (CO₂).

Uma forma de reduzir este tipo de porosidades é mantendo o keyhole estável que pode ser conseguido através de soldaduras realizadas a grandes velocidades com adição de fio de enchimento. Outro método eficaz para eliminar esta porosidade, é o uso de azoto, como gás de protecção. Este combina-se com o alumínio, dissolvendo as porosidades [26].

3.6.2.3 Porosidade de dimensões elevadas, localizada tipicamente no fundo do keyhole

Usando o modo pulsado (onda rectangular), verifica-se a formação de uma porosidade no fundo do keyhole. Esta pode levar à fissuração a quente. Alguns estudos realizados provaram a existência de vapores metálicos de magnésio e zinco, gás de protecção e ar, nessa porosidade. Pensa-se que, devido ao corte brusco da potência, ocorre um fecho brusco do keyhole. Os gases referidos ficam assim "aprisionados" no fundo do keyhole. É, assim, necessário estabilizar o keyhole no arrefecimento, para evitar este defeito. A solução encontrada, consiste em usar uma forma de onda que permita uma descida gradual da potência [21;26].

3.6.3 Fissuração a quente

A fissuração a quente pode ocorrer na zona fundida (ZF), designando-se então por fissuração na solidificação, ou na zona afectada pelo calor (ZAC), sendo classificada nesse caso como fragilização a quente. Este defeito ocorre por vezes a partir de certos tipos de porosidades [11]. A fissuração na solidificação está essencialmente associada à presença de elementos de liga e é mais importante na zona fundida em ligas com Mg e Si, por formação de Mg₂Si ou na zona termicamente afectada de ligas de alta resistência como os duralumínios ou as ligas de Al-Mn-Zn. Enquanto o primeiro tipo de fissuração é essencialmente devido às tensões originadas pela existência de um importante volume sólido no líquido, o segundo prende-se com a existência de compostos de baixo ponto de fusão [7].

No caso das ligas de alumínio, as fissuras que surgem durante a soldadura são produzidas pela interacção directa de muitos factores tais como: contracção na solidificação, tensões térmicas, ambas gera tensões e deformações; no campo da solidificação: temperatura e tempo de ciclo da velocidade de solidificação; composição química da liga (factor preponderante) (Figura 3.13); sistemas de fixação dos componentes soldados, que pode limitar

a contração. As actuais técnicas de diminuição da fissuração a quente na soldadura laser de ligas de alumínio intervêm no controlo dos factores acima descritos [28].

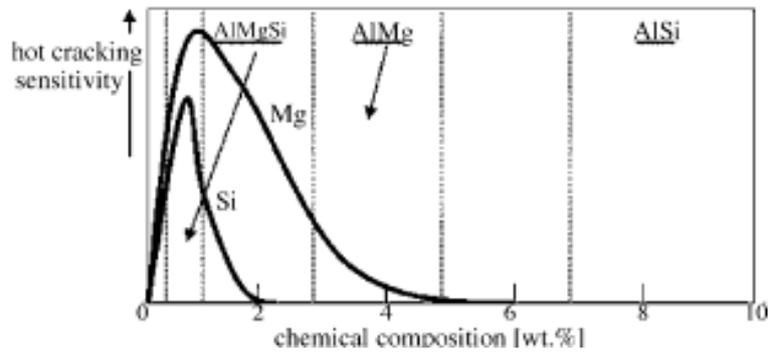


Figura 3.13 – Sensibilidade à fissuração a quente dependendo do teor de silício e magnésio [28]

Estudos demonstram que ainda não se encontra disponível um critério quantitativo genérico que consiga prever a fissuração a quente para diferentes condições. Assim, o conhecimento da influência dos parâmetros de soldadura permite estabelecer um critério de previsão no funcionamento de fissuras. O método mais utilizado para evitar o fenómeno de fissuração consiste em modificações químicas do banho de fusão. A fissuração a quente depende em grande parte da composição química da liga (ex. Al-Mg, Al-Si e Al-Si-Mg), [21]. Algumas ligas apresentam composição química dentro de valores que apresentam elevado risco de fissuração. Para diminuir esse risco fios de adição com a composição química adequada são adicionados durante a soldadura. Todavia, a soldadura pode ainda ser difícil, ou mesmo impossível, a menos que se consiga uma boa correlação entre os parâmetros de soldadura. A óptima correlação é difícil de encontrar, assim como, a melhor zona, pois a zona isenta de fissuras é muito restrita [28]

A fissuração a quente na soldadura de ligas de alumínio tem forte contribuição da sua alta expansão térmica, que provoca variação de volume durante a solidificação e ocorre na zona de maior intervalo de solidificação. A sensibilidade à fissuração de algumas ligas tratáveis termicamente deve-se especialmente à grande quantidade de elementos de liga existentes nestas ligas [26].

3.6.4 Amaciamento da ZAC

Devido às elevadas temperaturas verificadas, a zona fundida e a zona afectada pelo calor são sujeitas a uma degradação sensível das propriedades mecânicas, induzidas pelas alterações estruturais. Nas ligas de alumínio tratáveis termicamente, a ZAC pode ser distinguida pela destruição dos precipitados obtidos por tratamento térmico de endurecimento por precipitação. Nas ligas não tratáveis termicamente, a ZAC torna-se menos resistente devido à recristalização da estrutura encruada [11;21].

Como as ligas tratáveis termicamente requerem períodos maiores na temperatura de recozimento, combinado com um arrefecimento lento para completar o recozimento, a resistência da soldadura é menos afectada, podendo inclusivamente ser novamente tratadas, com o fim de recuperar as propriedades perdidas durante a soldadura [11].

3.6.5 Acções correctivas

Na Tabela 3.9 apresentou-se os defeitos típicos e limitativos nas soldaduras de ligas dissimilares de alumínio e possíveis acções correctivas.

| Defeitos | Acções correctivas |
|----------------------------|---|
| Fissuras | Verificar especificações de material Composição química do material de adição quando utilizado Verificar velocidade de soldadura Verificar geometria do cordão |
| Falta de penetração | Aumentar a potência laser Reduzir a velocidade de soldadura Aumentar a qualidade do feixe Aumentar a protecção gasosa |
| Falta de fusão | Melhorar o alinhamento do feixe laser relativamente à junta |
| Porosidades | Remover a contaminação da superfície Controlar a humidade e a sua contaminação Aumentar a protecção gasosa |
| Bordos queimados | Melhorar a fixação, eliminar intervalos entre juntas Verificar parâmetros de soldadura Utilizar fio de adição |
| Desalinhamento | Melhorar a fixação e preparação dos componentes |

Tabela 3.9 – Resumo de defeitos na soldadura laser e acções correctivas [3]

Neste capítulo procurou-se apresentar uma pesquisa actualizada do estado do conhecimento das ligas de alumínio e da soldadura de ligas dissimilares de alumínio utilizando lasers de Nd:YAG, visto que é um processo muito utilizado pela indústria e que apresenta ainda uma larga margem de evolução.

Devido à importância que o alumínio apresenta e as suas inúmeras aplicações, advém a necessidade de se proceder à soldadura de ligas dissimilares, com recurso a material de adição devido às limitações apresentadas das soldaduras na forma autogénea.

Procurou-se assim, soluções ao nível de selecção de materiais de adição, apresentando-se as vantagens e limitações, de forma a reduzir ou até mesmo anular os problemas típicos e limitativos que estas soldaduras apresentam.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

A parte experimental deste trabalho foi realizada na empresa inglesa Carr's Welding Technologies Ltd. (CWT) uma "Jobshop" que desenvolve trabalhos de soldadura com tecnologia laser tendo vários lasers de Nd-YAG que funcionam no modo pulsado, podendo utilizar material de adição, fio ou pó. Executa também trabalhos com as tecnologias de soldadura TIG e MIG/MAG.

A empresa tem como principal actividade a reparação de moldes e ferramentas e é também requisitada para a reparação de armas. Recebe vários trabalhos de soldadura de ligas dissimilares em alumínio recorrendo frequentemente a material de adição. O processo tecnológico mais utilizado na empresa é a soldadura laser com recurso frequentemente a material de adição [29].

Neste contexto o trabalho realizado vem estudar o comportamento de soldaduras de ligas dissimilares de alumínio, com o objectivo de melhorar a qualidade dos cordões obtidos e garantir a fiabilidade das peças produzidas.

O procedimento experimental está estruturado com base em três casos de soldadura de ligas de alumínio dissimilares com utilização de material de adição em fio.

- O primeiro caso é a investigação de soldadura de ligas dissimilares, com aplicação na indústria aeronáutica, daí a importância de soldadura de alumínio, pois devido ao seu baixo peso e elevada resistência o alumínio é um material muito utilizado na construção de aviões. Neste contexto é utilizada uma liga fundida de alumínio silício e magnésio a que se pretende ligar uma liga da série 6xxx.
- O segundo estudo tem aplicação na indústria militar e tem como intuito, determinar o melhor material de adição a utilizar na soldadura de diferentes ligas da série 6xxx. Foram analisados 4 tipos de fio como material de adição, comparando as potencialidades e limitações de cada um deles.
- O terceiro estudo é de aplicação de ligas alumínio no fabrico de componentes de informática, pretendendo-se efectuar a ligação de ligas da série 6xxx com a série 5xxx, com ou sem material de adição.

Pretende-se assim, relacionar os factores operacionais com os processos de soldadura utilizados e a partir daí aferir sobre a qualidade da soldadura como é representado na Figura 4.1.



Figura 4.1 – Design funcional do sistema de soldadura laser

Neste estudo os factores operacionais predominantes são, os materiais base e os materiais de adição. No processo de soldadura intervém-se ao nível da geometria e da composição química através da variação do material de adição. Ao nível da qualidade todos os parâmetros são de elevada importância de forma a garantir a qualidade e fiabilidade exigida pela empresa CWT.

4.2 Equipamento utilizado

Os lasers cilíndricos pulsados no estado sólido da *Trumpf* têm sido utilizados na produção industrial ao longo de décadas. Os lasers da marca *Trumpf* estão divididos em séries, sendo utilizado um laser da série HL. Os laser da série HL são de baixa potência, especialmente indicados para soldadura e corte de precisão. Por sua vez, lasers de alta potência de pulso, são capazes de soldar simultaneamente em vários locais diferentes. A profundidade de soldadura pode ser controlada através dos parâmetros laser até uma profundidade de 2 mm. Nas aplicações de corte, são facilmente cortados materiais de espessura até 4 mm e os contornos de intervalo de um décimo de milímetro.

Lasers pulsados no estado sólido são usados para trabalhos manuais ou integrados em linhas de produção. Os lasers sólidos da série HL da marca *Trumpf* apresentam as seguintes características descritas na Tabela 4.1 [30].

| Propriedades série HL | | | |
|--------------------------|--|--|---|
| Tipo de Laser | Atributos Técnicos | Propriedades | Processos |
| Laser cilíndrico pulsado | Meio activo: Nd:YAG Excitação: Lâmpadas de flash Direcção de bombeamento: Transversa | Modo de Operação: Contínuo Pulsado Potência: 0,4 a 4,4 kW Comprimento de onda: 1064 nm Qualidade do feixe: 12 mm.mrad a 0,4kW Até 25 mm.mrad a 4,4 kW | Soldadura Corte Brasagem Endurecimento Soldadura de deposição |

Tabela 4.1 – Propriedades Lasers Trumpf série HL [16]

O equipamento utilizado na realização dos cordões analisados neste trabalho, é um dos presentes na empresa Carr's Welding Technologies Ltd., laser sólido de Nd-YAG da marca *Trumpf* da série HL modelo 124 P (Figura 4.2) e que tem as características apresentadas na Tabela 4.2.



Figura 4.2 – Laser HL 124 P (Carr's Welding Technologies Ltd.)

A Tabela 4.2 descreve as propriedades do laser utilizado.

| Propriedades Laser Trumpf HL 124 P | | |
|--|--------|---------|
| Comprimento de onda | 1064 | nm |
| Potência média máxima | 120 | W |
| Potência pulsada mínima | 300 | W |
| Potência pulsada máxima | 5000 | W |
| Duração de pulso para máxima potência de pulso | 5/10 | kW/ms |
| Duração do pulso para potência de pulso reduzida | 0,3/20 | kW/ms |
| Energia pulsada máxima | 50 | J |
| Frequência de repetição de pulso máxima | 300 | Hz |
| Qualidade do feixe laser | 16 | mm mrad |

Tabela 4.2 – Especificações para o laser Trumpf HL 124 P [30]

4.2.1 Estações de trabalho

A estação de trabalho deve garantir que as peças possam ser rapidamente processadas e reprocessadas. A estação deve ser concebida de forma a garantir o conforto na realização da função do operador, mesmo em trabalhos longos e garantir a segurança do operador. Uma vez que o raio laser pode ser prejudicial para a visão em contacto directo, o local de execução de cordões de soldadura com utilização laser deve estar completamente vedado.

O processamento de peças até um peso aproximado de 400 kg pode ser efectuado em estações fechadas através da movimentação das peças em mesas móveis. Estas estações quando utilizadas conforme a indicação do fabricante garantem todas as regras de segurança.

No entanto, grandes peças exigem estações de trabalho abertas e neste caso, toda a área envolvente ao processamento com laser passa a ser área de trabalho, desta forma os operadores têm de seguir os regulamentos de segurança, estipuladas para salas em que operam lasers [30].

Na empresa CWT o laser HL 124 P funciona em estações de trabalho fechadas e as soldaduras de ligas de alumínio utilizadas na presente investigação foram realizadas nas estações de trabalho apresentadas na Figura 4.3 e Figura 4.4 referidos como 1 e 2 respectivamente.

A estação de trabalho *PowerWeld* (Figura 4.3) é adaptada para o processamento de pequenas peças pesando até 100 kg, numa área de trabalho fechada. O design ergonómico da estação permite soldaduras precisas, sem fadiga do operador, uma vez que este executa o trabalho sentado [30].

Estação de trabalho 1



Figura 4.3 – Estação de trabalho 1 - Power Weld (Juntas de Canto)

A estação *Power Weld* apresenta as características apresentadas na Tabela 4.3.

| Estação de trabalho 1 | Área de trabalho W x D x H [mm] | Peso peça | Curso [mm] | Dimensões W x D x H [mm] |
|-----------------------|---------------------------------|---|----------------------------|------------------------------|
| Power Weld | 800x300x600 | máx. 100 kg ¹ Movimento livre | X: 250 Y: 250 Z: 300 | 940x1000x1450 (máx. 1750) |

Tabela 4.3 – Características estação de trabalho Power Weld [30]

Estação de trabalho 2

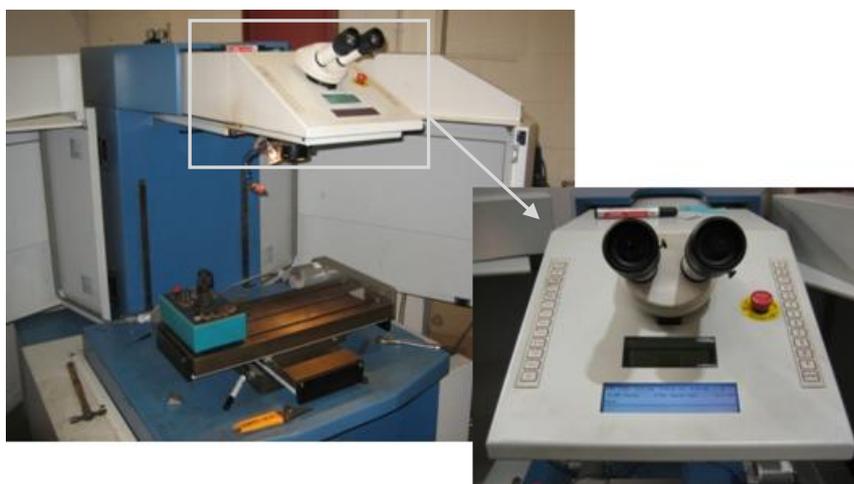


Figura 4.4 – Estação de trabalho 2 (Juntas de Topo)

4.3 Procedimento de execução das soldaduras

Os cordões de soldaduras executados na empresa CWT foram efectuados por um soldador especializado recorrendo ao laser descrito anteriormente, fixando as peças na mesa da estação de trabalho. A mesa de trabalho desloca-se nos três eixos x, y e z, sendo a peça fixada na mesa através de sistemas de posicionamento. Inicialmente é feita a focagem da peça através da movimentação do eixo do z (que controla a distância ao feixe), através das oculares de ampliação que possuem uma mira do local da incidência do feixe laser, a partir das quais o operador visualiza a peça e os cordões de soldadura, protegido da radiação.

O feixe laser é accionado em ambas as estações de trabalho através de um pedal. O movimento segundo x e y é garantido por um “joystick” que faz deslocar a mesa onde a peça se encontra fixa. Não é possível durante o accionamento do feixe movimentar o eixo do z de forma a não desfocar o cordão. O operador deste modo controla a velocidade da execução do cordão através do “joystick” aumentando ou diminuindo a velocidade mediante a interpretação da qualidade superficial adquirida pelo cordão. O fio de adição é alimentado manualmente pelo operador, controlando com uma mão o “joystick” que controla a velocidade de soldadura da peça fixa na mesa e com a outra mão, o fio de adição. Através do pedal controla o accionamento do feixe laser. Assim, o processo de soldadura exige profissionais altamente treinados e especializados para a realização de cordões de qualidade exigidos pelos clientes da CWT.

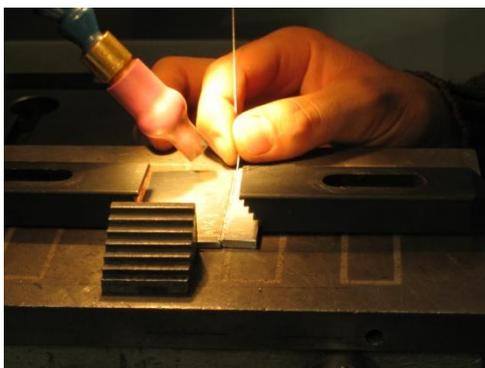


Figura 4.5 – Execução de soldadura laser Nd:YAG com fio de adição (CWT)

4.4 Ensaios de Caracterização

Após a realização das soldaduras procedeu-se a uma sequência de ensaios que visaram a caracterização da qualidade das juntas soldadas e a análise das características metalúrgicas associadas às condições operatórias da ligação.

Os ensaios não destrutivos realizados consistiram na análise visual para caracterização superficial dos cordões e realização de líquidos penetrantes em algumas das peças.

Os ensaios destrutivos utilizados para a caracterização das juntas soldadas foram realizados no Instituto Superior Técnico (IST). Efectuou-se a caracterização metalográfica, procedendo-se à análise com recurso a microscopia óptica e procedeu-se também a análise com recurso a microscopia de varrimento (SEM). O ensaio mecânico realizado foi a medição dos perfis de dureza dos cordões de soldadura para as diversas amostras.

4.4.1 Análise visual

Após a realização da soldadura das peças de alumínio, procedeu-se à observação dos cordões obtidos. A observação foi complementada através de fotografia das peças soldadas e registo dos aspectos principais necessários para interpretar superficialmente os cordões produzidos. Esta análise constitui apenas uma interpretação qualitativa, ao nível de qualidade da superfície dos cordões obtidos nos diferentes casos estudados.

4.4.2 Análise de Líquidos Penetrantes

De forma a complementar a análise visual implementada em todas as peças, algumas das peças foram sujeitas a testes de líquidos penetrantes por parte da empresa CWT de forma a garantir a integridade superficial das soldaduras obtidas.

4.4.3 Análise Metalográfica

A análise macrográfica tem como objectivo a caracterização da zona de ligação, enquanto a análise micrográfica visa a caracterização mais detalhada de determinadas zonas, de modo a conhecer a morfologia do grão e as suas alterações com a soldadura.

As amostras, para a realização dos ensaios, foram retiradas na secção transversal das soldaduras e, devido às suas reduzidas dimensões foram montadas em moldes de resina para melhor manuseamento. O procedimento de preparação, montagem e polimento das amostras é descrito no anexo A.1. Para a análise macrográfica das amostras foram efectuadas fotografias nas amostras contrastadas com o reagente Keller utilizando uma máquina fotográfica modelo *Canon Digital Ixus 55*. Na análise micrográfica foram realizadas fotografias com o auxílio de um microscópio óptico da marca *Hund-Wetzlar* modelo H-600, utilizando uma máquina incorporada no microscópio de modelo *Canon EOS 300 D Digital*.

4.4.4 Microscopia de varrimento – SEM

Nas soldaduras realizadas procedeu-se à análise das amostras com recurso um microscópio de varrimento da marca *Hitachi*, modelo S2400 equipado com um detector EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) standard da marca *Rontec*, estando as suas características descritas no anexo A.2.

4.4.5 Ensaios de dureza

Os ensaios de dureza determinam a resistência à indentação quando se aplica uma determinada carga no material. Pretendeu-se realizar um perfil de dureza de Vickers ao longo da secção transversal do material, desde o material base de uma das ligas até ao material base da outra liga, passando pelas zonas afectadas pelo calor e pela zona fundida. A dureza medida permite avaliar em termos relativos, a evolução da resistência mecânica ao longo do cordão. Os ensaios foram realizados segundo a norma ISO 6507-2 [31], com uma carga de 1 kgf, aplicada durante 15 s, em diversas zonas das diferentes amostras. O aparelho de dureza utilizado era da marca *Struers* modelo Duramin.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Soldadura – Liga LM 25 com 6061

5.1.1 Material e suas características

Os materiais utilizados neste estudo são ligas de alumínio, utilizadas na indústria aeronáutica sendo no caso concreto a soldadura de um componente electrónico de um avião designado por TVA Body. As ligas base e o material de adição utilizados estão descritos na Figura 5.1.



Figura 5.1 – Amostra Fornecida (TVA Body)

5.1.1.1 Propriedades material base

Os materiais base soldados neste caso são a liga fundida de alumínio silício magnésio (série 3xx.x) designada na nomenclatura inglesa por liga LM 25 (A 356.0) e uma liga da série 6xxx que tem como elementos principais magnésio e silício [8].

A liga fundida LM 25 é utilizada principalmente quando são exigidas elevadas propriedades mecânicas de peças fundidas. A liga é também utilizada quando a resistência à corrosão é uma consideração particularmente importante e quando são requeridas altas tensões. Consequentemente a liga encontra aplicação em estruturas marítimas, eléctricas e sobretudo no domínio dos veículos de transporte rodoviários, blocos e cabeças de motores e outros corpos de fundição. As potenciais utilizações e características são aumentadas através de quatro tratamentos térmicos disponíveis para areias ou moldes de fundição. Trata-se assim de uma liga de fundição de alta resistência mecânica [32].

A liga 6061 é uma das mais amplamente utilizadas na série 6xxx das ligas de alumínio. Trata-se de uma liga versátil, tratável termicamente, extrudida, com resistência mecânica média/alta. Devido à sua elevada resistência mecânica encontra ampla aplicação em elementos estruturais soldados como, aeronaves e componentes aeroespaciais, camiões, carros, estruturas de bicicletas, gasodutos, estruturas e acessórios marítimos e ferroviários [32;33].

A composição química e as propriedades mecânicas das ligas base encontram-se na Tabela 5.1 e 5.2.

| Composição química [% mássica] | | |
|---------------------------------------|--------------|----------------|
| Elemento | LM 25 | 6061-T6 |
| Si | 6,5-7,5 | 0,4-0,8 |
| Fe | 0,5 | 0,7 |
| Cu | 0,1 | 0,15-0,40 |
| Mn | 0,3 | 0,15 |
| Mg | 0,20-0,60 | 0,8-1,2 |
| Cr | - | 0,04-0,35 |
| Pb | 0,1 | - |
| Sn | 0,05 | - |
| Zn | 0,1 | 0,25 |
| Ti | 0,2 | 0,15 |
| Outros | Cada | 0,05 |
| | Total | 0,15 |
| Al | 90,15-91,55 | 95,8-98,6 |

Tabela 5.1 – Composição química materiais base [34]

Os valores das propriedades mecânicas para a liga fundida LM 25 variam mediante a utilização de molde de areia ou molde permanente. Os valores presentes na Tabela 5.2 são para molde permanente com tratamento térmico T6.

| Propriedades | Tensão de rotura [MPa] | Tensão de cedência [MPa] | Extensão [%] | Módulo de elasticidade [GPa] | Dureza [HV] |
|---------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------|
| LM 25 (T6) | 240 | 225 | 4 | 72 | 68-107 |
| 6061-T6 | 310 | 276 | 12 | 68,9 | 107 |

Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas dos materiais base [9;34]

5.1.1.2 Material de adição

A soldadura pretendida é executada com recurso a material de adição tendo-se utilizado a liga 4047 em fio, material muito utilizado como fio de adição nas soldaduras de ligas dissimilares de alumínio. É uma liga não tratável termicamente. O fio de alumínio 4047 foi originalmente desenvolvido como liga de brasagem para tirar partido do seu baixo ponto de fusão e estreito intervalo de solidificação. Além disso, tem um maior teor de silício (12%), superior à liga 4043 (5%), que aumenta a fluidez e reduz a contracção na solidificação. A fissuração a quente é significativamente reduzida quando se utiliza a liga 4047 como material de adição.

Esta liga é principalmente concebida para a soldadura das ligas 1060, 1100, 3003, 5005, 6061, 6063 e as ligas fundidas A612 e C612. Pode ser utilizada em aplicações de manutenção de elevada temperatura, como permutadores de calor, aparelhos de pressão, reservatórios de oxigénio líquido e na ligação de componentes estruturais [32;34]. A composição química e propriedades mecânicas desta liga encontram-se tabeladas na secção 5.2.1.2.

O diâmetro do fio de adição utilizado para ambas as configurações de junta testadas é de 0,38 mm (0,015 inch).

5.1.2 Configuração da Junta

Na realização deste trabalho foram testadas duas configurações de juntas:

Junta A

Procede-se ao encaixe simples dos dois componentes sendo que a liga LM 25 tem um encaixe onde entra o conector (liga 6061), sendo depois executado o cordão de soldadura circular ($\varnothing=2,8$ mm) em volta do conector (Figura 5.2).

Junta B

Igual à anterior, à excepção de se proceder previamente à abertura de um chanfro no conector, liga 6061 (Figura 5.3).

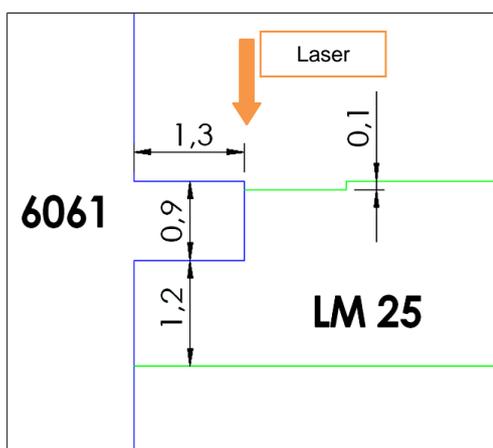


Figura 5.2 – Configuração de junta A

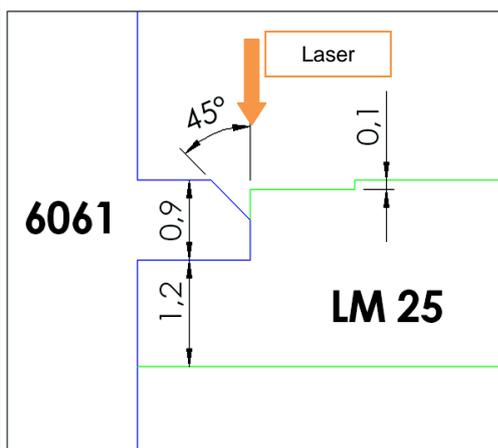


Figura 5.3 – Configuração de junta B

Considera-se que a soldadura possui penetração completa quando a profundidade do cordão é superior a 1 mm, sendo garantida desta forma uma soldadura estanque e uma diminuição da concentração de tensões na raiz do cordão.

