

U. PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

M 2020

REPARAÇÃO DE VEIOS DE TRANSMISSÃO DE AEROGERADORES UTILIZANDO TÉCNICAS DE SOLDADURA

FRANCISCO MONTEIRO COSTA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA À
FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

MANUEL FERNANDO GONÇALVES VIEIRA

ORIENTADOR FEUP
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

ANDRÉ ALVES FERREIRA

COORIENTADOR FEUP
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

| | | | |
|------------------|---|--|-----------|
| CANDIDATO | Francisco Monteiro Costa | CÓDIGO | 201505680 |
| TÍTULO | Reparação de veios de transmissão de aerogeradores utilizando técnicas de soldadura | | |
| DATA | 21 de outubro de 2020 | | |
| LOCAL | Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto | | |
| JÚRI | Presidente | Prof. Doutor Luís Filipe Malheiros F. Ferreira | DEMM/FEUP |
| | Arguente | Prof. Doutor Francisco José Gomes da Silva | DEM/ISEP |
| | Supervisor | Prof. Doutor Manuel F.G. Vieira | DEMM/FEUP |

Esta dissertação está parcialmente integrada no projeto GEAR3D - Reconstrução 3D de dentes de engrenagens de grande dimensão via deposição direta por laser, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (projeto POCI-01-0247-FEDER-039848), projeto apoiado pelo Programa Operacional Regional do Norte de Portugal (NORTE 2020).

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Manuel Fernando Gonçalves Vieira e ao Professor André Alves Ferreira pela disponibilidade e esforço em encontrar um tema de dissertação que tão bem se enquadrasse com os meus desejos e pela orientação dedicada. Um especial agradecimento por toda a compreensão de ambos durante um dos períodos mais negros da minha vida.

À empresa SERMEC GROUP por me conceder uma oportunidade de desenvolver um tema em ambiente industrial utilizando as suas instalações e recursos. Ao Engenheiro João Cruz pela confiança e ajuda para permitir que eu adquirisse ferramentas para o meu futuro profissional, tendo sempre tido paciência para lidar com todos os inconvenientes destes tempos tão inconventionais.

Ao Sr. Ramiro pelo grande auxílio com os ensaios de fadiga, pela boa disposição e vontade de ajudar durante não só o desenvolvimento da dissertação, mas durante todo o meu percurso universitário.

Aos meus pais e avós que viveram tempos tão difíceis, mas que sempre mantiveram e mantêm o meu bem acima de tudo, mesmo que isso, por vezes, se traduza em momentos que me fazem pisar o território da insanidade.

Ao meu avô Salomão um carinho especial pois não só pisa o território da insanidade, mas faz questão de fazer o picnic de família no jardim central.

Ao meu irmão Diogo e à minha irmã Sílvia que correm o risco de serem as pessoas mais importantes da minha vida e têm a audácia de tentar produzir uma terceira.

Aos meus compinchas que tão bem sabem mal me tratar e por isso mesmo não passava sem nenhum deles: Nuno Oliveira, Filipe Matos, José Gonçalves, Eduardo da Silva e Miguel Ferreira.

Por fim, à minha avó Maria José Teixeira de Sousa...

Resumo

A produção de energia renovável tem, na sociedade atual, vindo a registar um crescimento acelerado. Uma das fontes renováveis de energia com maior atração nesta indústria é a energia eólica. Ao seu crescimento está associado um aumento do número de aerogeradores existentes.

Os aerogeradores possuem componentes metálicos de grande dimensão que exigem processos de fabrico de alta precisão, traduzindo-se em elevados custos de produção. Ganha assim atratividade a reparação destes componentes devido à grande redução de custos associada.

Nesta dissertação, é comparada a influência da técnica de soldadura *temper bead* com a utilização de controlo térmico pré e durante o processo (pré-aquecimento e temperatura de interpasse) em reparações por soldadura. O foco é direcionado para veios de transmissão na liga 34CrNiMo6 reparados na empresa SERMEC GROUP. Estas técnicas têm como objetivo eliminar a necessidade de realizar tratamentos térmicos antes do processo final de *laser cladding*. Estes tratamentos térmicos são dispendiosos e reduzem o benefício da realização de reparações.

Para analisar as consequências da realização das duas diferentes técnicas, foram fabricados três provetes por soldadura: provete de controlo, provete com *temper bead* e provete com pré-aquecimento.

Foram utilizadas técnicas de ensaios não destrutivos para verificar a integridade das juntas produzidas. Após este controlo de qualidade foi feito o estudo das juntas recorrendo a microscopia ótica, e a ensaios de microdureza e fadiga. Concluiu-se que a influência do *temper bead* nas propriedades mecânicas da ZTA é diminuta quando comparada com a influência do pré-aquecimento.

Palavras-Chave

Soldadura; Reparação; Sistemas eólicos; Veios de transmissão.

Abstract

The production of renewable energy has, in today's society, been registering an accelerated growth. One of the most attractive renewable energy sources in this industry is wind energy. Its growth is associated with an increase in the number of existing wind turbines.

The wind turbines have large metal components that require high precision manufacturing processes, resulting in high production costs. Thus, component repair gains attractiveness due to the great cost reduction associated with it.

In this dissertation, the influence of the temper bead welding technique is compared with the use of thermal control before and during the process (preheating and interpass temperature) in welding repairs. The focus is directed to 34CrNiMo6 alloy transmission shafts repaired at SERMEC GROUP. These techniques aim to eliminate the need for heat treatments before the final laser cladding process maximizing the benefit of carrying out repairs.

The consequences of carrying out the two different techniques were analysed testing three specimens manufactured by welding: one for control, one with temper bead, and one with preheating.

Non-destructive testing techniques were used to verify the integrity of the produced joints. After this quality control, the joints were studied using optical microscopy, microhardness tests and fatigue tests. It was concluded that the influence of temper bead is small when compared to the influence of preheating.

Keywords

Welding; Repair; Wind power systems; Main-shafts.

Índice

| | |
|---|-----|
| Agradecimentos | I |
| Resumo | II |
| Palavras-Chave | II |
| Abstract | III |
| Keywords | III |
| Índice de Figuras | VI |
| I. Introdução | 1 |
| II. Revisão da Literatura | 2 |
| 1. Sistemas Eólicos | 2 |
| 1.1. Funcionamento | 3 |
| 1.2. Componentes | 3 |
| 1.3. Manutenção | 5 |
| 2. Tecnologias de Soldadura | 6 |
| 3. Processos de Soldadura..... | 7 |
| 3.1. <i>Gas Metal Arc Welding (GMAW)</i> | 9 |
| 3.2. <i>Shielded Metal Arc Welding (SMAW)</i> | 10 |
| 3.3. <i>Tungsten Inert Gas (TIG)</i> | 12 |
| 4. Técnica de soldadura - <i>Temper Bead</i> | 13 |
| 5. Procedimentos de Soldadura | 18 |
| 5.1. Criação de Especificações de Procedimento de Soldadura | 20 |
| III. Materiais e Métodos | 22 |
| 1. Metal de Base - Aço 34CrNiMo6 | 22 |
| 2. Materiais de Adição | 26 |
| 2.1. UTP 6824 MoLC | 26 |
| 2.2. AWS E 312-16 | 27 |
| 3. Métodos e técnicas utilizados | 28 |

| | |
|---|----|
| 3.1. Preparação dos provetes..... | 28 |
| 3.2. Soldadura dos Provetes | 29 |
| 3.3. Ensaios não destrutivos | 31 |
| 3.4. Ensaio de Fadiga | 33 |
| 3.5. Preparação metalográfica e Microscopia | 35 |
| 3.6. Perfis de dureza..... | 36 |
| IV. Resultados/Discussão..... | 38 |
| 1. Ensaios não destrutivos..... | 38 |
| 1.1. Inspeção visual | 38 |
| 1.2. Líquidos penetrantes | 39 |
| 1.3. Partículas magnéticas | 40 |
| 2. Microdurezas..... | 41 |
| 3. Microscopia..... | 44 |
| 4. Fadiga..... | 50 |
| V. Conclusões | 53 |
| VI. Perspetivas de trabalhos futuros | 54 |
| VII. Referências Bibliográficas | 55 |
| VIII. Anexos | 61 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Capacidade global instalada de energia eólica, GW, 1990-2015 [4] | 3 |
| Figura 2 - Componentes de um aerogerador[5]..... | 4 |
| Figura 3 - Processo de soldadura GMAW [23] | 9 |
| Figura 4 - Diagrama do processo SER [28] | 11 |
| Figura 5 - Processo de soldadura por elétrodo revestido [27] | 11 |
| Figura 6 - Diagrama do processo TIG [33] | 13 |
| Figura 7 - Processo de soldadura TIG [27]..... | 13 |
| Figura 8 - Regiões de uma junta soldada em relação ao diagrama de fase Fe-C [35] | 14 |
| Figura 9 - Corte do diagrama de Fases Fe-C [41]..... | 23 |
| Figura 10 - Diagrama TAC para um aço hipoeutectóide [58] | 24 |
| Figura 11 - Provete de teste para soldadura topo a topo em chapa com penetração completa [50]..... | 28 |
| Figura 12 - Realização do pré-aquecimento de um provete | 30 |
| Figura 13 - Remoção de material antes do processo de <i>temper bead</i> | 30 |
| Figura 14 - Elérodos utilizados no <i>temper bead</i> | 31 |
| Figura 15 - Líquidos penetrante e revelador utilizados no ensaio de líquidos penetrantes..... | 32 |
| Figura 16 - Aplicação do líquido penetrante | 32 |
| Figura 17 - Exemplo de um defeito presente num dos provetes | 32 |
| Figura 18 - Exemplo do ensaio de partículas magnéticas | 33 |

| | |
|--|----|
| Figura 19 - Início da preparação dos provetes de fadiga | 34 |
| Figura 20 - Provede em ampulheta de carregamento em ponto único | 34 |
| Figura 21 - Amostragem dirigida do provede de controlo | 35 |
| Figura 22 - Fissuração presente na amostra de controlo | 36 |
| Figura 23 - Morfologia dos perfis de dureza realizados [69] | 37 |
| Figura 24 - Esquematização de local de cada perfil de dureza | 37 |
| Figura 25 - Provedes soldados, da direita para a esquerda: com pré-aquecimento, controlo, com <i>temper bead</i> | 38 |
| Figura 26 - Fissura de ~5 cm no provede de controlo | 38 |
| Figura 27 - Defeitos presentes em zonas de início de arco no provede com pré-aquecimento | 39 |
| Figura 28 - Defeitos presentes em zonas de início de arco no provede com <i>temper bead</i> | 39 |
| Figura 29 - Resultados do ensaio de líquidos penetrantes do provede de controlo.. | 39 |
| Figura 30 - Junta soldada do lado superior do provede com <i>temperbead</i> | 40 |
| Figura 31 - Exemplo do ensaio de partículas magnéticas do provede com pré-aquecimento | 40 |
| Figura 32 - Exemplo do ensaio de partículas magnéticas do provede com <i>temper bead</i> | 41 |
| Figura 33 - Representação gráfica dos valores apresentados na Tabela 7 - Médias de valores de microdureza por indentação | 42 |
| Figura 34 - Representação gráfica dos perfis de dureza do provede com <i>temper bead</i> | 43 |

| | |
|--|----|
| Figura 35 - Microestrutura do metal de base dos provetes de controlo (esquerda) e com <i>temper bead</i> (direita) | 44 |
| Figura 36 - Linha de fusão com ZTA martensítica do provete de controlo | 45 |
| Figura 37 - ZTA do provete com pré-aquecimento | 45 |
| Figura 38 - ZTA do provete com <i>temper bead</i> | 46 |
| Figura 39 - Zona de grão grosseiro da ZTA do provete com pré-aquecimento | 47 |
| Figura 40 - Região martensítica no provete com <i>temper bead</i> | 47 |
| Figura 41 - ZTA do provete com <i>temper bead</i> de grão ferrítico | 48 |
| Figura 42 - Microestrutura do UTP 6824 MoLC nos provetes com pré-aquecimento (esquerda) e com <i>temper bead</i> (direita) | 49 |
| Figura 43 - Estrutura dendrítica do AWS E 312-16 | 49 |
| Figura 44 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de fadiga | 51 |
| Figura 45 - Faces de fratura por fadiga dos provetes com pré-aquecimento (esquerda) e com <i>temper bead</i> (direita) | 52 |

I. Introdução

Atualmente em termos de produção de energia vive-se um aumento da procura de sistemas de produção de energia renovável e energia verde. Esta nova procura veio trazer um grande desenvolvimento ao setor industrial de produção de energia eólica e também às indústrias com as quais esta trata.

O desenvolvimento destas tecnologias vem alinhado com um aumento do rigor e qualidade no que toca à produção de componentes para aerogeradores. Estes componentes, pela sua exigência de fabrico e dimensões, são custosos, sendo desejoso que o seu tempo de vida em funcionamento seja o mais estendido possível.

Uma das formas de prolongar o tempo de vida de uma peça é, quando esta apresenta algum defeito, recorrer à sua reparação. Este processo é apresentado como uma alternativa à compra de uma nova peça devido à significativa redução de custos a que está associado. Por exemplo, podendo ser realizada uma reparação que estenda a utilização da peça em 20% por 10% do preço de compra esta opção torna-se a mais atraente.

Em termos de reparação de elementos metálicos, a soldadura é um processo comumente utilizado devido à sua versatilidade e qualidade de resultados. No entanto, em determinados casos é necessária a adaptação dos processos tradicionais para que estes possam ser aplicados a peças de ligas/dimensões/geometrias mais exigentes.

Nesta dissertação de mestrado, realizada na empresa SERMEC GROUP, é desenvolvido um estudo da técnica de soldadura de *temper bead* quando aplicada a veios de transmissão de aerogeradores da liga 34CrNiMo6. Tem-se por objetivo estudar a possibilidade de eliminar a necessidade de realizar tratamentos térmicos pós soldadura de natureza dispendiosa.

II. Revisão da Literatura

1. Sistemas Eólicos

A utilização de sistemas eólicos para a recolha ou produção de energia é algo que tem vindo a ser realizado desde uma fase inicial do desenvolvimento tecnológico da civilização humana. Apesar de ser possível observar a utilização da energia eólica para as mais variadas aplicações, como fazer voar papagaios, propulsionar veículos, trituração de grão e bombeamento de fluidos, a sua utilização para produção de energia elétrica é muito recente e data de aproximadamente há 120 a 140 anos [1].

Na sua fase inicial do desenvolvimento, os sistemas de aproveitamento de energia eólica, devido ao extenso e liberal uso de combustíveis fósseis, não eram uma opção competitiva no que toca a cobrir as necessidades do consumidor. No entanto, em 1973 e em 1979, viveram-se duas crises petrolíferas severas. A falta de disponibilidade e a volatilidade de preços dos combustíveis fósseis durante estes períodos evidenciaram a necessidade da existência de fontes energéticas alternativas. Assim sendo, o desenvolvimento de tecnologias de produção de energia que não encontrassem a sua base em combustíveis fósseis encontrou uma nova força na sociedade. A energia eólica demonstrou ser facilmente explorada e rapidamente se destacou e tornou-se a fonte de energia alternativa mais desenvolvida [2].

No início do século XXI o aumento da preocupação com a produção de energia limpa foi e está a ser motivado pelo efeito do aquecimento global, pelo impacto ambiental e pela sustentabilidade de recursos naturais. Devido a estes fatores tem-se vindo a observar um enorme crescimento deste setor industrial, verificável pela capacidade de produção de energia eólica (em GW) ter vindo a crescer exponencialmente a nível mundial (Figura 1). Devido a procura de mercado acrescidas relacionadas com o desenvolvimento de aerogeradores, esta temática ganhou importância económica em diversos setores industriais, havendo como consequência o desenvolvimento de investigação aplicada nesta área. [2-5].

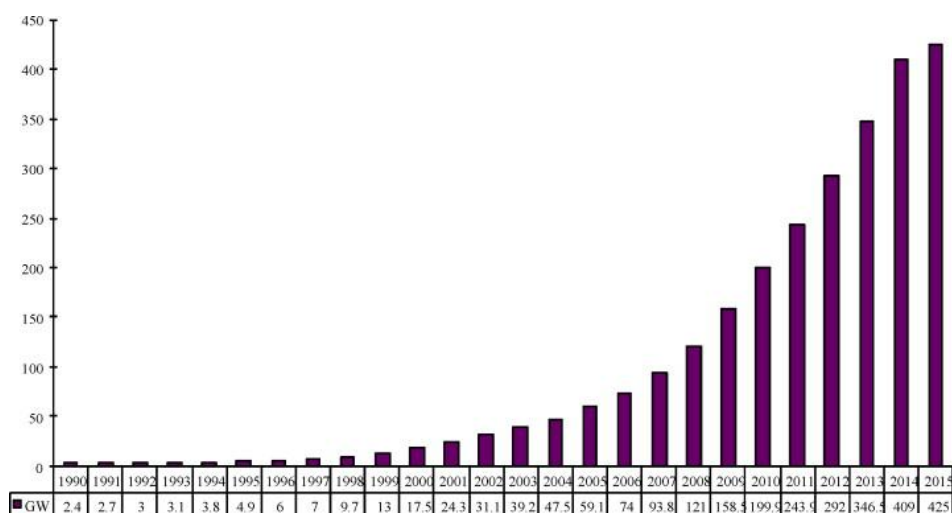


Figura 1 - Capacidade global instalada de energia eólica, GW, 1990-2015 [4]

1.1. Funcionamento

A produção de energia elétrica recorrendo a esta tecnologia, como a maioria dos processos utilizados globalmente, funciona com recurso a turbinas [6].

A rotação das pás da turbina é gerada pelo vento, possibilitando a tradução do movimento irregular do vento numa rotação de um eixo que, por sua vez, faz uso de um gerador para transformar a energia cinética em energia elétrica. Para que tal aconteça as turbinas utilizam, de forma geral, dois tipos de gerador diferentes: geradores de íman permanente e geradores de indução. Estes geradores funcionam sobre um princípio base da física: um campo magnético em rotação induz uma corrente elétrica. Para garantir a alta eficiência no trabalho e desempenho destas turbinas têm de ser tidos em conta vários parâmetros que afetam a produção de energia, como a direção do vento, a sua intensidade e o modo como este interage com as pás da turbina [6, 7].

1.2. Componentes

A composição de um aerogerador sofre poucas variações entre fabricantes sendo observável um conjunto de componentes que lhes é comum (Figura 2). Estes são: fundação, sistema elétrico, torre, nacela, rotor e pás, gerador, caixa de velocidades (multiplicador), veios de transmissão e componentes eletrónicos de monitorização e controlo [6].

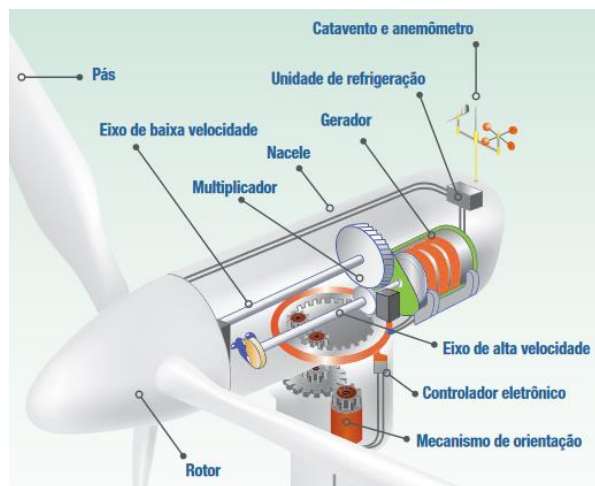


Figura 2 - Componentes de um aerogerador[5]

Um gerador eólico é, em si, um conjunto de sistemas encarregues de tarefas específicas que, em conjunto, visam obter o máximo rendimento na produção energética, garantir a sanidade estrutural do aerogerador e permitir a recolha de informações pertinentes ao estudo e desenvolvimento dos mesmos. Todos estes subsistemas são monitorizados e controlados eletronicamente de forma automática ou, caso assim seja necessário, com a intervenção remota por parte de um operador [8].

O sistema responsável pela orientação da nacela é denominado por *yaw*. Utiliza um conjunto de engrenagens e de motores no seu funcionamento, sendo que a reorientação é feita com o intuito de encontrar a melhor posição para a “captura” do vento. Funcionando de forma semelhante, o sistema de rotação das pás permite o controlo do efeito da passagem de ar nas pás [8].

O gerador e o rotor são os responsáveis pela transformação da energia cinética em energia elétrica. Como principal responsável pela divisão das turbinas em diferentes classes tem-se o tipo de gerador que suportam. Diretamente conectado ao gerador está o sistema de distribuição de energia para a rede [7, 9].

O denominado *drive train* é o sistema que é composto por todas as partes da turbina que estão ligadas a veios de transmissão. É composto pelos seguintes componentes: a caixa de velocidades, o veio central, o rolamento principal e o

veio do gerador [10].

Por último, o sistema de supervisão e de aquisição de dados (SCADA) é o responsável pela recolha de informação dos postos de vigia que estão presentes por toda a estrutura. Utilizando o SCADA um operador consegue averiguar o estado em que se encontram os componentes físicos do sistema e as variáveis que o afeta. Devido à dimensão e às, frequentemente, localizações de difícil acesso em que estas turbinas se encontram, o SCADA desempenha um papel fundamental no que toca à supervisão da estrutura, permitindo que as falhas sejam detetadas antes de se tornarem críticas, criando espaço para a manutenção e reparação atempada e até preventiva [11, 12].

1.3. Manutenção

Como referido anteriormente, o SCADA desempenha um papel de extrema importância no que toca a identificar situações em que a manutenção é necessária. Ao utilizar a monitorização permanente dos valores de performance e de estado estrutural é criada um sistema de acrescida segurança estrutural. Clarificando, a segurança da estrutura advém da rápida identificação de qualquer falha e a sua resolução, impedindo que esta evolua. É uma grande melhoria face a inspeções periódicas, uma vez que estas últimas permitem que os sistemas continuem a trabalhar sob o risco de ocorrência de danos devidos a falhas presentes.

Devido às características das turbinas eólicas, a reparação de falhas estruturais tem de ser planeada corretamente pois, comumente, um aerogerador não é de fácil acesso. É necessário avaliar a relação custo/benefício do defeito a reparar, pois qualquer operação de desmantelamento total ou parcial exige um investimento temporal, monetário e de recursos elevado [11].

Existem, portanto, duas opções de reparação: *in situ* ou numa localização apropriada. As reparações no local podem ser realizadas sem desmantelamento algum ou com desmantelamento parcial das peças do aerogerador. A reparação das pás da turbina pode ser realizada das duas formas por um operador, dependendo da relação tempo/preço que o cliente que paga pelo serviço está

disposto a despende. Tratando-se de uma reparação sem desmantelamento o operador, treinado em trabalhos em altitude, desloca-se ao topo da nacela e, com auxílio de cordas e equipamento de segurança, acede à pá e realiza a reparação. Com desmantelamento parcial a pá é baixada e o trabalho é realizado no solo.

As reparações em locais apropriados, normalmente, envolvem o desmantelamento da estrutura da nacela e, quando o dano se encontra na torre ou na fundação, o desmantelamento total e o transporte de todos os componentes para locais de avaliação e reparação especializados. Quando uma reparação é efetuada, é também tido em conta o material que vai ter de ser reparado visando o ajuste do método ao defeito e às suas características. Encontra-se, aqui, o foco do trabalho quando se analisa a reparação dos elementos metálicos que se encontram em grande parte da estrutura eólica.

Um dos métodos utilizados na reparação dos componentes metálicos é a soldadura. A soldadura pode ser realizada no local, quando as reparações são de carácter menor e não é exigida a realização de tratamentos térmicos. Quando são num local apropriado, como por exemplo, em empresas especializadas, como a SERMEC GROUP, trata-se de reparações exigentes e, muitas vezes, provenientes de falhas críticas no sistema, obrigando à utilização extensa de processos de soldadura e, normalmente, à realização de tratamentos térmicos posteriores.

2. Tecnologias de Soldadura

A soldadura é um processo pelo que visa a união, a nível atómico ou molecular, de dois componentes compostos por materiais do mesmo tipo (metálicos, poliméricos ou cerâmicos) utilizando a ação da temperatura e, dependendo do caso, da pressão para atingir a combinação dos mesmos. Tendo em conta este tipo de ligação física e química, pode-se inferir que ao utilizar a soldadura é formada uma união entre componentes da qual resulta uma ligação metalúrgica. Este tipo de ligações deve ser de resistência igual ou superior à do

material base. Previamente à sua realização, é necessário selecionar entre os diferentes processos de soldadura o mais adequado, assim como todas as variáveis associadas.

Uma importante distinção entre processos de soldadura é a fonte de energia que pode ser utilizada para formar a união dos materiais: química (soldadura a gás ou aluminotérmica), elétrica (soldadura por arco, por resistência ou por feixe laser ou de eletrões) ou mecânica (soldadura por fricção) [13, 14].

Resumidamente, é um processo de produção de juntas de excelência, especialmente para materiais metálicos. Isto deve-se a produzir juntas contínuas e estanques com propriedades mecânicas que podem ser adequadas à aplicação através da escolha do material de adição. Com planeamento adequado, é possível a produção de juntas reprodutíveis por operadores qualificados. Um bom planeamento reduz ou elimina a introdução de defeitos e tensões nas peças produzidas, algo que normalmente é aduzido como uma grande desvantagem deste processo [13, 15].

3. Processos de Soldadura

Dentro do processo de união de materiais conhecido como soldadura, distinguem-se uma miríade de métodos que apresentam variações em alguns aspetos chave. Podem verificar-se diferenças na fonte de energia, no tipo de eletrodo utilizado, na alimentação de material de adição e na proteção dos materiais a serem soldados. Os métodos mencionados no decorrer desta dissertação utilizam fontes de energia elétrica, tratando-se de métodos de soldadura por arco elétrico.

Um arco elétrico é considerado um gás ionizado, ou seja, uma mistura gasosa de iões e eletrões que é condutora de corrente elétrica. A estabilidade deste arco é afetada por vários fatores que são alterados com o processo utilizado, exigindo adaptações, como por exemplo: a geometria do eletrodo e da peça, a existência de revestimentos, a utilização de gases de proteção e a temperatura.

O arco é também afetado pelo fenômeno do sopro magnético. Este fenômeno promove o desvio do arco elétrico devido a magnetismos residuais ou ao aparecimento de campos magnéticos provenientes do escoamento de corrente durante o processo, sendo que estes são influenciados pela proximidade do arco a extremidades da peça [14, 16].

O método de iniciação do arco elétrico é chamado de escorvamento. Existem três tipos de escorvamento; no entanto, apenas um método é utilizado por todos os processos de soldadura por arco elétrico: escorvamento por curto circuito. Este é o método de início de arco utilizado no processo de soldadura por arco elétrico e funciona raspando o eletrodo na peça a soldar. Caso mal executado pode dar-se a “colagem” do eletrodo à peça e a sua possível contaminação [17].

A função da fonte de energia é criar as condições desejadas para que haja a fusão dos materiais de base e de adição, sem que devido a falta, excesso ou inconsistência de corrente, haja a introdução de defeitos na junta. Para tal é necessário que a fonte execute a conversão da voltagem que é fornecida pela rede elétrica (normalmente entre 120 V e 480 V) para uma que seja adequada à soldadura, entre 20 V e 80 V. Como a maior parte dos métodos que utilizam arco elétrico são de baixa voltagem (alta corrente), as fontes elétricas, dependendo da gama, conseguem manter as voltagens antes referidas com valores de output de corrente entre 30 A e 1500 A [18, 19].

Dependendo da necessidade presente face à junta que se vai soldar, pode ser requerido que o processo seja realizado com corrente contínua (DC, subdividida em DC+ e DC-) ou corrente alternada (AC). Seja uma fonte AC ou DC, também se podem definir as fontes como de corrente constante ou voltagem constante. Os ajustes realizados pela fonte para manter um dos fatores constantes são calculados utilizando uma curva de V-A. Esta define o quanto se deve ajustar a voltagem/amperagem para manter o outro parâmetro constante, mesmo quando há variações de distância do eletrodo à peça ou de velocidade de alimentação de material [19].

Uma das características extremamente importantes aquando da escolha de uma

fonte elétrica é o fator de marcha. O fator de marcha dita o tempo que é permitido a uma fonte de energia trabalhar sob determinadas condições de corrente incessantemente. É apresentado sob a forma de uma percentagem que representa a fração de tempo que se pode utilizar a fonte dentro de 10 minutos. Se uma fonte apresentar um fator de marcha de 60% para 100 A, esta fonte só pode trabalhar a 100 A durante 6 minutos e deve parar de trabalhar os restantes 4 minutos, perfazendo os 10 minutos referidos. É um parâmetro que deve ser respeitado sob o risco de danos ao equipamento ou falhas de performance [16, 18, 20].

3.1. *Gas Metal Arc Welding (GMAW)*

Gas metal arc welding ou GMAW, é uma designação atribuída a um dos processos de soldadura por arco elétrico mais utilizados a nível mundial. Segundo a norma NP EN ISO 4063:2015 [21] trata-se do processo 13. Apresenta como vantagens uma elevada taxa de produção, a possibilidade de ser utilizado em todas as posições normalizadas e a facilidade de aprendizagem do processo [22]. Caracteriza-se pela utilização de um eletrodo em forma de fio, o qual funciona simultaneamente como metal de adição, sendo este alimentado constantemente (*feed*). Em conjunto com a alimentação de material é feita a ejeção do gás protetor. Assim sendo, este processo utiliza como equipamento de trabalho característico uma fonte elétrica equipada com um motor de alimentação para a bobina com o metal de adição [22-24].

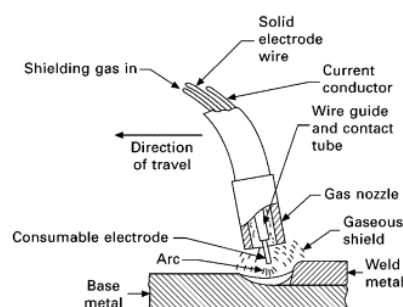


Figura 3 - Processo de soldadura GMAW [23]

A composição gasosa utilizada cria uma divisão em dois processos, fazendo referência a como estes gases desempenham o seu papel: *Metal Inert Gas* (MIG,

processo 131) e Metal Active Gas (MAG, processo 135) [21]. A estes dois processos atribui-se a mais alta taxa de produção dos processos soldadura manual [22-25].

A composição da mistura gasosa utilizada implica uma diferente resposta por parte dos materiais soldados e do equipamento utilizado. Por parte do equipamento é possível influenciar a intensidade de corrente, a estabilidade do arco e o método de transferência de material. Por parte do material influencia-se a formação de óxidos, a profundidade de penetração e a incorporação de gases. Importante afirmar que estas características também são afetadas por outros fatores simultaneamente [22-25].

Na realização do processo MIG utilizam-se misturas de gases inertes para ser realizada a proteção do cordão de soldadura e do banho contra a formação de óxidos. É geralmente utilizado para materiais não ferrosos e reativos. Os gases utilizados são comumente argônio, hélio ou uma mistura de ambos [22-25].

O processo MAG apresenta misturas gasosas menos custosas. É aplicável a materiais ferrosos e utiliza misturas gasosas de dióxido de carbono, oxigénio e argônio, havendo, também, a possibilidade de se utilizar hélio [22-25].

3.2. *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*

O processo conhecido por *shielded metal arc welding (SMAW)*, *stick-eletrode welding* ou soldadura por eletrodo revestido (SER, processo 111 [26]) é outro método de soldadura que é extensivamente utilizado em quase todos os ambientes de trabalho de soldadura com materiais metálicos. Apresenta a capacidade de soldar praticamente todos os tipos de materiais ferrosos e alguma ligas não ferrosas, como ligas de níquel ou, até, ligas de cobre e de titânio [24, 27]. Caracteriza-se pela utilização de eletrodos revestidos que funcionam em simultâneo como material de adição. O revestimento utilizado é responsável pela formação de uma escória removível e de gases que vão realizar a proteção do banho metálico. Apresenta-se simples em termos de funcionamento, como se pode ver pela Figura 4. Apenas é necessária uma fonte de corrente, uma ligação entre a fonte e peça e um alicate para segurar no

elétrodo [16, 27-29].

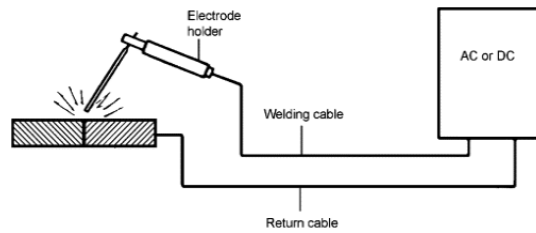


Figura 4 - Diagrama do processo SER [28]

Da geometria do eletrodo e da sua simplicidade são retiradas grandes vantagens no que toca a aplicação em ambientes fora de oficina ou fábrica. As fontes de corrente são relativamente portáteis e possibilitam o seu transporte para ambientes de mais difícil acesso ou dimensões reduzidas [28].

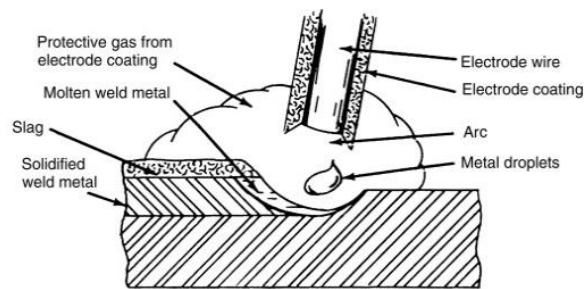


Figura 5 - Processo de soldadura por eletrodo revestido [27]

Encontram-se vários tipos de revestimentos que são utilizados consoante os materiais base, a soldadura a realizar e o tipo de papel que este vai exercer: proteção contra ação da atmosfera, estabilização do arco, desoxidação, adição de elementos de liga ao metal de adição ou aumento da penetração de soldadura [16, 28].

Todas estas diferentes propriedades estão dependentes da composição química do revestimento do eletrodo, havendo três distinções principais: eletrodos ácidos, eletrodos rútilicos e eletrodos básicos. Apresentam-se, também, como importantes os eletrodos de revestimento celulósico [30].

Os eletrodos ácidos apresentam na sua composição óxidos de manganês e ferro,

encontrando como aplicação principal a soldadura de aços não ligados de baixo carbono. A solidificação da escória é lenta e forma um revestimento poroso e facilmente removível [28].

Os elétrodos rútilicos incorporam na sua composição grandes quantidades do mineral rutilo (TiO_2), teores que podem ser superiores a 50%. São elétrodos que facilitam o escorvamento do arco e produzem gotas de solda muito consistentes tornando o processo mais fácil e com melhor junção entre os metais de base. Uma grande desvantagem é potenciarem a incorporação de hidrogénio no cordão de soldadura abrindo portas para a instalação de fissuração a frio [31].

Os elétrodos básicos contêm na sua composição química fluoreto de cálcio e carbonato de cálcio. Os elétrodos básicos de baixo hidrogénio exibem um forte efeito de remoção de oxigénio e enxofre dos metais base. O ponto de fusão baixo da escória dificulta o aparecimento de inclusões no cordão mesmo em passes sucessivos em que não haja remoção total da escória. Estes elétrodos inibem fortemente a incorporação de hidrogénio, um fator extremamente positivo [31].

Por último, os elétrodos celulósicos contêm uma grande proporção de elementos ricos em celulose. Estes compostos potenciam uma excelente penetração com a adição de hidrogénio ao arco. No entanto, devido a esta utilização do hidrogénio, estes elétrodos são os que criam as condições mais propícias à fissuração a frio [28, 32].

3.3. *Tungsten Inert Gas (TIG)*

Por último, o processo *gas tungsten arc welding* (GTAW) ou *tungsten inert gas* (TIG, processo 141 [26]) é o processo de excelência na soldadura manual quando se trata de versatilidade de materiais, de soldadura de secções finas e da realização de passes de raiz. Este processo caracteriza-se pela utilização de um eléctrodo não consumível de tungsténio (puro ou, mais comumente, com pequenas adições de outros metais) numa tocha que expelle uma cortina de gás protetor. Apresenta a opção de ser realizado em modo autógeno, sem a

utilização de metal de adição, algo que poucos processos oferecem. Como todos os processos de arco elétrico utiliza uma fonte de corrente, esta pode fornecer corrente AC ou DC [16, 33, 34].

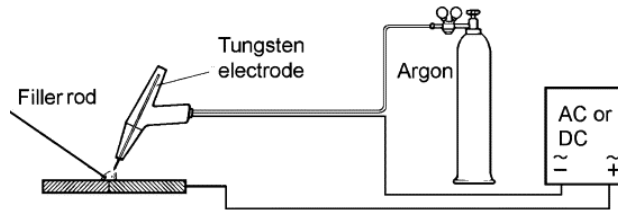


Figura 6 - Diagrama do processo TIG [33]

A cortina de gás protetor tem como função a proteção do banho metálico e do eletrodo e a estabilização do arco elétrico. Este arco pode ser afetado alterando a composição do gás utilizado [16, 33, 34].

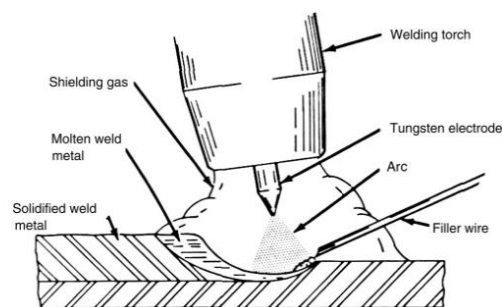


Figura 7 - Processo de soldadura TIG [27]

O ajuste da geometria do eletrodo afeta a abertura do arco elétrico, e por consequência, a profundidade de penetração. Quando é utilizada uma corrente DC utilizam-se eletrodos cônicos onde o ângulo do vértice pode ser maior ou menor, aumentando ou diminuindo a profundidade de penetração respectivamente. Em correntes AC utilizam-se geometrias semiesféricas [16, 33, 34].

4. Técnica de soldadura - *Temper Bead*

Comum a todos os processos de soldadura utilizados está a necessidade de adaptar o procedimento que vai ser realizado às condições disponíveis e ao

resultado desejado. Assim sendo, surgem situações em que a realização de simples passes de raiz seguidos de passes de enchimento não é suficiente para criar uma junta soldada satisfatória, quer devido aos materiais constituintes das peças, à geometria das mesmas ou às condições disponíveis no local. Para serem cumpridas condições mais exigentes sem alteração das tecnologias de soldadura, foram desenvolvidas várias técnicas de soldadura diferentes.

Estas técnicas de soldadura descrevem uma determinada ordem de passos característicos que trazem benefícios específicos ao processo realizado. Estes incluem: possibilidade de soldar materiais que normalmente não podem ser soldados, facilitação de processos posteriores à soldadura (como maquinagem) ou até eliminação total de passos de fabrico que normalmente são indispensáveis.