Ambas as configurações apresentaram uma maior zona de enchimento com material de adição sobre a liga LM 25 que apresenta boa soldabilidade com a liga de adição 4047, reduzindo assim a zona de ligação com a liga 6061 que apresenta com maior frequência problemas de soldabilidade. O chanfro efectuado pode trazer vantagens pois diminui a zona fusão da liga 6061 aumentando a fusão da liga LM 25 com teores de silício próximo do material de adição que possibilita uma boa soldabilidade entre ligas.

5.1.3 Designação das amostras

As peças analisadas foram fornecidas pela empresa CWT e estão divididas em dois lotes. O lote A representa as peças com a configuração de junta A. O lote era constituído por um total de 10 peças, com 7 peças soldadas, estando as restantes por soldar. O lote B apresenta a configuração de junta B e foram analisadas 2 peças.

A catalogação das peças tem seguinte forma exemplificativa, "A-1-A" sendo que a primeira letra representa o lote, o primeiro algarismo a peça e a última letra o número de amostras retirada a cada peça, para análise metalográfica. A Tabela 5.3 indica se a peça vem completa ou se foi cortada para análises na empresa. Apresenta também as peças em que

foram executados testes de líquidos penetrantes, defeitos revelados, reparações executadas nos cordões e as amostras retiradas a cada peça.

| Lote | Peça | Estado | Testes (CWT) | Reparada | Defeitos | Amostras |
|------|------|----------|------------------|----------|-------------------|---------------|
| A | 1 | Completa | - | Não | - | A, B, C, D, E |
| | 2 | Cortada | Líq. Penetrantes | Não | Largura do cordão | - |
| | 3 | Cortada | Líq. Penetrantes | Sim | Largura do cordão | - |
| | 4 | Completa | Líq. Penetrantes | Sim | - | A |
| | 5 | Completa | Líq. Penetrantes | Não | Poros | - |
| | 6 | Completa | Líq. Penetrantes | Sim | - | - |
| | 7 | Completa | Líq. Penetrantes | Sim | - | - |
| B | 1 | Cortada | - | Não | - | A, B |
| | 2 | Cortada | - | Sim | - | A |

Tabela 5.3 – Designação implementada e estado das amostras fornecidas pela CWT

As amostras foram todas montadas a quente em resina acrílica à excepção das amostras A-1-C, A-1-D e A-1-E que foram montadas a frio estando o processo descrito no anexo A.1.

5.1.4 Parâmetros de Soldadura

Os parâmetros utilizados foram escolhidos mediante anos de experiência na soldadura de ligas dissimilares de alumínio pela empresa Carr's Welding Technologies Ltd.

| | Potência [kW] | Duração [ms] | Frequência [Hz] | Tamanho do foco [mm] |
|---------------------|---------------|--------------|-----------------|----------------------|
| Passo Autogéneo | 2,5 | 5,2 | 6,5 | 0,8 |
| Passo Fio de Adição | 2,5 | 5,2 | 8,0 | 0,85 |
| Passo de acabamento | 2,5 | 5,2 | 8,0 | 1,2 |

Tabela 5.4 – Parâmetros de soldadura TVA Body

O gás de protecção utilizado é árgon que sai coaxialmente com o feixe laser.

Os parâmetros seleccionados não variaram ao longo do processo, uma vez que, são os mais eficazes para o equipamento laser e materiais base e de adição utilizados. Assim, para os mesmos parâmetros são testadas duas configurações de junta. O que se pretendeu foi então aferir sobre que configuração apresenta melhores resultados utilizando o mesmo material de adição.

5.1.4.1 Velocidade de soldadura

A velocidade de soldadura nos ensaios realizados é um parâmetro que não é fornecido pelo dispositivo laser, nem é constante, dado que a velocidade é controlada pelo operador que dá movimento à peça através da mesa móvel onde esta está fixa e controla o fio de adição manualmente. Este parâmetro é calculado aproximadamente com base na Equação 5.2 utilizada pelo fabricante do laser para esta série de lasers [35].

Assim para os casos estudados a velocidade altera de operador para operador, pois o cordão não é feito de modo contínuo, podendo o operador avançar ou recuar durante a execução do cordão, pode também variar para os diferentes equipamentos utilizados.

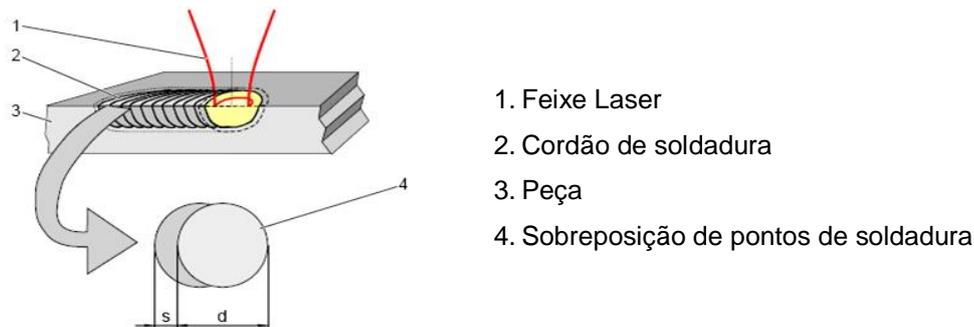


Figura 5.4 – Velocidade de soldadura [35]

u → Sobreposição de pontos (%)

d → Diâmetro de um ponto de soldadura, que corresponde ao diâmetro do foco (mm)

s → Distância de um ponto para outro (mm)

Em que se aplica a seguinte relação:

$$s = d \left(1 - \frac{u}{100\%} \right)$$

Equação 5.1 – Distância de um ponto para outro [35]

Com o conhecimento da frequência de pulso (f_p) a velocidade de soldadura em mm/s é dada pela Equação 5.2.

$$v = f_p \times s = f_p \times d \left(1 - \frac{u}{100\%} \right)$$

Equação 5.2 – Velocidade de soldadura [35]

Cálculo da velocidade de soldadura

Conhecendo a frequência e o tamanho do foco é feita uma estimativa da velocidade de soldadura, considerando a sobreposição de pontos entre o valor máximo e mínimo.

| | Velocidade de soldadura | | | Unidades |
|--|-------------------------|---------------|------------|----------|
| | Autogéneo | Fio de adição | Acabamento | |
| Frequência de pulso (f_p) | 6,5 | 8 | 8 | Hz |
| Tamanho do foco (d) | 0,8 | 0,85 | 1,2 | mm |
| Distância de um ponto para outro (s) (com $u=60\%$) | 0,32 | 0,34 | 0,48 | mm |
| Distância de um ponto para outro (s) (com $u=85\%$) | 0,12 | 0,1275 | 0,18 | mm |
| Velocidade (v) (com $u=60\%$) | 2,08 | 2,72 | 3,84 | mm/s |
| Velocidade (v) (com $u=85\%$) | 0,78 | 1,02 | 1,44 | mm/s |

Tabela 5.5 – Cálculo velocidade de soldadura

Assim, ao longo dos casos estudados apresenta-se um intervalo entre a velocidade máxima e mínima permitida para execução dos cordões de soldaduras.

5.1.5 Análise Visual

A seguinte análise serve para interpretar qualitativamente a qualidade superficial dos cordões obtidos.

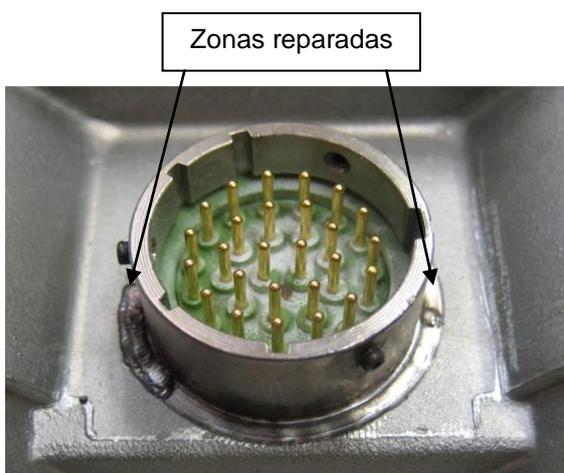


Figura 5.5 – Aspecto superficial do cordão (A-7)

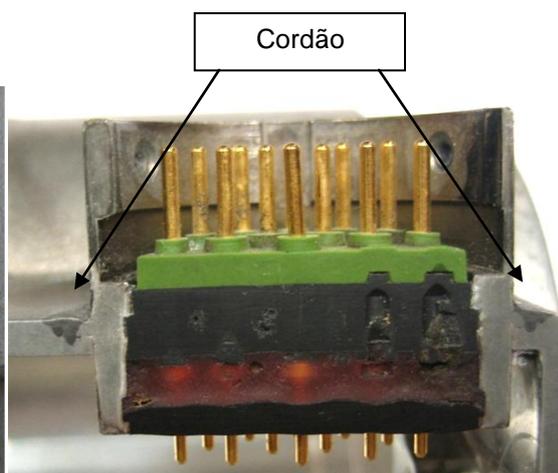


Figura 5.6 – Corte transversal (B-2)

Os cordões exibiram uma largura regular, no entanto, apresentaram em diversas amostras zonas reparadas (Figura 5.5) que tornaram o cordão irregular nessas zonas, diminuindo a qualidade superficial dos cordões. As reparações efectuadas também contribuíram para a formação de bordos queimados no conector (liga 6061). Na Figura 5.6 visualiza-se o corte da secção transversal da peça utilizando a configuração de junta B. Pode-se verificar uma elevada penetração na configuração B devido ao chanfro efectuado.

5.1.6 Análise de Líquidos Penetrantes

As peças soldadas são sujeitas a ensaios de líquidos penetrantes e reparadas sempre que apresentem, algum defeito superficial.



Figura 5.7 – TVA Body ensaios de LP (A-4)

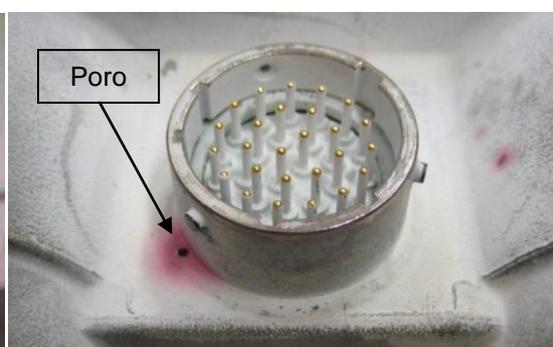


Figura 5.8 – Detecção de poros com LP (A-5)

Como exemplo de peças isentas e com defeitos superficiais nos cordões temos, a Figura 5.7 que apresenta a peça A-4 sujeita ao ensaio de líquidos penetrantes que se encontra isenta de defeitos superficiais. A Figura 5.8 apresenta a peça A-5 que apresenta poros no cordão esta peça será sujeita à reparação pontual no local do poro com recurso ao fio de adição utilizado para a execução do cordão.

5.1.7 Análise de resultados

A inspecção visual foi efectuada a todas as peças fornecidas de ambas as configurações, apresentando-se os resultados na Tabela 5.6.

| Aspectos | | Lote - Peça | | | | | | | | |
|-------------------|--------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | A-1 | A-2 | A-3 | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 | B-1 | B-2 |
| Largura do cordão | Regular | x | | | x | x | x | x | x | x |
| | Variável | | | | | | | | | |
| | Insuficiente | | x | x | | | | | | |
| Poros | Existentes | | | | | x | x | | | |
| | Inexistentes | x | x | x | x | | | x | x | x |
| Convexidade | Marcada | | | | x | x | | | | |
| | Suave | x | x | x | | | x | x | x | x |
| | Inexistente | | | | | | | | | |
| Reparação | Sim | | | x | x | | x | x | | x |
| | Não | x | x | | | x | | | x | |
| Bordos Queimados | Existente | | | | x | | x | x | x | x |
| | Inexistente | x | x | x | | x | | | | |

Tabela 5.6 – Observações resultantes da análise visual das soldaduras TVA Body

A largura do cordão assim como a penetração são parâmetros fundamentais numa soldadura pois são eles que determinam a resistência da ligação, desta forma as peças A-2 e A-3 são peças rejeitadas pois não apresentam a largura definida e assim, não garantem a fiabilidade da ligação.

Os poros detectados no ensaio de líquidos penetrantes não são aspecto de exclusão das amostras uma vez que, estas são reparadas superficialmente apenas reduzindo a qualidade do aspecto visual do cordão que passa a apresentar reparações (Figura 5.5).

As reparações são efectuadas após os ensaios de líquidos penetrantes que frequentemente revelaram poros superficiais que necessitam de ser reparados, no entanto estas reparações fazem diminuir o aspecto superficial e provocam com frequência bordos queimados no conector (liga 6061) devido à proximidade do cordão, afectando a qualidade da liga base.

A convexidade tal como os poros superficiais detectados não é determinante para a aceitação das soldaduras, apenas quantifica o aspecto superficial, só no caso de se dar o abatimento do cordão se excluíam peças, caso que não se verificou.

5.1.8 Análise Metalográfica

5.1.8.1 Análise Macrográfica

A análise macrográfica consiste na caracterização macroestrutural das juntas soldadas com ampliações menores que 50x. Este ensaio tem como objectivo a caracterização comparada da morfologia dos cordões obtidos com os diferentes parâmetros, assim como, a identificação de defeitos macroestruturais existentes.

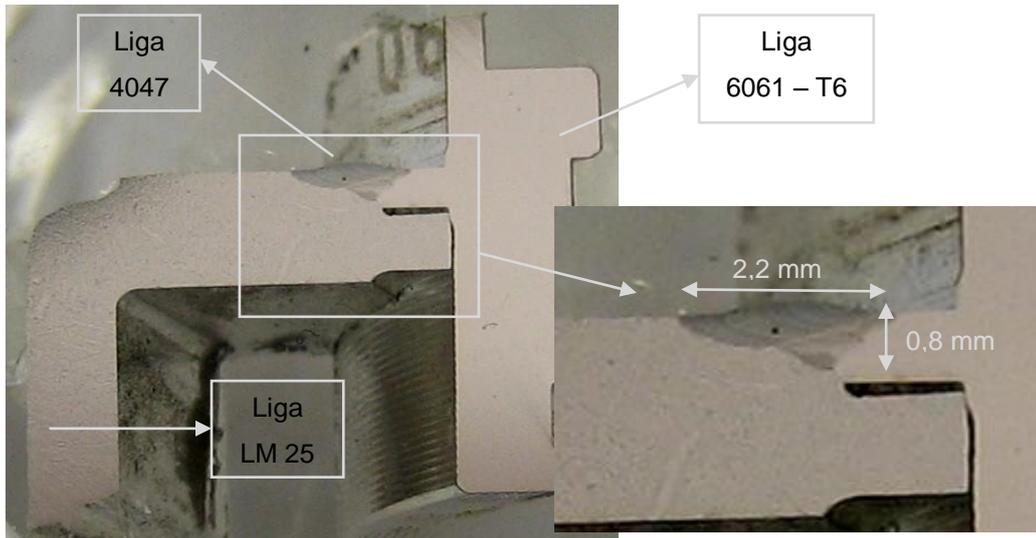


Figura 5.9 – Macrografia da secção transversal configuração A (A-1-A)

Para a configuração de junta A obteve-se uma largura de 2,2 mm e uma profundidade de penetração de 0,8 mm, que faz diminuir a secção transversal do cordão e por sua vez a resistência da soldadura. A falta de penetração pode frequentemente originar pontos de concentração de tensões na raiz do cordão dando-se a fractura do cordão. Assim, teve que se testar uma nova configuração de junta na qual se efectua um chanfro na liga LM 25 (Figura 5.3) de forma a aumentar a penetração.

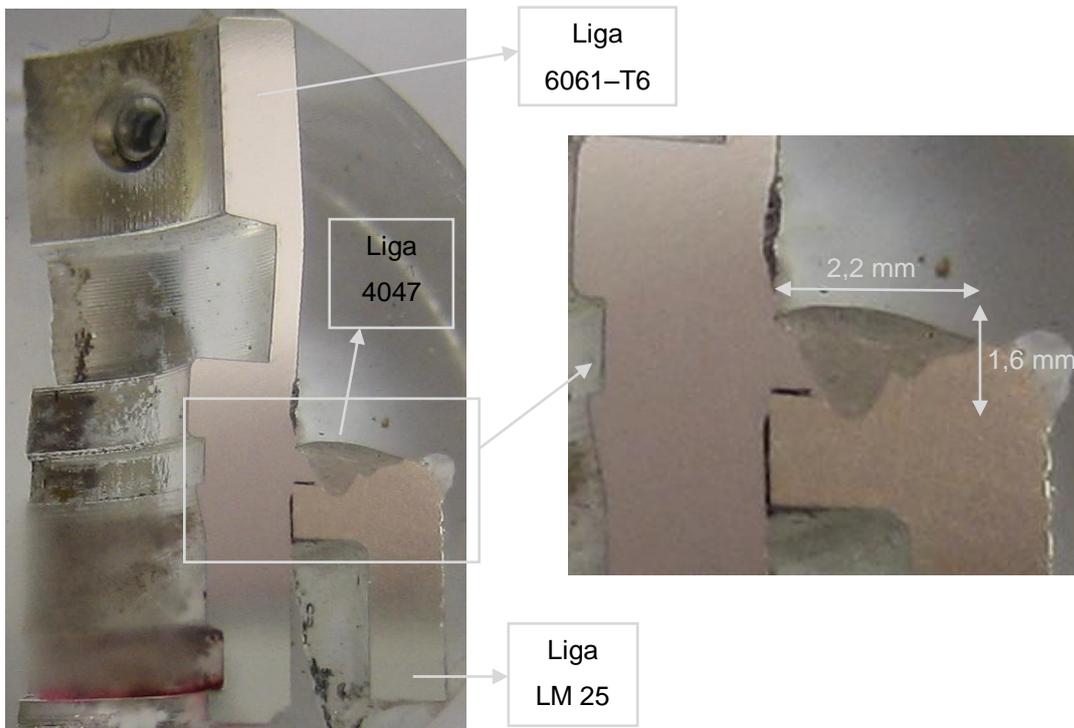


Figura 5.10 – Macrografia da secção transversal configuração B (B-2-A)

A macrografia da configuração B apresentou a mesma largura revelada para a configuração A, no entanto, revelou uma profundidade de 1,6 mm. Desta forma obteve-se uma maior secção transversal do cordão incrementando a resistência da soldadura.

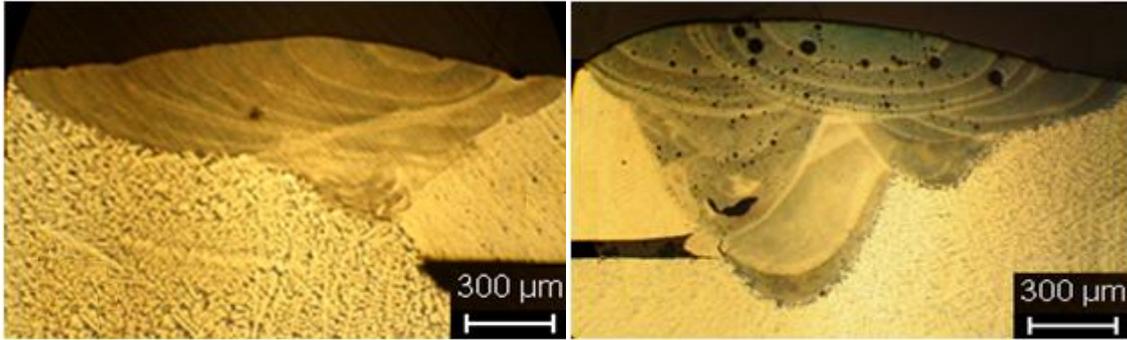


Figura 5.11 – Macrografias das juntas soldadas com as configurações A (A-1-A) e B (B-2-A) respectivamente

A configuração A apresentou-se quase isenta de porosidades e revelou uma boa ligação na interface da zona fundida com os materiais base.

Na junta B visualizou-se um elevado número de porosidades, principalmente na parte superior do cordão. É possível também constatar falta de colagem entre passos na zona fundida, devido à adição de fio ser manual, e como a secção de enchimento é superior nesta configuração, este defeito é mais frequente.

5.1.8.2 Análise Micrográfica

A análise micrográfica consiste na caracterização microestrutural das juntas soldadas através de microscopia óptica. Através desta análise é possível avaliar com maior detalhe os aspectos revelados pela análise macrográfica assim como a caracterização pormenorizada de todas as zonas da soldadura, em comparação com a estrutura do material base.

Materiais Base

Os materiais base utilizados são iguais para ambas as configurações de junta, na Figura 5.12 e 5.13 são apresentadas as microestruturas dos materiais base utilizados.



Figura 5.12 – Microestrutura liga LM 25



Figura 5.13 – Microestrutura liga 6061-T6

As reacções eutéticas são características das ligas alumínio silício. Assim a liga LM 25 (Figura 5.12) apresenta uma microestrutura hipoeutética com um teor de silício <12%. Ligas alumínio-silício hipoeutéticas têm uma microestrutura constituída por grãos de uma fase rica em Al e uma mistura eutética de Al-Si [36;37].

Nas ligas da série 6xxx quando o conteúdo dos elementos de liga ultrapassam a solubilidade limite na fase sólida, a liga produz constituintes de microestrutura de segunda fase.

Os constituintes de segunda fase podem consistir em precipitados de elementos puros ou fases intermetálicas. Assim, na microestrutura da liga 6061 (Figura 5.13) verificou-se a existência partículas de segunda fase de Mg_2Si na solução sólida de alumínio [36;38].

O material base de ambas as ligas apresentou uma microestrutura homogénea.

Junta A

Nesta análise tomou-se como exemplo a amostra A-1-A que é representativa dos cordões com a configuração da junta A. Procurou-se nesta análise apresentar as características principais da ligação desta liga de adição com estes materiais base e os defeitos recorrentes da ligação e não os defeitos particulares da amostra.

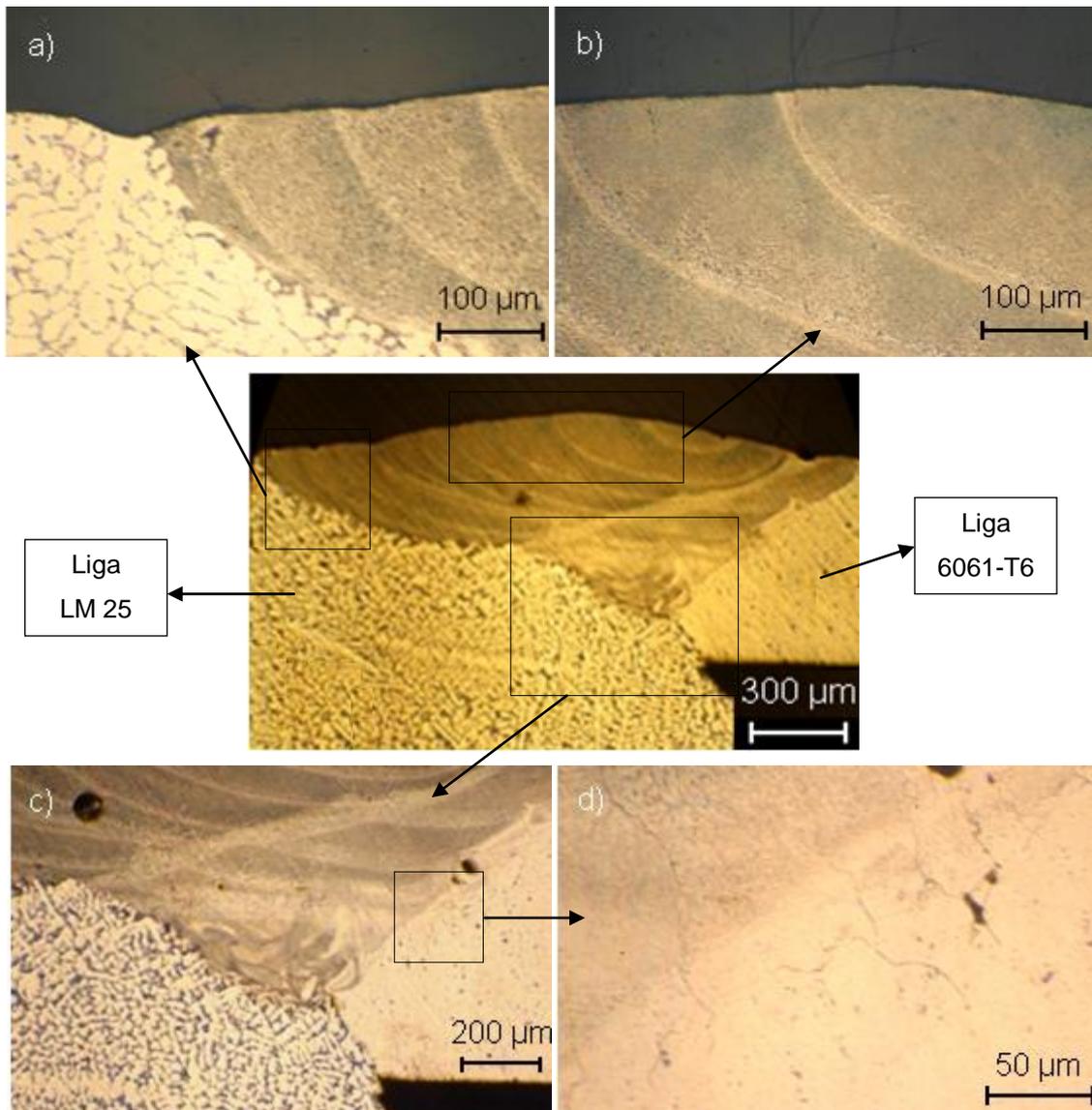


Figura 5.14 – Soldadura junta A (amostra A-1-A); a) Ligação ZF à liga LM 25; b) Estrutura da ZF; c) Raiz do cordão ligação MA com MB; d) Micro fissuras na interface ZF com MB 6061

A soldadura apresentou boa ligação do material de adição 4047, com os materiais base (figura a) no entanto, revelou micro fissuras na zona de ligação entre o material de adição e a liga 6061 (figura d). As micro fissuras ocorreram mais frequentemente na liga 6061 do que na liga LM 25, em que não se verifica este tipo de micro fissuras, este fenómeno deve-se ao maior

teor de magnésio presente na liga 6061. Por este motivo os cordões apresentaram uma maior zona fundida sobre a liga LM 25, em que este fenómeno é menos frequente, assim diminuiu-se a zona de interface com a liga 6061 para evitar este problema.

A zona fundida apresentou uma microestrutura de solidificação celular dendrítica muito fina característica de um processo de arrefecimento rápido (Figura b e d).

A ligação com esta configuração de junta não revelou porosidades, demonstrativo da eficaz protecção gasosa utilizada. A penetração do cordão também não esteve garantida nestas amostras, devido à configuração utilizada e às limitações de potência do equipamento utilizado.

Junta B

Para a análise da junta B a amostra utilizada foi a amostra B-2-A que representa a microestrutura típica desta ligação e os defeitos encontrados.