Durante a realização de um processo de soldadura por arco elétrico de um aço dá-se a formação de zonas afetadas pela grande quantidade de energia térmica à qual são sujeitas, denominadas por zonas termicamente afetadas ou ZTA. Estas zonas encontram-se junto à linha de fusão criada durante a soldadura no material base [35-37].

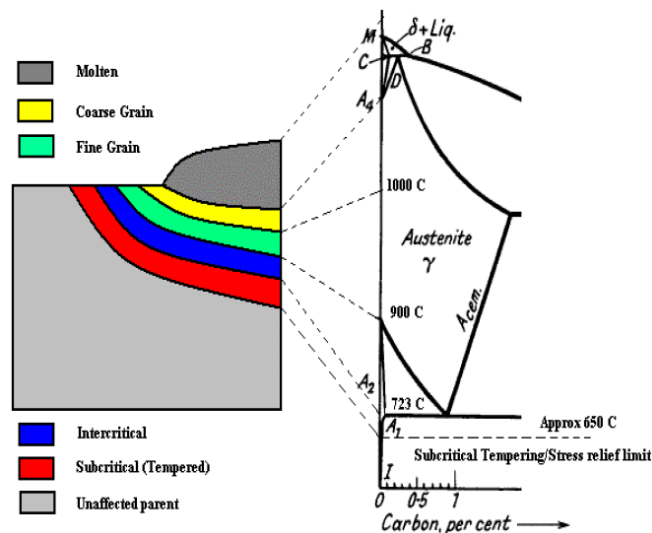


Figura 8 - Regiões de uma junta soldada em relação ao diagrama de fase Fe-C [35]

Como é evidenciado na Figura 8, as temperaturas alcançadas na ZTA são superiores à da temperatura inferior de transição “A1” o que se traduz em

alterações microestruturais. As alterações sofridas estão dependentes de vários fatores e podem ter consequências que vão desde o negligenciável ao inadmissível. Os dois fatores de maior influência são a composição química do aço e a velocidade de arrefecimento a que este vai ser submetido. A composição química, nomeadamente o teor de carbono (carbono equivalente para aços ligados), é um fator chave na previsão da microestrutura final sendo que teores superiores em carbono vão resultar na formação de microestruturas martensíticas ou bainíticas. Um aumento na taxa de arrefecimento da ZTA vai ter consequências semelhantes às do aumento do teor de carbono devido à inibição da sua difusão: formação de microestruturas frágeis. Para além da introdução de alterações microestruturais há a introdução de tensões internas que podem estar na génese de defeitos futuros ou, por vezes, mesmo durante a realização do processo de soldadura [35-37].

De forma a contrariar estes efeitos negativos é usual serem realizados tratamentos térmicos posteriores (*post weld heat treatment* - PWHT). Regra geral, trata-se de ciclos térmicos que visam o alívio de tensões e/ou a obtenção de microestruturas com melhores propriedades de tenacidade. No entanto, por vezes não existe a possibilidade da realização de PWHT devido a fatores de geometria de peça ou recursos, tanto económicos como de equipamentos. Quando em situações de reparação, o objetivo é estender o tempo de vida da peça de forma a evitar os gastos associados à compra de uma peça nova. Assim sendo, a realização de novos tratamentos térmicos na peça, após o processo de soldadura, inviabiliza a realização de reparações (diminuição de despesas) devido ao grande custo monetário e temporal associado. Estabelecem-se, assim, as reparações como uma aplicação de excelência para técnicas de soldadura como o *temper bead* e o pré-aquecimento, que permitem eliminar passos de processamento como tratamentos térmicos dispendiosos [37-40].

A técnica de *temper bead* explora a formação de zonas termicamente afetadas para, com a deposição controlada de cordões extra, produzir um efeito semelhante ao de um tratamento térmico nas ZTA presentes no material de base. Estes cordões extra são depositados sobre a junta já formada tendo em conta a entrega térmica que vai ser feita e o seu efeito. Permite-se, então, que

haja um pequeno alívio de tensões residuais e um parcial ou total tratamento térmico, semelhante a um revenido, nas microestruturas da ZTA. Assim sendo, consegue-se obter uma diminuição da fragilidade destas zonas com a transformação de uma fase frágil como a martensite em martensite revenida, ou, se as condições assim o permitirem, bainite ou perlite. Uma outra característica desta técnica é o facto do material de adição extra, enquanto se encontra no estado austenítico, funcionar como um “absorvedor” de algum do hidrogénio que possa ter sido incorporado na ZTA, diminuindo o risco de fissuração a frio. Esta técnica, no entanto, não substitui perfeitamente um tratamento térmico no que toca ao alívio de tensões e otimização de microestruturas finais. Quando a geometria da peça ou a sua dimensão tornam a realização de um ciclo térmico demasiado dispendioso ou até impossível, esta técnica apresenta-se como uma excelente forma de contornar este problema, dentro das suas limitações. Como exemplo de aplicação em componentes de alta exigência tem-se a realização de *temper bead* em componentes de núcleos de dois reatores nucleares de água no Japão, em conjunto com *laser cladding* [38-41].

Existem cinco tipos diferentes normalizados de realização da técnica de *temper bead* que diferem na forma de deposição da solda, mas partilham o objetivo de reverter as ZTA existentes. Estes são descritos na norma australiana TGN-PE-02 [35]:

- Técnica de *half bead*
- Técnica de camada consistente
- Técnica de *temper bead* alternativa
- Técnica de deposição controlada
- Técnica de *weld toe tempering*

A técnica de *half bead* é utilizada com SMAW e é realizada com a deposição de três camadas com consecutivos incrementos do diâmetro dos elétrodos. Antes de cada nova deposição é realizada uma remoção de aproximadamente 50% da espessura do cordão anterior para que a nova ZTA formada faça o revenido da formada no passe anterior. É uma técnica que caiu em desuso devido à

necessidade de remoção de material manualmente com uma rebarbadora, que não é um processo de precisão, havendo a grande probabilidade de serem cometidos erros [35, 36, 39].

A técnica de camada consistente é realizada com SMAW ou TIG e é um processo gradual realizado em simultâneo com a junta soldada. Consiste num ajuste da espessura das camadas depositadas para que estas tenham espessura suficiente de modo a que a zona termicamente afetada de cada deposição faça o revenido da ZTA formada previamente. Procura-se que não haja transformações de fase de forma a serem obtidas estruturas de martensite revenida com pequenas quantidades de bainite [35, 36].

A técnica de *temper bead* alternativa foi desenvolvida especificamente para ser utilizada em ligas carbono-manganês e carbono-molibdénio. É utilizada com o processo TIG e consiste na utilização de uma entrega térmica de 10% da medida durante o teste de qualificação dos procedimentos de soldadura da peça. Tem como necessidades a aplicação de um pré-aquecimento de pelo menos 150°C e a realização de pelo menos seis passes de soldadura [35, 36].

A técnica de deposição controlada é realizada com o processo SMAW e é utilizada para peças que corram o risco de fragilização por fluência ou de fissuração por reaquecimento durante a sua reparação. Consiste num aumento da entrega térmica do primeiro passe para o segundo de 1,3 vezes a 1,8 vezes. Para cada camada seguinte o aumento da entrega térmica deve ser de 30% a 70%. Estes valores devem ser verificados experimentalmente [35, 39].

A técnica de *weld toe tempering* é um método que pode ser utilizado com qualquer método de soldadura por arco elétrico. Visa a utilização de vários passes perto dos limites da soldadura para que esta ZTA seja revenida. O objetivo é aumentar a ductilidade desta zona devido a ser a que, regra geral, apresenta um maior aumento de dureza e atuar, em simultâneo, como um ponto de concentração de tensões [35, 36].

Todos estes processos devem ser verificados e testados para o caso em que vão ser aplicados, para que as condições em que forem realizados sejam registadas

numa Especificação de Procedimento de Soldadura (EPS). Para garantir que as condições produzem resultados aceitáveis devem ser realizados ensaios mecânicos e microscopia ótica [35, 36].

5. Procedimentos de Soldadura

Em ambientes industriais ou ambientes controlados, todos os processos de soldadura realizados, de pequenas ou grandes dimensões, têm de cumprir requisitos bem definidos previamente, quer pela empresa que realiza o processo, quer pela entidade que encomenda o serviço. Estes requisitos vêm descritos e explicitados em vários tipos de documentos como padrões de engenharia de soldadura, especificações de procedimento de soldadura (normalizados ou não) e *data sheets* [42]. Ao conjunto de requisitos descritos por estes documentos chamam-se: procedimentos de soldadura. Estes explicitam o conjunto de variáveis e passos que têm de ser obrigatoriamente cumpridos para conduzir uma produção de acordo com os requisitos de fabrico [43, 44].

Os padrões de engenharia de soldadura são documentos destinados ao topo da cadeia de fabrico dentro da empresa, isto é, os grupos de projetistas, de engenheiros e de recrutamento responsáveis pela realização do projeto. Este tipo de documentos não é sempre utilizado pois, muitas vezes, é preferido um conjunto de EPS para cumprir a sua função, por conterem um leque de informações mais específicas. Neste documento vêm descritas variadas características sobre os tipos de soldadura que virão a ser realizados. Normalmente encontram-se informações como [42]:

- Material de base;
- Material de adição;
- Tipo de junta;
- Processo de soldadura;
- Parâmetros de soldadura;
- Simbologia normalizada de acordo com o processo;

- O intervalo de espessuras permissível;
- Tipos de ensaios/controlo de qualidade executados por EPS.

Com estas informações gerais sobre o que é esperado encontrar durante o fabrico das peças ou das estruturas, é possível delinear uma sequência ótima de passos que é necessário seguir: desde a preparação das juntas até ao teste e aprovação das mesmas. São também informações essenciais para a seleção e contratação de pessoal com capacidades e qualificações suficientes para cumprir as exigências existentes.

Especificações de procedimento de soldadura (EPS) são documentos desenvolvidos com a finalidade de fornecer à oficina, à fábrica ou ao operador de campo as indicações necessárias para que o processo de soldadura descrito seja realizado dentro dos parâmetros e de forma satisfatória, reproduzível e fiável. Assim sendo, uma EPS deve conter um conjunto de variáveis específicas definidas de forma a que qualquer indivíduo competente seja capaz de reproduzir o processo de soldadura descrito, sem a necessidade de intervenção/clarificação por outras entidades. Normalmente, numa EPS, são definidas características como:

- Processo de soldadura;
- Metal base e de adição;
- Geometria e posição da junta durante o processo;
- Consumíveis e equipamentos;
- Tratamentos térmicos pré e pós realização da soldadura;
- Outras características específicas ao processo descrito.

É característico e aconselhável que exista uma EPS para descrever e identificar todas as soldaduras diferentes que são realizadas por uma empresa. Para que tal seja possível, muitas vezes, a criação de uma EPS por parte de uma empresa ou oficina é auxiliada/supervisionada/certificada ou até fornecida por entidades externas, como sociedades de engenharia ou soldadura especializadas e acreditadas para tal. Tendo em conta esta possível intervenção de entidades externas na criação desta documentação, quando tal se verifica,

é feita a distinção entre uma EPS formalizada apenas dentro de portas e uma EPS testada e examinada por uma entidade externa (EPS Normalizada). A não ser quando dito o contrário, as especificações criadas não expiram, permitindo que empresas criem um variado catálogo de procedimentos confiáveis e acreditados que podem ser postos em prática imediatamente [45, 46]. Tornam-se, assim, uma grande vantagem no que toca à praticidade e à velocidade de aplicação face a novos projetos com juntas semelhantes ou mudanças de pessoal (novos membros da empresa não familiarizados com o trabalho de soldadura desenvolvido ou a desenvolver).

5.1. Criação de Especificações de Procedimento de Soldadura

Com o início de um novo projeto deve ser realizada uma análise interna com o intuito de verificar a existência de alguma EPS dentro da empresa que seja aplicável visando poupar tempo e recursos. A criação de novas especificações implica o estudo das solicitações mecânicas a que cada junta vai ser submetida e um processo de tentativa e erro, baseado no banco de conhecimento existente. É também necessária a escolha do processo de soldadura, das suas variáveis ótimas e de tratamentos térmicos prévios e posteriores (se necessários) para obter o resultado pretendido. Assim sendo, a reaplicação de EPS já desenvolvidas em novos processos é algo de favorável e desejado. No contexto de reparação de componentes, é algo que aumenta a sua atratividade face à substituição de componentes devido à poupança recursos e tempo, melhorando a velocidade de resposta às necessidades do cliente e aumentando margens de lucro.

O início do desenvolvimento de uma EPS é marcado pela criação de um documento denominado por “especificação de procedimento de soldadura preliminar” (RQPS), seguindo o formato descrito pela norma EN ISO 15609:2004 [47]. Uma RQPS contém todas as variáveis necessárias para o processo que está a ser descrito e é um documento que aguarda aprovação para ser oficializado. Segundo a norma EN ISO 15607:2003 [48], a aprovação de uma RQPS pode ser realizada por seis métodos diferentes (nem todos os processos de união apresentam todas estas opções) [43, 44, 49]:

- Teste do procedimento de soldadura;
- Teste dos materiais consumíveis;
- Experiência prévia de soldadura;
- Baseando-se num procedimento de soldadura normalizado;
- Teste de uma soldadura realizada em pré-produção.

O teste de procedimento de soldadura é aplicado a um número de provetes de teste preparadas em concordância com o processo de soldadura que vai ser utilizado na produção. É um método aplicável sempre que as propriedades do metal da zona de fusão e da zona afetada termicamente (ZTA) são críticas na peça a produzir. Deverão ser fabricados suficientes provetes de teste para que se possam realizar todos os ensaios necessários. Estes ensaios incidem sobre as propriedades mecânicas das duas zonas anteriormente referidas tendo por base a realização de ensaios mecânicos como ensaios de impacto, flexão ou tração, variando com a EPS que está a ser avaliada. [43, 44, 50]. A realização de um teste de procedimento de soldadura é realizado conforme a norma EN ISO 15614 [50].

O teste dos materiais consumíveis não é tão comum ser utilizado devido às suas restrições de aplicabilidade. Apenas é aplicável quando a junta não é formada por metais de base dissimilares, a microestrutura produzida é aceitável e as propriedades da ZTA não se deterioram significativamente em serviço. Sempre que existem requerimentos de propriedades de dureza ou impacto, de pré-aquecimento, de *input* de calor controlado ou de tratamento térmico pós soldadura para a junta especificada, este método de teste também não é aplicável. Em adição às restrições já mencionadas, é destacado um conjunto grande de parâmetros limitantes, referentes ao processo de soldadura, na norma EN ISO 15610 [51] sobre a aplicabilidade deste teste. Estando a junta específica dentro de todos estes critérios, a RQPS é validada se todas as condições de soldadura estiverem dentro das recomendadas pelo produtor dos consumíveis utilizados e estiverem verificadas pela literatura [43, 44, 51].

A qualificação de uma EPS com base em experiência e conhecimento prévio é, como o nome sugere, simplesmente a utilização de documentação de vários

procedimentos semelhantes já formalizados que apresentem grandes semelhanças em termo de variáveis. Estes documentos devem conter não só as variáveis utilizadas mas, também, os resultados de testes realizados a soldaduras em serviço durante um tempo de pelo menos 5 anos [43, 44, 52].

Quando se escolhe basear a validação de uma RQPS numa EPS normalizada, caso o processo seja bem-sucedido, a especificação avaliada adquire, também, o estatuto de uma especificação normalizada. Este processo visa a realização de um exame semelhante ao primeiro método de validação abordado, recorrendo a um examinador externo, tendo o cuidado de realizar os mesmos testes realizados na EPS normalizada guião [43, 44, 53].

Por último, a realização de testes em peças de pré-produção é um método que, em termos teóricos, pode ser aplicado a qualquer tipo de soldadura. Não é sempre utilizado porque apresenta a desvantagem de obrigar ao fabrico de peças antes de se dar início à produção, ou seja, custos mais elevados. A sua aplicação preferencial é em EPS para juntas soldadas que não são representáveis por provetes de teste generalizados, em termos de forma ou de dimensões. É um processo de excelência pois permite testar com rigor o comportamento do cordão de soldadura na peça, evidenciando todas as características essenciais: dimensões, restrições, escoamentos de calor ou acessos limitados [43, 44, 54].

Após a realização dos testes necessários, todos estes serão documentados num registo de qualificação de processo de soldadura. Este documento é apresentado em conjunto com a EPS, sendo o que representa a sua credibilidade e fiabilidade [43].

III. Materiais e Métodos

1. Metal de Base - Aço 34CrNiMo6

No contexto da empresa SERMEC GROUP, uma das ligas habitualmente observadas, no que toca à composição de veios de transmissão, é a liga

34CrNiMo6. Esta escolha de material visa cumprir os requisitos em termos de resistência à fadiga que esta aplicação exige. É um aço com teores de carbono inferiores ao eutectóide, ou seja, é um aço hipoeutectóide [55].

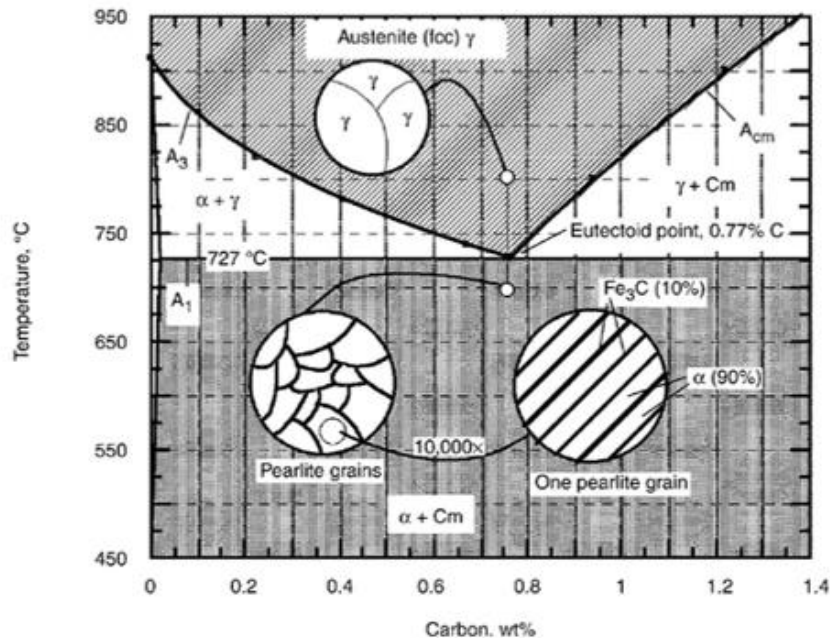


Figura 9 - Corte do diagrama de Fases Fe-C [41]

Conforme mostrado na Figura 9, caso seja realizado um arrefecimento que possibilite as condições próximas do equilíbrio, após a austenitização ocorre a formação de ferrite pró-eutectóide. Este é um constituinte que se apresenta como mais tenaz e menos duro que a perlite. A ferrite pró-eutectóide deposita-se nas zonas de fronteira de grão da austenite, observando-se uma rede de ferrite que envolve os cristais de perlite finais [56].

No entanto, em ambientes industriais, é pouco comum a aplicação de leis de arrefecimento que permitam apenas a realização de reações isotérmicas, especialmente no contexto de soldadura. Normalmente, aplicam-se leis de arrefecimento contínuo para que o comportamento do aço em questão, depois de estudado, seja conhecido e reproduzível. O arrefecimento em soldadura, de modo geral, é realizado ao ar, método simples e que não encarga custos adicionais [57].

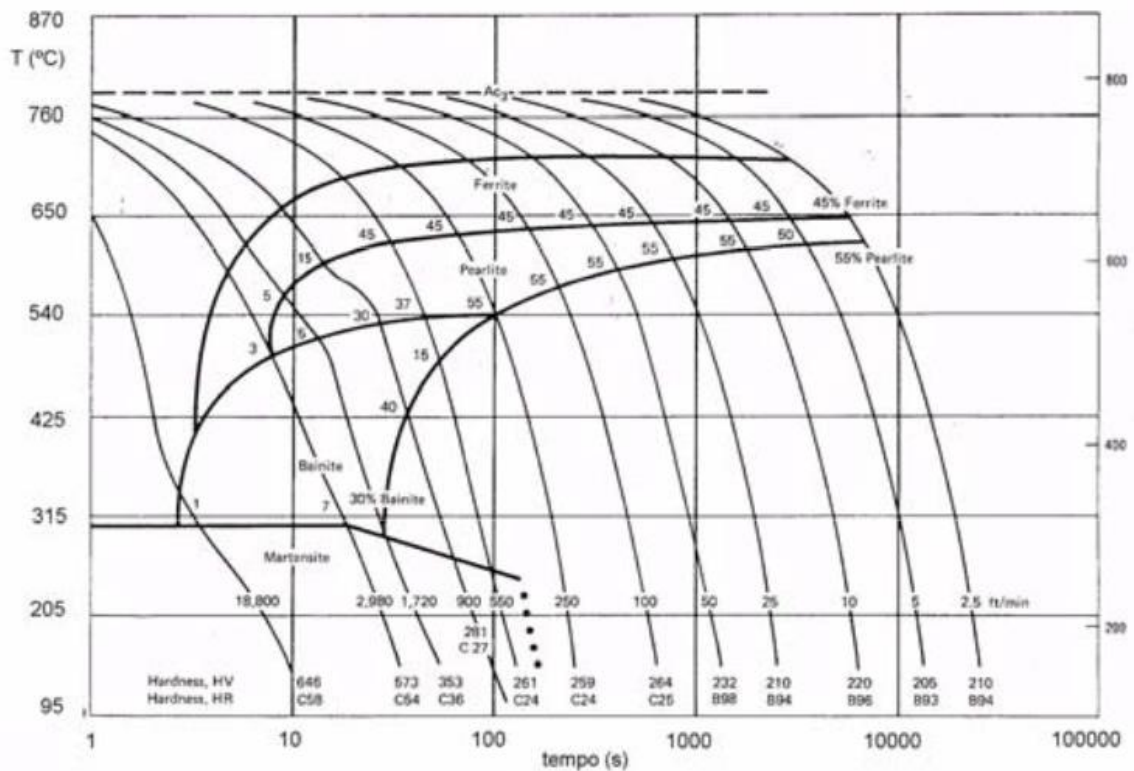


Figura 10 - Diagrama TAC para um aço hipoeutectóide [58]

De acordo com o diagrama de transformação contínua (TAC) apresentado na Figura 10, podemos observar que é possível a obtenção de dois constituintes que não constam no diagrama de equilíbrio: martensite e bainite [57].

A martensite é um constituinte de elevada resistência mecânica, que se traduz num comportamento frágil, mas extremamente resistente à tração e ao desgaste. A sua obtenção advém da inibição da difusão do carbono durante a transformação da austenite em ferro α . Para se obter este aprisionamento do carbono é necessária a imposição de arrefecimento com elevada velocidade. Esta falta de difusão resulta numa malha de rede deformada e inflexível devido à saturação em carbono [57].

A bainite é um constituinte formado quando se seguem leis de arrefecimento rápidas, ligeiramente mais lentas do que na formação de martensite. O rápido arrefecimento vai abrandar a difusão do carbono por parte da austenite fazendo com que esta se vá transformando em $\alpha_{\text{bainítica}}$ e austenite enriquecida em carbono. Esta austenite enriquecida vai, devido à baixa capacidade de dissolução do carbono na ferrite, acabar por se transformar em carbonetos e,

novamente, em $\alpha_{\text{bainítica}}$. Esta reação ocorre a uma temperatura superior a M_s mas fora do equilíbrio. Apresenta uma dureza largamente superior à dureza do domínio perlítico, assim como uma ductilidade superior à da martensite. É, assim, uma microestrutura de excelência, conjugando elevada resistência mecânica e elevada tenacidade [57].

A obtenção de microestruturas alvo e, por consequência, propriedades mecânicas desejadas, não é apenas influenciada pelo arrefecimento da liga, mas também, pelo seu teor de elementos de liga. A liga 34CrNiMo6 apresenta, na sua composição química, os seguintes elementos: cromo, manganês, molibdênio e níquel [55].

Com a adição de elementos de liga estão a ser introduzidos agentes que, durante o arrefecimento da austenite, vão influenciar o fenómeno da difusão. Clarificando, quando ocorre a repartição do carbono e dos elementos de liga, que sucede durante a transformação da austenite, vai ser necessário um maior intervalo de tempo para que este processo seja completo e se atinja o equilíbrio. Com uma maior duração de tempo desta reação surge um aumento da temperabilidade [58, 59].

Assim, tendo em conta que os veios de transmissão exigem elevadas resistência ao desgaste, o aumento da resistência mecânica associada à obtenção de martensite e/ou, dependendo das solicitações, de bainite (por tratamento térmico da martensite ou por reação normal) é algo desejável. Não deve, contudo, devido ao grande aumento da resistência mecânica, ser posta em causa a resistência à fadiga destas peças, devido à função que exercem [60].

A propósito, o cromo, o manganês e o molibdênio encontram-se à esquerda do ferro na tabela periódica e, por isso, apresentam maior afinidade ao carbono do que o ferro. Com uma maior afinidade ao carbono poder-se-á observar a precipitação de carbonetos destes elementos [58, 59].

Segundo a norma BS EN 10269:2013 [55], a composição da liga em destaque deve obedecer aos seguintes valores tabelados:

Tabela 1 - Composição química da liga 34CrNiMo6 em % de massa [55]

| Material/ Composição Química [%] | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | |
|--|-----|------|-----|-----|-------|-------|-----|------|-----|
| 34CrNiMo6 | Min | 0,3 | - | 0,5 | - | - | 1,3 | 0,15 | 1,3 |
| | Max | 0,38 | 0,4 | 0,8 | 0,025 | 0,035 | 1,7 | 0,3 | 1,7 |

Apresentando como propriedades mecânicas os seguintes valores:

Tabela 2 - Propriedades mecânicas da liga 34CrNiMo6 [55]

| Rp0,2 [MPa] | Rm [MPa] | A [%] | KV ₂ [J] |
|----------------|-------------|----------|------------------------|
| 940 | 1040 - 1200 | 14 | 45 |

Onde Rp0,2 é o limite de escoamento ou cedência; Rm é a resistência máxima à tensão; A é o alongamento; KV₂ é a energia absorvida por impacto a 20 °C.

Este aço insere-se na qualidade de aços que é utilizado no estado temperado e revenido [55]. Este dado está de acordo com o expectável tendo em conta que é uma liga utilizada numa aplicação que exige valores de resistência mecânica elevados, mas, ao mesmo tempo e como já mencionado, deve possuir a capacidade de não entrar em falência com a aplicação de cargas cíclicas.

2. Materiais de Adição

2.1. UTP 6824 MoLC

O eletrodo utilizado na produção foi o eletrodo UTP 6824 MoLC com 3,2 mm de diâmetro. Este eletrodo, segundo a norma AWS 5.4 (denominado AWS E 309 MoL-17) [61] apresenta a composição química seguinte:

Tabela 3 - Composição química do eletrodo UTP 6824 MoLC [61, 62]

| Eletrodo | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Cu | |
|--------------|-----|------|------|------|------|------|----|----|----|------|
| E 309 MoL-17 | Min | - | - | 0,50 | - | - | 22 | 2 | 12 | - |
| | Max | 0,04 | 0,90 | 2,50 | 0,04 | 0,03 | 25 | 3 | 14 | 0,75 |

Trata-se de um aço inoxidável com microestrutura austenítica que, de acordo com as informações do fornecedor, permite a produção de juntas compatíveis com *laser cladding* [62]. Esta característica demonstrou-se um ponto chave na seleção de materiais de adição devido ao processo de reparação seguido na empresa SERMEC GROUP. Após a soldadura do defeito ser completa, o veio de transmissão em questão é transportado para a secção de *laser cladding* para concluir o processo de reparação, obtendo um acabamento de superfície de alta precisão, algo extremamente difícil apenas pelo processo de soldadura. Com a utilização desta liga é fornecido um excelente substrato para o processo de *laser cladding* devido à sua compatibilidade química. É também uma excelente opção por providenciar um depósito mais dúctil (Tabela 4) que o metal de base, capaz de absorver as tensões residuais características deste processo. Inibe, assim, o início e propagação de fissuras.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do eletrodo UTP 6824 MoLC [61, 62]

| Rp0,2 [MPa] | Rm [MPa] | A [%] | Kv [J] |
|----------------|-------------|----------|-----------|
| >490 | >670 | >25 | >47 |

2.2. AWS E 312-16

Esta liga foi utilizada durante a técnica de *temper bead*, tendo sido utilizados três eletrodos diferentes: *Weartech 312* com 2,5 mm, *Capilla 52K* com 3,25 mm e *Capilla 312* com 4 mm. A única diferença entre estes três eletrodos encontra-se nos seus diâmetros, sendo que todos eles obedecem à seguinte composição química, segundo AWS 5.4 [61]:

Tabela 5 - Composição química do eletrodo AWS E 312-16 [61, 63]

| Eletrodo | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Cu | |
|----------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| E 309 | Min | - | - | 0,50 | - | - | 28,0 | - | 8 | - |
| MoL-17 | Max | 0,15 | 0,90 | 2,50 | 0,04 | 0,03 | 32,0 | 0,75 | 10,5 | 0,75 |

Este aço apresenta uma estrutura ferrítica-austenítica característica de um aço inoxidável duplex [63]. Como eletrodo, foi escolhido para a técnica de *temper bead* por apresentar uma melhor resistência mecânica, ou seja: propriedades mais próximas das do metal de base.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do eletrodo AWS E 312-16 [63]

| Rp0,2 MPa | Rm MPa | A % | Kv J |
|----------------------|-------------------|----------------|-----------------|
| >500 | >750 | >20 | >40 |

A utilização desta liga, em conjunto com a anteriormente descrita, proporciona uma junta soldada capaz de absorver tensões residuais na camada interna e melhor resistência mecânica na superfície. Segundo o fornecedor *Capilla*, é um eletrodo adequado a soldar ligas com baixa soldabilidade e, assim como no caso do eletrodo UTP 6824 MoLC, produz um depósito adequado a processamentos de *laser cladding* posteriores.

3. Métodos e técnicas utilizados

3.1. Preparação dos provetes

Os provetes para a soldadura foram dimensionados de acordo com a norma ISO 15614-1:2017 [50], dimensões demonstradas na Figura 11. Procurou-se obter uma aproximação das condições nas quais os testes de qualificação de procedimentos de soldadura são realizados.

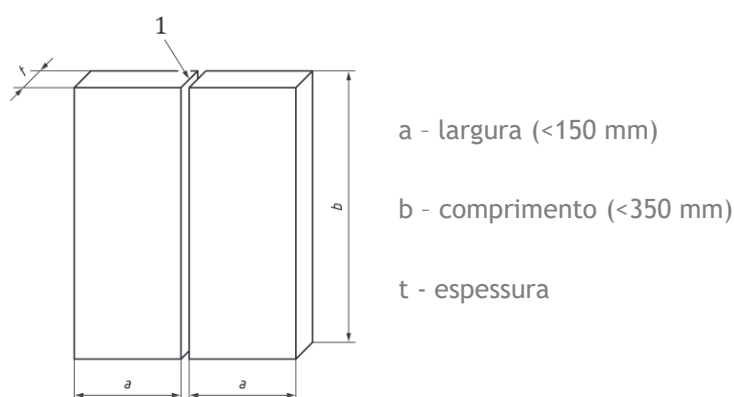


Figura 11 - Provede de teste para soldadura topo a topo em chapa com penetração completa [50]

Condicionado pela disponibilidade de material apenas em formato de varão circular, foram utilizados discos com 15 mm de espessura e com 380 mm de diâmetro. Este diâmetro permite que uma extensão aceitável da parte central da junta soldada esteja de acordo com a dimensão a representada na Figura 11. Foi utilizado um bisel em V com um ângulo de 30° e com um talão em faca. Esta escolha baseou-se no intuito de se obter uma aproximação à geometria que a base de uma fissura apresenta. O corte e maquinagem dos provetes foram feitos com recurso a uma serra de corte de banda e a uma fresadora de CNC, respetivamente. Devido à reduzida distância da zona da junta ao perímetro dos provetes, os extremos do diâmetro pelo qual foi realizada a soldadura foram rejeitados e serviram como zonas de início e fim do arco elétrico, reduzindo a introdução de defeitos na junta.

3.2. Soldadura dos Provetes

Concluída a preparação dos provetes, foram definidas as condições em que estes seriam soldados, tendo sido delineados três tipos de condições diferentes:

- Controlo;
- Soldadura com pré-aquecimento e controlo térmico;
- Soldadura com pré-aquecimento, controlo térmico e aplicação da técnica de soldadura *temper bead*.

O processo de controlo foi realizado sem qualquer tipo de controlo térmico. Deste modo, simularam-se as condições de soldadura dos provetes utilizadas por um operador sem experiência/informação no tratamento da liga do metal de base.



Figura 12 - Realização do pré-aquecimento de um provete

O segundo processo foi realizado com a aplicação de um pré-aquecimento e com um controlo da temperatura de interpasse. Em todas as etapas do processo, o aquecimento foi obtido com recurso a uma toxa de oxigás (conforme mostrado na Figura 12), com o seu controlo efetuado por termómetro de infravermelhos calibrado. A temperatura de pré-aquecimento foi calculada utilizando uma relação do valor de carbono equivalente com a espessura de provete, tendo sido utilizada uma temperatura de 250 °C. A temperatura de interpasse foi mantida no intervalo de 220 °C a 250 °C e verificada em vários pontos do provete antes do início de cada deposição.



Figura 13 - Remoção de material antes do processo de *temper bead*

O último processo seguiu o mesmo controlo térmico descrito previamente. Após realizado o enchimento do provete, foi utilizada uma técnica de *temper bead* modificada semelhante à técnica de *half bead* normalizada [35]. Assim, depois

de removida uma espessura de 4 mm da junta soldada (Figura 13), procedeu-se ao enchimento com três elétrodos da liga de aço inoxidável AWS 312 de diâmetros consecutivamente superiores: 2,5 mm , 3,25 mm e 4 mm (Figura 14). A modificação do processo normalizado encontra-se durante o processo de remoção de material, sendo que esta etapa apenas é realizada uma vez: antes do início do processo, em vez de 50% da espessura depositada após cada camada depositada, simplificando a técnica para o operador.



Figura 14 - Elétrodos utilizados no *temper bead*

Na totalidade dos processos alguns parâmetros foram semelhantes. O processo de soldadura foi realizado utilizando elétrodos do tipo AWS 309 L para os três processos. Foi realizada uma limpeza prévia das peças com acetona de forma a remover qualquer tipo de detritos depositados na superfície dos provetes. Também sempre tida em atenção foi a remoção da escória formada entre cada deposição, de forma a diminuir o risco da formação de inclusões em passes seguintes. Antes do início da soldadura de cada provete foi feita a sua fixação de modo a impedir o seu empeno com a acção da temperatura.

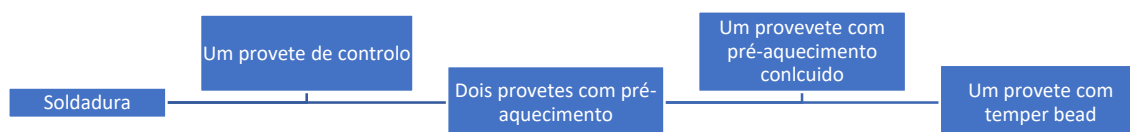


Figura 15 - Diagrama do processo de produção dos provetes soldados

3.3. Ensaios não destrutivos

3.3.1. Líquidos Penetrantes

O ensaio de líquidos penetrantes foi realizado para verificar a integridade das zonas de material de adição. Durante a realização do ensaio foi seguida a norma

utilizada pela SERMEC GROUP para a realização do ensaio ISO 3452 -1:2013 [64].



Figura 16 - Líquidos penetrante e revelador utilizados no ensaio de líquidos penetrantes

Foi realizada uma limpeza prévia dos provetes para a obtenção de resultados fidedignos. Após a realização da limpeza foi feita a deposição do líquido penetrante nas zonas a avaliar utilizando um pincel, demonstrado na Figura 17.



Figura 17 - Aplicação do líquido penetrante

Após um tempo de espera de 20 minutos procedeu-se à remoção do líquido em excesso. Com a aplicação sob a forma de *spray* do líquido revelador são evidenciadas de forma clara quaisquer discontinuidades presentes, através do contraste entre a cor branca do revelador e a cor vermelha do líquido penetrante (Figura 18). Este ensaio foi realizado nas duas faces de cada provete.



Figura 18 - Exemplo de um defeito presente num dos provetes

3.3.2. Partículas Magnéticas

O ensaio de partículas magnéticas teve como intuito a identificação de defeitos

no material base, visto o material de adição ser um aço inoxidável austenítico e, portanto, não apresentar propriedades magnéticas. A realização do ensaio foi feita segundo a norma ISO 17638:2016 [65] e o critério de aceitação de acordo com a norma ISO 23278:2015 [66]. Ambas as normas são de utilização recorrente na empresa SERMEC GROUP.



Figura 19 - Exemplo do ensaio de partículas magnéticas

O processo, simplificando, consistiu numa limpeza prévia dos provetes soldados, para remoção de quaisquer detritos da sua superfície. Após a secagem dos provetes procedeu-se à aplicação da suspensão de partículas magnéticas com um borrifador. Esta aplicação da suspensão foi feita de forma a obter uma cobertura total da junta soldada. Foi utilizado um eletroímã para levar à deposição destas partículas em qualquer tipo de descontinuidade existente. Este processo ocorre quando as partículas magnéticas se alinham com o campo magnético que passa pelo provete. Caso exista uma descontinuidade, o fluxo magnético é alterado e provoca uma acumulação de partículas nesse local. Quando irradiadas com raios UV estas partículas brilham com uma cor verde fluorescente, facilmente visível a olho nu (Figura 19). Este ensaio foi realizado em ambas as faces de cada provete.

3.4. Ensaio de Fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados conforme as indicações da norma ISO 01143:2010 [67]. Assim sendo, houve a necessidade de serem maquinados provetes de fadiga a partir dos provetes de soldadura. A amostragem foi realizada de forma direcionada: foram utilizados os dados recolhidos durante a realização dos ensaios não destrutivos para garantir a sanidade estrutural dos

provetes a maquinar. Não se procedeu com o fabrico de provetes da amostra de controlo devido à presença de descontinuidades visíveis em toda a sua extensão. O corte dos blocos foi realizado por uma serra de corte de banda (Figura 20), e a maquinagem foi realizada por torneamento CNC de forma à junta soldada ficar localizada na zona de maior aplicação de carga.

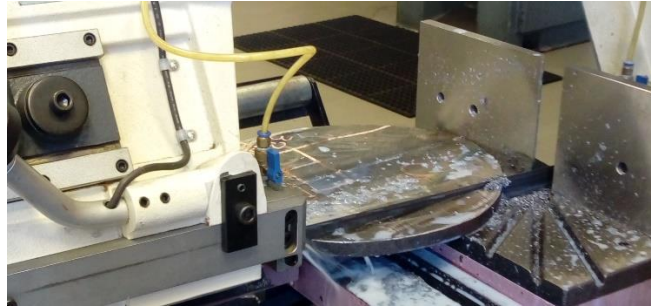


Figura 20 - Início da preparação dos provetes de fadiga

Durante a produção dos provetes em ampolheta de carregamento em ponto único (Figura 21) procedeu-se à definição das cargas a utilizar em cada ensaio.