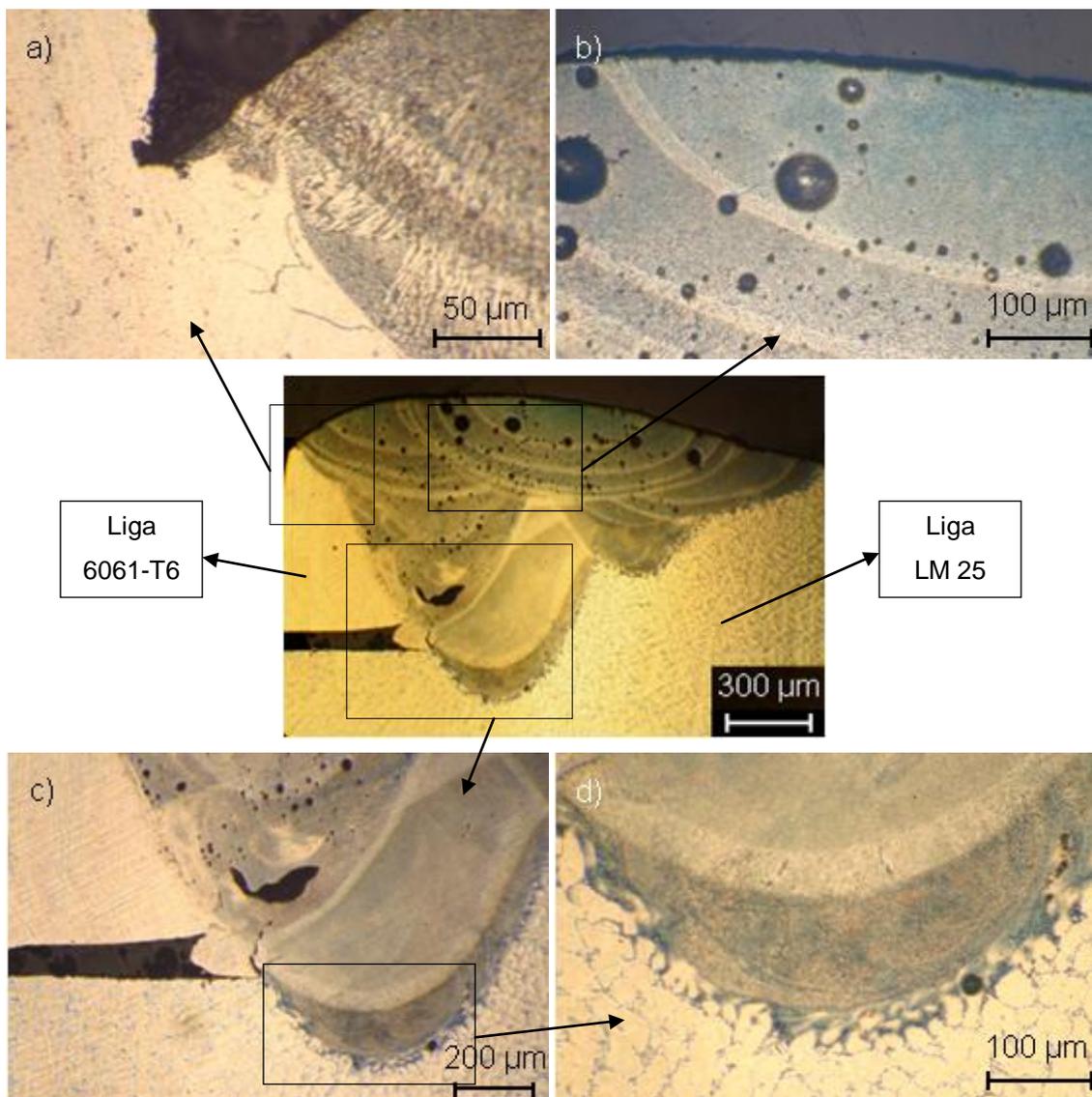


Figura 5.15 – Soldadura junta B (B-2-A); a) Micro fissuras na ligação MA com liga 6061; b) Porosidades MA; c) Raiz do cordão evidencia falta de ligação entre passos de MA; d) Ligação MA com liga LM 25

Na figura a) a zona fundida apresentou grãos com crescimento epitaxial, junto à linha de fusão com uma microestrutura colunar dendrítica [25]. Visualizaram-se também micro fissuras na ligação entre o material de adição e a liga 6061 (figura a), no entanto estas não se verificaram na ligação à liga LM 25 (figura d), que tem melhor soldabilidade, pelos mesmos motivos descritos para a junta A.

A soldadura efectuada com a configuração de junta B apresenta um elevado número de porosidades (figura b) situando-se os poros de maior dimensão na zona superior do cordão. Este tipo de porosidade “fina” é induzida pela libertação de gases de hidrogénio devido à ineficaz protecção gasosa utilizada [21].

Visualizou-se falta de ligação entre passos de soldadura (figura c), devido às soldaduras serem executadas manualmente.

5.1.9 Análise de resultados

A Tabela 5.7 resume os aspectos principais observados através da análise metalográfica das soldaduras, para as diversas amostras.

| Aspectos observados | | Amostras | |
|---------------------|--------------|----------|---------|
| | | Junta A | Junta B |
| Penetração | Total | | x |
| | Incompleta | x | |
| Poros | Muitos | | x |
| | Poucos | x | |
| | Inexistentes | | |
| Fissuras | Existente | | |
| | Inexistente | x | x |
| Micro fissuras | Existentes | x | x |
| | Inexistentes | | |

Tabela 5.7 – Observações resultantes da análise metalográfica das amostras

A penetração elevada na configuração B conseguiu-se através do chanfro realizado no conector que possibilitou uma maior zona fundida, com aproximadamente o dobro da penetração. No entanto, esta configuração originou um maior número de porosidades, induzidas pela libertação de hidrogénio, pois ligas com elevados teores de magnésio (liga 6061) aumentam a solubilidade do hidrogénio no alumínio fundido durante a solidificação.

Este problema é evitável com a melhoria da protecção gasosa, uma solução possível é baixar a temperatura do gás de protecção (para cerca de 223 K) [15]. É também fundamental proceder-se à remoção da camada de óxidos, existentes à superfície através da preparação da superfície, sendo a solução mais eficaz a utilização de sistemas de limpeza laser [39], no entanto estas soluções têm elevado custo. Assim, o polimento mecânico das superfícies a soldar apresenta vantagens, reduzindo as fontes de hidrogénio responsáveis pela formação de micro porosidades, comparativamente à simples passagem de acetona desengordurante, sendo um processo economicamente viável. É significativa a diminuição de porosidades através da passagem de polimento grosseiro para um polimento fino [39]. Além disso, outra

maneira de reduzir porosidades é aumentando a potência e desta forma o tempo de solidificação, permitindo a fuga do hidrogénio.

As amostras analisadas não apresentam fissuração a quente um dos problemas mais frequentes na soldadura de ligas de Al-Mg-Si dissimilares devido ao material de adição utilizado que evita este problema.

As micro fissuras revelaram-se na interface da zona fundida com a liga 6061, devido ao teor de magnésio presente nesta liga, não se encontrando este tipo de defeito na ligação ao material LM 25, uma vez este, apresenta um teor elevado de silício, que por sua vez, facilita a soldabilidade desta liga com o material de adição 4047, porque apresentam teores de silício semelhantes.

5.1.10 Microscopia de varrimento – SEM

Sistemas de análise de microscopia de varrimento (SEM) são uma técnica de grande utilidade para análise micro estrutural permitindo identificar as fases constituintes das microestruturas de ligas de alumínios. E através de micro análises de raios X ou espectros de dispersão de energia (EDS) permite uma identificação qualitativa dos componentes químicos ou uma estimativa quantitativa de micro regiões das amostras [36].

A realização da microscopia de varrimento teve como objectivo determinar o teor dos principais elementos de liga presentes nos materiais base e no material fundido, uma vez que, a composição química da zona fundida durante o processo de soldadura é de extrema importância ao nível da qualidade das soldaduras obtidas (Figura 4.1). Procedeu-se também à análise de microestruturas através da análise SEM. Neste caso a análise SEM efectuou-se apenas na amostra B-2-A, pois os materiais base e de adição não variaram, procedendo-se à análise dos principais elementos de liga presentes (Al, Si, Mg e Fe) nos materiais base e no material de adição utilizado.

Através da análise dos espectros podemos quantificar aproximadamente os elementos de liga presentes em cada material. A título de exemplo apresenta-se o espectro da liga fundida LM 25 (Figura 5.16), onde se observa um alto teor de alumínio e silício, o que é de esperar numa liga de fundição da série 3xx.x.

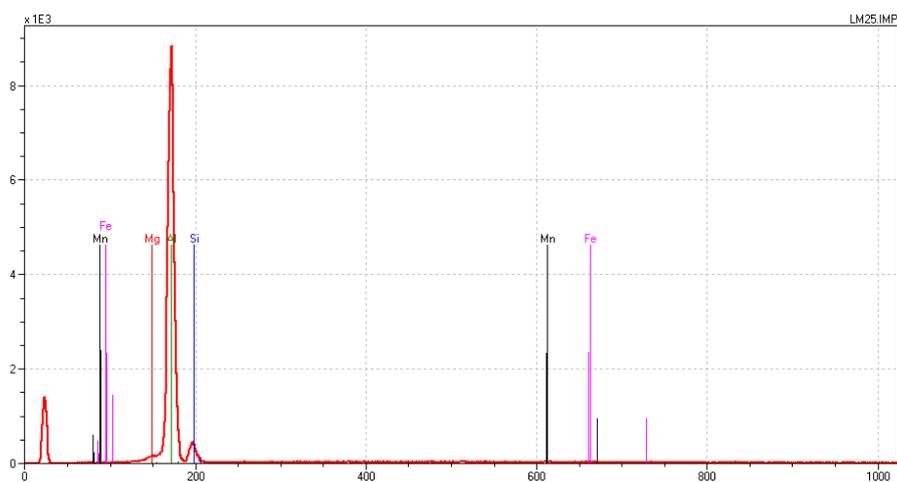


Figura 5.16 – Espectro obtido pela análise SEM para a liga LM 25

Os valores obtidos nos espectros são depois quantificados e comparados com os valores de composição química típica para estes materiais base e de adição.

| Composição química [% mássica] | | | |
|---------------------------------------|-----------------------|----------------|---------------------------|
| Elemento | Materiais base | | Material de adição |
| | LM 25-T6 | 6061-T6 | 4047 |
| Si | 16,32 | 2,00 | 13,08 |
| Fe | 0,40 | 0,29 | 0,31 |
| Mg | 1,94 | 2,91 | 1,73 |
| Al | 81,00 | 94,80 | 84,66 |

Tabela 5.8 – Composição química ligas obtida pela análise SEM

A liga base LM 25 apresentou um teor de silício superior ao esperado para este tipo de liga, este valor é contraditório ao revelado pelas análises micrográficas ópticas e de varrimento obtidas, pois uma liga com teor de silício superior a 12% apresenta uma estrutura hipereutética e as micrografias revelam uma estrutura hipoeutética (< 12% Si) [36]. Semelhantes teores de elementos de liga obtidos entre a liga 4047 e LM 25 comprovam a boa soldabilidade existente entre estas ligas.

Os teores de silício e magnésio verificados para a liga 6061 são ligeiramente superiores aos valores típicos. Os valores elevados de magnésio são a causa frequente de micro fissuras, observadas na microscopia óptica para a liga 6061.

A zona fundida (liga 4047) apresentou uma liga hipereutética (> 12% Si) que é confirmada pelos valores obtidos na análise SEM. O material de adição apresenta teores bastante próximos do esperado para os elementos de liga analisados. Excepção quanto ao teor de magnésio que é ligeiramente superior ao esperado.

Os valores elevados de magnésio obtidos em todas as ligas, podem ser frequentemente a causa da elevada porosidade verificada, uma vez que este elemento aumenta a solubilidade do hidrogénio no alumínio fundido durante a solidificação. Durante a solidificação uma grande quantidade de gás de hidrogénio gera bolhas na interface sólido-líquido, interagindo com o magnésio [26].

5.1.10.1 Análise Micrográfica – SEM

Na análise micrográfica SEM as indentações de dureza serviram de referência para a localização das micrografias tendo sido efectuadas nas zonas de interface entre a zona fundida e os materiais base.

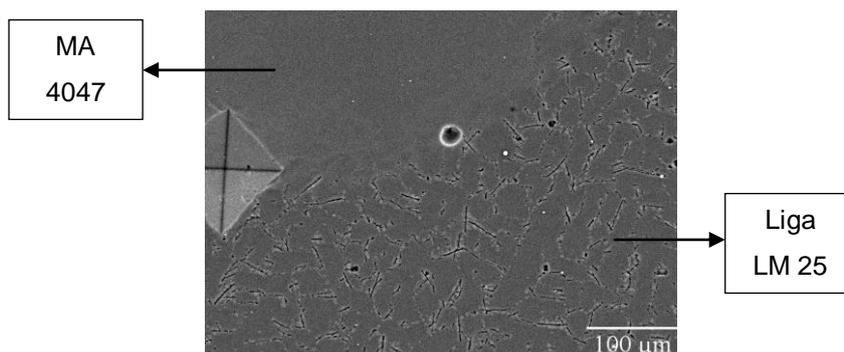


Figura 5.17 – SEM – Micrografia ligação MA 4047 com liga LM 25 (B-2-A)

A Figura 5.17 confirma os resultados obtidos pela microscopia óptica para a liga base LM 25. Uma vez que, esta apresentou uma microestrutura com dendrites de composição hipoeutética, sendo possível identificar uma fase rica em silício circundados por grãos da solução de alumínio primário [36].

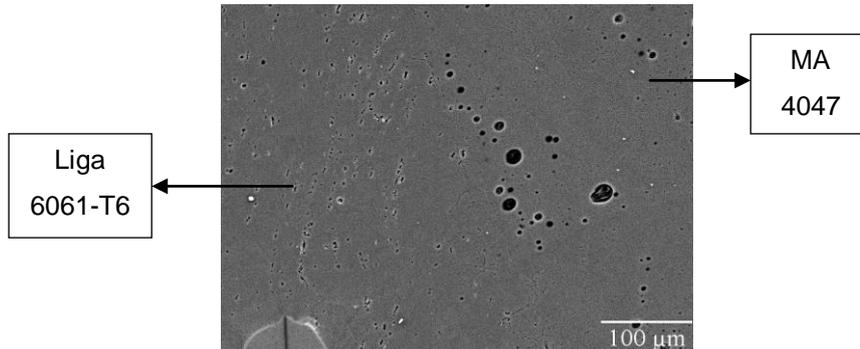


Figura 5.18 – SEM – Micrografia ligação MA 4047 com liga 6061 (B-2-A)

A estrutura de grão da liga 6061 revelou partículas de segunda fase de Mg_2Si (Figura 5.18) [36], como já anteriormente identificados na microscopia óptica.

A análise SEM não permitiu identificar a microestrutura obtida na zona fundida. Apenas foi possível detectar defeitos presentes na zona fundida, como porosidades, que revelaram maior propensão na interface com a liga 6061, como identificado na microscopia óptica.

5.1.11 Ensaios de dureza

Os resultados dos ensaios de dureza de Vickers realizados nas amostras apresentaram-se na forma de gráfico que traça a evolução da dureza no cordão de soldadura e nos materiais base. Tomou-se como exemplo uma amostra da geometria “A” e outra da “B” pois os perfis obtidos são semelhantes nas restantes amostras.

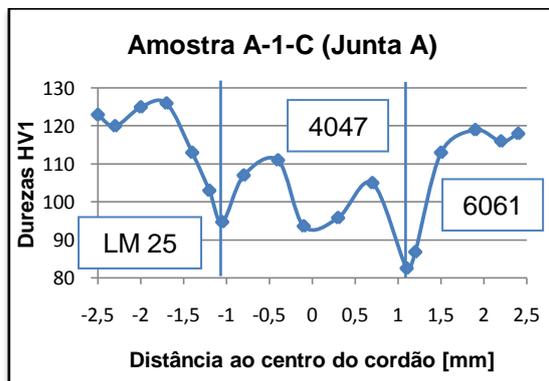


Figura 5.19 – Perfil de dureza de Vickers (A-1-C)

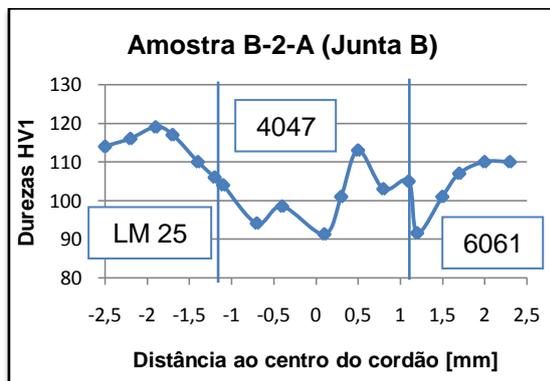


Figura 5.20 – Perfil de dureza de Vickers (B-2-A)

5.1.12 Análise de resultados

No gráfico da Figura 5.21 fez-se a comparação entre os perfis obtidos para ambas as geometrias.

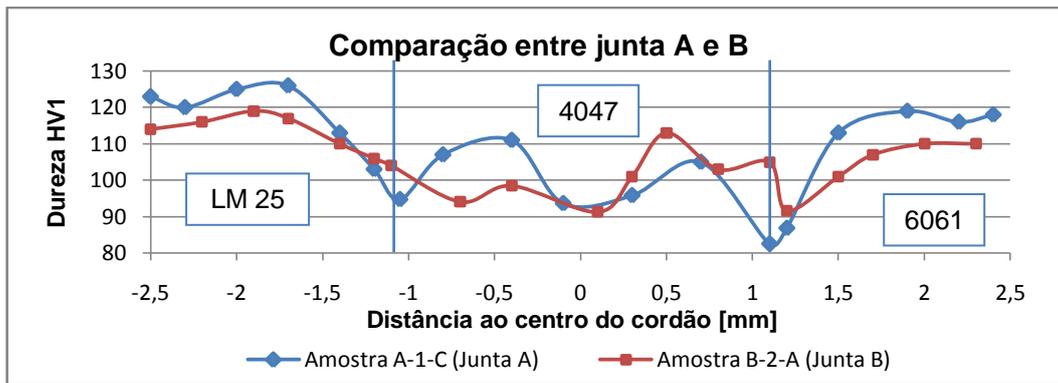


Figura 5.21 – Comparação dos perfis de dureza de Vickers entre junta A e B

Os perfis de dureza obtidos para ambas as configurações embora com algumas diferenças pontuais, apresentaram a mesma tendência o que se esperava pois os materiais base e adição utilizados foram os mesmos apenas se fazendo variar a geometria da junta que não interfere nos valores de dureza dos materiais.

Na Tabela 5.9 é indicado os valores médios obtidos para as ligas. No caso dos materiais base a média foi obtida com base em mais valores para além dos indicados nos gráficos e foi feita a média entre os pontos de ambas as amostras. Nas ligas de adição o valor médio não contempla os valores obtidos na interface zona fundida material base.

| Liga | Materiais base | | Materiais de adição | |
|---------------------|----------------|---------|---------------------|---------|
| | LM 25 | 6061-T6 | 4047 | |
| | | | Junta A | Junta B |
| Dureza [HV1] | 121 | 109 | 101 | 98 |

Tabela 5.9 – Valores de dureza médios para as ligas base e de adição

Os elevados valores de dureza obtidos para a liga LM 25 são devido à liga de fundição ser fabricada em molde permanente, e devido ao tratamento térmico T6 efectuado, incrementando as propriedades mecânicas desta liga de elevada resistência ao desgaste.

O perfil de dureza verificado na liga 6061 é representativo da série 6xxx que contém silício e magnésio em proporções aproximadas requeridas para a formação do composto Mg_2Si , permitindo tratamentos térmicos. O magnésio é também a base para o aumento de resistência e dureza destas ligas [25].

Os valores de dureza médios para ambas as configurações de junta são bastante semelhantes o que era de esperar já que o material de adição utilizado é o mesmo. A diferença registada embora não sendo significativa pode ficar a dever-se à elevada porosidade que a configuração B apresentou que pode reduzir a dureza da zona fundida. A liga 4047 apresenta uma estrutura resistente ao desgaste devido às partículas de silício primário formadas em misturas eutéticas de Al-Si [36].

O amaciamento da ZAC verificado para ambas as configurações é devido à destruição dos precipitados obtidos por tratamento térmico de endurecimento por precipitação devido às altas temperaturas atingidas durante o processo de soldadura [11;21].

5.2 Soldadura – Ligas 6063 com 6082

5.2.1 Material e suas características

Pretende-se nesta análise proceder à soldadura de ligas de alumínio 6063 com 6082 com utilização de material de adição.

A empresa CWT foi contactada para proceder à soldadura com recurso a material de adição da peça presente na Figura 5.22 que é usada em aplicações militares. Pretende-se assim, determinar o melhor material de adição para efectuar a ligação, como não se pode efectuar testes destrutivos para determinar a qualidade e fiabilidade da ligação, procedeu-se à aquisição das mesmas ligas para proceder a testes de caracterização da soldadura para aferir qual o fio de adição a utilizar, para efectuar este trabalho.



Figura 5.22 – Peça a soldar (liga 6063 T6 com 6082 T6)

Para a realização dos ensaios foi adquirido, como material base a liga 6063-T6 em barra (comprimento 4000 mm, largura 3,2 mm e altura 12,5 mm), e a liga 6082-T6 em placa (comprimento 350 mm, largura 250 mm e altura 3 mm). Os materiais base adquiridos no entanto não apresentam as melhores formas para os testes pois deveriam ser chapas, mas eram as formas comercialmente disponíveis nas imediações da fábrica.

Os fios utilizados como material de adição na soldadura destas ligas são: 4047, 4043, 5356 e GSALSI-12 designação comercial para a liga 4047 A [40]. Foram testadas estas ligas de adição em juntas de canto e topo. Os fios e varetas utilizados como material de adição apresentam as seguintes dimensões (Tabela 5.10).

| Ligas | Diâmetro | | Comprimento | |
|--------------|----------|------|-------------|-----|
| | Inch | mm | Inch | mm |
| 4047 | 0,015 | 0,38 | 18 | 457 |
| 4047A | 0,015 | 0,38 | Bobine | |
| 4043 | 0,015 | 0,38 | 18 | 457 |
| 5356 | 0,025 | 0,64 | 18 | 457 |

Tabela 5.10 – Dimensões fios de adição

5.2.1.1 Propriedades material base

A liga 6063 é uma das ligas tratadas termicamente mais usuais, tendo como principais elementos de liga magnésio e silício, sendo utilizada em produtos extrudidos como, tubo, barra, bobine e perfis. Ligas de fácil extrudibilidade normalmente apresentam teores de 1,1% Mg₂Si. Apresenta boa resistência à corrosão, boa soldabilidade e boa resposta à anodização [12;32]. A liga 6063 é tipicamente utilizada em aplicações arquitetônicas como caixilharia de janelas e portas. Esta liga foi também a chave para a recente ponte totalmente feita em alumínio, construída em apenas alguns dias em Foresmo, na Noruega. É também utilizada pela marca automóvel Audi para a construção de chassis [33].

A liga 6082 é uma liga de resistência média/alta, com excelente resistência à corrosão. É a liga de maior resistência da série 6000, sendo utilizada como liga estrutural. É uma liga relativamente nova e como apresenta maior resistência mecânica tem substituído a liga 6061 em diversas aplicações. A adição de uma grande quantidade de manganês controla a microestrutura, que por sua vez origina uma liga mais resistente. A liga 6082 é tipicamente utilizada em aplicações de alta resistência como pontes, guias, transportes e também é utilizada como reservatório na indústria alimentar [12;32].

As propriedades químicas e mecânicas dos materiais base são apresentadas na Tabela 5.11 e Tabela 5.12 respectivamente.

| Composição química [% mássica] | | |
|--------------------------------|----------|-----------|
| Elemento | 6063 -T6 | 6082-T6 |
| Si | 0,2-0,6 | 0,7-1,3 |
| Fe | 0,35 | 0,5 |
| Cu | 0,1 | 0,1 |
| Mn | 0,1 | 0,4-1,0 |
| Mg | 0,45-0,9 | 0,6-1,2 |
| Cr | 0,10 | 0,25 |
| Zn | 0,1 | 0,2 |
| Ti | 0,1 | 0,1 |
| Outros | Cada | 0,05 |
| | Total | 0,15 |
| Al | 97,5 | 95,2-98,3 |

Tabela 5.11 – Composição química materiais base [34]

| Propriedades | Tensão de rotura [MPa] | Tensão de cedência [MPa] | Extensão [%] | Módulo de elasticidade [GPa] | Dureza [HV] |
|--------------|------------------------|--------------------------|--------------|------------------------------|-------------|
| 6063-T6 | 241 | 214 | 12,0 | 68,9 | 83 |
| 6082-T6 | 290 | 250 | 10,0 | 70,0 | 95 |

Tabela 5.12 – Propriedades mecânicas materiais base [34]

5.2.1.2 Material de adição

A liga 4047A é uma variante da liga 4047 apresentando aproximadamente a mesma percentagem mássica de elementos de liga, as principais diferenças verificam-se no maior teor de cobre, manganês e magnésio (Tabela 5.13).

A liga 4043 é uma das mais antigas e mais amplamente utilizada como fio de adição para soldadura e brasagem de ligas. Sendo utilizada exclusivamente como material de adição em soldaduras. A adição de 5% de silício resulta numa maior fluidez da liga que faz desta liga uma das escolhas preferenciais por parte dos soldadores. Esta liga é concebida para soldadura de ligas similares e dissimilares de alumínio, apresentando excelentes resultados nas ligas 6061, 6063, 5052, 355, 356 entre outras. É também amplamente utilizada nos processos de TIG e MIG utilizando árgon como gás de protecção [34;41].

A liga 5356 é uma liga não tratável termicamente, os fios de adição são utilizados em aplicações de moderada/alta resistência. Os principais elementos de liga são o magnésio, manganês, crómio e titânio. Fio de adição para soldadura de materiais base com elevado teor de magnésio (> 3% Mg) [12;41].

No conjunto da América do Norte, 80% do alumínio vendido como material de adição é feito a partir de apenas duas ligas, 4043 e 5356, e uma destas ligas é a escolha certa para 80% das aplicações [42].

| Composição química [% mássica] | | | | |
|---------------------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| Elemento | 4047 | 4047A | 4043 | 5356 |
| Si | 11-13,5 | 11,0-13,0 | 4,5-6,0 | 0,25 |
| Fe | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 0,4 |
| Cu | 0,05 | 0,30 | 0,30 | 0,10 |
| Mn | 0-0,5 | 0,15 | 0,05 | 0,05-0,2 |
| Mg | 0,05 | 0,10 | 0,05 | 4,5-5,5 |
| Cr | - | - | - | 0,05-0,2 |
| Zn | 0,1 | 0,20 | 0,10 | 0,10 |
| Ti | 0,1 | 0,15 | 0,20 | 0,06-0,2 |
| Outros | Cada | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| | Total | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| Al | 86,45-86,75 | 85,3-89,0 | 92,3-95,5 | 92,9-95,3 |

Tabela 5.13 – Composição química das ligas de adição [34]

As propriedades mecânicas das ligas de adição não são apresentadas pois os valores encontrados em diversas literaturas estão associados soldaduras de materiais base similares. Assim, as propriedades mecânicas para os fios de adição dependem dos materiais base utilizados nas soldaduras.

5.2.2 Configuração da Junta

Dos materiais base adquiridos foram cortadas amostras de dimensões iguais para testar os materiais de adição. Foram realizados testes utilizando juntas de canto, que é a configuração que mais se assemelha com a peça pretendida pelo cliente (Figura 5.22) e testaram-se juntas de topo para complementar a análise, para mais do que uma geometria. A forma das juntas e o procedimento de soldadura dos cordões são apresentadas na Figura 5.23 e 5.24.

Os cordões de soldadura foram realizados em diferentes estações de trabalho, sendo utilizada a estação de trabalho 1 para as juntas de canto e nas de juntas de topo a estação 2.