Figura 21 - Provede em ampolheta de carregamento em ponto único

Foram selecionadas quatro cargas, uma para cada provede de cada grupo. A seleção das cargas foi feita com base em ensaios de fadiga realizados previamente dentro do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMM) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) em ligas de aço semelhantes à liga do metal de base. Os ensaios, devido às limitações do equipamento, apresentam um número de ciclos máximo de um milhão. Selecionaram-se as cargas com base nas seguintes previsões:

- Carga que não conduza à falência: 4 kg
- Carga média baixa com probabilidade de falência baixa: 6 kg
- Carga média alta com probabilidade de falência desconhecida: 8 kg
- Carga que leve à falência: 11 kg

Estas foram pesadas tendo em conta o peso de toda a montagem, para que não se excedesse o valor estipulado. Após o início do ensaio, este é interrompido assim que o provete entre em rutura por ação da fadiga ou assim que seja atingido o limite máximo de um milhão de ciclos.

3.5. Preparação metalográfica e Microscopia

Foi realizada uma amostragem aleatória das juntas produzidas pelos processos em que foram tidos cuidados de controlo térmico e uma amostragem dirigida na junta de controlo, visível na Figura 22. Após o corte das amostras com uma serra de corte de banda procedeu-se à retificação das mesmas de forma a remover os riscos profundos feitos pelo processo de corte.



Figura 22 - Amostragem dirigida do provete de controlo

O polimento das amostras foi feito numa máquina de polimento *Struers RotoPol-21* e seguiu a seguinte sequência:

- Lixas: 120 p - 180 p - 320 p - 600 p - 1000 p;
- Suspensões de diamante: 6 μm - 1 μm .

A realização do ataque químico foi feita com o reagente *Kalling's II*, reagente de uso comum com aços inoxidáveis. A escolha foi feita com o objetivo de tornar observáveis as microestruturas tanto do metal de base como do metal de adição, simultaneamente. O reagente *Kalling's II* apresenta a capacidade de atacar estruturas ferríticas e martensíticas, assim como aços inoxidáveis [68]. O reagente foi preparado com:

- 100 mL de ácido clorídrico

- 5 g de cloreto de cobre (II)
- 100 mL de etanol

O ataque foi realizado recorrendo a algodão embebido para fazer a aplicação do reagente nas amostras utilizando pinças com uma fonte de água facilmente acessível para, após uma duração de três a cinco segundos, este ser removido. Após a remoção do ataque a superfície da amostra foi observada havendo a aplicação de outro ataque se necessário.

A microscopia foi realizada de forma a serem recolhidas pelo menos três imagens de cada zona das juntas soldadas: metal de base, ZTA e metal de adição.

Estas imagens foram recolhidas de forma aleatória utilizando um microscópio ótico *Axiotec/ Zeiss* com objetivas desde 5x até 100x com auxílio do software e equipamento de captura de imagem. Foram recolhidas imagens de zonas específicas para capturar pormenores relevantes, como por exemplo na Figura 23.

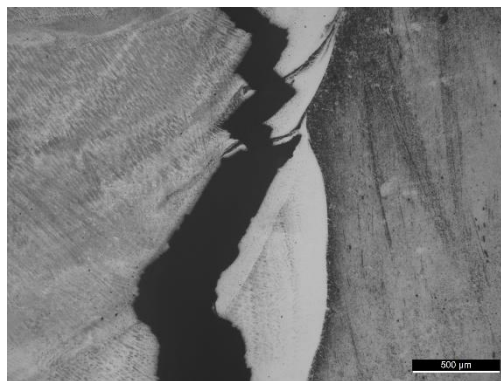


Figura 23 - Fissuração presente na amostra de controlo

3.6. Perfis de dureza

Os perfis de dureza realizados foram feitos com recurso ao equipamento *Struers Duramin*. Foi utilizada a norma BS EN 01043-1:1996 [69] para garantir a fiabilidade dos resultados obtidos. O procedimento normalizado também

permite a comparação de dados entre amostras, por se manter a metodologia da realização das indentações, mesmo com mudanças de amostra. Todos os ensaios de microdureza realizados foram HV2 com tempos de indentação de 15 s.

Para cada amostra foram realizados três perfis, de forma a registrar as propriedades das zonas vizinhas a ambas as faces dos provetes e também da zona central. Os perfis localizados na vizinhança das superfícies foram realizados a 2 mm de distância das mesmas. Cada zona da junta soldada foi alvo de três indentações, com a exceção da ZTA, onde foram realizadas cinco, como mostrado na Figura 24.

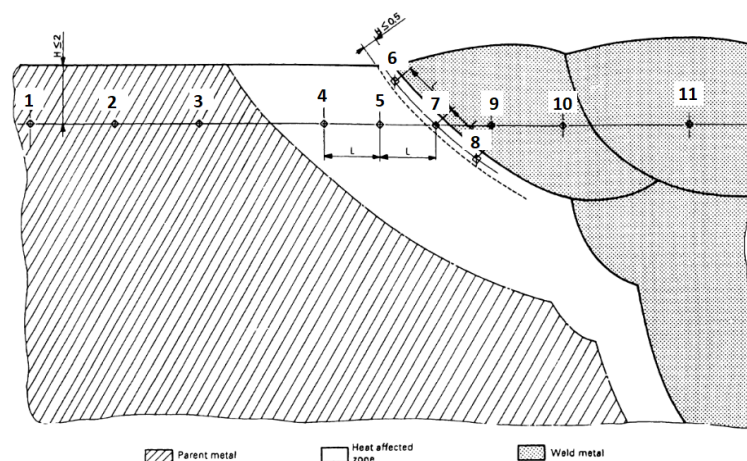


Figura 24 - Morfologia dos perfis de dureza realizados [69]

Com a obtenção de três perfis (Figura 25) de onze indentações foram recolhidos um total de trinta e três valores de dureza para cada tipo de provete. O tratamento de dados foi feito graficamente para que as variações de dureza entre as zonas formadas durante a soldadura se evidenciassem, e, também, simplificando a comparação entre amostras.

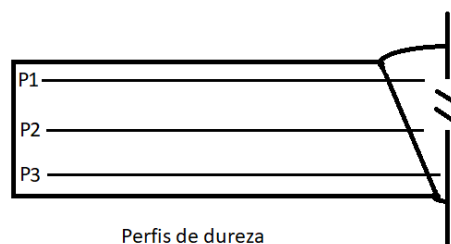


Figura 25 - Esquematização de local de cada perfil de dureza

IV. Resultados/Discussão

1. Ensaio não destrutivo

1.1. Inspeção visual

Demonstrado na Figura 26 estão os provetes no seu estado pós-soldadura. Imediatamente, por comparação, é visível que o provete de controlo sofreu um empeno consideravelmente superior aos outros dois provetes, mesmo tendo sido submetido ao mesmo tipo de fixação.



Figura 26 - Provetes soldados, da direita para a esquerda: com pré-aquecimento, controlo, com *temper bead*

Este empeno deve-se à maior taxa de arrefecimento que este provete sofre, causada pela falta de pré-aquecimento. O arrefecimento mais acelerado introduz maiores tensões na peça e, aliado a alterações microestruturais, é um fator de fragilização da junta soldada.

Na parte superior da junta não houve nenhum tipo de defeito identificável visualmente em nenhum dos três provetes. É visível, no entanto, no provete de controlo, a presença de fissuração na zona do passe de raiz, justificada posteriormente. De salientar uma fissura de aproximadamente 5 cm de comprimento que se encontra diretamente na zona útil do provete, como se pode ver pela Figura 27.



Figura 27 - Fissura de ~5 cm no provete de controlo

1.2. Líquidos penetrantes

Foram evidenciados alguns defeitos na junta soldada, novamente apenas do lado do passe de raíz. A maior parte dos defeitos identificados estão localizados em zonas de início do arco elétrico, podendo a causa ser atribuída à ocorrência de erros durante o processo de soldadura. Analisando a Figura 28 e a Figura 29, os defeitos presentes demonstram-se como zonas com falta de fusão, podendo estes ser corrigidos com uma melhoria da técnica do soldador.

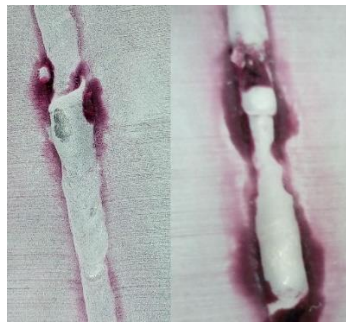


Figura 28 - Defeitos presentes em zonas de início de arco no provete com pré-aquecimento

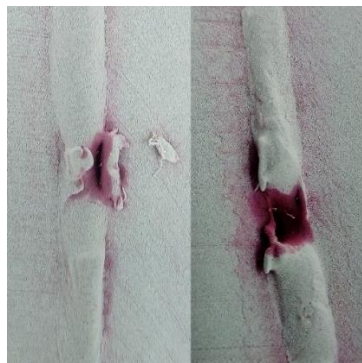


Figura 29 - Defeitos presentes em zonas de início de arco no provete com *temper bead*

No provete de controlo este ensaio confirmou o já observado na inspeção visual, como é mostrado na Figura 30. Este defeito levou à rejeição deste material na ocasião do fabrico dos provetes de fadiga.

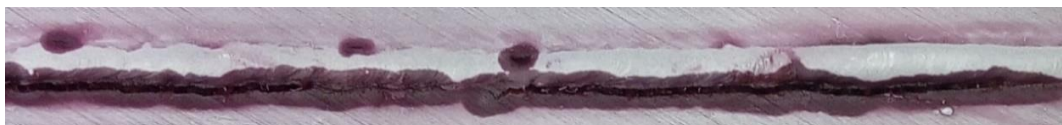


Figura 30 - Resultados do ensaio de líquidos penetrantes do provete de controlo

Do lado superior das juntas não foram identificados nenhuns defeitos em nenhum dos provetes, mostrando que os problemas encontrados durante a produção destes ocorreram durante a realização dos passes de raiz.



Figura 31 - Junta soldada do lado superior do provete com *temperbead*

1.3. Partículas magnéticas

O ensaio de partículas magnéticas foi realizado com o objetivo de confirmar os resultados obtidos previamente. Utilizou-se como ensaio complementar devido à liga usada para o enchimento, AWS E 309 MoL-17, apresentar uma microestrutura austenítica e não possuir propriedades magnéticas. Avaliaram-se principalmente a ZTA e a linha de fusão.

Devido aos defeitos já grosseiramente evidentes no provete de controlo, este não foi submetido ao ensaio de partículas para não haver um desperdício de recursos da empresa na obtenção de um resultado já conhecido.



Figura 32 - Exemplo do ensaio de partículas magnéticas do provete com pré-aquecimento

Os resultados apurados nas duas amostras restantes foram semelhantes entre si, não tendo sido identificados defeitos na zona examinada. A concentração de partículas ao longo da junta (Figura 32) foi identificada com a linha de fusão e resulta da diferença de magnetismos entre os dois metais utilizados. Esta distribuição de partículas também se verificou no provete com *temper bead*,

não devendo ser confundido com um defeito, como se pode observar na Figura 33.



Figura 33 - Exemplo do ensaio de partículas magnéticas do provete com *temper bead*

2. Microdurezas

A média dos valores de dureza obtidos é representada pela Tabela 7. Resultam da média calculada com os valores dos três perfis de dureza (Figura 25) para cada indentação (Figura 24).

Tabela 7 - Médias de valores de microdureza por indentação

| Provete | Indentação | | | | | | | | | | |
|------------------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------|-----|-----|
| | Metal de Base | | | ZTA | | | | | Metal de Adição | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Controlo | 281 | 277 | 269 | 422 | 427 | 463 | 441 | 446 | 228 | 232 | 234 |
| Pré-Aquecimento | 260 | 256 | 259 | 304 | 294 | 302 | 293 | 295 | 229 | 229 | 230 |
| Temper Bead | 271 | 270 | 262 | 284 | 294 | 291 | 286 | 289 | 239 | 238 | 242 |

Analisando a tabela, é perceptível uma diferença entre os valores de dureza registados para a ZTA do provete de controlo *versus* os provetes com pré-aquecimento e com *temper bead*. Como esperado, esta é a zona em que os cuidados térmicos demonstram a sua influência, traduzindo-se em decréscimos dos valores de dureza de aproximadamente 35% para ambos os casos.

Os elevados valores de dureza na ZTA do provete de controlo evidenciam a alta resistência mecânica causada pelo rápido arrefecimento durante o processo de

soldadura. Esta alta resistência traduz-se numa reduzida ductilidade, tendo sido a gênese da fissuração que ocorreu ao longo da linha de fusão. A Figura 34 mostra a representação gráfica das médias das microdurezas nos provetes de controlo, com pré-aquecimento e com *temper bead*.

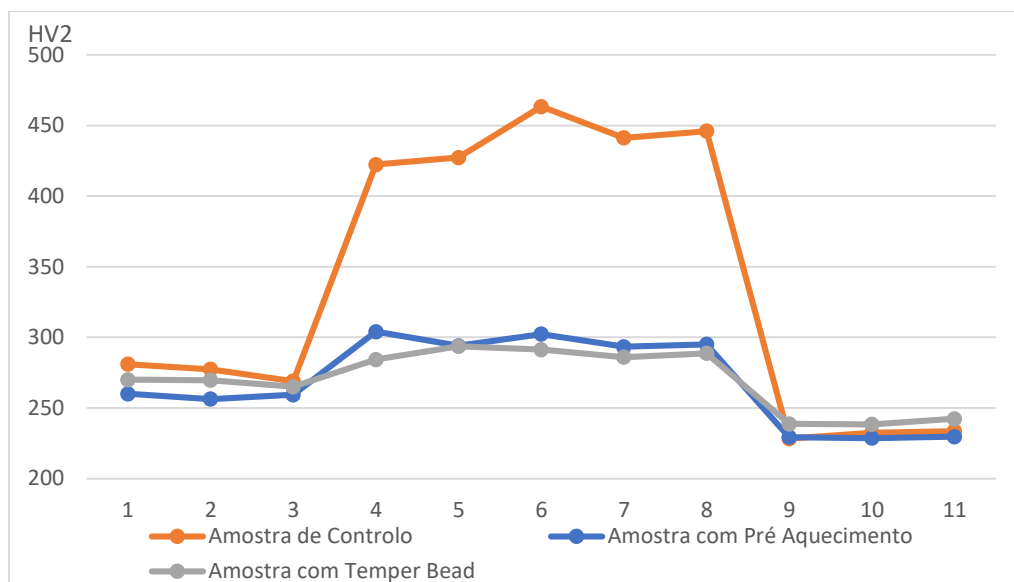


Figura 34 - Representação gráfica dos valores apresentados na Tabela 7 - Médias de valores de microdureza por indentação

Os valores dos três provetes são concordantes nas zonas dos metais de base e de adição. Isto é algo esperado porque a zona de metal base não sofre influência do processo de soldadura, por não atingir temperaturas superiores a 250°C. Com estas baixas temperaturas, alguma alteração de microestrutura que se traduzisse em propriedades mecânicas torna-se muito morosa, intervalos de tempo com ordens de grandeza superiores à duração da formação da junta. A zona de metal de adição também não é influenciada devido às condições de arrefecimento a que é submetida apresentarem muito pouca variação, não influenciando as suas propriedades mecânicas.

Na zona da ZTA encontra-se uma diferença (já abordada) entre os provetes de controlo e os outros. Inicialmente não se registam diferenças entre os valores médios de dureza dos provetes com pré-aquecimento e com *temper bead*. Esta similaridade de valores traduz uma falta de influência geral da técnica de soldadura utilizada na ductilidade da ZTA, objetivo da sua aplicação.

No entanto, quando representados separadamente os perfis de dureza, como na Figura 35, do provete com *temper bead*, é observável uma pequena variação entre os três perfis de dureza estudados.

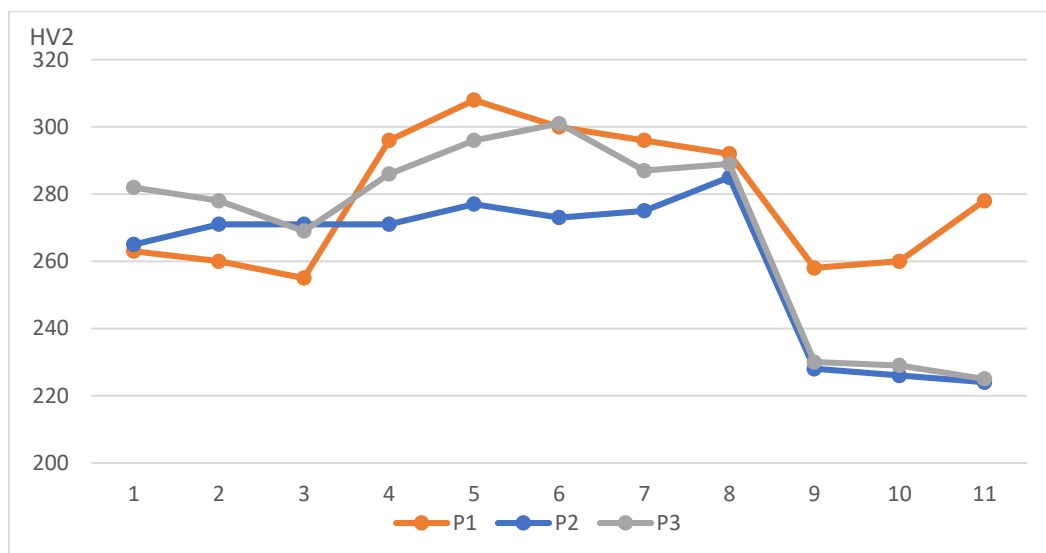


Figura 35 - Representação gráfica dos perfis de dureza do provete com *temper bead*

Com esta representação gráfica é visível que no perfil 2 não houve uma variação de dureza entre a ZTA e o metal de base. Este efeito deve-se ao alívio de tensões conseguido pela técnica de *temper bead*. Os valores mais elevados do metal de adição do perfil 1 são resultado de estas indentações incidirem sobre o AWS E 312-16, liga com maior resistência mecânica.

Assim sendo, contrariamente ao observado pelos valores médios, esta técnica de soldadura efetivamente influencia os valores de dureza, mas não o faz de forma uniforme ao longo da peça. Esta falta de uniformidade pode ser explicada pelo perfil 3 se encontrar demasiado afastado da superfície em que a técnica é aplicada e, por isso, não atingir temperaturas suficientemente elevadas para causar a diminuição de dureza desejada. As durezas do perfil 1 podem ser explicadas pela criação de uma nova ZTA em vez da concretização do objetivo da técnica: tratamento térmico da ZTA existente (resultado do perfil 2).

Em suma: a técnica de *temper bead* influencia os resultados de dureza obtidos, mas não o consegue fazer ao longo de toda a profundidade da junta. Consequentemente, o impacto desta técnica de soldadura é diminuto quando

comparado com o impacto do pré-aquecimento que, por si só, se traduz em reduções de valores de dureza de aproximadamente 35% na ZTA.

3. Microscopia

A análise das imagens obtidas por microscopia permitiu corroborar as conclusões retiradas sobre a zona de metal de base dos provetes. Observando a Figura 36 pode-se concluir que as temperaturas de pré-aquecimento e de interpasse não impactaram sobre a microestrutura ferrítica do metal de base. No entanto, como expectável, nas ZTA de cada provete são identificáveis diferenças, especialmente no de controlo.

Analisando a microestrutura da ZTA do provete de controlo, é visível uma microestrutura martensítica. Esta microestrutura de elevada resistência mecânica é a responsável pelos valores de dureza significativamente superiores aos do metal de base. Esta microestrutura é observável na Figura 37.

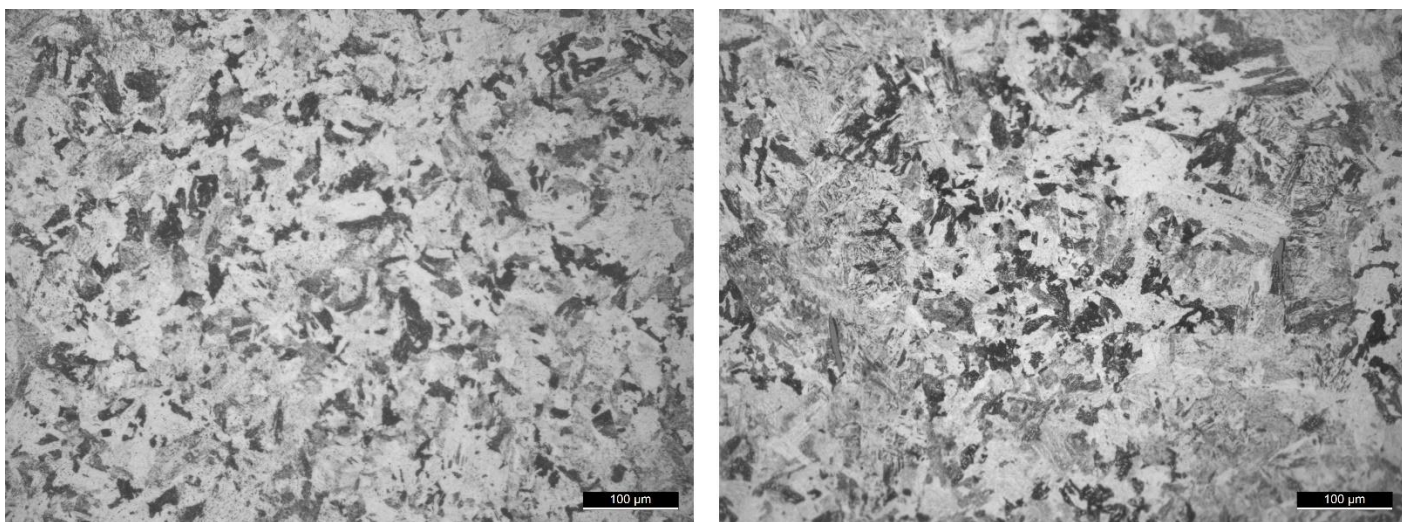


Figura 36 - Microestrutura do metal de base dos provetes de controlo (esquerda) e com *temper bead* (direita)

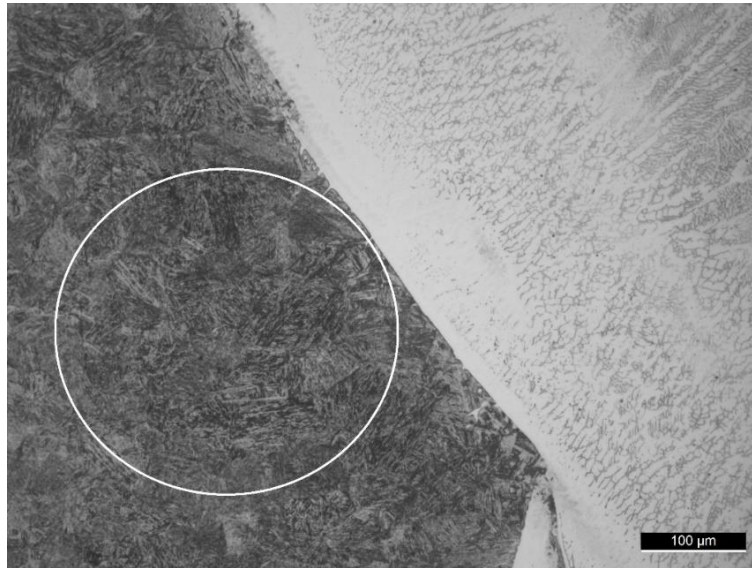


Figura 37 - Linha de fusão com ZTA martensítica do provete de controle

A amostra com pré-aquecimento apresentou, na zona da ZTA, uma microestrutura mais fina do que a do metal base. A sua formação deve-se à taxa de arrefecimento desta amostra ser consideravelmente desacelerada com a execução do pré-aquecimento em conjunto com a aplicação de uma temperatura de interpasse sempre superior a 220°C. A microestrutura é constituída por ferrite (Figura 38) que, devido ao seu tamanho mais reduzido, é responsável pelo pequeno aumento da resistência mecânica. Uma vantagem deste grão refinado face à martensite é manter uma considerável parte da sua ductilidade, diminuindo exponencialmente o risco de fissuração.

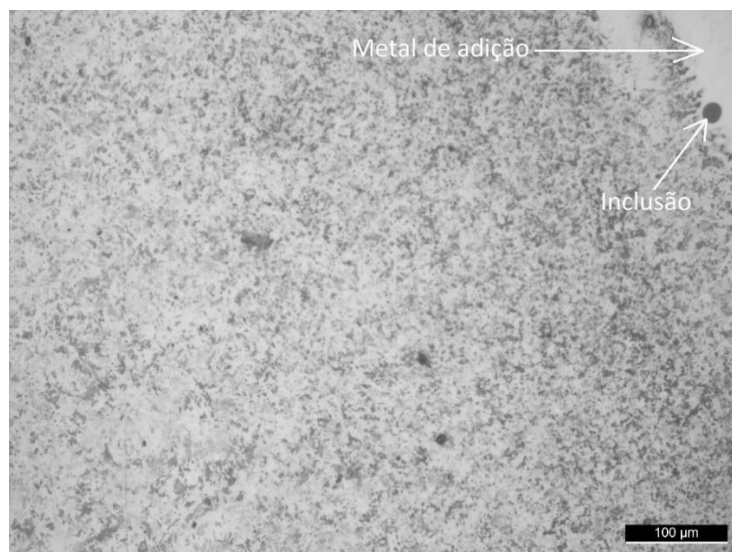


Figura 38 - ZTA do provete com pré-aquecimento

Comparativamente com a microestrutura da ZTA do provete com *temper bead*, torna-se óbvia a similaridade de ambas, pois apresentam a mesma estrutura ferrítica na maioria da ZTA, como mostrado na Figura 39.

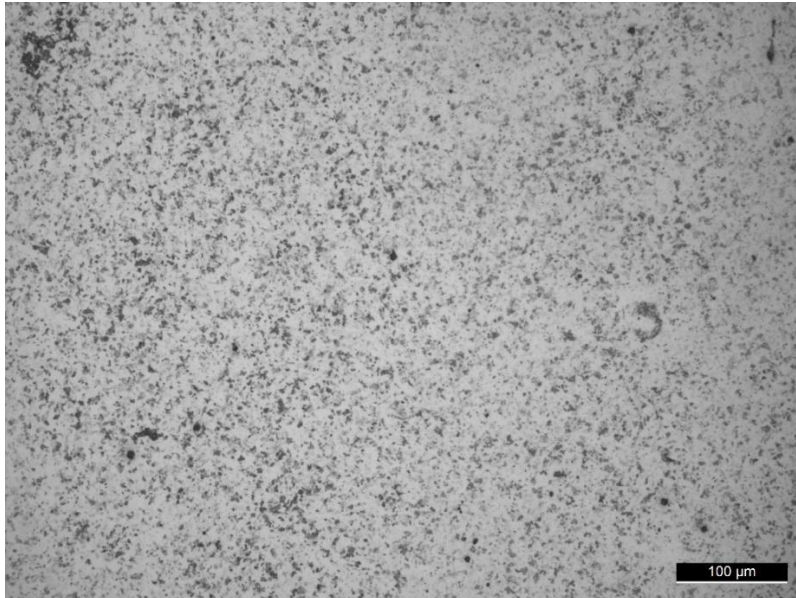


Figura 39 - ZTA do provete com *temper bead*

No entanto são observadas algumas zonas que apresentam microestruturas diferentes destas em ambas as amostras. Na ZTA do provete com pré-aquecimento surgem zonas em que se verifica um grão grosseiro e se obteve uma microestrutura semelhante à do metal base, mostrada na Figura 40. O aumento de grão deu-se numa zona em que houve uma menor taxa de arrefecimento. Este efeito é promovido pelo controlo das temperaturas de interpasse e pré-aquecimento. Com uma maior entrega térmica durante as fases de aquecimento pré-soldadura criam-se condições de arrefecimento propícias à formação desta microestrutura grosseira. A existência de variação microestrutural ao longo da espessura desta junta pode ser um resultado da variação da temperatura de diferentes zonas durante o processo de aquecimento manual.

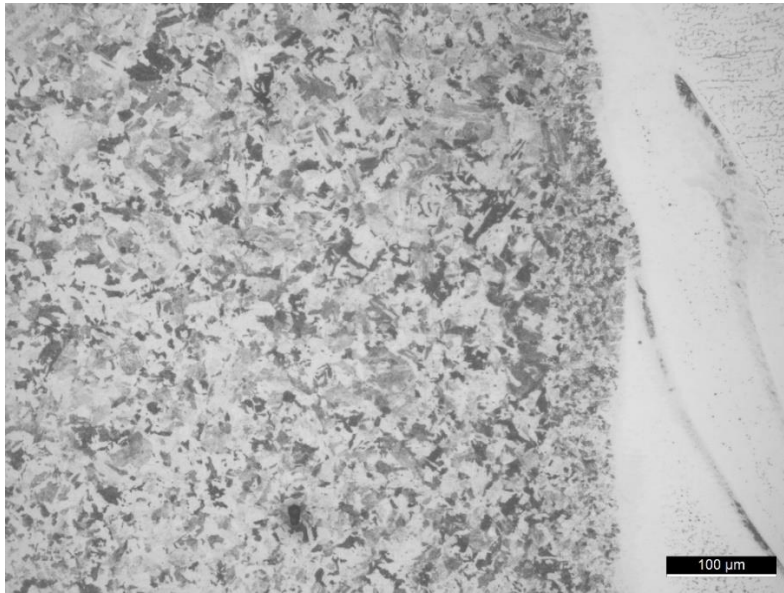


Figura 40 - Zona de grão grosseiro da ZTA do provete com pré-aquecimento

Na amostra com *temper bead* foram também observadas pequenas regiões martensíticas (Figura 41), nomeadamente numa zona aproximadamente 3 mm abaixo da primeira camada de *temper bead* (ligeiramente acima da linha média de espessura da peça de 15 mm). Esta proximidade demonstra a falta de capacidade da técnica de *temper bead* atuar em zonas mais próximas da superfície e que, por isso têm uma taxa de arrefecimento superior.

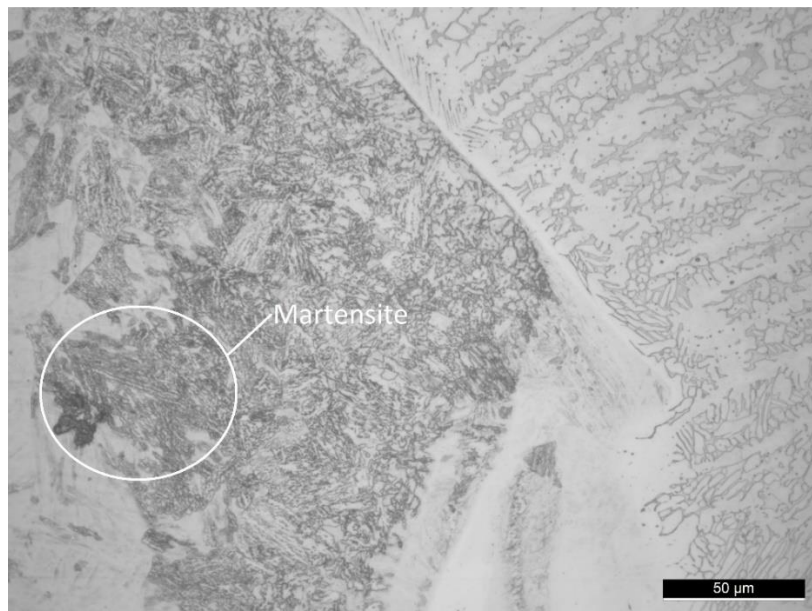


Figura 41 - Região martensítica no provete com *temper bead*

A presença desta fase numa zona central da peça aponta para uma ineficácia

da técnica de soldadura em promover a transformação de microestruturas frágeis, já formadas, em microestruturas mais dúcteis. Isto poderá dar-se devido à entrega térmica não ser suficiente ou devido à remoção de material inicial não ter sido suficiente para que o *temper bead* conseguisse influenciar um maior volume do provete.

Registaram-se, também, zonas em que o grão ferrítico se encontrava mais condensado. Esta zona é a correspondente às indentações realizadas no perfil 2 da amostra com *temper bead* apresentando valores de dureza semelhantes ao do metal base mesmo com uma microestrutura mais fina, como verificado na Figura 42.

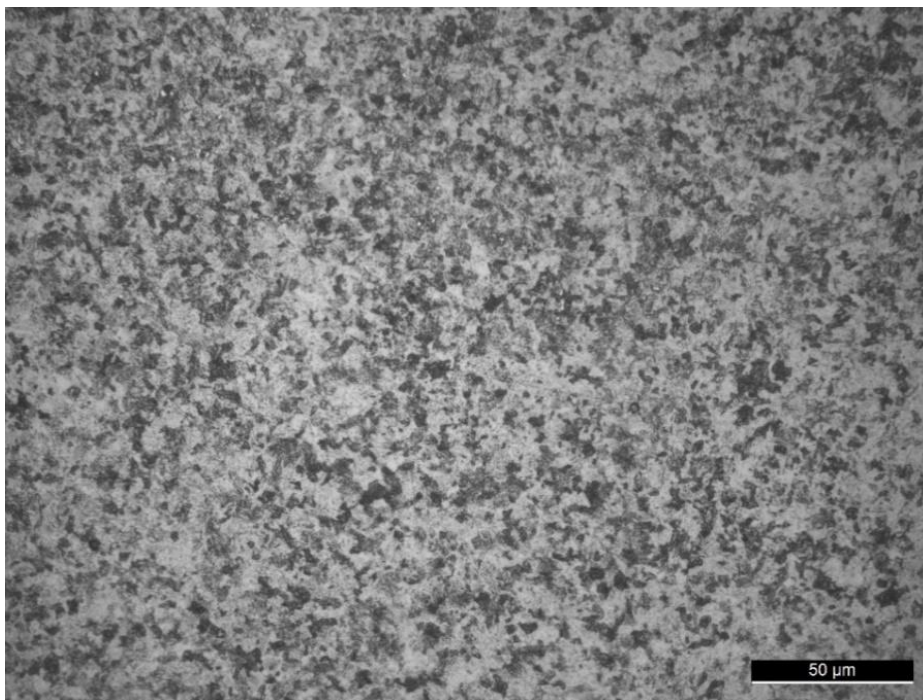


Figura 42 - ZTA do provete com *temper bead* de grão ferrítico

Tal como no caso do metal de base, a microestrutura do metal de adição foi consistente ao longo dos três ensaios. É visível uma estrutura dendrítica austenítica característica do processo de soldadura nos metais de adição, como representado na Figura 43.

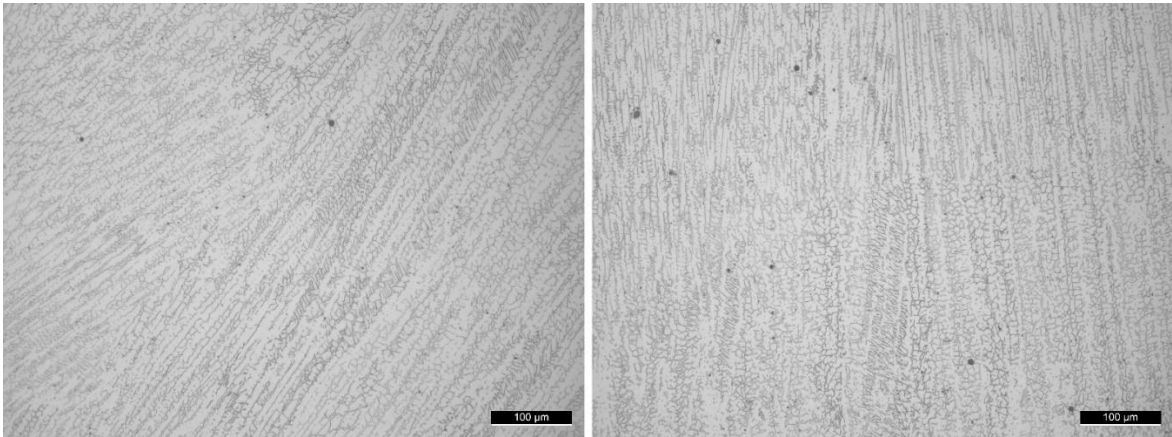


Figura 43 - Microestrutura do UTP 6824 MoLC nos provetes com pré-aquecimento (esquerda) e com temper bead (direita)

A microestrutura das camadas de *temper bead* apresentaram, também, uma microestrutura dendrítica. No entanto, como mencionado na secção dos materiais, a microestrutura é duplex austenícia-ferrítica (Figura 44), visível a ferrite a escura.

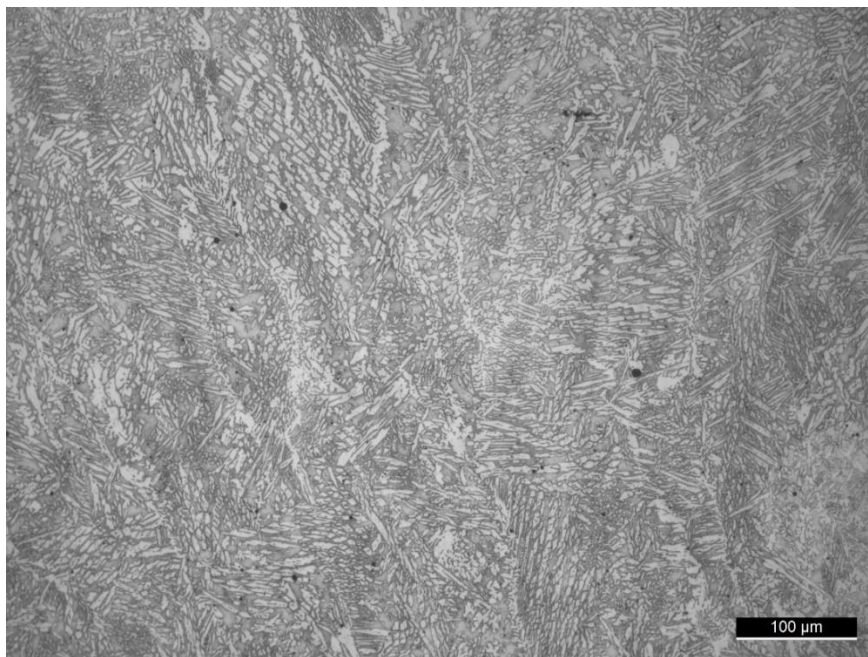


Figura 44 - Estrutura dendrítica do AWS E 312-16

Em resumo, a influência da técnica de *temper bead*, à semelhança de nos valores de dureza, não impacta de forma tão relevante os resultados como o esperado. Comparando a microestrutura do provete de controlo com a do provete com pré-aquecimento, conseguimos traçar um efeito evidente e claro

do controlo térmico no que toca à microestrutura final. No entanto, quando é efetuada a comparação entre o provete com pré-aquecimento e o provete com *temper bead*, não existe uma alteração dos resultados significativa.