Juntas de canto

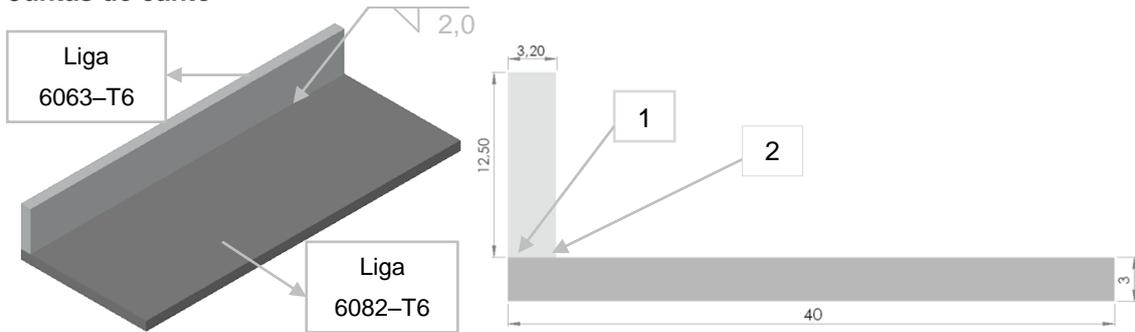


Figura 5.23 – Configuração e dimensões das juntas de canto

Na Figura 5.23 apresenta-se a forma e a ordem de execução dos cordões utilizada: o ponto 1 representa a primeira soldadura e sua localização, esta soldadura serviu de união entre a barra (liga 6063) sobre a placa (liga 6082), o ponto 2 é o local onde se executou o cordão de canto pretendido. O cordão de soldadura 1 para os materiais de adição 4047 e 4043 foi efectuado com fio de adição. Para as ligas 4047A e 5356 não se utilizou fio de adição apenas ligação autogénea.

Juntas de topo

Na execução das juntas de topo procedeu-se previamente à realização de um chanfro com 1 mm de altura em ambos os materiais base de forma a permitir uma maior penetração do cordão de soldadura devido à elevada espessura dos materiais base utilizados.

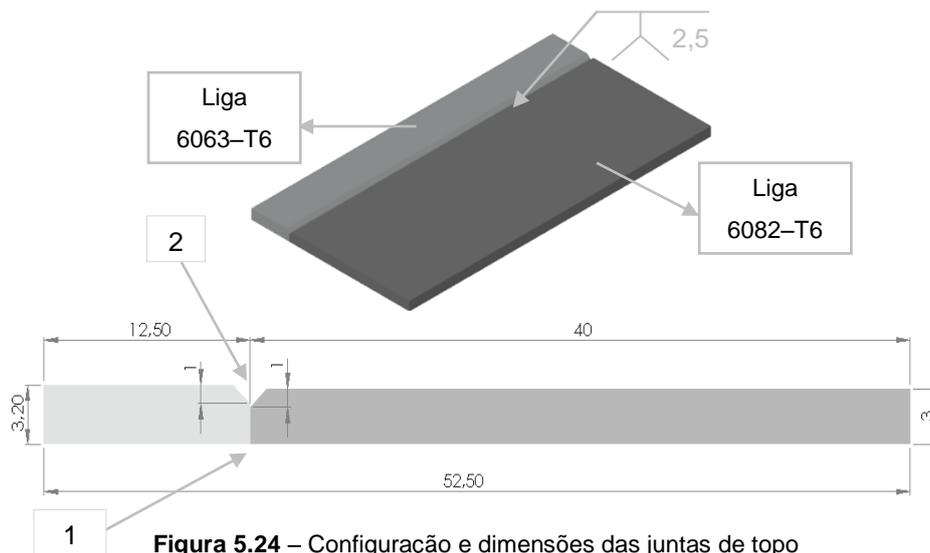


Figura 5.24 – Configuração e dimensões das juntas de topo

Na Figura 5.24 o ponto 1 representa a primeira soldadura e a sua localização, o cordão de ligação efectuou-se apenas na liga 4047, para a liga 4047A não se efectuou cordão de ligação procedendo-se unicamente à execução da junta de topo identificada como ponto 2.

5.2.3 Designação das amostras

As amostras foram cortadas das peças soldadas e foi feita a sua montagem em moldes de resina, sendo designadas através das ligas de adição com que foram efectuadas as soldaduras. A referência das amostras teve a seguinte forma representativa “4047-1” em

que os primeiros 4 dígitos representam a liga de adição utilizada e o último algarismo o número de amostras retiradas a cada peça.

5.2.4 Fixação das peças

O sistema de fixação escolhido foi baseado na experiência dos operadores no entanto, este não se verificou o mais eficaz uma vez que as peças soldadas apresentam distorção devido às tensões criadas durante a soldadura, que poderiam ser reduzidas através de um sistema de fixação mais eficaz.

Sistema de fixação das juntas de canto



Figura 5.25 – Sistema de fixação – Juntas de Canto

Sistema de fixação das juntas de topo



Figura 5.26 – Sistema de fixação – Juntas de Topo

5.2.5 Parâmetros de Soldadura

Os parâmetros utilizados foram escolhidos mediante anos de experiência dos operadores nestes equipamentos e em soldadura de ligas dissimilares de alumínio pela empresa CWT.

Foram utilizados os mesmos parâmetros para os quatro materiais de adição, as soldaduras de canto foram realizadas na estação de trabalho 1 (Figura 4.3) e as de topo na

estação 2 (Figura 4.4). A velocidade de soldadura não é um parâmetro fornecido directamente pelas estações de trabalho sendo calculado a partir da Equação 5.2, apresentando-se o intervalo máximo e mínimo de velocidade possível para a execução das soldaduras.

Devido ao facto de serem utilizadas estações de trabalho distintas para a execução das diferentes juntas, os parâmetros fornecidos pelos diferentes equipamentos podem variaram ligeiramente.

| Parâmetros | Juntas de Canto | Juntas de Topo | Unidades |
|--------------------|-----------------|----------------|-------------------|
| Potência | 3,2 | 2,2 | kW |
| Duração | 5,0 | 6,0 | ms |
| Frequência | 7,0 | 6,5 | Hz |
| Tamanho do foco | 1,0 | 0,845 | mm |
| Energia | 16 | 17,3 | J |
| Potência média | 112 | - | W |
| Entrega térmica | - | 4027 | J/cm ² |
| Tensão | - | 350 | V |
| Velocidade (u=60%) | 2,8 | 2,2 | mm/s |
| Velocidade (u=85%) | 1,05 | 0,82 | mm/s |

Tabela 5.14 – Parâmetros de soldadura (Juntas de canto/topo)

No acabamento das juntas de canto aumentou-se o tamanho do foco para 1,2 mm assim, aumenta-se o diâmetro de actuação do feixe de forma a uniformizar o aspecto superficial do cordão de soldadura.

O gás de protecção utilizado foi o árgon, coaxial com o feixe laser, em ambas as estações de trabalho e para os quatro materiais de adição utilizados, para as duas configurações de junta. Assim, como no caso anterior, os parâmetros são fixos para os quatro fios de adição e procurou-se aferir acerca da qualidade de soldadura estabelecendo o melhor material de adição aplicável a estas ligas, através das análises efectuadas.

5.2.6 Análise Visual

Após a execução das soldaduras foram tiradas fotografias demonstrativas do aspecto das soldaduras e da presença de defeitos visíveis e feita a comparação entre as ligas de adição utilizadas.

Juntas de canto

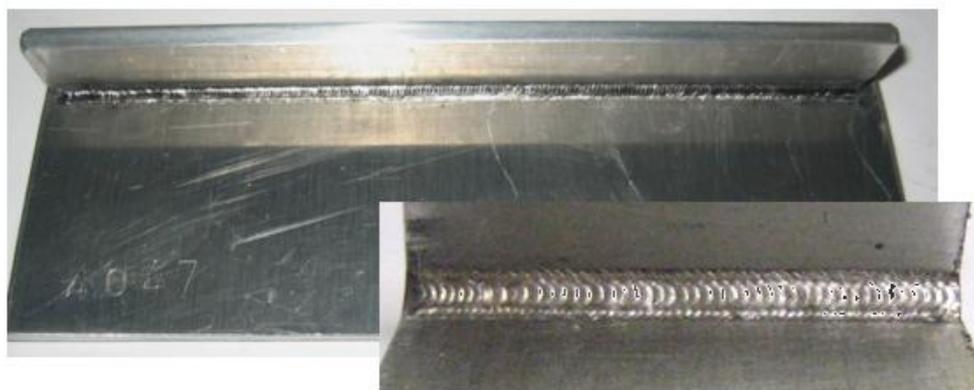


Figura 5.27 – Cordão de soldadura com material de adição 4047

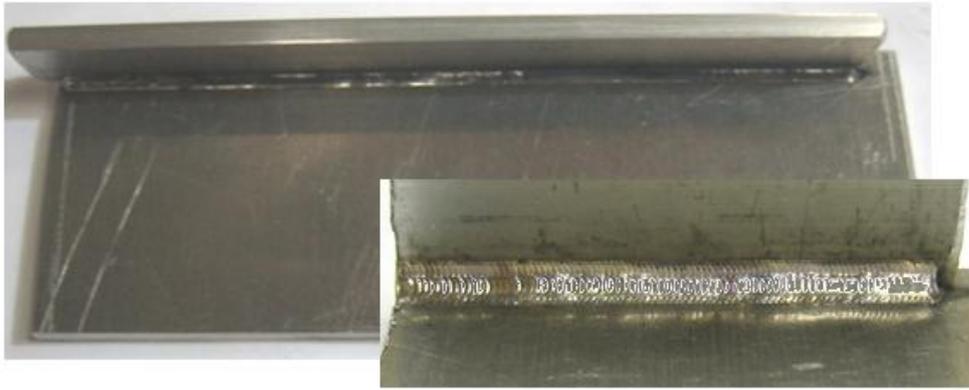


Figura 5.28 – Cordão de soldadura com material de adição 4047 A

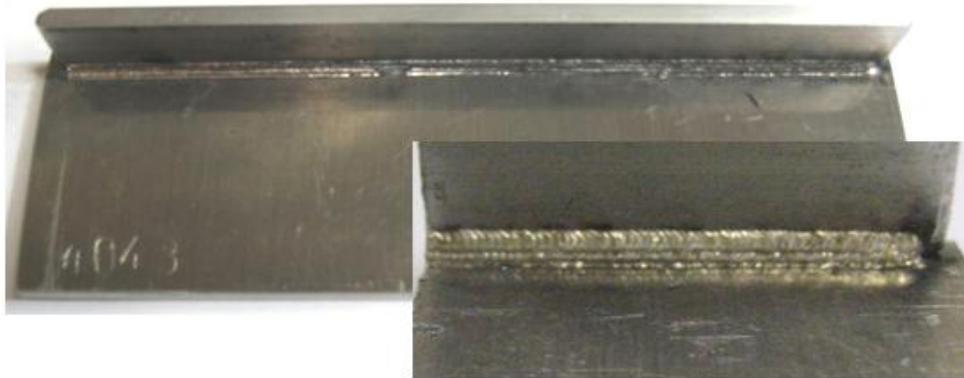


Figura 5.29 – Cordão de soldadura com material de adição 4043



Figura 5.30 – Cordão de soldadura com material de adição 5356

O cordão efectuado com o fio de adição 4047 apresentou uma largura regular e visualizou-se uma sobreposição de pontos menor do que as restantes ligas, apresentando uma velocidade de soldadura superior aos restantes cordões.

A soldadura obtida pela liga 5356 apresentou um aspecto superficial diferente relativamente aos restantes cordões, devido ao diâmetro do fio de adição ser quase duas vezes superior comparativamente com os restantes fios, que apresentam o mesmo valor de diâmetro.

Os cordões obtidos apresentaram boa qualidade superficial e encontravam-se isentos de poros superficialmente, demonstrando a perícia do soldador.

Juntas de Topo

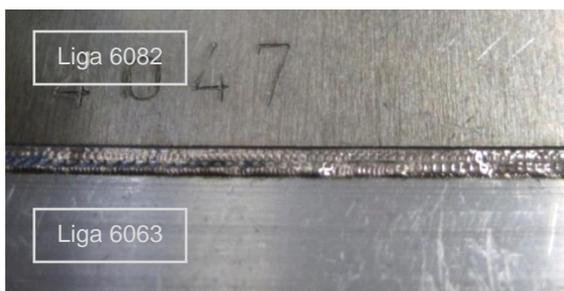


Figura 5.31 – Vista de topo cordão com MA 4047

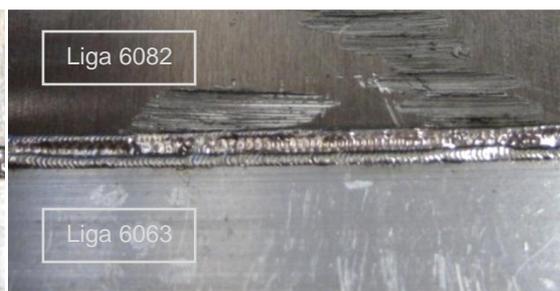


Figura 5.32 – Vista de topo cordão com MA 4047A

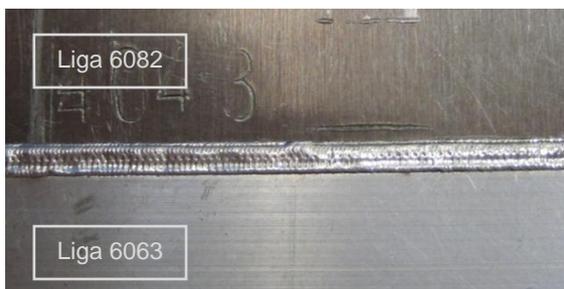


Figura 5.33 – Vista de topo cordão com MA 4043

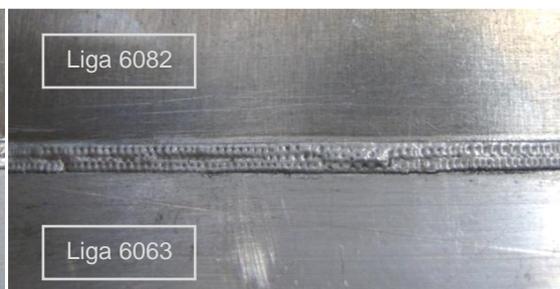


Figura 5.34 – Vista de topo cordão com MA 5356

Nas juntas de topo, os cordões continuaram a demonstrar boa qualidade superficial. Distinguem-se dois passos de soldadura nas vistas de topo no centro do cordão para os quatro materiais utilizados.

O cordão efectuado com a liga 5356 tem um aspecto superficial diferente dos restantes, devido à influência do diâmetro superior, como verificado para a junta de canto.

5.2.7 Análise de resultados

Os resultados visíveis através da análise visual estão resumidos na Tabela 5.15.

| Aspectos observados | | Amostras | | | | | | | |
|---------------------|-------------|----------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| | | 4047 | | 4047A | | 4043 | | 5356 | |
| | | Canto | Topo | Canto | Topo | Canto | Topo | Canto | Topo |
| Largura do cordão | Regular | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Variável | | | | | | | | |
| Convexidade | Marcada | | | | | | | | |
| | Suave | x | x | | x | x | x | x | x |
| | Inexistente | | | x | | | | | |
| Desalinhamento | Marcado | | | x | x | | | x | |
| | Suave | x | x | | | x | x | | x |
| | Inexistente | | | | | | | | |

Tabela 5.15 – Observações resultantes da análise visual dos cordões soldados

A largura manteve-se regular para os diversos cordões revelando a perícia dos soldadores, assim como a convexidade que à excepção da liga 4047A na configuração de canto relevou alguma concavidade.

O desalinhamento foi o principal defeito operativo registado nas amostras e ficou a dever-se a um ineficaz sistema de fixação.

5.2.8 Análise Metalográfica

A análise metalográfica encontra-se dividida em análise macrográfica para ampliações inferiores a 50x e micrográfica para maiores ampliações.

5.2.8.1 Análise Macrográfica

Juntas de Canto

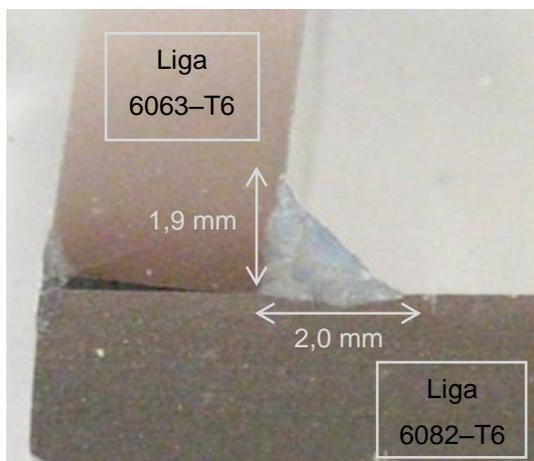


Figura 5.35 – Macrografia com MA 4047

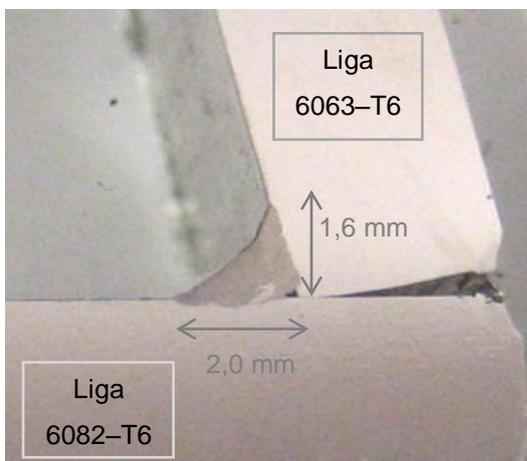


Figura 5.36 – Macrografia com MA 4047A

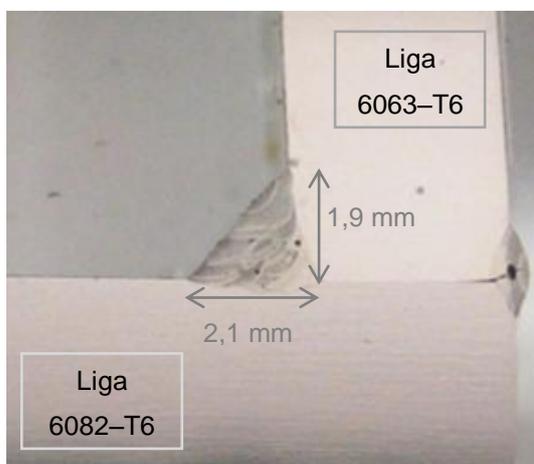


Figura 5.37 – Macrografia com MA 4043

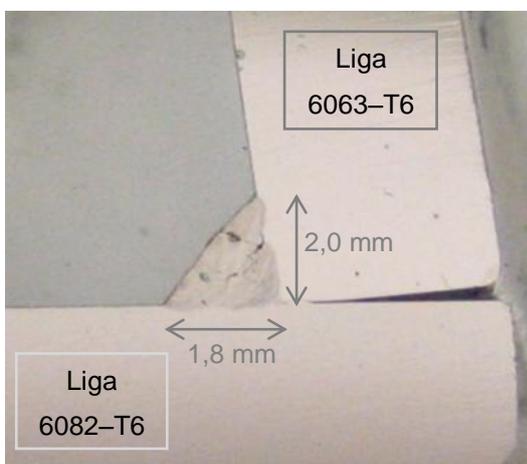


Figura 5.38 – Macrografia com MA 5356

Através da análise macrográfica verificou-se que os cordões apresentaram aproximadamente a mesma dimensão nas amostras à exceção do cordão realizado com material de adição 4047A que apresentou uma dimensão de cateto inferior ao pretendido, as diferenças de dimensões verificadas deveram-se à adição de fio ser um processo manual.

Verificou-se para as amostras onde não se utilizou material de adição na soldadura de união das peças um maior desalinhamento 4047A e 5356, já para as soldaduras com material de adição 4047 e 4043 que possuem um cordão de união realizado com material de adição, o desalinhamento é consideravelmente inferior. No entanto, devido às elevadas tensões criadas durante a soldadura do cordão de canto, verificou-se a fractura cordão de ligação (identificado na Figura 5.23 como ponto 1) para as quatro amostras realizadas (Figura 5.35 a 5.38).

A forma de se evitar o desalinhamento e distorções seria executar o cordão de união sempre com material de adição, cordão mais resistente, e um sistema de preparação de juntas em que se aplica uma pré-tensão no sentido contrário às distorções (Figura 5.39). No caso das juntas de topo pode se implementar um sistema de fixação como indicado na Figura 5.39, evitando-se as distorções e o desalinhamento das peças [3].

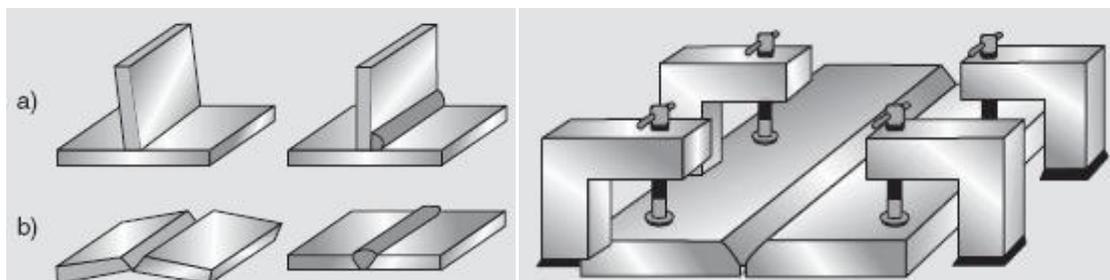


Figura 5.39 – Preparação de juntas com aplicação de pré-tensão: a) junta de canto; b) junta de topo; sistema de fixação junta de topo respectivamente [3]

A liga 4047 encontra-se isenta de poros, já para a liga 4047A é possível visualizar falta de penetração na raiz do cordão. Na liga 4043 constatou-se a existência de poros e na liga 5356 visualizou-se poros de maior dimensão e uma fissura extensiva a toda a zona fundida que conduziu à fractura da mesma.

Juntas de topo

Nas juntas de topo não se procedeu à análise metalográfica das ligas 4043 e 5356 devido à fractura total das amostras aquando do corte para montagem, factor que demonstrou a limitação de fiabilidade dos cordões obtidos. Para a liga 5356 era de prever a fractura total, uma vez que deu-se a fissuração a quente ao longo de todo o cordão que foi prontamente detectada pelo soldador durante a soldadura.



Figura 5.40 – Macrografia da junta de topo MA 4047 **Figura 5.41** – Macrografia de topo com MA 4047A

As configurações apresentaram aproximadamente a mesma largura visualizando-se uma maior penetração na junta em que se utilizou a liga de adição 4047. O desalinhamento é quase anulado na liga 4047 devido a ter-se procedido à execução do cordão de ligação (Figura 5.40) no lado oposto ao cordão pretendido. Por sua vez na liga 4047A em que não se procedeu ao cordão de ligação o desalinhamento é notório, não tendo sido suficiente o sistema de fixação para evitar o desalinhamento das peças, podendo este ser evitado com a preparação de junta apresentada na Figura 5.39.

É também notório em ambas as amostras a falta de penetração na raiz do cordão.

Junta de canto

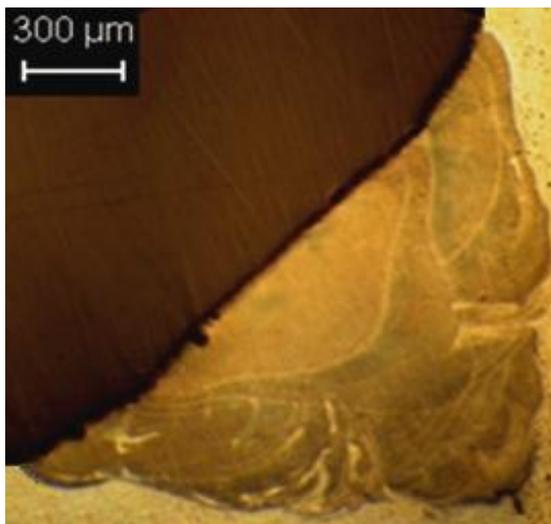


Figura 5.42 – Macrografia com MA 4047

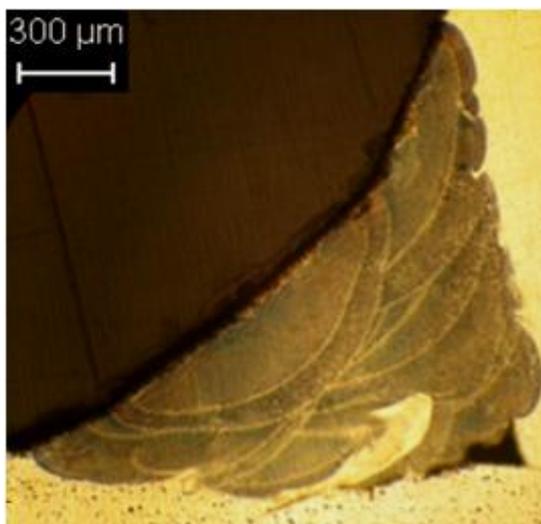


Figura 5.43 – Macrografia com MA 4047A

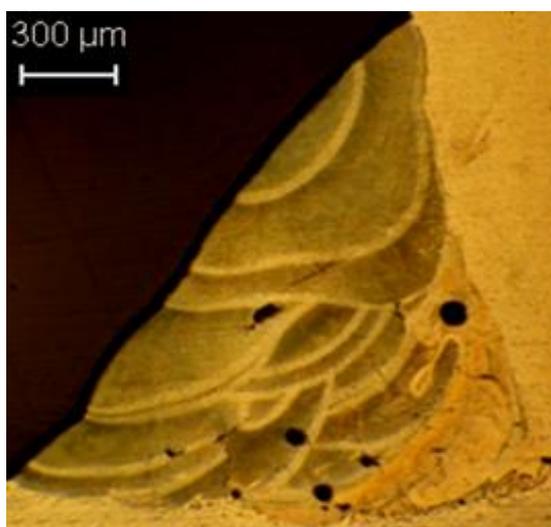


Figura 5.44 – Macrografia com MA 4043

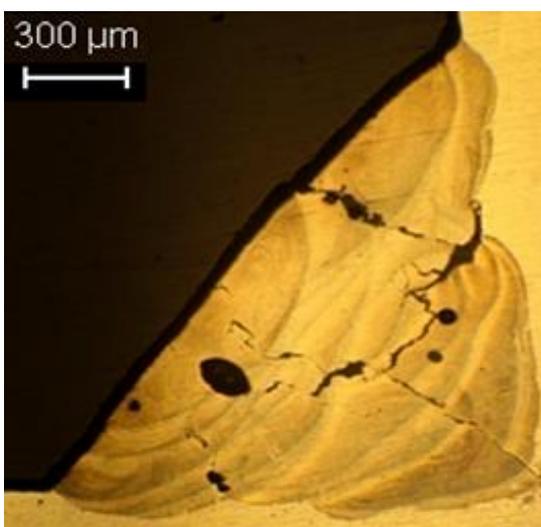


Figura 5.45 – Macrografia com MA 5356

A soldadura realizada com o fio de adição 4047 não apresentou porosidades na zona fundida e revelou boa ligação da zona fundida com os materiais base.

O cordão de soldadura executado com a liga de adição 4047A apresentou falta de penetração na raiz da amostra assim como falta de colagem à liga 6082 próximo da raiz do cordão e não apresentava poros.

O material de adição 4043 revelou uma soldadura com um número elevado de poros de grandes dimensões, no entanto, apresentou boa penetração na raiz do cordão e boa molhagem dos materiais base.

O cordão de soldadura executado com recurso ao fio de adição 5356 apresentou poros e fissuras, que originaram a fractura do cordão não garantindo a integridade da ligação, resultado decorrente do fenómeno de fissuração a quente, frequente neste material de adição.

Junta de Topo



Figura 5.46 – Macrografia com MA 4047



Figura 5.47 – Macrografia com MA 4047A

Ambas as amostras apresentaram falta de penetração na raiz do cordão. Assim como falta de ligação entre passos na zona fundida. Estes problemas ficaram-se a dever à ineficaz preparação de junta efectuada e devido à diferente geometria dos materiais base.

5.2.8.2 Análise Micrográfica

Na análise micrográfica apresentou-se as micrografias das amostras representativas dos materiais base e para os quatro materiais de adição, demonstrando a estrutura dos materiais base, zonas fundidas e os defeitos característicos dos cordões de soldadura.

Materiais Base



Figura 5.48 – Micrografia liga 6063-T6

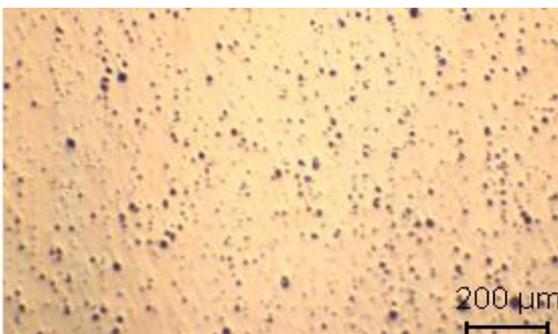


Figura 5.49 – Micrografia liga 6082-T6

Ambos os materiais revelaram uma microestrutura homogênea e regular. A liga 6063 apresentou um grão mais refinado e de menores dimensões quando comparado com a liga 6082 que apresentou uma microestrutura de grandes dimensões.

Ligas Al-Mg-Si formam uma mistura eutética de alumínio líquido na fase α com partículas de segunda fase intermetálicas de Mg_2Si e partículas de segunda fase de Si a uma temperatura de $559^\circ C$ [24;36].

A liga 6063 (Figura 5.48) para esta ampliação não permite identificar os constituintes da microestrutura. No entanto, para ligas de baixo teor de magnésio, caso da liga 6063, é frequente o silício elementar estar presente em partículas de segunda fase [36].

Na liga 6082 que possui um teor de magnésio superior, é frequente existir um equilíbrio de partículas de silício de segunda fase com o componente intermetálico Mg_2Si , na Figura 5.49 apresenta-se claramente uma microestrutura de grãos na solução sólida de alumínio contendo partículas de segunda fase de Mg_2Si [36].

Junta de canto com material de adição 4047

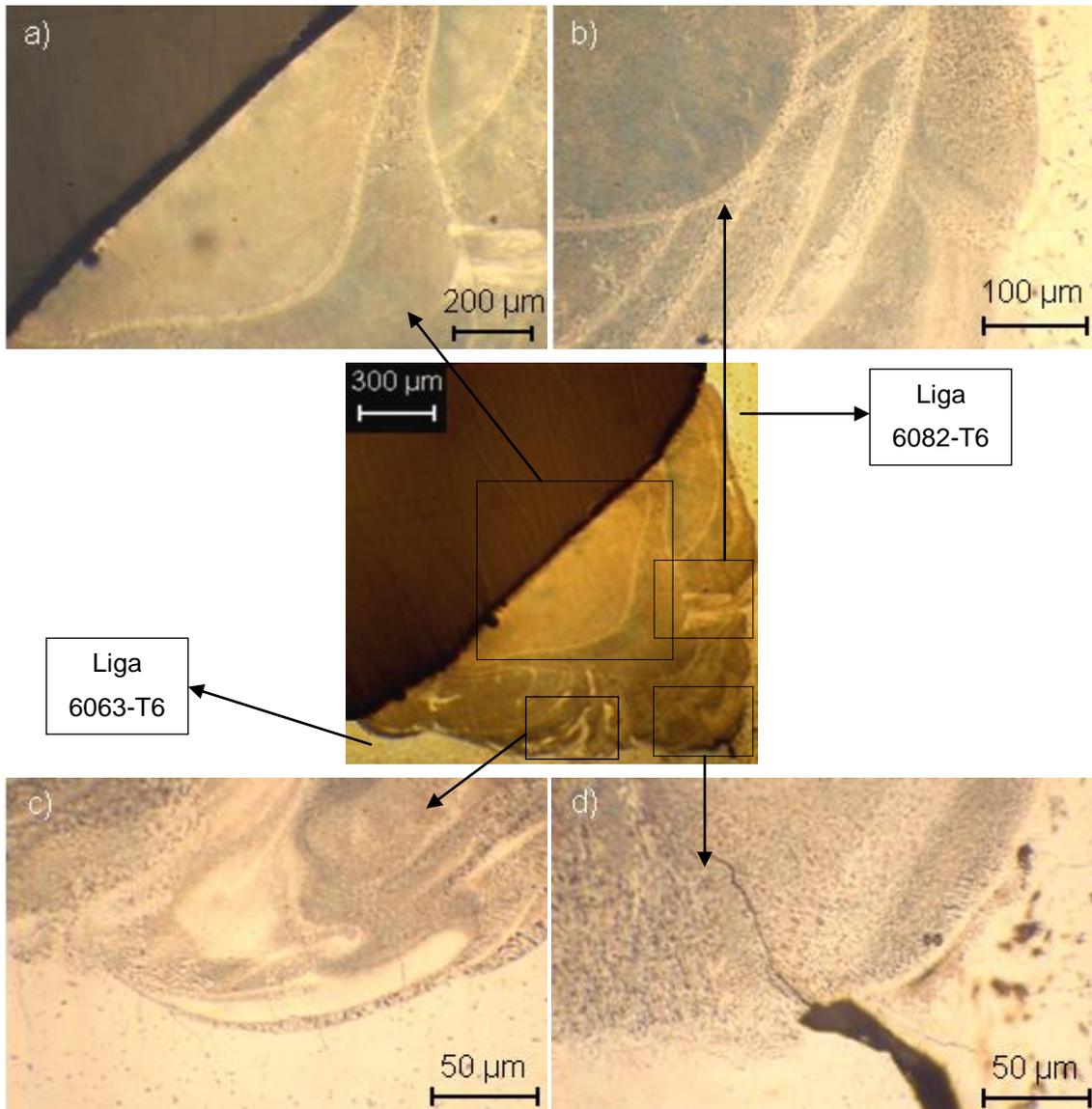


Figura 5.50 – Junta soldada com MA 4047; a) Estrutura da ZF; b) Estrutura da ZF na interface com a liga 6082; c) Micro fissuras na interface MB 6063 com ZF; d) Fissura no MA na raiz do cordão

Visualiza-se na figura a), a zona fundida, com passos de soldadura do material de adição bem delimitados e isenta de porosidades. Na figura b) e d) é visível uma microestrutura de solidificação celular dendrítica muito fina característica de um arrefecimento rápido [25;36]. Tipicamente as zonas de refusão, entre passos, apresentaram-se grãos mais coalescidos com teor elevado de alumínio (zonas mais claras) [36]. A interface, zona fundida com a liga 6063 apresenta boa molhagem (figura c), no entanto revelou micro fissuras assim como a ligação à liga 6082.

Na figura d) visualizou-se falta de penetração na raiz do cordão e uma fissura daí decorrente. Este defeito cria um ponto de concentração de tensões sendo frequentemente a causa da falha de várias soldaduras. Este defeito poderia ser evitado com um sistema de fixação mais eficaz, como indicado anteriormente, uma vez que deve-se a distorções e desalinhamento das peças durante a solidificação.

Junta de canto com material de adição 4047A

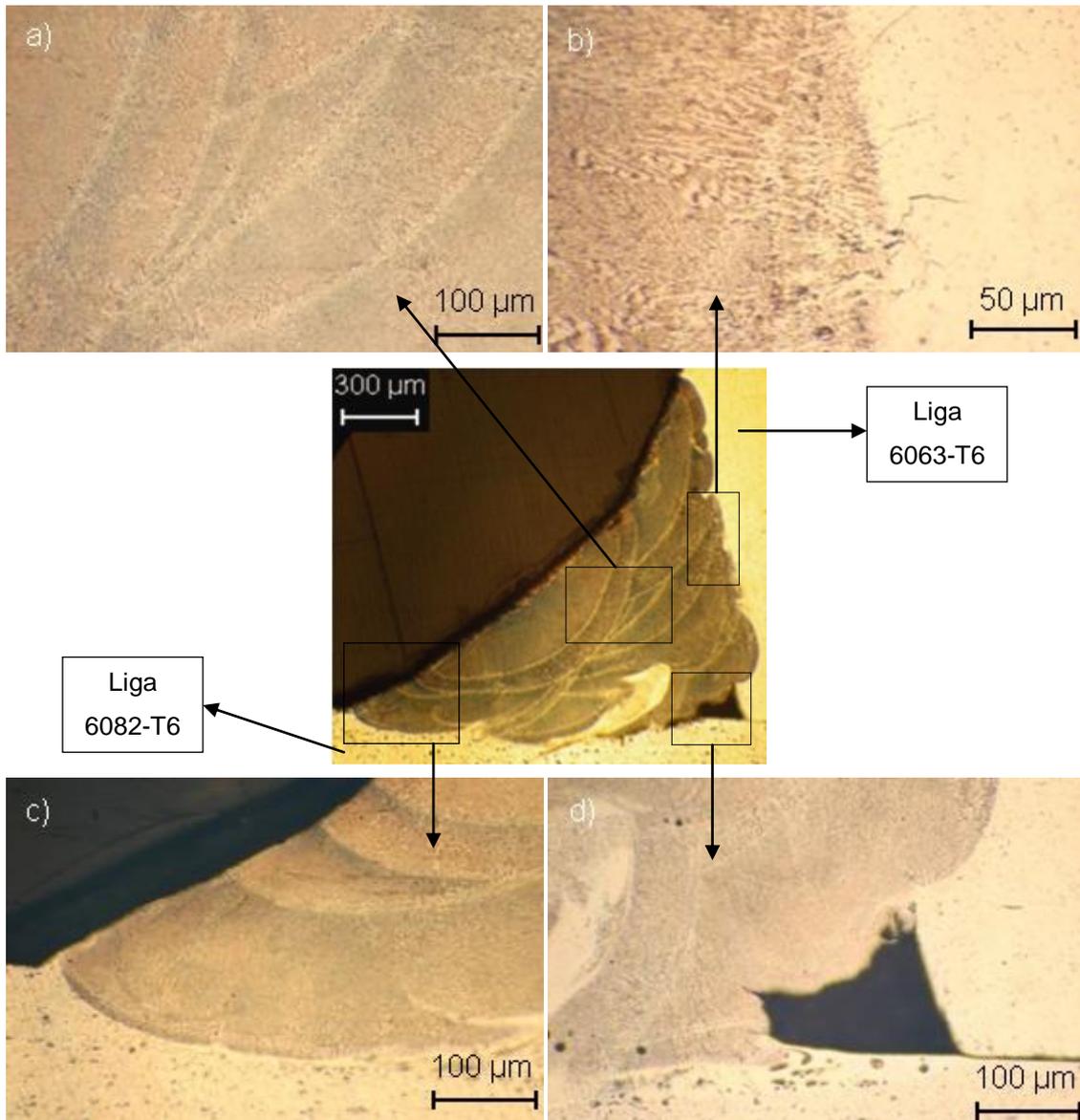


Figura 5.51 – Junta soldada com MA 4047A; a) Estrutura da ZF; b) Micro fissuras na interface MB 6063 com ZF; c) Estrutura da ZF na interface com a liga 6082; d) Falta de penetração da ZF na raiz do cordão

Na figura a) apresenta-se a microestrutura da zona fundida com passos bem delimitados e isenta de porosidades como verificado para a liga 4047. As zonas de refusão (linhas claras) devido ao reaquecimento sucessivos são zonas em que o teor de alumínio aumenta [36].

A figura b) revela grão epitaxial e uma microestrutura celular dendrítica na direcção do escoamento de calor [25], apresenta também micro fissuras na zona de interface do material fundido com a liga 6063, no entanto, para esta amostra, tal não se verificou na ligação à liga 6082 (figura c).

A falta de penetração visível na figura d) é decorrente da execução manual do cordão de soldadura, podendo ser evitada através da execução de uma passagem de ligação autógena de forma a aumentar a penetração e depois proceder aos passos de enchimento, este procedimento deveria ser aplicado a todas as amostras de forma a aumentar a penetração.

Junta de canto com material de adição 4043

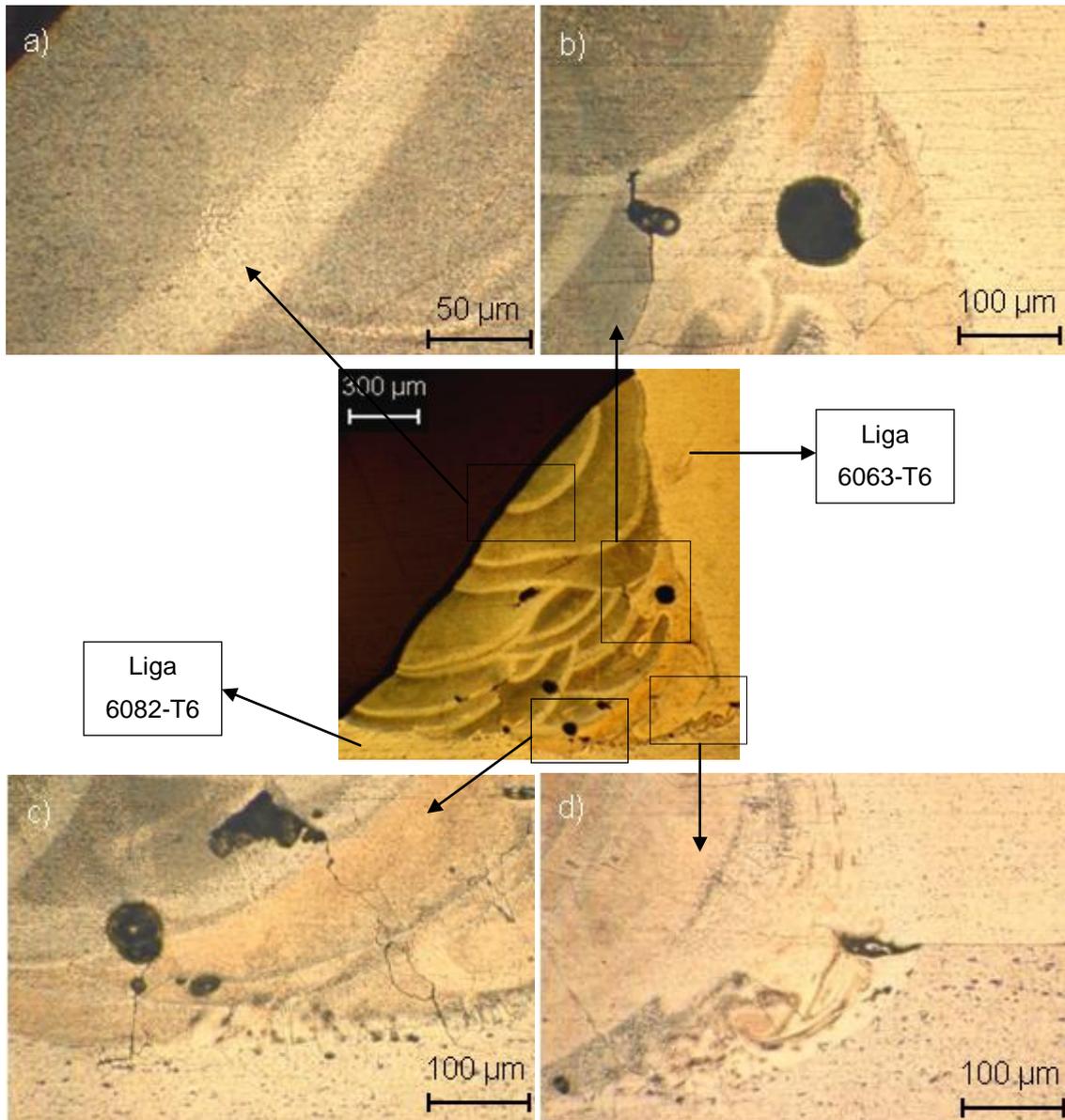


Figura 5.52 – Junta soldada com MA 4043; a) Estrutura da ZF; b) Porosidades e micro fissuras na ZF, interface com MB 6063; c) Micro fissuras MB 6082 na interface com a ZF; d) Raiz do cordão de soldadura

Na figura a) visualiza-se a zona de refusão, entre passos, apresentando grãos mais coalescidos com teor elevado alumínio [36].

Na figura b) e c) visualiza-se poros que têm como causa, a libertação de gases de hidrogénio, tendo como principais acções correctivas melhorar a protecção gasosa e proceder-se à remoção de óxidos presentes na superfície dos materiais base [21;39]. O aumento de porosidades nesta liga é devido ao menor teor de silício presente neste material uma vez que, o silício tende em reduzir a solubilidade do hidrogénio no alumínio líquido [39].

A figura d) revela boa penetração na raiz do cordão e uma mistura uniforme dos três materiais. A penetração elevada obtida é devido a ser uma das amostras que apresentou menor distorções devido a uma eficaz preparação de junta que as restantes amostras não tiveram.

Junta de canto com material de adição 5356

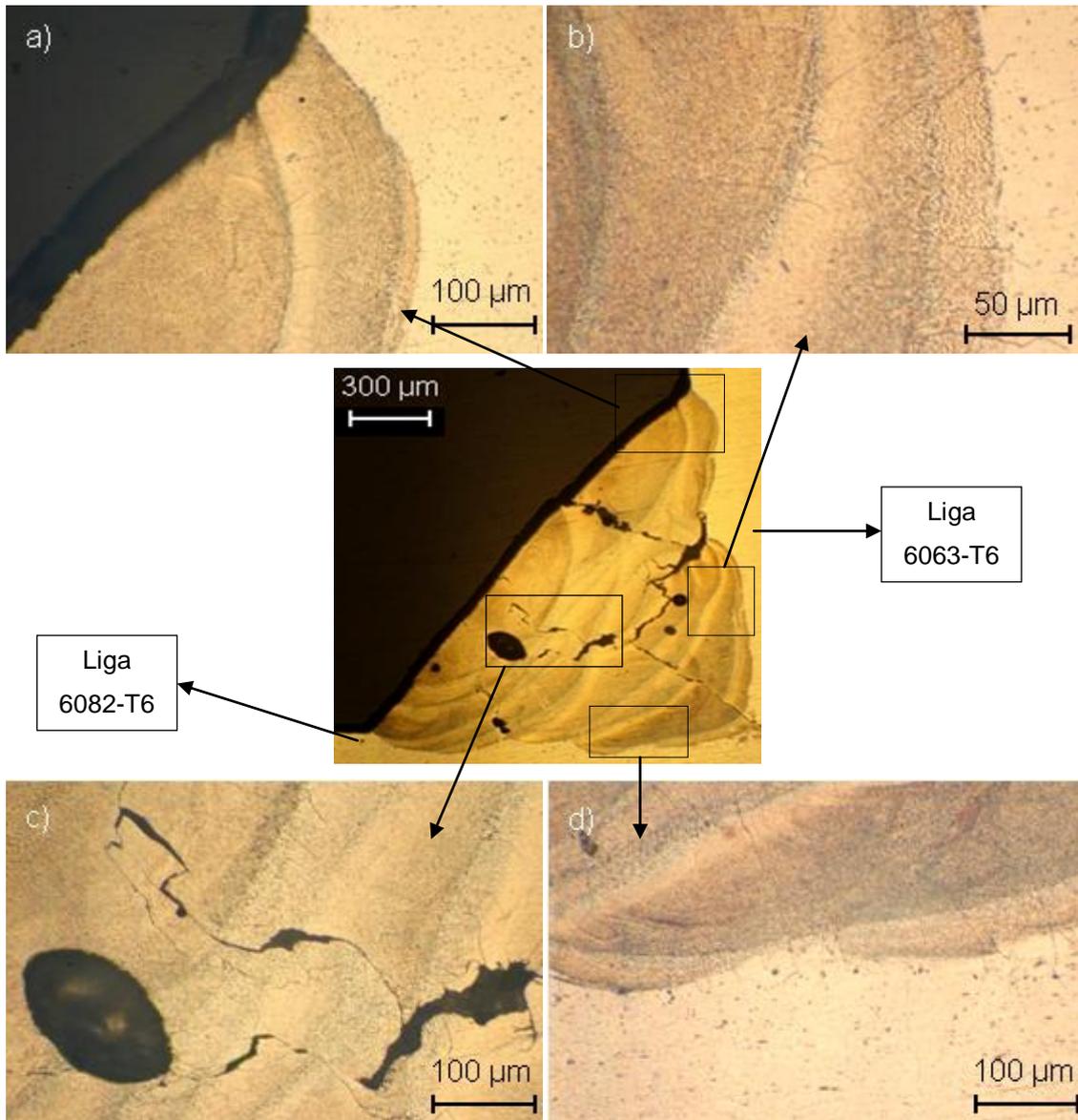


Figura 5.53 – Junta soldada com MA 5356; a) Ligação ZF com liga 6063; b) Micro fissuras na interface ZF com a liga 6063; c) Porosidades e fissuras na ZF; d) Micro fissuras na interface ZF com MB 6082

A figura a) e b) revelam boa molhagem entre a liga de adição e as ligas base, no entanto para maiores ampliações (figura b), já é visível micro fissuras na interface que se estendem à zona fundida, caso que não se verificou nas restantes ligas de adição. Este fenómeno tem como causa o elevado teor de magnésio que a liga 5356 apresenta, verificando-se que os parâmetros utilizados não são os indicados para a soldadura desta liga, sendo necessário aumentar-se a potência e a velocidade de soldadura [28].

A figura c) apresenta defeitos limitativos do cordão efectuada com a liga 5356, poros e fissuras de grandes dimensões, devido a estes defeitos este material de adição não garantiu a fiabilidade da junta soldada. As limitações reveladas pela liga 5356 devem-se a este material ser indicado para a soldadura de ligas base com elevado teor de magnésio (> 3% Mg) [8;12].

Junta de topo com material de adição 4047

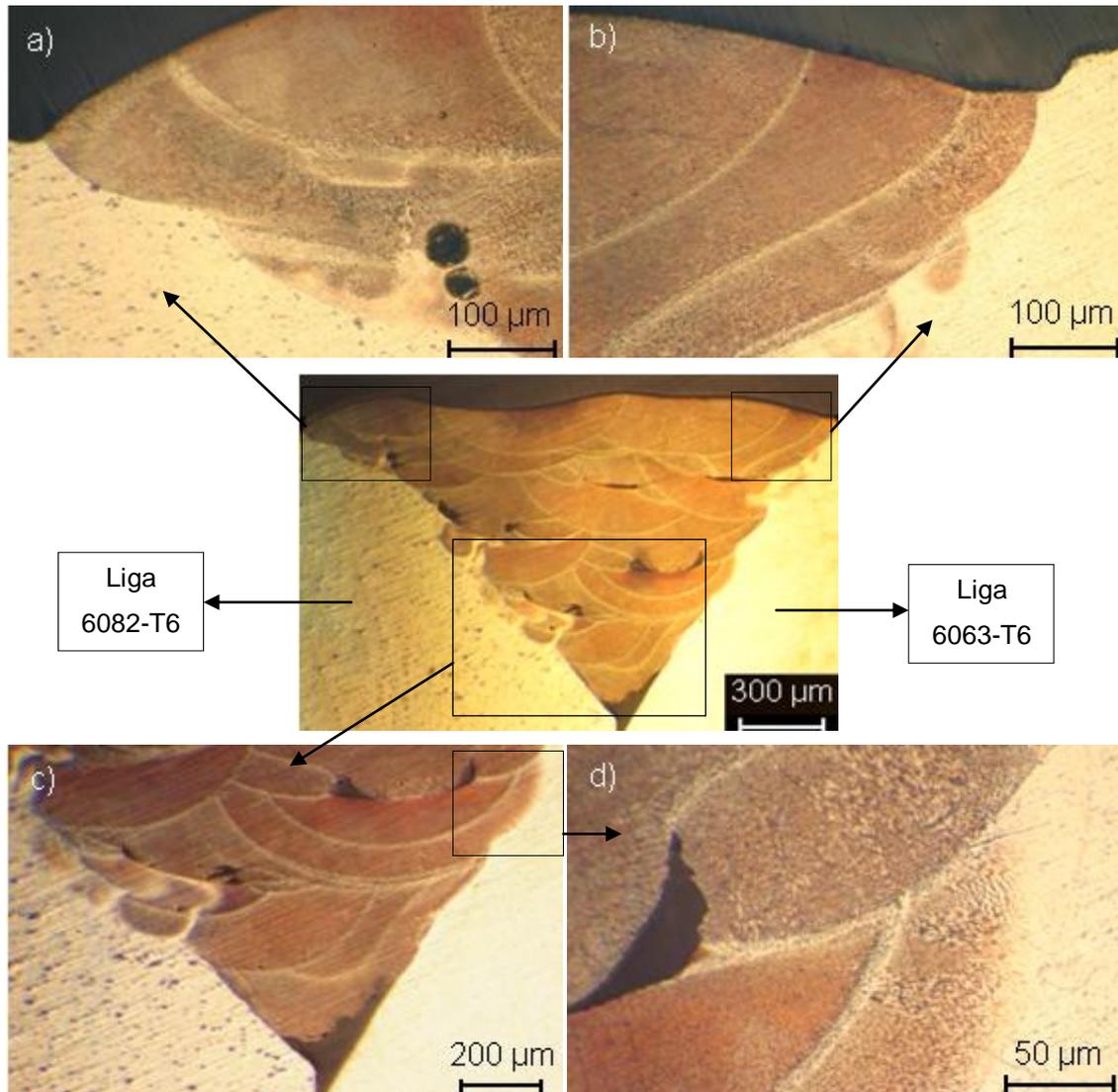


Figura 5.54 – Junta soldada com MA 4047; a) Porosidades na ZF, interface ZF com MB 6082; b) Interface ZF com MB 6063; c) Passos de ligação MA; d) Interface ZF com liga 6063 falta de colagem na ZF

Verificou-se boa ligação entre a zona de fundida e a liga 6082 (figura a), assim como, na ligação entre o material fundido e a liga 6063 (figura b).

Na figura c) visualiza-se a falta de penetração na raiz do cordão, este problema seria evitado realizando um passo de soldadura autogénea na raiz do cordão de forma a aumentar a penetração e depois executar passos de enchimento. Na figura c) e com maior ampliação na figura d) pode-se ver um defeito frequente nas amostras de topo analisados que é a falta de colagem entre passos, este defeito é de difícil correcção, uma vez que é devido à adição manual de fio, dependendo da perícia do operador. Uma solução possível para reduzir este problema é para cordões de maiores secções transversais aumentar o diâmetro do fio.

A figura d) apresentou zonas de refusão bem marcadas com alto teor de alumínio devido ao reaquecimento entre passos, tem uma microestrutura de solidificação celular dendrítica muito fina característica de um arrefecimento rápido como verificado na configuração de canto [36].