4. Fadiga

Os resultados obtidos com a realização dos ensaios de fadiga estão representados na Tabela 8, em que se realizou a conversão da carga de Kg para MPa utilizando a seguinte expressão:

$$\sigma(MPa) = \frac{Carga(Kg) \times 9,8 \times 32 \times l(mm)}{\pi \times d^3(mm)}$$

Em que σ representa a tensão aplicada no centro do provete, $l = 45$ mm representa a distância linear média desde a secção média transversal de menor diâmetro ($d = 5$ mm) do provete, à secção transversal de menor diâmetro da gola da roldana.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios de fadiga

| Carga [KG] | σ [MPa] | Número de ciclos | |
|------------|----------------|------------------|--------------------|
| | | Pré-aquecimento | <i>Temper bead</i> |
| 4 | 143,74 | 1000000 | 1000000 |
| 6 | 215,62 | 1000000 | 1000000 |
| 8 | 287,49 | 1000000 | 1000000 |
| 11 | 395,3 | 61052 | 76715 |

Analisando a tabela conclui-se que a previsão realizada sobre os ensaios das cargas com 4 Kg e 6 Kg durante a sua estipulação estava correta: estes ensaios cumpririam o número de ciclos máximos. Verifica-se também que os ensaios de carga 8 Kg também concluíram o ensaio sem entrar em rotura. Este dado é positivo visto corresponder à carga para a qual estava associada uma incerteza maior quanto ao resultado esperado. A rotura de ambos os provetes deu-se apenas no quarto ensaio, o de carga mais elevada. Este resultado também foi

de encontro às expectativas.

Analisando a diferença de ciclos realizados para o último ensaio entre os dois provetes conclui-se que esta é diminuta. Uma diferença de 15663 ciclos representa um valor de 1,6% do número máximo de ciclos realizáveis no ensaio. Esta grande proximidade de resultados torna-se evidente na Figura 45 em que as duas curvas do gráfico se encontram quase sobrepostas.

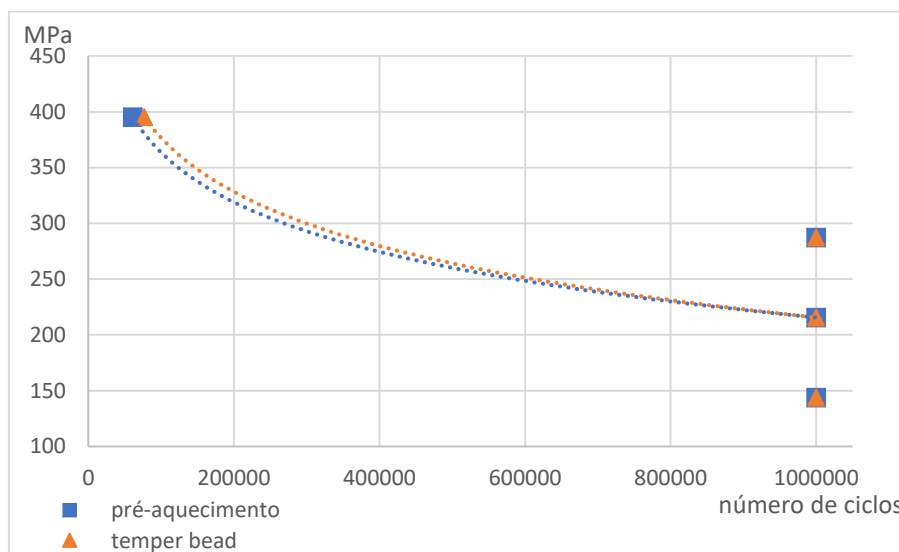


Figura 45 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de fadiga

Em forma de conclusão, pode-se inferir que a resistência à fadiga dos provetes se pode considerar inalterada após a realização do *temper bead*. É, no entanto, relevante mencionar que o número de ensaios realizados é reduzido, não permitindo delinear uma curva de fadiga detalhada e com uma maior abrangência de dados.

Com a análise da fratura dos provetes constata-se, novamente, que estes se comportam de forma semelhante face à fadiga. Ambos os provetes das duas técnicas fraturaram na zona central do provete, evidenciando a inexistência de descontinuidades ou microestruturas indesejadas ao longo da linha de fusão na ZTA. Caso estes defeitos estivessem presentes funcionariam como zonas enfraquecidas promovendo uma rotura acelerada. Assim sendo, tendo a fratura surgido na zona do metal de adição, que foi sujeito a condições de arrefecimento durante os dois processos de fabrico, esta semelhança de

comportamento está dentro do esperado, pois as propriedades mecânicas do depósito do eletrodo UTP 6824 MoLC mantêm-se constantes.

As seguintes figuras apresentam a rugosidade das faces de fratura característica de uma liga com um comportamento dúctil.



Figura 46 - Faces de fratura por fadiga dos provetes com pré-aquecimento (esquerda) e com *temper bead* (direita)

Conclui-se, novamente, que a influência da técnica de soldadura de *temper bead* não obteve resultados significativamente diferentes no que toca à melhoria de propriedades.

V. Conclusões

Do estudo realizado da técnica de *temper bead* retira-se a seguinte conclusão: em casos de reparação de veios por soldadura da liga 34CrNiMo6 a utilização desta técnica de soldadura não se justifica.

As propriedades de dureza sofreram melhorias quase negligenciáveis face aos resultados obtidos pela utilização de um simples pré-aquecimento. Os valores do provete com *temper bead* apresentaram uma redução média de 34%, apenas mais 2% que no provete com pré-aquecimento.

As microestruturas presentes nas amostras retiradas dos provetes tratados demonstraram-se semelhantes na sua maioria. As diferenças registadas apenas se apresentam em áreas reduzidas podendo ser atribuídas a entregas térmicas variadas durante a realização do processo de soldadura. Estas variações advêm da falta de consistência por parte do operador durante a formação das juntas.

Os ensaios de fadiga fornecem dados incertos devido ao seu reduzido número. Avança-se com a hipótese que um aumento do volume de testes nesta área permitiria obter uma curva de fadiga mais apurada que, eventualmente, melhor sustentasse as conclusões tiradas. Assim sendo, chega-se novamente à conclusão que estes dois processos de fabrico produzem juntas com as mesmas propriedades mecânicas.

Como conclusão final retira-se que a técnica de *temper bead*, como aplicada, não produz resultados suficientemente positivos para justificar a sua utilização *versus* a aplicação um controlo térmico antes e durante a soldadura. Esta conclusão é retirada devido ao investimento em termos de tempo, equipamento, mão-de-obra e materiais consumíveis se aliarem à introdução de uma maior margem de erro durante o processo para tornar a relação custo/benefício muito pouco atrativa.

VI. Perspetivas de trabalhos futuros

Analisando o trabalho realizado em conjunto com os resultados obtidos é possível conjecturar uma lista de possíveis trabalhos futuros a desenvolver de forma a otimizar a reparação por soldadura.

Em termos de processo podem ser introduzidas alterações à técnica *temper bead* utilizada para averiguar se é possível obter uma relação custo/benefício mais atrativa. Nomeadamente, deve ser analisada a profundidade de ação da técnica de forma a conseguir-se afetar a microestrutura interna da peça. Este foi um dos problemas encontrados. Pode ser abordado pelo processo de remoção de material (removendo uma espessura maior) ou pela entrega térmica de forma a essa energia térmica conseguir afetar estas zonas.

Em termos de resultados deveriam ser realizados mais ensaios de fadiga para, como mencionado nas conclusões, ser traçada uma curva de fadiga mais pormenorizada. Os ensaios realizados apresentam valores de ciclos reduzidos tornando difícil discernir o impacto que cargas mais leves têm no comportamento da liga.

Uma última sugestão de abordagem futura é a realização de ensaios mecânicos que não foram utilizados. Servem de exemplo o ensaio de impacto de Jomini ou ensaios de tração, ensaios que permitiriam obter informações sobre outras propriedades mecânicas afetadas (ou não) pela técnica de soldadura.

VII. Referências Bibliográficas

- [1] M. Pasqualetti, R. Righter, and P. Gipe, "History of Wind Energy," 2004, pp. 419-433.
- [2] Q. Wu and Y. Sun, "1.1 Wind Power Development," in *Modeling and Modern Control of Wind Power*: John Wiley & Sons.
- [3] J. M. Miller, "4.3 Wind Turbine Systems," in *Ultracapacitor Applications*: Institution of Engineering and Technology.
- [4] D. Y. C. Leung and Y. Yang, "Wind energy development and its environmental impact: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 1031-1039, 2012/01/01/ 2012.
- [5] Iberdrola. (2016, 13/09/2020). *ENERGÍA EÓLICA: limpia, eficiente e segura*.
- [6] K. D. Alex Kalmikov, "Wind Power Fundamentals," Presentation, 2012.
- [7] S. H. Horowitz and A. G. Phadke, "15.2.2 Wind Turbines," in *Power System Relaying (4th Edition)*: John Wiley & Sons.
- [8] I. S. University, "Wind Turbine Components," Iowa State University: Wind Energy Systems Laboratory, 2016.
- [9] J. Kucera, "14.2.2.1 Energy Acquisition Subsystem," in *Desalination - Water from Water (2nd Edition)*: John Wiley & Sons.
- [10] R. L. Busby, "2.3.1 Gearbox," in *Wind Power - The Industry Grows Up*: PennWell.
- [11] F.-K. Chang, "124. A Study Investigating the Inter-Correlation of Wind Speed and Turbulence on the Accuracy of SCADA Based Wind Turbine Blade Load Reconstructions," in *Structural Health Monitoring 2013, Volume 1 and 2 - A Roadmap to Intelligent Structures*: DEStech Publications.
- [12] H. R. Karimi, "Structural Control and Fault Detection of Wind Turbine

Systems," ed: Institution of Engineering and Technology.

- [13] R. Santos, "TELI A2 1920: Introdução - OAW," ed. FEUP: MIEMM, 2019.
- [14] F. C. Campbell, "2. Arc Welding of Metals," in *Joining - Understanding the Basics*: ASM International.
- [15] N. Subramanian, "11.3 Advantages of Welding," in *Steel Structures - Design and Practice*: Oxford University Press.
- [16] R. Santos, "TELI A3 1920: SMAW - GTAW - PAW," ed. FEUP: MIEMM, 2019.
- [17] R. Smith and R. K. Mobley, "10.4.13 Gas Tungsten Arc Starting Methods," in *Rules of Thumb for Maintenance and Reliability Engineers*: Elsevier.
- [18] A. W. Society, A. O'Brien, Ed. *Welding Handbook: Welding Processes, Part 1*. Miami: American Welding Society, 2004.
- [19] M. A. Laughton and D. F. Warne, "10.1.1 Power Sources for Arc Welding," in *Electrical Engineer's Reference Book (16th Edition)*: Elsevier.
- [20] N/A, "dysprosium," in *Dictionary of Metals*: ASM International.
- [21] *PT EN ISO 4063: Soldadura e processos afins - Nomenclatura dos processos e números de referência*, 2015.
- [22] S. Lathabai, "20 - Joining of aluminium and its alloys," in *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*, R. Lumley, Ed.: Woodhead Publishing, 2011, pp. 607-654.
- [23] P. K. Mallick, "8 - Joining for lightweight vehicles," in *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, P. K. Mallick, Ed.: Woodhead Publishing, 2010, pp. 275-308.
- [24] M. A. Wahab, "6.03 - Manual Metal Arc Welding and Gas Metal Arc Welding," in *Comprehensive Materials Processing*, S. Hashmi, G. F. Batalha, C. J. Van Tyne, and B. Yilbas, Eds. Oxford: Elsevier, 2014, pp. 49-76.

- [25] R. Santos, "TELI A4 1920: GMAW - FCAW," ed. FEUP: MIEMM, 2019.
- [26] *PT EN ISO 4063: Nomenclatura dos processos e números de referência*, 2015.
- [27] J. M. Antonini, "8.04 - Health Effects Associated with Welding," in *Comprehensive Materials Processing*, S. Hashmi, G. F. Batalha, C. J. Van Tyne, and B. Yilbas, Eds. Oxford: Elsevier, 2014, pp. 49-70.
- [28] K. Weman, "9 - Manual metal arc (MMA) welding with coated electrodes," in *Welding Processes Handbook (Second Edition)*, K. Weman, Ed.: Woodhead Publishing, 2012, pp. 99-103.
- [29] A. G. Olabi, R. Lostado, and K. Y. Benyounis, "6.10 - Review of Microstructures, Mechanical Properties, and Residual Stresses of Ferritic and Martensitic Stainless-Steel Welded Joints," in *Comprehensive Materials Processing*, S. Hashmi, G. F. Batalha, C. J. Van Tyne, and B. Yilbas, Eds. Oxford: Elsevier, 2014, pp. 181-192.
- [30] T. J. Lienert, S. S. Babu, T. A. Siewert, and V. L. Acoff, "5.1.3 Considerations of SMAW Formulation," in *ASM Handbook, Volume 06A - Welding Fundamentals and Processes*: ASM International.
- [31] J. E. Kogel, N. C. Trivedi, J. M. Barker, and S. T. Krukowski, "108.2.1.2 Fluxes for Submerged Arc Welding," in *Industrial Minerals and Rocks - Commodities, Markets, and Uses (7th Edition)*: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).
- [32] S. K. Sarkar and S. Saraswati, "8.2.4 Electrodes," in *Construction Technology*: Oxford University Press.
- [33] K. Weman, "6 - TIG welding," in *Welding Processes Handbook (Second Edition)*, K. Weman, Ed.: Woodhead Publishing, 2012, pp. 63-69.
- [34] R. Singh, "Chapter 3 - Welding and Joining Processes," in *Applied Welding Engineering*, R. Singh, Ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2012, pp. 147-170.

- [35] TGN-PE-02 : *Temper Bead Welding*, 2006.
- [36] W. J. Sperko, "Exploring Temper Bead Welding," *Welding Journal*, August, 2005 2005.
- [37] W. Mohr, M. Boring, and Y. P. Yang, *An Analysis of a Completed Temper Bead Weld Repair Performed on an Amine Tower*. 2010.
- [38] A. International Atomic Energy, "6.2.4.1 Core Internals - Upflow Conversion," in *Stress Corrosion Cracking in Light Water Reactors - Good Practices and Lessons Learned*: IAEA.
- [39] A. Strang, "4.5.8 Code Requirements," in *Materials for High Temperature Power Generation and Process Plant Applications*: Maney Publishing for IOM3, the Institute of Materials, Minerals and Mining.
- [40] A. S. M. I. H. Committee, "133.4 Weld-Metal Porosity," in *ASM Handbook, Volume 06 - Welding, Brazing, and Soldering*: ASM International.
- [41] J. R. Davis, "5.5.2 Use of Low-Hydrogen Processes and Consumables," in *ASM Specialty Handbook Carbon and Alloy Steels*: ASM International.
- [42] *Welding Procedure Guide*, 2008.
- [43] *EN ISO 15607: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – General rules*, 2003.
- [44] *BS EN 288-1 : Specification and approval of welding procedures for metallic materials - Part 1. General rules for fusion welding*, 1997.
- [45] G. M. Goodrich, "11.11.1.1 Welding Procedure Specification," in *Iron Castings Engineering Handbook*: American Foundry Society.
- [46] T. J. Lienert, S. S. Babu, T. A. Siewert, and V. L. Acoff, "References," in *ASM Handbook, Volume 06A - Welding Fundamentals and Processes*: ASM International.
- [47] *EN ISO 15609-1: Specification and qualification of welding procedures*

for metallic materials – Welding procedure specification – Part 1: Arc welding 2004.

[48] *EN ISO 15607: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – General rules*, 2003.

[49] *EN ISO 15609-1: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure specification – Part 1: Arc welding* 2004.

[50] *EN ISO 15614-1: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test –Part 1:Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys*, 2017.

[51] *EN ISO 15610: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Qualification based on tested welding consumables*, 2003.

[52] *EN ISO 15611: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Qualification based on previous welding experience*, 2003.

[53] *EN ISO 15612: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Qualification by adoption of a standard welding procedure*, 2004.

[54] *EN ISO 15613: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Qualification based on pre-production welding test*, 2004.

[55] *BS EN 10269: Steels and nickel alloys for fasteners with specified elevated and/or low temperature properties*, 2013.

[56] H. Santos, "Aula nº 3 - O diagrama de equilíbrio Fe-C. As fases sólidas e as reacções invariantes do diagrama. Os pontos críticos das ligas Fe-C e o fenómeno de histerese térmica. ," Sebenta de Tratamentos Térmicos, FEUP, MIEMM.

[57] H. Santos, "Aula nº 6 - Os domínios martensítico e bainítico," Sebenta de Tratamentos Térmicos, FEUP, MIEMM.

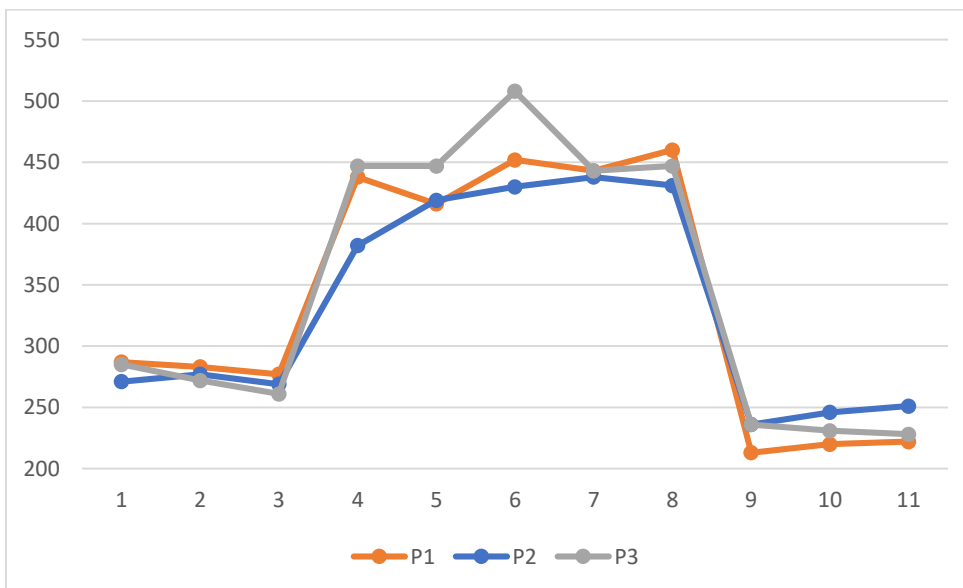
- [58] H. Santos, "Aula nº 7 - Efeito dos elementos de liga na transformação da austenite " Sebenta de Tratamentos Térmicos, FEUP, MIEMM.
- [59] H. Santos, "Aula nº 8 - Aços ligados de baixo e médio carbono," Sebenta de Materiais Metálicos, FEUP, MIEMM.
- [60] H. P. Bloch and F. K. Geitner, "2.5.1 Shaft Fracture," in *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting, Volume 2 - Practical Machinery Management for Process Plants (4th Edition)*: Elsevier.
- [61] *AWS 5.4: Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*, 2012.
- [62] UTP, "UTP 6824 MoLC - Low carbon stick electrode for dissimilar metal joints and claddings," UTP, Ed., ed: UTP, 2016.
- [63] Capilla, "Part catalogue: 2. Welding consumables for welding of stainless steels," Capilla, Ed., ed. Germany: Capilla.
- [64] *ISO 3452-1: Non-destructive testing – Penetrant testing – Part 1:General principles*, 2014.
- [65] *ISO 17638: Non-destructive testing of welds – Magnetic particle testing*, 2016.
- [66] *ISO 23278: Non-destructive testing of welds – Magnetic particle testing – Acceptance levels*, 2015.
- [67] *ISO 1143: Metallic materials - Rotating bar bending fatigue testing*, 2010.
- [68] B. L. Bramfitt and A. O. Benscoter, "8.13.6.1 Description," in *Metallographer's Guide - Practices and Procedures for Irons and Steels*: ASM International.
- [69] *BS EN 01043-1: Destructive tests on welds in metallic materials. Hardness testing - Part 1: Hardness tet on arc welded joints*, 1996.