Junta de topo com material de adição 4047A

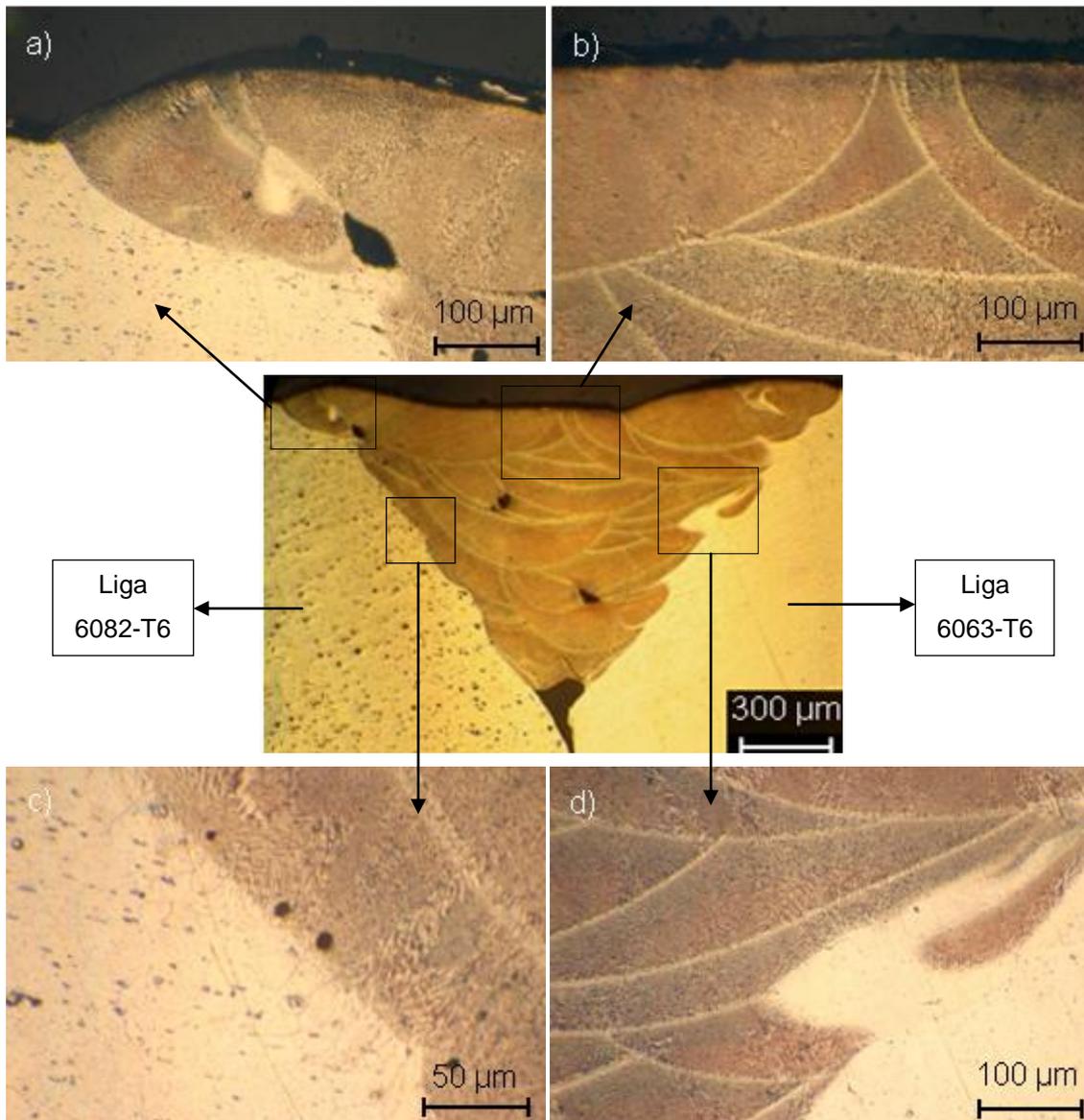


Figura 5.55 – Soldadura com MA 4047A; a) Ligação MA a liga 6082 (x100); b) Estrutura de grão MA (x100); c) Micro fissuras MA com liga 6082 (x200); d) Estrutura de grão MA na ligação à liga 6063 (x100)

Na figura a) apresenta-se a boa ligação entre a zona fundida e a liga base 6082, sendo também visível a falta de ligação entre passos, defeito frequente nas juntas de topo devido à maior secção transversal e necessidade de se efectuar mais passos de enchimento.

Na figura b) é visível a microestrutura da zona fundida que apresenta várias zonas de refusão onde se verifica um aumento do teor de alumínio, como verificado para a liga 4047.

Nesta amostra a molhagem obtida com a liga 6082 (figura c) não se verificou tão eficaz comparativamente à molhagem obtida para a liga 6063 (figura d).

5.2.9 Análise de resultados

Os resultados da análise metalográfica encontram-se resumidos na Tabela 5.16.

| Aspectos observados | | Amostras | | | | | |
|---------------------|--------------|----------|------|--------|------|------|------|
| | | 4047 | | 4047 A | | 4043 | 5356 |
| | | Canto | Topo | Canto | Topo | | |
| Penetração | Total | x | | | | x | |
| | Incompleta | | x | x | x | | x |
| Poros | Muitos | | | | | x | x |
| | Poucos | | x | | x | | |
| | Inexistente | x | | x | | | |
| Fissuras | Existentes | | | | | | x |
| | Inexistentes | x | x | x | x | x | |
| Micro Fissuras | Existente | x | x | x | x | x | x |
| | Inexistente | | | | | | |

Tabela 5.16 – Observações resultantes da análise metalográfica das amostras

A falta de penetração revelada nas amostras teve como causa factores operacionais podendo ser reduzida com fixação mais eficaz, e com execução prévia de uma passagem de ligação autogénea de forma a aumentar a penetração e só depois executar-se os passos de enchimento.

As porosidades verificaram-se com maior incidência nas ligas com menor teor de silício e maior teor de magnésio uma vez que, o silício tende em reduzir a solubilidade do hidrogénio no alumínio líquido [26;39]. Este defeito pode ser eliminado com eficaz protecção gasosa e preparação de juntas removendo óxidos superficiais e o controlo de humidade sendo a forma mais eficaz e economicamente mais viável o polimento das juntas a soldar, obtendo-se resultados eficazes com preparações utilizando lixas de granulometria de 800 mesh [3;39].

A fissuração a quente foi evitada com a utilização de ligas da série 4xxx com teor elevado de silício e baixo teor de magnésio. No caso da liga de adição 5356 em que o fenómeno de fissuração a quente decorreu e é frequente, seria necessário aumentar potência e aumentar a velocidade no entanto seria complicado efectuar estas acções uma vez que adição de fio é manual e o equipamento está a funcionar com a potência média máxima disponível. Uma acção correctiva seria diminuir o diâmetro do fio, utilizando um diâmetro igual aos restantes fios de adição, uma vez que para menores diâmetros é necessário menos potência.

As micro fissuras verificadas em todas as amostras analisadas surgem tanto na interface com a liga base 6063, como na 6082 e tem como frequente causa a estreita camada limite adjacente à zona de fusão das ligas endurecidas por precipitação. Esta região forma-se quando se verifica baixo ponto de fusão das fases eutéticas ou dos constituintes de liga nas fronteiras de grão durante a soldadura, e deve-se à elevada quantidade de elementos de liga disponíveis para formação de fases eutéticas. A presença destas fases associada às tensões de tracção ocasionadas pela soldadura pode provocar a formação de pequenas fissuras, que em condições extremas se podem prolongar ao longo da interface da zona de fusão, caso verificado na liga 5356. A temperatura elevada induzida no início da soldadura alarga parcialmente a região fundida, tornando esta zona mais propensa à fissuração [25].

5.2.10 Microscopia de varrimento – SEM

Nesta análise efectuaram-se testes aos elementos químicos constituintes dos materiais base e para os quatro materiais de adição utilizados nas amostras soldadas com configuração de junta de canto, não se procedeu à análise para as juntas de topo pois a composição química não se altera por se variar a geometria da junta.

Desta forma, os valores da estimativa quantitativa obtidos pela análise SEM para os principais elementos químicos presentes nas amostras estão apresentados na Tabela 5.17.

| Composição química [% mássica] | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|---------|---------------------|-------|-------|-------|
| Elemento | Materiais base | | Materiais de adição | | | |
| | 6063-T6 | 6082-T6 | 4047 | 4047A | 4043 | 5356 |
| Si | 2,17 | 1,69 | 12,97 | 11,59 | 16,16 | 3,32 |
| Fe | 0,50 | 0,31 | 0,50 | 0,35 | 0,40 | 0,20 |
| Mg | 2,66 | 2,38 | 1,84 | 1,92 | - | 4,74 |
| Al | 93,47 | 95,62 | 84,68 | 83,07 | 83,44 | 91,47 |

Tabela 5.17 – Composição química ligas obtida pela análise SEM

O cordão obtido com a liga 4047 apresenta valores de silício característicos de uma reacção eutética (12,6% Si) [36], assim como a liga 4047A confirmando-se a semelhança química esperada para ambas as ligas. Assim, as diferenças obtidas nos resultados dos cordões de soldadura devem-se a factores operacionais, como diferentes preparações de junta.

A análise à liga 4043 não é correcta pois apresenta um elevado teor de silício e um baixo teor de alumínio que não é característico neste material. Este erro ficou-se a dever a ser a primeira análise efectuada e apenas ter se quantificado 3 elementos de liga. Nas análises seguintes teve se em conta a percentagem mássica típica dos elementos de liga nos diferentes materiais, avaliando-se mais elementos de liga com principal atenção aos que apresentam tipicamente maior percentagem mássica.

Os materiais base apresentaram teores elevados de silício e magnésio, o elevado teor de silício pode ter como causa a mistura resultante com os materiais de adição que à excepção da liga 5356 têm todos elevados teores de silício.

Os valores elevados de magnésio são a causa frequente de micro fissuras, observadas na microscopia óptica. No entanto, os altos teores de magnésio revelados podem incrementar a resistência e dureza das juntas soldadas [25], assim é frequente a utilização da liga 5356 como material de adição pois obtém-se juntas de maior resistência mecânica embora no caso concreto esta se tenha verificado ineficaz devido a factores operacionais, como potência e velocidade de soldadura. Outra das causas para os defeitos presentes na liga 5356 é a diferença significativa dos teores de magnésio entre a liga base e os materiais de adição apresentando melhor soldabilidade em ligas com elevados teores de magnésio.

5.2.10.1 Análise Micrográfica – SEM

As micrografias obtidas por microscopia de varrimento não permitem caracterizar a microestrutura dos materiais de adição nas zonas fundidas, apenas detectar defeitos pontuais.

Assim, nas micrografias da Figura 5.56 apresenta-se a interface da zona fundida com os materiais base, visualizando-se poros na liga de adição 5356.

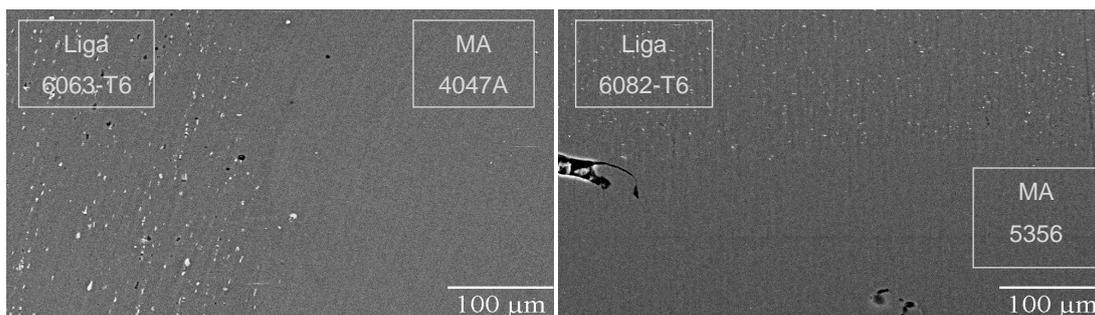


Figura 5.56 – SEM – Micrografia interface MA 4047 A com liga 6063 e interface MA 5356 com liga 6082 respectivamente (Juntas de canto)

As micrografias dos materiais base não permitem caracterizar com precisão a sua microestrutura no entanto é frequente neste tipo de ligas da série 6xxx que os grãos visíveis sejam partículas de segunda fase de Mg_2Si , pois são característicos destas ligas [36].

5.2.11 Ensaios de dureza

Foram efectuados testes de dureza para todas as amostras com configuração de junta de canto e nas juntas de topo apenas para os materiais da adição 4047 e 4047A cordões esses que não fracturaram aquando do corte para preparação das amostras.

Juntas de canto

Os gráficos seguintes apresentam os perfis de dureza revelados para as quatro ligas de adição testadas.

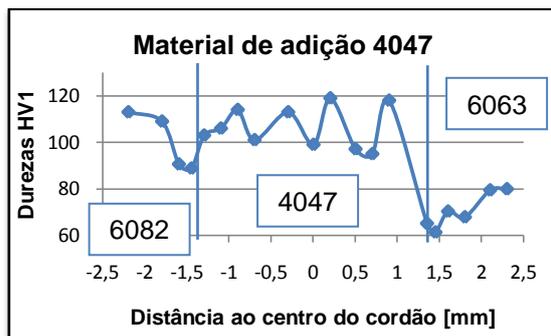


Figura 5.57 – Perfil de dureza de Vickers MA 4047

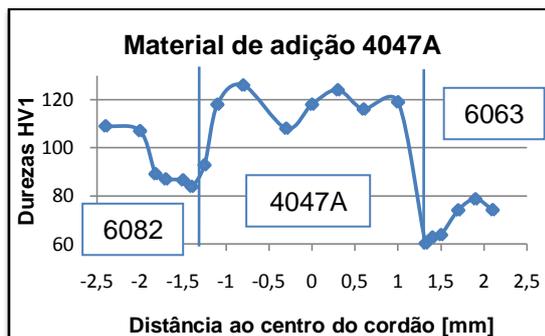


Figura 5.58 – Perfil de dureza de Vickers MA 4047A

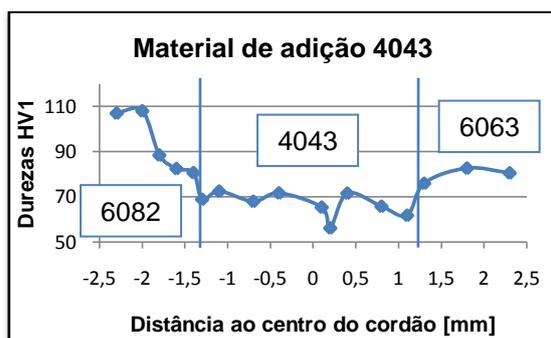


Figura 5.59 – Perfil de dureza de Vickers MA 4043

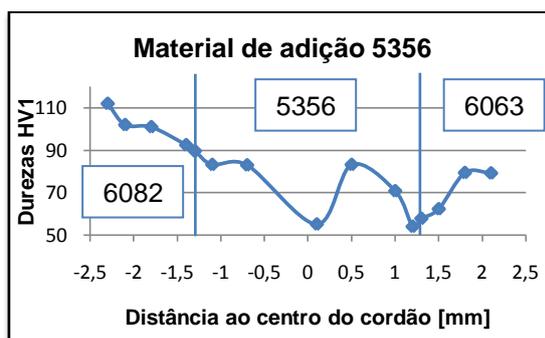


Figura 5.60 – Perfil de dureza de Vickers MA 5356

Os perfis obtidos nos materiais de adição apesar das oscilações apresentaram tendências constantes. Visualizou-se em todas as ligas utilizadas uma diminuição da dureza na interface zona fundida com os materiais base, que aconteceu com maior relevo nas ligas 4047 e 4047A. Este fenómeno acontece na ZAC, zona de falha frequente em juntas soldadas.

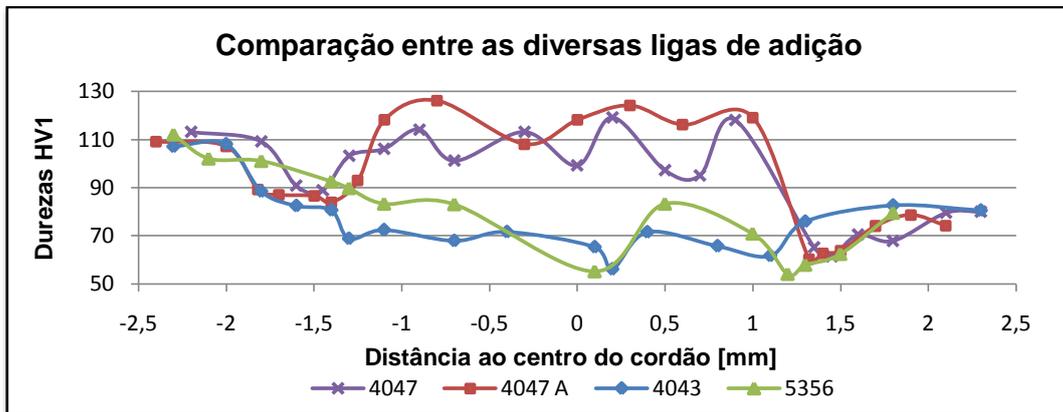


Figura 5.61 – Comparação dos perfis de dureza de Vickers para as diversas ligas de adição

Através da comparação entre os diferentes perfis pode-se detectar que os materiais base apresentaram um perfil de durezas aproximadamente constante. Já nos materiais de adição podemos ver um comportamento semelhante entre a liga 4047 e 4047A que se justifica devido à semelhança química e mecânica que estas ligas apresentam. Já as ligas 4043 e 5356 apresentaram perfis de dureza inferiores às ligas 4047 e 4047A e aos materiais base utilizados.

Juntas de topo

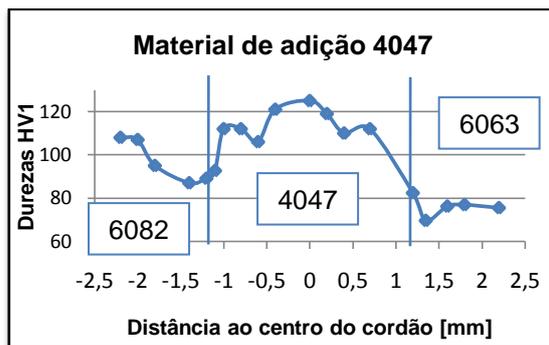


Figura 5.62 – Perfil de dureza de Vickers MA 4047

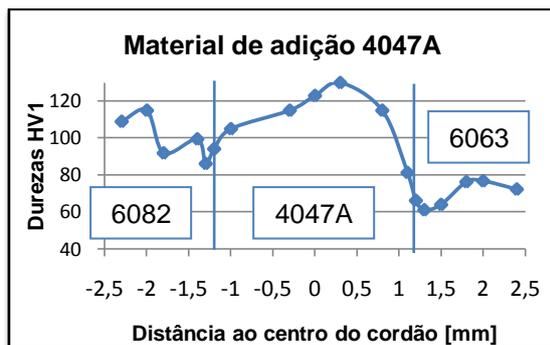


Figura 5.63 – Perfil de dureza de Vickers MA 4047A

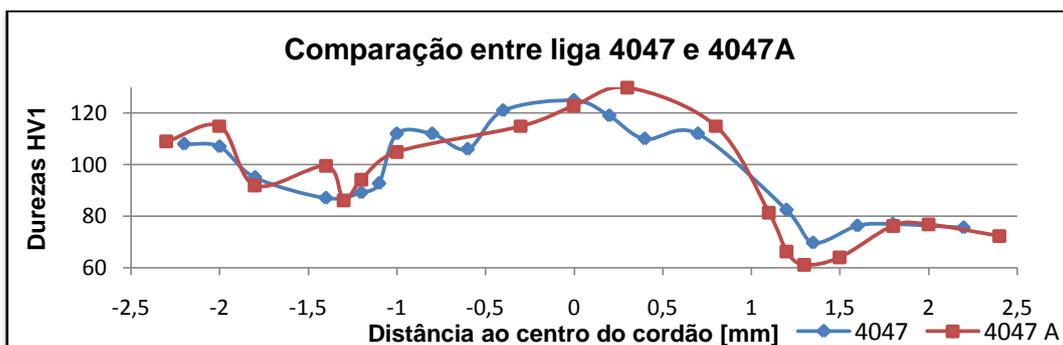


Figura 5.64 – Comparação dos perfis de dureza de Vickers para MA 4047 e 4047A

Tal como na configuração de canto os perfis obtidos para juntas de topo entre os materiais 4047 e 4047A são semelhantes o que se explica pela semelhança química e mecânica destas ligas.

Na Tabela 5.18 encontram-se os valores médios obtidos para as diversas ligas baseados nos gráficos anteriores. Os valores de dureza médios foram calculados através da média dos pontos retirados sobre cada material em cada amostra, posteriormente fez-se a média dos valores obtidos para as 6 amostras testadas e assim, surge o valor médio dos materiais base utilizados. Para os materiais de adição foi feita a média dos pontos que estão sobre o cordão em cada amostra, não entrando para a média os pontos que estão na interface da zona de fusão com o material base.

| Liga | Materiais base | | Materiais de adição | | | | | |
|---------------------|----------------|---------|---------------------|------|--------|------|------------|------------|
| | 6063-T6 | 6082-T6 | 4047 | | 4047 A | | 4043 Canto | 5356 Canto |
| | | | Canto | Topo | Canto | Topo | | |
| Dureza [HV1] | 76 | 106 | 104 | 115 | 118 | 118 | 67 | 74 |

Tabela 5.18 – Valores de dureza médios para as ligas utilizadas

A liga 6082 verificou valores médios de dureza elevados devido a ser uma das ligas da série 6xxx com maior resistência mecânica, tal como verificado na liga 6061 no caso anterior. Já a liga 6063 é uma liga que apresenta menor resistência ao desgaste e menor resistência mecânica daí os menores valores de dureza registados. As elevadas durezas registadas para ambas as ligas base são devidas ao tratamento térmico T6 (tratamento térmico de solubilização seguido de envelhecimento natural).

A liga 4047A foi a que apresentou uma dureza média superior comparativamente às restantes ligas não se registando diferenças de durezas para as diferentes geometrias de junta, confirmando-se assim, como verificado no caso anterior que a dureza não varia com as diferentes configurações, variando apenas com o material de adição utilizado na soldadura.

A liga 4047 apresentou durezas próximas das registadas para a liga 4047A, comprovando a sua semelhança mecânica como verificado nos gráficos para ambas as configurações. Os valores elevados de dureza obtidos para ambas as ligas são devido ao alto teor de silício presente nestas ligas apresentando elevada resistência ao desgaste e menor ductilidade [24].

A liga 4043 apresentou valores reduzidos de dureza devido ao menor teor de silício presente nesta liga uma solução possível para uniformizar a dureza do cordão de soldadura obtido seria proceder-se à realização de tratamentos térmicos [11].

Os valores de dureza registados para a liga 5356 podem não ser representativos desta liga de adição, uma vez que, como foi descrito nas análises anteriores a amostra apresenta um elevado número de poros e fissuras que podem alterar a precisão dos valores de dureza obtidos, pois soldaduras executadas com a liga 5356 apresentam elevada resistência e ductilidade [42;43].

O amaciamento da ZAC verificado em todos os materiais com maior incidência nas ligas 4047 e 4047A é devido à destruição dos precipitados obtidos por tratamento térmico de

endurecimento por precipitação efectuado nos materiais base devido às altas temperaturas atingidas durante o processo de soldadura [11;21].

5.2.12 Análise Visual (Peça pretendida)

Nesta fase é feita a análise visual da peça soldada, com a utilização do fio de adição 4047 que revelou os melhores resultados nas análises efectuadas. Utilizando os materiais fornecidos e com a forma pretendida pelo cliente, procedeu-se então ao cordão de soldadura. Na peça pretendida apenas se procedeu à análise visual e a ensaios de líquidos penetrantes, devido à impossibilidade de proceder-se a ensaios destrutivos de caracterização.



Figura 5.65 – Peça pretendida soldada (liga 6063-T6 com 6082-T6)

O cordão de soldadura apresentou bom aspecto superficial e uma largura regular. Como complemento à análise visual procedeu-se à inspecção com líquidos penetrantes.

5.2.13 Líquidos Penetrantes (Peça pretendida)

Após realizada a soldadura foram efectuados testes de líquidos penetrantes na peça pretendida de forma a testar a qualidade superficial do cordão.



Figura 5.66 – Ensaio de líquidos penetrantes à peça soldada (liga 6063-T6 com 6082-T6)

A peça apresenta alguns poros superficiais que são reparados através da adição pontual de material de adição sendo desta forma preenchido o poro existente, obtendo-se soldaduras isentas de defeitos superficiais.

Através das análises anteriores efectuadas às mesmas ligas base testando quatro materiais adição, pode-se seleccionar o material de adição 4047 que garante a qualidade e fiabilidade da peça pretendida pelo cliente da CWT.

5.3 Soldadura – Liga 6060 com 5154 ou 5754

5.3.1 Material e suas características

Neste caso prático testou-se cordões de soldaduras entre ligas da série 5xxx e 6xxx, sendo executados testes sem material de adição e com as ligas de adição 4043 e 4047. Os componentes a ligar são utilizados na indústria informática como peças de computadores (Figura 5.67).



Figura 5.67 – Peça a soldar (série 6000 com 5000)

Alguns dos trabalhos executados para a indústria informática na empresa CWT procuram a ligação entre a liga 6060 e a liga 5154 ou 5754 podendo ser utilizadas ambas as ligas da série 5xxx como material base. Deste modo, embora as amostras testadas tenham como material base a liga 6060 com a liga 5754 não se exclui da análise a liga 5154 porque ambas as ligas são bastante semelhantes quimicamente e mecanicamente. Assim, os resultados obtidos para a liga 5754 podem ser implementados com segurança na liga 5154.

5.3.1.1 Propriedades material base

A liga 5154 tem como principal componente o magnésio (3,5% Mg), apresenta excelente resistência à corrosão. As principais aplicações são: estruturas soldadas, reservatórios, recipientes sob pressão, estruturas marítimas e transportes. Esta liga é também utilizada em algumas aplicações como fio de adição [12].

A liga 5754 tem como principal componente de liga o magnésio. É uma liga não tratável termicamente logo é endurecida através de trabalho mecânico, sendo laminada espontaneamente amolece até que atinja uma condição estável. Tem excelente resistência à corrosão em especial à água do mar e industrialmente em atmosferas poluídas. Devido às suas características a liga é utilizada tipicamente na construção naval, em chapas de pavimentos, rebites, equipamentos de pesca, estruturas soldadas para aplicações químicas e nucleares. É também utilizada em painéis de carroçarias e como estrutura nos chassis automóveis [32].

A liga 6060 é utilizada na forma extrudida, de resistência média e com boas características para anodização. Esta liga é tipicamente utilizada em aplicações arquitectónicas, caixilharia de janelas e portas, é também utilizada quando se pretende perfis de acabamento brilhante [44].

As tabelas seguintes apresentam a composição química e propriedades mecânicas dos materiais base:

| Composição química [% mássica] | | | |
|---------------------------------------|--------------|---------------|---------------|
| Elemento | 6060 | 5154-O | 5754-O |
| Si | 0,3-0,6 | 0,25 | 0,4 |
| Fe | 0,1-0,3 | 0,4 | 0,4 |
| Cu | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Mn | 0,1 | 0,1 | 0,5 |
| Mg | 0,35-0,6 | 3,10-3,90 | 2,6-3,6 |
| Cr | - | 0,15-0,35 | - |
| Cr+Mn | - | - | 0,1-0,6 |
| Zn | 0,15 | 0,2 | 0,2 |
| Ti | 0,1 | 0,2 | 0,15 |
| Outros | Cada | 0,05 | 0,05 |
| | Total | 0,15 | 0,15 |
| Al | 97,8 | 94,3-96,8 | 93,6-97,3 |

Tabela 5.19 – Composição química materiais base [34]

| Propriedades | Tensão de rotura [MPa] | Tensão de cedência [MPa] | Extensão [%] | Módulo de elasticidade [GPa] | Dureza [HV] |
|---------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------|
| 6060-T5 | 220 | 180 | 12 | 69 | 70 |
| 5154-O | 240 | 115 | 27 | 70,3 | 58 |
| 5754-O | 215 | 140 | 25 | 68 | 55 |

Tabela 5.20 – Propriedades mecânicas dos materiais base [34;45]

5.3.1.2 Material de adição

As propriedades dos fios de adição utilizados estão descritas na secção 5.2.1.2.

5.3.2 Parâmetros de Soldadura

Neste ensaio foram testadas as opções de soldadura autogénea e com material de adição usando os fios 4043 e 4047. A estação de trabalho 2 foi a utilizada na execução dos cordões com os parâmetros seleccionados para soldar as ligas base 6060 com 5754 ou 5154.

| Parâmetros de Soldadura | | | | |
|--------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| Parâmetros | Autogéneo | Fio 4043 | Fio 4047 | Unidades |
| Potência | 4,4 | 4,4 | 4,4 | kW |
| Duração | 5,0 | 5,0 | 5,0 | ms |
| Frequência | 6,0 | 8,0 | 8,0 | Hz |
| Tamanho do foco | 5,0 | 2,0 | 2,0 | mm |
| Entrega Térmica | 6999 | 8534 | 8534 | J/cm ² |
| Tensão | 380 | 380 | 380 | V |
| Energia | 15 | 14 | 14 | J |
| Velocidade (u=60%) | 12 | 6,4 | 6,4 | mm/s |
| Velocidade (u=85%) | 4,5 | 2,4 | 2,4 | mm/s |

Tabela 5.21 – Parâmetros de soldadura da liga 6060 com 5154 ou 5754

A protecção gasosa é conseguida através de alimentação de árgon coaxialmente com o feixe laser.

À semelhança dos casos anteriores utilizaram-se os mesmos parâmetros para ambos os fios de adição. Na soldadura autogénea é necessário proceder ao aumento do tamanho do foco de forma a garantir a fusão de ambos os materiais base de forma a conseguir a ligação dos materiais.

5.3.3 Configuração da Junta

A configuração da junta é determinada pelas ligas base disponíveis na empresa CWT. O operador procede primeiro a pontos de ligação no lado oposto onde irá efectuar o cordão (ponto 1). As ligas apresentam as dimensões descritas na Figura 5.68.

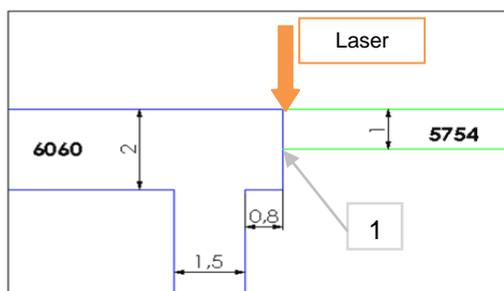


Figura 5.68 – Configuração da junta liga 6060 com 5754

5.3.4 Análise Visual

Nesta fase fez-se a análise visual dos cordões realizados e são apresentadas as principais características superficiais para os três casos analisados.



Figura 5.69 – Soldadura sem material de adição (Autogéneo)

O cordão realizado sem material de adição revela um elevado número de defeitos. Apresentou concavidade suave, poros em elevado número, bordos queimados, colapso do cordão de soldadura, material expelido e crateras.



Figura 5.70 – Soldadura com fio de adição 4043

O cordão com uso da liga 4043 como material de adição apresenta uma largura de cordão regular e uma convexidade marcada. Relativamente aos defeitos, revela salpicos e crateras.



Figura 5.71 – Soldadura com fio de adição 4047

A liga 4047 usada como material de adição demonstra largura regular e uma convexidade marcada, no entanto numa parte da ligação apresenta abatimento do cordão, evidencia também a presença de salpicos.

5.3.5 Análise de resultados

Na Tabela 5.22 é resumido os principais aspectos observados e é feita a comparação entre os diferentes cordões.

| Aspectos observados | | Amostras | | |
|---------------------|--------------|-----------|----------|----------|
| | | Autogéneo | Fio 4043 | Fio 4047 |
| Largura do cordão | Regular | x | x | x |
| | Variável | | | |
| Convexidade | Marcada | | x | x |
| | Suave | | | |
| | Inexistente | x | | |
| Poros | Sim | x | | |
| | Não | | x | x |
| Fissuras | Existentes | x | | |
| | Inexistentes | | x | x |
| Bordos queimados | Existentes | x | | |
| | Inexistentes | | x | x |
| Salpicos | Existentes | | x | x |
| | Inexistentes | x | | |

Tabela 5.22 – Observações resultantes da análise visual dos cordões

Os cordões obtidos demonstraram bastantes limitações quanto à qualidade superficial revelada. Estes defeitos tiveram como causa a falta preparação de junta pois era necessário proceder-se remoção de óxidos presentes na superfície dos materiais base e evitar fontes de humidades.

5.3.6 Análise Metalográfica

5.3.6.1 Análise Macrográfica

Não foi possível proceder à análise macrográfica da soldadura autogénea por esta se fracturar totalmente durante o corte para proceder à montagem da mesma. Através da análise macrográfica efectuada às soldaduras com fio de adição, podemos aferir acerca da geometria dos cordões de soldadura realizados, assim como, os principais defeitos apresentados em cada ligação.

As juntas soldadas não apresentaram distorções significativas que se ficou a dever à forma das ligas base utilizadas e devido ao cordão efectuado ser de secção reduzida.

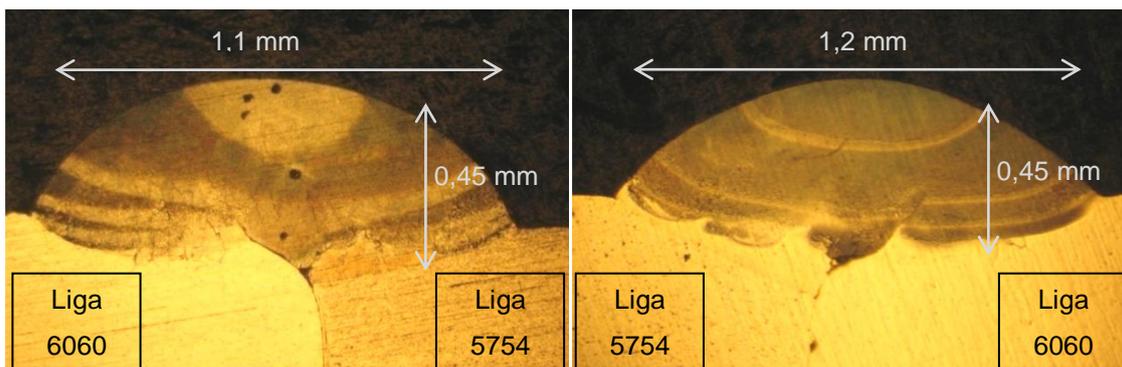


Figura 5.72 – Macrografia com MA 4043

Figura 5.73 – Macrografia com MA 4047

Ambos os cordões apresentaram aproximadamente a mesma secção soldada e demonstraram uma convexidade marcada.

A liga 4043 como material de adição revela poros na zona fundida da amostra e falta de colagem na ligação à liga 6060. Já a ligação efectuada com fio de adição 4047 apresenta-se isenta de poros e demonstra uma boa ligação aos materiais base.

5.3.6.2 Análise Micrográfica

Como nos casos anteriores seleccionou-se amostras representativas para caracterizar as microestruturas dos materiais utilizados.

Material Base

Os materiais base apresentam uma estrutura homogénea. A liga da série 5754 apresenta uma estrutura mais grosseira do que a liga 6060.



Figura 5.74 – Micrografia liga 5754



Figura 5.75 – Micrografia liga 6060

Ligas alumínio magnésio da série 5xxx tipicamente contêm partículas de segunda fase Mg_2Si , $Al_{18}Mg_3Cr_2$ e Al_6Mn , no entanto para a microestrutura da liga 5754 (Figura 5.74) sendo uma liga com elevado teor de magnésio no estado tratado, apenas se encontram presentes microestruturas de Mg_2Si (pontos pretos) [36].

Na liga 6060 a ampliação não permite identificar os constituintes da microestrutura (Figura 5.75). No entanto, a liga 6060 com baixo teor de magnésio, assim como a liga 6063, é característico o silício elementar estar presente em partículas de segunda fase [36].

Juntas de topo com fio 4043

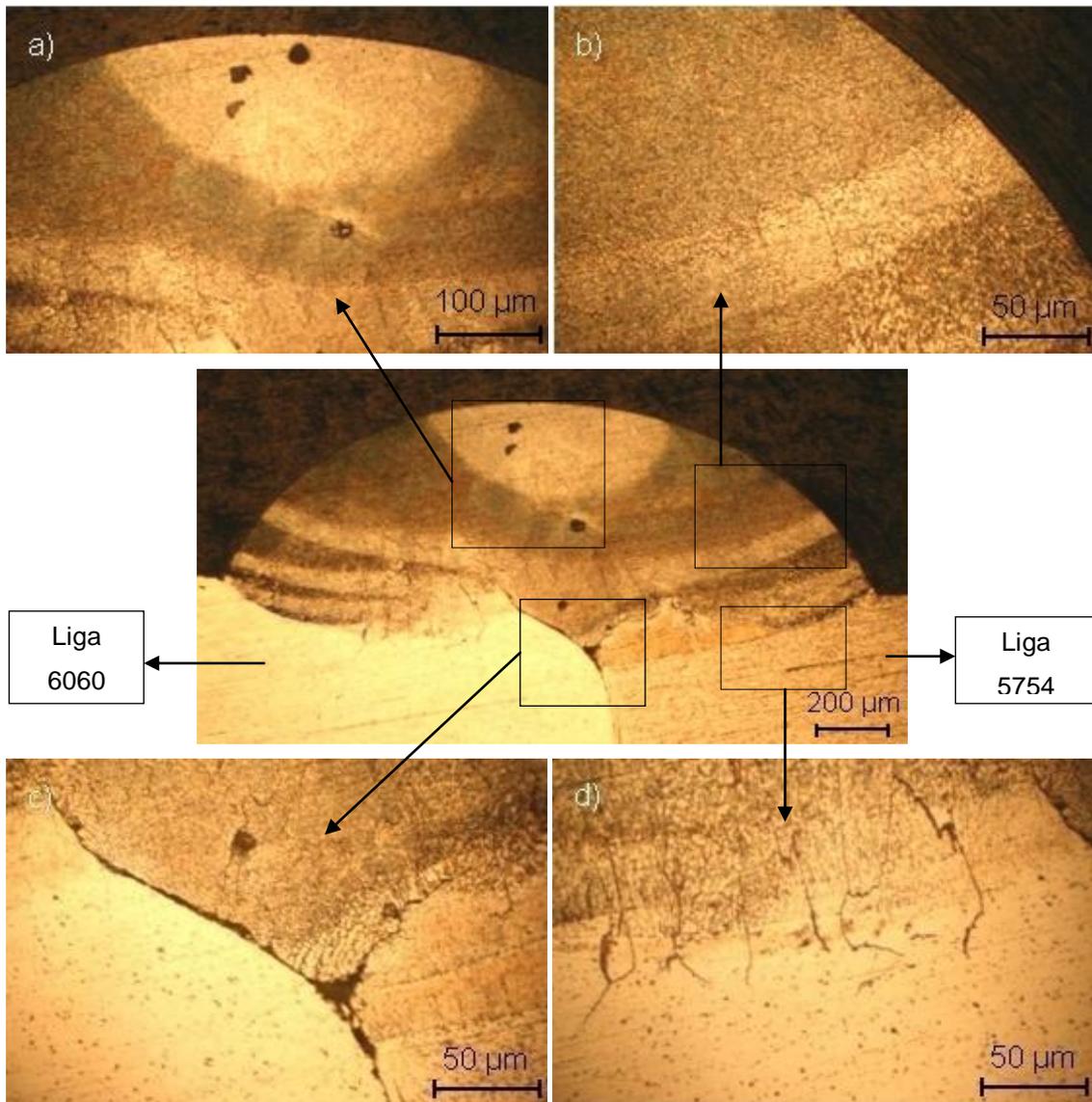


Figura 5.76 – Junta soldada com MA 4043; a) Porosidades na ZF; b) Zona de refusão de grão no MA; c) Falta de ligação na interface ZF com material base 6060; d) Micro fissuras na ligação ZF à liga 5754

A soldadura realizada com material de adição 4043 apresentou porosidades na zona fundida (figura a) principalmente na zona da raiz do cordão e na zona superior do cordão, tendo como causa a ineficaz protecção gasosa e falta de preparação de juntas.

A figura b) zona fundida, apresentou grãos com crescimento epitaxial e formação de estruturas colunares dendríticas, sendo visível nas zonas de refusão entre passos, zonas mais claras com elevado teor de alumínio [25;36].

A raiz do cordão demonstrou falta de colagem da liga de adição ao material base 6060 (figura c).

Já na interface da ligação da zona fundida com a liga 5754 visualizou-se micro fissuras (figura d), este fenómeno é frequente na soldadura de ligas da série 5xxx com alto teor de magnésio, com a liga 4043 por se formar uma grande quantidade de um composto eutético de segunda fase Mg_2Si , decrescendo a ductilidade e aumentando sensibilidade à fissuração [43].

Juntas de topo com fio 4047

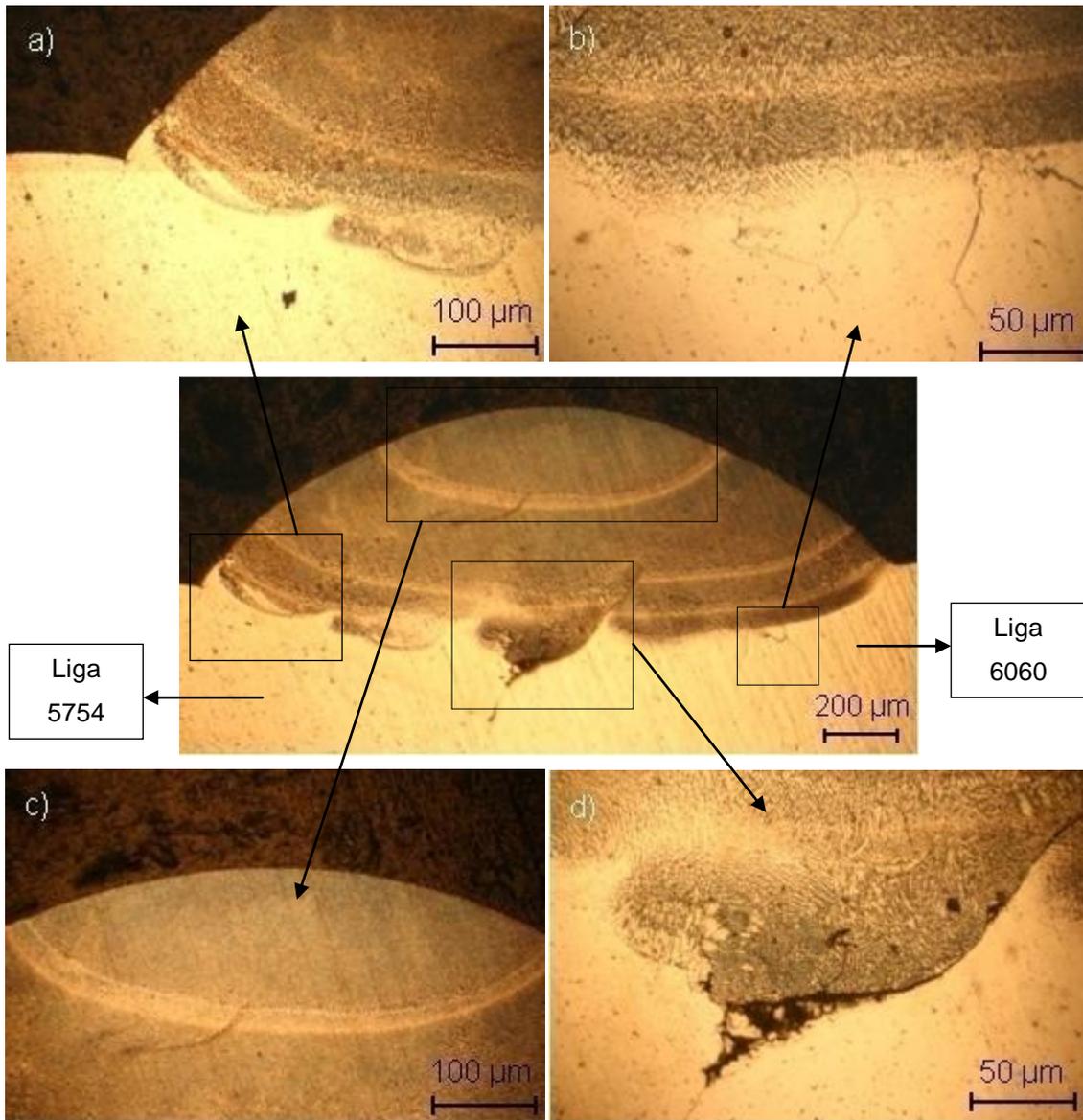


Figura 5.77 – Junta soldada com MA 4047; a) Interface ZF com a liga 5754; b) Micro fissuras na ligação ZF com a liga 6060; c) Estrutura da ZF; d) Falta de ligação na raiz do cordão à liga 6060

A junta soldada com a liga de adição 4047 apresenta uma boa ligação à liga base 5754 (figura a), já na ligação à liga 6060 verificou-se a formação de micro fissuras (figura b).

A figura c) apresenta a microestrutura da junta fundida em que pode visualizar a forma do último passo com fio de adição.

A figura d) revelou falta de ligação na interface da zona fundida com a liga base 6060, como verificado na amostra executada com a liga de adição 4043, este defeito pode ter como causa principal a falta de preparação das juntas dos materiais base.

A microestrutura da zona fundida é característica de reacção eutética, e apresentou assim como a liga 4043, a formação de estruturas colunares dendríticas com crescimento epitaxial do grão, junto à linha de fusão (figura b, d).

5.3.7 Análise de resultados

Resumo dos principais resultados decorrentes da análise metalográfica:

| Aspectos observados | | Amostras | |
|---------------------|--------------|----------|------|
| | | 4047 | 4043 |
| Penetração | Total | | |
| | Incompleta | x | x |
| Poros | Muitos | | |
| | Poucos | | x |
| | Inexistentes | x | |
| Fissuras | Existente | | |
| | Inexistente | x | x |
| Micro fissuras | Existentes | x | x |
| | Inexistentes | | |

Tabela 5.23 – Observações resultantes da análise metalográfica das amostras

A penetração obtida é aceitável para ambas as ligas, no entanto, na raiz do cordão verificou-se falta de colagem à liga 6060, este problema pode ter origem devido à falta de preparação de juntas. Assim, o polimento mecânico das superfícies ou através da passagem de acetona desengordurante poderia evitar-se este defeito.

A soldadura com a liga 4047 revelou-se isenta de porosidades demonstrando uma eficaz protecção gasosa. Já na utilização da liga 4043 a mesma protecção gasosa utilizada verificou-se ineficaz, sendo demonstrativo que a protecção gasosa é um parâmetro que tem de ser regulável com o material de adição utilizado.

As micro fissuras ocorreram com frequência na interface da zona fundida e os materiais base devido ao alto teor de magnésio das ligas base.

A liga de adição 4043 demonstrou melhor soldabilidade com a liga 6060, pois apresenta limitações nas soldaduras com ligas da série 5xxx com alto teor de magnésio, por se formar uma grande quantidade de partículas de segunda fase Mg_2Si , decrescendo a ductilidade da ligação e aumentando sensibilidade à fissuração [42].

O fenómeno de fissuração a quente não se manifestou na soldadura destas ligas, devido ao controlo da composição química do material fundido com a adição das ligas 4043 e 4047.

5.3.8 Microscopia de varrimento – SEM

Como nas análises anteriores procedeu-se à análise SEM para avaliar os principais elementos de liga presentes nos materiais base e de adição. Assim, na Tabela 5.24 indicou-se a percentagem mássica dos principais elementos de liga.

| Elemento | Composição química [% mássica] | | | |
|-----------|--------------------------------|-------|---------------------|-------|
| | Materiais base | | Materiais de adição | |
| | 6060 | 5754 | 4043 | 4047 |
| Si | 1,24 | 1,09 | 7,48 | 12,67 |
| Fe | 0,29 | 0,58 | 0,45 | 0,52 |
| Mg | 2,31 | 2,16 | 1,93 | 1,69 |
| Al | 96,17 | 96,17 | 90,41 | 85,13 |

Tabela 5.24 – Composição química ligas obtida pela análise SEM

A liga de adição 4047 registou valores próximos do teor típico de silício, ferro e alumínio, no entanto, o magnésio apresenta valores elevados para esta liga. Confirma-se assim para os teores obtidos a reacção eutética que se dá nestas ligas. Já para a liga 4043 o valores de silício comprovam uma microestrutura hipoeutética (< 12% Si) [36].

A liga 6060 revelou um alto teor de magnésio que pode ser a causa da falta de colagem verificada na raiz do cordão para ambas as ligas de adição.

5.3.8.1 Análise Micrográfica - SEM

Juntas de topo com fio 4043

As indentações presentes nas micrografias serviram de localização para as análises efectuadas por microscopia de varrimento.

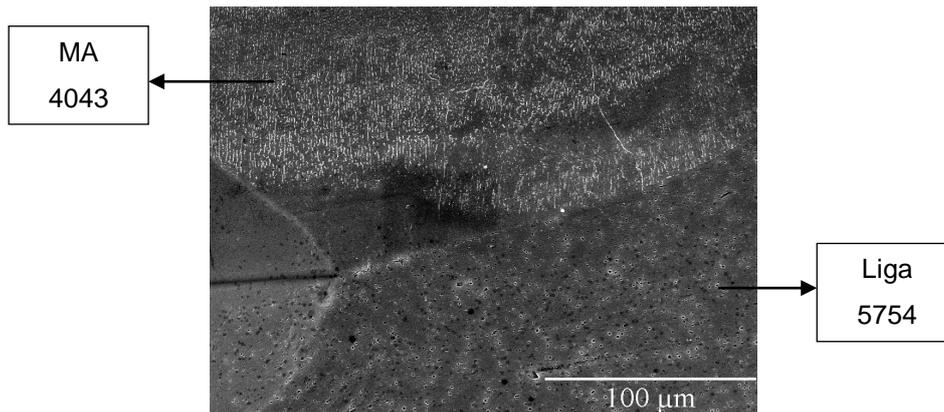


Figura 5.78 – SEM – Ligação MA 4043 com liga 5754

Na liga base 5757 (Figura 5.78) sendo uma liga com elevado teor de magnésio, apenas se encontram presentes microestruturas de Mg_2Si [36], comprovando os resultados obtidos por microscopia óptica.

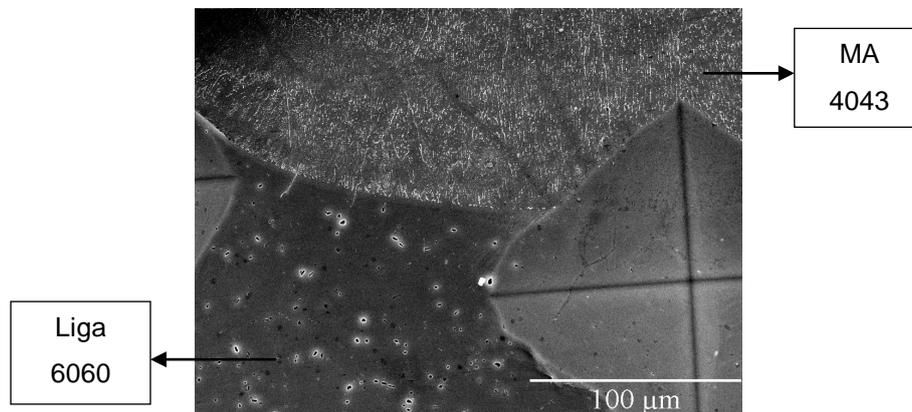


Figura 5.79 – SEM – ligação MA 4043 com a liga 6060

Na liga 6060 (Figura 5.79) com baixo teor de magnésio, assim como na liga 6063, é característico os constituintes da microestrutura estar presente em maior percentagem o silício elementar em partículas de segunda fase e em menor percentagem Mg_2Si [36].

Na liga de adição 4043 as micrografias (Figura 5.78 e 5.79) revelaram uma microestrutura com grãos epitaxiais colunares-dendriticos.

Juntas de topo com fio 4047

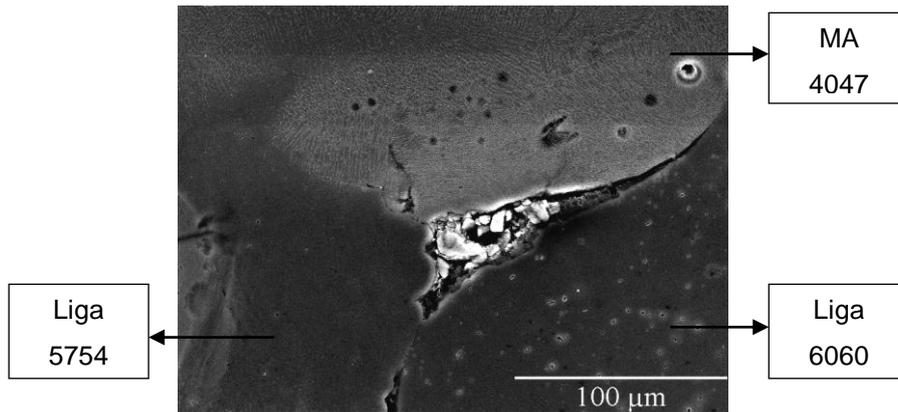


Figura 5.80 – SEM – raiz do cordão MA 4047 com liga 6060 e 5754

Na micrografia obtida com material de adição 4047 não é possível determinar as microestruturas obtidas, apenas se visualiza os defeitos como porosidades na raiz do cordão e falta de ligação à liga 6060 como identificado na microscopia óptica.

5.3.9 Ensaios de dureza

Os resultados dos ensaios de dureza de Vickers realizados nas amostras apresentam-se na forma de gráfico que traça a evolução da dureza no cordão de soldadura.

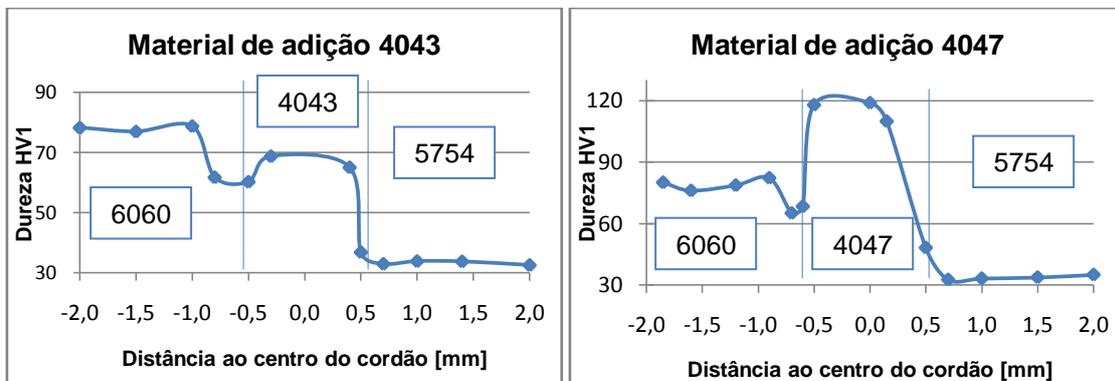


Figura 5.81 – Perfil de dureza de Vickers MA 4043

Figura 5.82 – Perfil de dureza de Vickers MA 4047

5.3.10 Análise de resultados

De modo a permitir comparar os resultados obtidos para cada uma das amostras realizou-se um gráfico contendo ambos os perfis de dureza traçados (Figura 5.83).

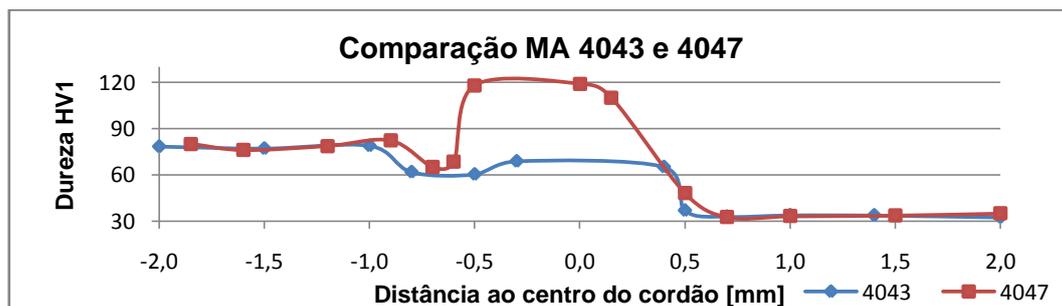


Figura 5.83 – Comparação dos perfis de dureza de Vickers para MA 4043 e 4047

Da análise dos gráficos pode-se aferir que os valores de dureza médios dos materiais base são semelhantes para ambas as amostras. Na Tabela 5.25 encontram-se os valores médios para os materiais base e para as ligas de adição utilizadas.

| Liga | Materiais base | | Materiais de adição | |
|--------------|----------------|--------|---------------------|------|
| | 6060-T5 | 5754-O | 4043 | 4047 |
| Dureza [HV1] | 78 | 34 | 67 | 116 |

Tabela 5.25 – Valores de dureza médios para as ligas utilizadas

As ligas da série 5xxx são caracterizadas pela baixa dureza e elevada resistência e ductilidade [12] O baixo valor de dureza da liga 5754 deve-se ao tratamento recozimento e recristalização efectuado. No entanto, a liga 5754 apresentou uma dureza bastante reduzida e inferior aos valores tipicamente descritos para esta liga. Em aplicações que exijam maiores durezas, tratamentos de endurecimento por trabalho mecânico (H) permitem incrementar os valores de dureza, assim como as restantes propriedades mecânicas.