VIII. Anexos

Anexo 1 - Tabela de durezas HV2 do provete de controlo

| Amostra de Controlo | | | | | | |
|---------------------|---------|-----|-----|--------------|-----|-----------------|
| Identação | Durezas | | | Dureza Média | | |
| | P1 | P2 | P3 | Metal Base | ZTA | Metal de Adição |
| 1 | 287 | 271 | 285 | 276 | | |
| 2 | 283 | 277 | 272 | | | |
| 3 | 277 | 269 | 261 | | | |
| 4 | 438 | 382 | 447 | 440 | | |
| 5 | 416 | 419 | 447 | | | |
| 6 | 452 | 430 | 508 | | | |
| 7 | 443 | 438 | 443 | | | |
| 8 | 460 | 431 | 447 | | | |
| 9 | 213 | 236 | 236 | | | |
| 10 | 220 | 246 | 231 | | | |
| 11 | 222 | 251 | 228 | | | 231 |

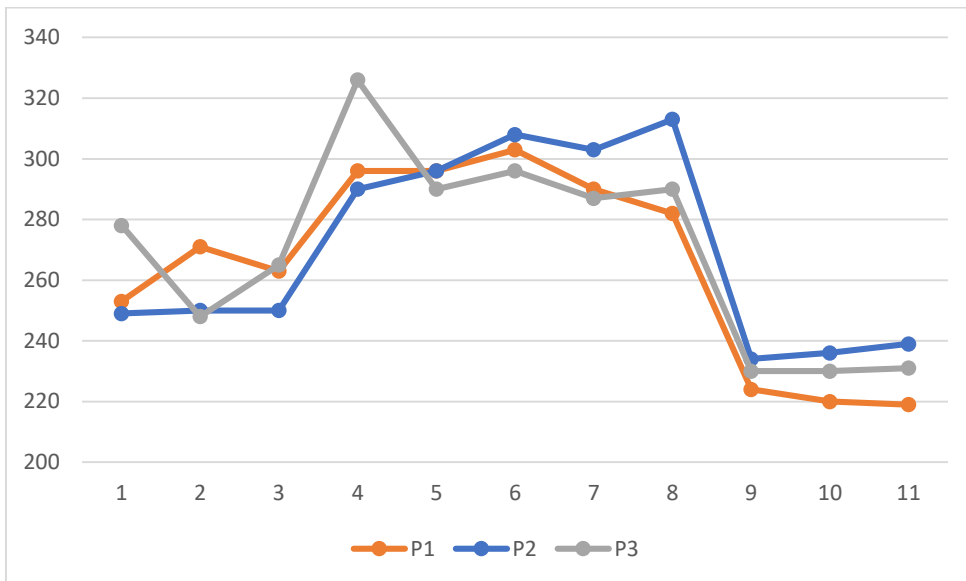
Anexo 2 - Representação gráfica dos perfis de dureza do provete de controlo



Anexo 3 - Tabela de durezas HV2 do provete com pré-aquecimento

| Amostra de Controlo | | | | | | |
|---------------------|---------|-----|-----|--------------|-----|-----------------|
| Identação | Durezas | | | Dureza Média | | |
| | P1 | P2 | P3 | Metal Base | ZTA | Metal de Adição |
| 1 | 253 | 249 | 278 | 259 | | |
| 2 | 271 | 250 | 248 | | | |
| 3 | 263 | 250 | 265 | | | |
| 4 | 296 | 290 | 326 | 298 | | |
| 5 | 296 | 296 | 290 | | | |
| 6 | 303 | 308 | 296 | | | |
| 7 | 290 | 303 | 287 | | | |
| 8 | 282 | 313 | 290 | | | |
| 9 | 224 | 234 | 230 | | | |
| 10 | 220 | 236 | 230 | 229 | | |
| 11 | 219 | 239 | 231 | | | |

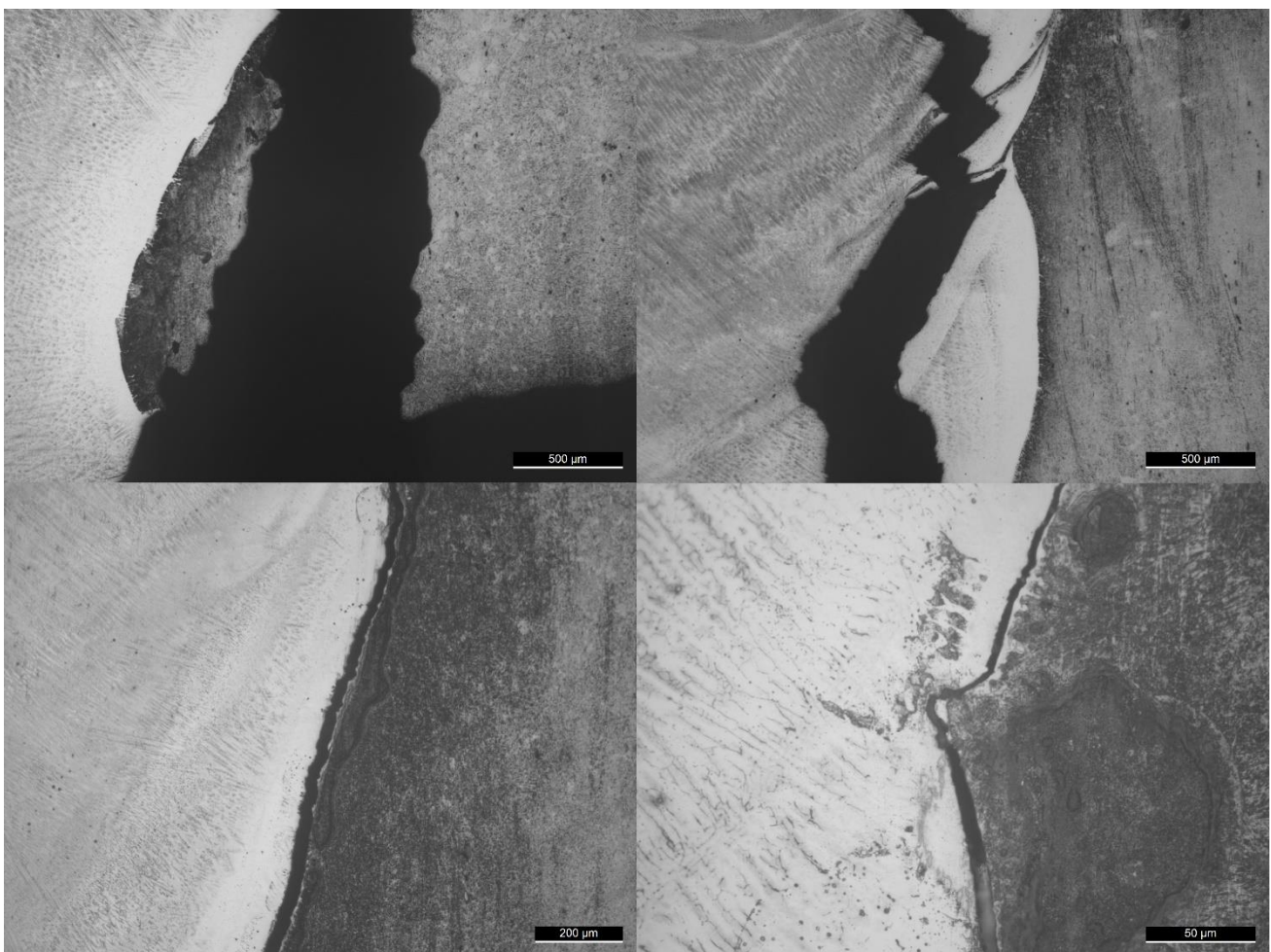
Anexo 4 - Representação gráfica dos perfis de dureza do provete com pré-aquecimento



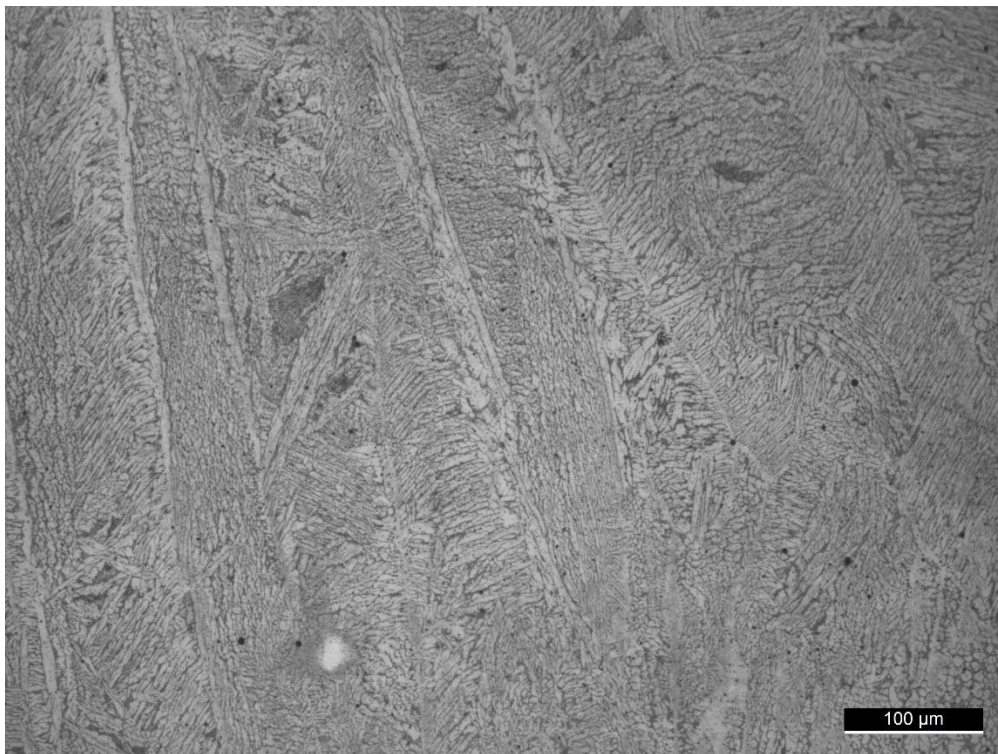
Anexo 5 - Tabela de durezas HV2 do provete com *temper bead*

| Amostra de Controlo | | | | | | |
|---------------------|---------|-----|-----|--------------|-----|-----------------|
| Identação | Durezas | | | Dureza Média | | |
| | P1 | P2 | P3 | Metal Base | ZTA | Metal de Adição |
| 1 | 263 | 265 | 282 | 268 | | |
| 2 | 260 | 271 | 278 | | | |
| 3 | 255 | 271 | 269 | | | |
| 4 | 296 | 271 | 286 | | 289 | |
| 5 | 308 | 277 | 296 | | | |
| 6 | 300 | 273 | 301 | | | |
| 7 | 296 | 275 | 287 | | | |
| 8 | 292 | 285 | 289 | | | |
| 9 | 258 | 228 | 230 | | | |
| 10 | 260 | 226 | 229 | | | |
| 11 | 278 | 224 | 225 | | | |

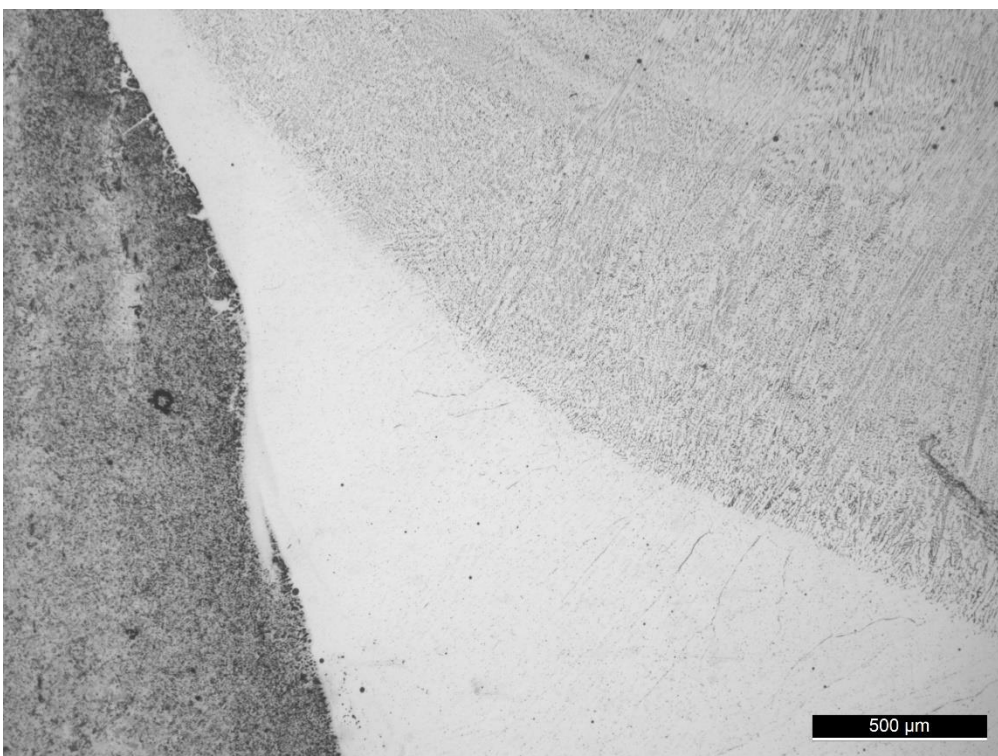
Anexo 6 - Propagação de uma fissura no provete de controlo



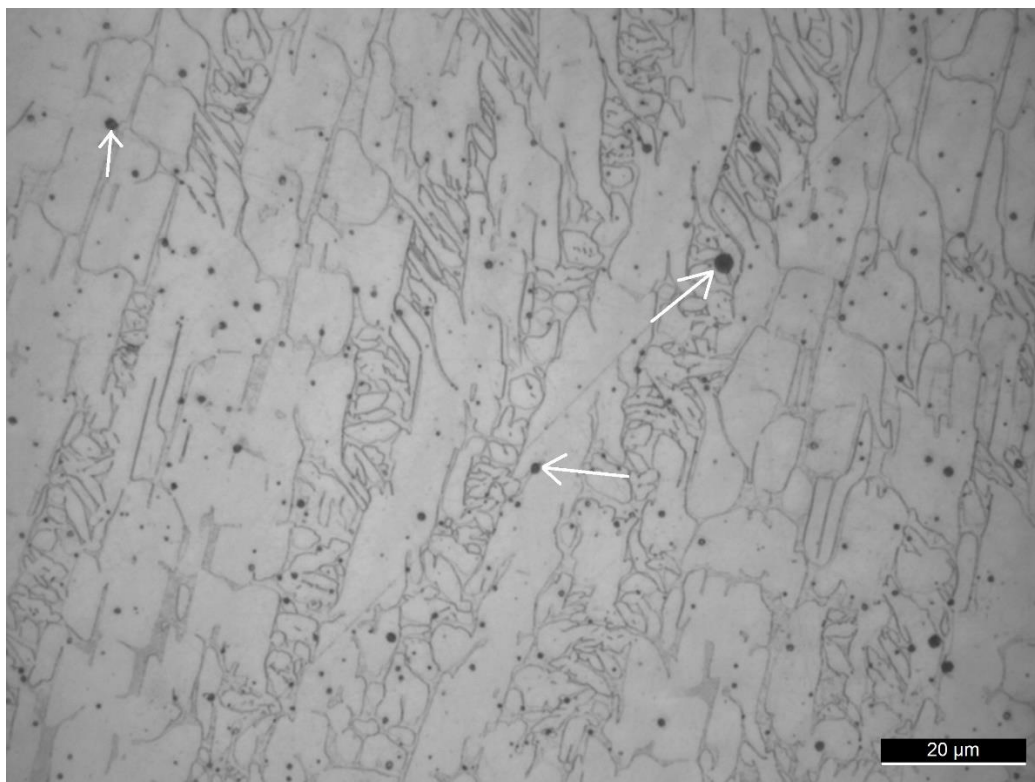
Anexo 7 - Microestrutura dendrítica do metal de adição no provete de controlo



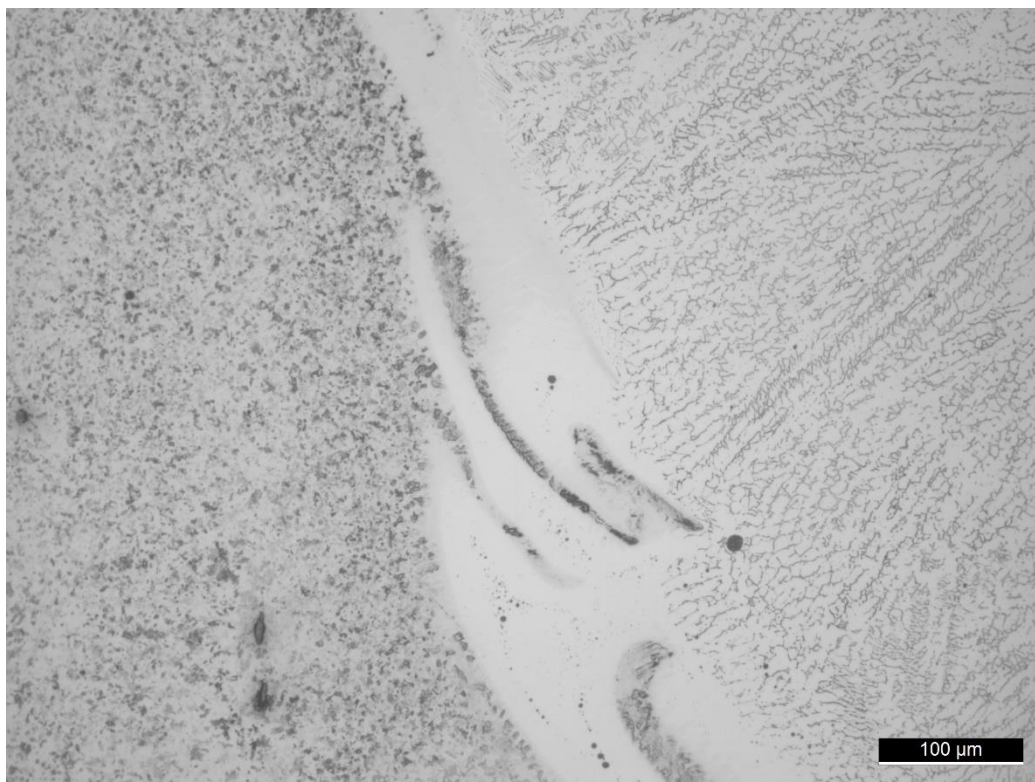
Anexo 8 - Contraste entre o passe de raiz e o segundo passe no provete com pré-aquecimento



Anexo 9 - Inclusões no metal de adição do provete com pré-aquecimento



Anexo 10 - Zona de difusão parcial no provete com pré-aquecimento



Anexo 11 - Microestrutura dendrítica da camada depositada na técnica de *temper bead*