A liga extrudida 6060 apresentou valores de dureza médios dentro do esperado para esta liga com um tratamento T5 e semelhantes à liga 6063 utilizada na análise anterior.

A liga 4043 como material de adição a dureza é aproximadamente 2 vezes superior à liga 5754 porém, é um pouco menor que a dureza da liga 6060.

A dureza do material de adição 4047 relativamente à liga 5754 é 3,4 vezes superior. Por sua vez, quando comparada com a liga 6060 é aproximadamente 1,5 vezes superior.

Verifica-se assim, que a utilização da liga de adição 4043 para estes metais base permite obter um perfil de durezas mais uniforme comparativamente à liga 4047 que apresenta valores de dureza muito acima dos materiais base utilizados.

Os valores de dureza médios obtidos para as ligas de adição 4043 e 4047 são bastante próximos dos obtidos no caso anterior com os materiais base 6063 e 6082 concluindo-se assim que a dureza da zona fundida não varia de acordo com os materiais base utilizados.

O amaciamento da ZAC não se verificou na interface com a liga 5754 para ambos os materiais de adição. No entanto, na ligação à liga 6060 é verificável nos gráficos dos perfis de dureza um ligeiro amaciamento da ZAC devido à destruição de precipitados obtidos por tratamento térmico e daí a respectiva diminuição de dureza na interface.

6 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

6.1 Introdução

Neste capítulo é feita a discussão dos resultados obtidos através das análises visuais, macroscópica, microscópica (óptica e de varrimento) e das durezas efectuadas para os três casos estudados de soldaduras de ligas dissimilares de alumínio. Procurou-se neste contexto, encontrar as melhores soluções a implementar na empresa CWT nestes casos específicos.

Estando a discussão dividida na seguinte forma:

- Na soldadura da liga LM 25 com a liga 6061 procurou-se aferir a melhor configuração de junta limitações e potencialidades de cada uma das ligações. Apresenta-se também a melhor solução para o caso específico e as melhorias a implementar.
- Soldadura liga 6063 com 6082, estabelece-se qual o melhor material de adição a implementar na ligação com base nas amostras efectuadas e nos testes realizados, e as vantagens decorrentes da utilização das outras ligas de adição.
- Por último na liga 6060 com 5154 ou 5754 é apresentado também qual o material de adição que apresenta melhor fiabilidade aos resultados obtidos.

6.2 Soldadura – Liga LM 25 com 6061

Os principais resultados decorrentes das análises efectuadas no capítulo anterior são resumidos na tabela seguinte:

| | Configuração A | Configuração B |
|-----------------------|----------------|----------------|
| Aspecto Superficial | Bom | Bom |
| Penetração | Incompleta | Total |
| Porosidades | Poucas | Muitas |
| Fissuração a Quente | Inexistente | Inexistente |
| Dureza média MA [HV1] | 101 | 98 |

Tabela 6.1 – Resultados soldadura: liga LM 25 com 6061

Ambas as configurações apresentam um aspecto superficial de qualidade, no entanto, no caso concreto desta soldadura o factor penetração é preponderante para aceitação da junta soldada uma vez que, para garantir a fiabilidade da peça é necessária uma penetração total de forma a evitar um ponto de concentração de tensões que pode ser catastrófico para a integridade da junta soldada. Assim, a configuração que deve ser escolhida para execução do trabalho por parte da empresa CWT é a “B” que apresenta uma maior penetração devido ao chanfro realizado.

A liga 4047 apresenta elevada soldabilidade com a liga LM 25 devido aos elevados teores de silício presentes em ambas as ligas. No entanto, na interface com a liga 6061 verifica-se micro fissuras devido ao maior teor de magnésio presente nesta liga e um maior amaciamento da ZAC devido à destruição de precipitados, desta forma, alterações na geometria que diminuam a área de contacto da liga de adição com a liga 6061 são vantajosas.

Outras formas de se conseguir um aumento de penetração sem proceder à alteração da geometria da peça seria proceder ao aumento de potência, reduzir a velocidade de soldadura e a dimensão do ponto focal do feixe laser.

Devido à dimensão da secção transversal “B” ser consideravelmente superior à secção “A” verificou-se um aumento considerável de porosidades tipicamente induzida por gases de hidrogénio, que deve ser reduzida através de uma protecção gasosa mais eficaz. Existe também uma velocidade crítica para a qual o crescimento e formação de porosidades devido a gases de hidrogénio pode ser evitado, no entanto, num processo manual como o que foi utilizado torna-se impossível estabelecer esta velocidade. Outra forma de reduzir as porosidades é aumentar a potência, aumentando assim o tempo de solidificação, permitindo a fuga do hidrogénio [21]. É também fundamental proceder-se à remoção de óxidos presentes na superfície dos materiais base através da preparação da superfície, a maneira mais eficaz é a limpeza laser, no entanto, esta solução tem elevados custos. Assim, o polimento mecânico da superfície ou a utilização de acetonas desengordurantes tornam-se alternativas viáveis na redução das fontes de hidrogénio responsáveis pela formação de micro porosidades [39].

A liga 4047 apresentou-se eficaz pois evita o problema de fissuração a quente que é frequente ocorrer na soldadura deste tipo de ligas, para além de que, possui uma dureza elevada, próxima das ligas base utilizadas permitindo obter-se perfis de dureza mais uniformes.

6.3 Soldadura – Ligas 6063 com 6082

A Tabela 6.2 resume os principais resultados obtidos.

| | Liga 4047 | Liga 4047A | Liga 4043 | Liga 5356 |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Aspecto Superficial | Bom | Bom | Bom | Bom |
| Porosidade | Pouca | Pouca | Muita | Muita |
| Fissuração a Quente | Não ocorreu | Não ocorreu | Não ocorreu | Ocorreu |
| Dureza média MA [HV1] | 110 | 118 | 67 | 74 |

Tabela 6.2 – Resultados soldadura: liga 6063 com 6082

A liga 4047 foi a que apresentou os melhores resultados às análises efectuadas tendo sido o material de adição escolhido pela empresa CWT para proceder à soldadura dos materiais base utilizados. A liga revelou bom aspecto superficial e soldaduras isentas de porosidades, assim como, boa penetração e ligação aos materiais base. O fenómeno de fissuração a quente foi eliminado devido ao teor reduzido de magnésio que apresenta e ao alto teor de silício. A dureza da liga 4047 é ligeiramente superior aos materiais base utilizados e superior às ligas 4043 e 5356. A liga 4047 apresentou boa soldabilidade e fluidez devido ao elevado teor de silício que apresenta.

Os resultados obtidos para as ligas 4047A são semelhantes aos obtidos para a liga 4047 que se deve à semelhança química e mecânica que estas ligas apresentam, podendo a liga 4047A ser utilizada sem perda de qualidade e fiabilidade das soldaduras. No entanto, a liga apresentou falta de penetração em ambas as geometrias analisadas, as diferenças obtidas nos resultados dos cordões de soldadura devem-se a factores operacionais, tais como, diferentes preparações de junta.

A liga 4043 não apresentou defeitos limitativos na sua utilização como material de adição na soldadura destas ligas, no entanto, revelou propensão ao aparecimento de porosidades e uma dureza inferior aos materiais base e de adição. Devido ao facto de ser um material de adição macio deu-se a fractura do cordão de topo, desta forma, a liga apresentou limitações em cordões de elevada secção transversal.

A liga 5356 para os parâmetros e equipamento utilizado revelou-se ineficaz na obtenção de uma soldadura fiável, uma vez que, deu-se a fractura do cordão de topo, para além de que, o cordão de canto apresentou inúmeros defeitos que não garantem a ligação pretendida. Este problema deve-se à propensão que as ligas 6xxx base e 5xxx material de adição com elevado teor de magnésio têm para a fissuração a quente.

Outro factor que pode ter contribuído para os defeitos detectados é a utilização dos mesmos parâmetros operatórios quando o fio utilizado tem quase o dobro do diâmetro dos restantes materiais de adição utilizados.

6.4 Soldadura – Liga 6060 com 5154 ou 5754

Os resultados principais das análises presentes no capítulo anterior indicam:

| | Autogéneo | Liga 4043 | Liga 4047 |
|-----------------------|--------------|-------------|-------------|
| Aspecto Superficial | Mau | Médio | Médio |
| Porosidades | Elevado | Médio | Baixo |
| Fissuração a Quente | Não Avaliado | Não ocorreu | Não ocorreu |
| Dureza média MA [HV1] | Não Avaliado | 67 | 116 |

Tabela 6.3 – Resultados soldadura: liga 6060 com 5754

A soldadura sem recurso a material de adição para este tipo de ligas e com o equipamento utilizado não pode ser aplicada pois, não garante a ligação dos materiais, nem a fiabilidade exigida a juntas soldadas de ligas de alumínio. Entre os vários defeitos apresentados pela soldadura sem recurso a material de adição, o fenómeno de fissuração a quente inviabiliza a soldadura autogénea de ligas de alumínio das séries 5xxx com 6xxx pode ser evitado através do controlo da composição química do material fundido. Desta forma, a utilização das ligas de adição 4047 e 4043 possibilitaram a soldadura das ligas 5754 com 6060 evitando os fenómenos de fissuração a quente e reduzindo os defeitos superficiais revelados na soldadura autogénea.

O cordão efectuado com o material de adição 4043 apresenta-se com um aspecto superficial médio que poderia ser melhorado através de um melhor sistema de fixação, assim como uma melhor preparação de junta e protecção gasosa de forma a reduzir a formação de porosidades.

A soldadura com a liga 4047 apresentou defeitos superficiais tal como verificado para a liga 4043, que poderão ser reduzidos através das soluções aplicáveis à liga 4043. A liga 4047 revelou-se isenta de porosidades, mostrando uma eficiente protecção gasosa. Desta forma a liga de adição 4047 revelou-se a melhor solução na soldadura da liga 6060 com a liga 5754.

7 CONCLUSÕES

Através dos resultados e conclusões retiradas para os três casos estudados e da pesquisa efectuada, pode-se alargar os resultados obtidos à soldadura de ligas da série 6xxx dissimilares, assim como a soldadura de ligas 5xxx com a liga 6xxx.

7.1 Aplicação da liga de adição 4047 e 4047A

Devido às semelhanças químicas das ligas 4047 e 4047 A as quais foram confirmadas através dos resultados obtidos, considerou-se que tanto uma liga como outra apresentaram características e qualidades de juntas soldadas bastante próximas, assim, as conclusões apresentadas são aplicáveis a ambas as ligas. Desta forma, a partir de agora apresentam-se conclusões para a liga 4047 que é a mais utilizada e conhecida comercialmente sendo extensível à liga 4047 A.

Verificou-se através dos casos estudados nos capítulos anteriores que **a liga 4047 é a solução ideal, para o equipamento laser utilizado, para a soldadura de ligas dissimilares da série 6xxx, assim como, para ligas da série 6xxx com a série 5xxx**, uma vez que, apresenta soldaduras de boa qualidade superficial, elevada soldabilidade e fluidez e não apresenta fissuração a quente. Possui também baixa porosidade aquando de uma eficaz protecção gasosa e preparação de juntas, devido aos elevados teores de silício que reduzem a solubilidade de gases de hidrogénio. Demonstrou ser uma liga de elevada dureza e resistente ao desgaste, no entanto, apresenta baixa ductilidade devido também aos altos teores de silício.

7.2 Aplicação da liga de adição 4043

A liga 4043 é a solução indicada para a soldadura de ligas dissimilares da série 6xxx e 6xxx com 5xxx em aplicações que exijam maior ductilidade e menor dureza. No entanto, é uma liga de menor soldabilidade e fluidez quando comparada com a liga 4047, devido ao menor teor de silício presente na sua composição. A utilização da liga 4043 apresenta maiores exigências ao nível das preparações de juntas e estabelecimento dos parâmetros de soldadura como o gás de protecção, devido à sua maior propensão de formação de porosidades comparativamente à liga 4047 e 4047A.

Deste modo, a liga 4043 é adequada na soldadura de ligas dissimilares da série 6xxx extrudidas, tais como a liga 6061 e 6063. Também apresenta bons resultados na soldadura de ligas fundidas com ligas da série 6xxx. Contudo, a liga 4043 não deve ser utilizada na soldadura de ligas da série 5xxx com elevados teor de magnésio.

7.3 Limitações das ligas de adição da série 4xxx

As ligas de adição da série 4xxx não devem ser aplicadas na soldadura de ligas de alumínio com elevado teores de magnésio (> 3% Mg), devido ao facto de formar-se uma grande quantidade de um composto eutético de segunda fase Mg_2Si , decrescendo a ductilidade e aumentando sensibilidade à fissuração.

Outra limitação da utilização da série 4xxx como material de adição é quando se pretende proceder à anodização após a soldadura, pois a zona fundida adquire uma cor escura em comparação com os materiais base. Neste caso deve ser utilizada liga 5356 como material de adição [42;46].

7.4 Aplicação da liga de adição 5356

Os resultados obtidos nos casos estudados para a utilização da liga de adição 5356 na soldadura de ligas dissimilares da série 6xxx foram bastante limitativos para o laser de Nd:YAG de 5 kW de potência máxima pulsada utilizado. No entanto, quando isenta de defeitos, é uma liga que apresenta elevada resistência e ductilidade, e é ideal para posterior anodização.

A liga 5356 não deve ser utilizada na soldadura de ligas da série 2xxx ou outras ligas com elevado teor de cobre, pois combinações de magnésio e cobre devem ser evitadas, tais como a 6013 ou 6111, sendo frequente a fissura da soldadura [46].

7.5 Resumo conclusões

Na Tabela 7.1 é feito o resumo das conclusões obtidas com a execução deste trabalho apresentando de forma sucinta as ligas base em que se pode aplicar as diversas ligas de adição, vantagens, os defeitos típicos e como evitá-los.

| Ligas de adição | Ligas base | Vantagens | Defeitos Desvantagens | Ações correctivas |
|-----------------|--|--|--|---|
| 4047 | Ligas 6xxx dissimilares, ligas 6xxx com 5xxx: Ex: 6061, 6063, 6082, 6060, 5754, 5154. Ligas fundidas Al-Si e Al-Si-Mg Ex: LM 25 Limitações na de ligas com > 3% Mg | Elevada soldabilidade Elevada fluidez Bons resultados na soldadura manual com lasers pulsados de ND:YAG Evita fissuração a quente Elevada dureza Resistência à corrosão | Porosidades Resistência moderada Baixa ductilidade Anodização não aplicável | Aumentar protecção gasosa Preparação de juntas (polimento mecânico, acetonas, sistemas de fixação) |
| 4043 | Ligas 6xxx dissimilares, 6061, 6063 Ligas fundidas Al-Si e Al-Si-Mg Limitações na soldadura de ligas da série 5xxx com teores elevados de magnésio. Excepção 5052 | Boa soldabilidade Evita fissuração a quente Resistência à corrosão Elevada ductilidade | Porosidades Baixas durezas Anodização não aplicável | Aumentar protecção gasosa Preparação de juntas (polimento mecânico, acetonas, sistemas de fixação) Efectuar tratamentos térmicos após soldadura |
| 5356 | Ligas 6xxx dissimilares, ligas 6xxx com 5xxx com alto teor de magnésio. Limitações ligas com alto teor de cobre (série 2xxx), Ex: 6013, 6111. | Elevada resistência e ductilidade Anodização aplicável | Fissuração a quente Porosidades Baixas durezas | Aumentar potência Aumentar velocidade de soldadura Preparação de juntas (polimento mecânico, acetonas, sistemas de fixação) Protecção gasosa |

Tabela 7.1 – Resumo das conclusões obtidas para os materiais de adição utilizados

7.6 Propostas de trabalho futuro

Como trabalho futuro e complemento as análises efectuadas, seria interessante proceder a um conjunto de análises que consolidassem os resultados obtidos e complementar algumas informações. Neste sentido surgem as seguintes tarefas:

- Proceder ao estudo dos mesmos casos com sistema de adição de fio automatizados de forma a comparar os resultados e apresentar as vantagens e limitações do processo manual com o sistema automatizado. E definir um método de selecção para a utilização de um ou outro processo ao nível industrial.
- Para além dos casos estudados era importante testar um maior número de materiais base de forma aos resultados obtidos para estas ligas de adição serem mais abrangentes para a soldadura de ligas dissimilares de toda a série 6xxx e entre a série 6xxx e 5xxx.
- Era importante completar a análise efectuada com ensaios de tracção, para determinar a resistência mecânica das soldaduras para os diversos materiais de adição utilizados.
- O estudo do comportamento à fadiga das juntas soldadas para os diversos fios de adição utilizados.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Smith, W. F.; *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*, 3ª edição, McGraw Hill, Portugal (1998)
- [2] Web-Page – www.world-aluminium.org – Página na Internet The International Aluminium Institute, Actualizada © 2008 Microsoft Corporation
- [3] Mathers, G.; *The Welding of Aluminium and Its Alloys*, Woodhead Publishing, 2002
- [4] *Revista Solução, Publicação ESAB, Abril de 2005*
- [5] *Focus Aluminium, Svetsaren, ESAB, Vol. 54, 2 (2000)*
- [6] Boynard, C.; *Desenvolvimento e Optimização da Técnica de Inspeção Não Destrutiva ToFD em Soldadura de Chapas Finas de Alumínio*; Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Setembro 2004
- [7] Lopes Dias, E. M.; Miranda R. M.; *Metalurgia da Soldadura*; Instituto de Soldadura e Qualidade
- [8] Polmear, I. J.; *Light Alloys - Metallurgy of the Light Metals; Metallurgy and Materials Science*; Edward Arnold (Publishers) Ltd., 1981
- [9] Web-page – <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php> – SubsTech (Substances & Technologies); 2008/09/03
- [10] Vilaça, P.; *Fundamentos do Processo de Soldadura por Fricção Linear – Análise Experimental e Modelação Analítica*; Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Setembro 2003.
- [11] Leal, R.; *Soldadura de Ligas de Alumínio Pelos Processos de Fricção Linear e Laser de Díodos*, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2004
- [12] ASM Handbook; *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*; American Society for Metals (ASM); Vol. 2, 2004
- [13] Thomas, W. M.; Nicholas, E. D.; Needham, M. G. Templesmith, Dawes, C. J., *Friction stir butt welding, International patent application PCT/GB92/02203*, GB Patent Application 9125978.8, US Patent 5.460.317,6 December 1991
- [14] Pépe, N.; *Comportamento à corrosão e fadiga de juntas soldadas por fricção linear da liga AA5083-H111*; Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Setembro 2005
- [15] Quintino, L.; Santos, J.; *Processos de Soldadura*, Instituto de Soldadura e Qualidade 2.ª Edição 1998
- [16] Technical information; *Laser machining – Solid-state lasers*; TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG Copyright © Julho de 2007
- [17] Pedrosa, N.; *Caracterização Experimental e Modelação Numérica do Processo de Soldadura por Laser de Díodos*; Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Julho 2004
- [18] Rodrigues, J.; *Tecnologia Laser no Processamento de Materiais – Soldadura Laser e Prototipagem Rápida*; Tese de Mestrado Engenharia de Materiais, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Novembro 2007.

- [19] Santos, J.; Quintino, L.; Miranda, R.M.; *Processamento de Materiais por Feixe de Electrões Laser e Jacto de Água*, Instituto de Soldadura e Qualidade, 1991
- [20] Ready, J., Farson, D.: *LIA Handbook of Laser Materials Processing*, Laser Institute of America, Magnolia Publishing, Inc, (2001)
- [21] Quintino, L., Vilaça, P., Gonçalves, V.; *Soldadura por laser de Nd:YAG, em Liga de Alumínio*, Tecnologia & Qualidade, Instituto de Soldadura e Qualidade, Outubro/Dezembro 2003 nº 46
- [22] Kuo, T.Y.; Lin, H. C.; *Effects of pulse level of Nd-YAG laser on tensile properties and formability of laser weldments in automotive aluminum alloys*; Materials Science and Engineering A 416 (2006) 281-289
- [23] Olsen, F. O.; *Pulsed Laser Materials Processing, Nd-YAG versus CO₂ Lasers* Institute for Manufacturing Engineering, Technical University of Denmark, January 1995
- [24] Braun, R.; *Nd:YAG laser butt welding of AA6013 using silicon and magnesium containing filler powders*, German Aerospace Center, Institute of Materials Research, Köln, Germany, April 2006
- [25] ASM Handbook; *Welding Brazing and Soldering*; American Society for Metals (ASM); Vol. 6, 2004
- [26] Paleocrassas, A. G.; *Feasibility Investigation of Laser Welding Aluminum Alloy 7075-T6 through the use of a 300 W, Single-Mode, Ytterbium Fiber Optic Laser*, Degree of Master of Science, Graduate Faculty of North Carolina State University, 2005
- [27] Web-page - <http://www.devicelink.com/mddi/archive/00/01/015.html> - Manufacturing Issues in Hermetic Sealing of Medical Products; Medical Device & Diagnostic Magazine; MDDI Article Index; Janeiro 2000
- [28] Cicala, E., Duffet, G., Andrzejewski, H., Grevey, D., Ignat, S.; *Hot cracking in Al-Mg-Si alloy laser welding – operating parameters and their effects*; Materials Science and Engineering A 395 (2005) 1–9
- [29] Web-page - <http://www.carrswelding.co.uk/> - Carrs Welding technologies Ltd.; Copyright © 1999-2000.
- [30] Web-page – www.trumpf.com – Trumpf Group – Global Website Copyright © 2008 Trumpf
- [31] Metallic materials – Vickers hardness test – Part 1: *Test Method, Reference Number: ISO 6507-1:1997 (E)*, International Standard, 2ª Edição, 15 de Novembro de 1997
- [32] Web-page - www.azom.com - The A to Z of Materials and AZojomo - The “AZo Journal of Materials Online”...AZoMTM.com Pty. Ltd Copyright © 2000-2008.
- [33] The Aluminum Association, Inc.; *Aluminum Alloy - Selection and Applications*; Copyright © The Aluminum Association, Inc.; Dezembro de 1998
- [34] MatWeb Page, Material Property Database – www.matweb.com – Página na Internet mantida pela Automation Creations, Inc. 2007.
- [35] Technical information; *Laser build-up welding in tool and mold making*; TRUMPF Laser GmbH + Co. KG Copyright © Novembro de 2007

- [36] ASM Handbook; *Metallography and Microstructures*; American Society for Metals (ASM); Vol. 9, 2004
- [37] Peres, M.; *Caracterização da liga de alumínio A356 solidificada rapidamente por centrifugação e fundida em areia*; *Projeções* Vol., 23, 52-62, Janeiro/Dezembro de 2005
- [38] Rao, Prasad, K., Ramanaiah, N., Viswanathan, N.; *Partially melted zone cracking in AA6061 welds*; *Materials and Design* 29 (2008) 179–186
- [39] Haboudoua, A., Peyrea, P., Vannes, A.B., Peix, G.; *Reduction of porosity content generated during Nd:YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminium alloys*; *Materials Science and Engineering A363* (2003) 40–52
- [40] Web-page - <http://www.stehle-laserschweissen.de/en/schweisszusaeetze> - Stehle Laser-Schweisstechnik
- [41] Web-page – www.esab.com – Welding & Cutting Global Copyright © ESAB 2006
- [42] Frank G. Armao; *Welding aluminum alloys - "Isn't there one filler metal I can use for all my aluminum welding?"*; *Plant Engineering*; October 1, 2003
- [43] Frank G. Armao, Contributing Writer; *Which filler wire is best for welding 6061-T6 aluminum, 5356 or 4043?"*; *Practical Welding Today®*; October 3, 2006
- [44] Web-page – <http://sales.riotintoaluminium.com/> – Rio Tinto Aluminium, © 2008
- [45] Web-page – www.efunda.com – Engineering Fundamentals, Copyright © 1999-2008 eFunda, Inc.
- [46] Welding Handbook; *Welding Handbook – Metals and Their Weldability*; American Welding Society (AWS); 17ª Edição; Volume 4, 1982
- [47] LECO Delivering the Right Results; *Metallography Principles and Procedures*; LECO is a registered trademark of LECO Corporation
- [48] Web-page - http://www.angstrom.us/equipment_hitachis.html - Angstrom Scientific Inc.; © 2005 Angstrom Scientific Inc.

A. ANEXOS

A.1 Procedimento para a realização da análise metalográfica

O procedimento de ensaio seguido para a realização dos ensaios de análise metalográfica das soldaduras obtidas foi o seguinte [15;47]:

1. Cortar e maquinar as amostras com dimensões adequadas aos moldes a utilizar
2. Limpar as arestas das amostras, para remoção de rebarbas
3. Identificar cada uma das amostras
4. Proceder à montagem das amostras:

Montagem a quente (temperatura de 180° C):

Resina acrílica transparente montada a quente e com compressão durante 7 minutos, arrefecimento por circuito de água durante 3 minutos.

Montagem a frio (temperatura ambiente)

Resina epoxídica + endurecedor (5:1)

Tempo de cura (polimerização): 12 horas

5. Realizar o desbaste das amostras utilizando lixas de granulometria 240, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2400 mesh.
6. Polimento grosseiro utilizando lixas de granulometria de 4000 mesh.
7. Proceder ao polimento fino das amostras, utilizando uma pasta de 3 micrómetros de granulometria, num pano “RAM” lubrificado com uma mistura etanol:água (1:1)
8. Efectuar o polimento ultra fino, utilizando suspensão de alumina (referência SPM), num pano “SUPRA” lubrificado com uma mistura de etanol: água (1:1)
9. Proceder à contrastação das amostras com soluções previamente preparadas, cuja solução se apresenta na Tabela A.1, de forma a distinguir o material base da ZAC e zona fundida
10. Observação das amostras ao microscópio com diferentes ampliações.
11. Realização de fotografias, com diferentes ampliações dos aspectos relevantes presentes em cada amostra.

| Designação | Composição | Procedimento de aplicação |
|------------|---|---|
| Keller | 190 ml H ₂ O 5 ml HNO ₃ 3 ml HCL 2 ml HF | Contrastar por ligeira imersão ou por passagem. Lavagem com água fria |

Tabela A.1 – Solução de contrastação aplicada nas ligas de alumínio [36]

A.2 Especificações microscópio de varrimento – SEM

O microscópio Hitachi S-2400 SEM é desenvolvido para microscopia electrónica de varrimento de alta resolução e elementares raios-X micro análises. É constituído por lentes cónicas que permitem alta resolução mesmo em amostras inclinadas [48].



Figura A.1 – Microscópio de varrimento - SEM Hitachi S-2400 [48]

Especificações equipamento:

- Resolução: 4,0 nm
- Ampliação: 20x (WD=35mm) – 300000x
- Acelerador de tensão: 0.3-3 (passos de 0.1 kV), 4-8 (passos de 1 kV), 10, 12, 15, 18, 20, 22, 25 kV.
- Movimento electrónico FOV: ± 20 micrones (WD = 30 mm)
- Movimento segundo X: 0 – 80 mm
- Movimento segundo Y: 0 – 40 mm
- Movimento segundo T: -20, -90 graus
- Movimento segundo R: 360 graus contínuos
- Movimento segundo Z: 5 - 35 mm
- Tamanho máximo amostra: 150 mm