

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Efeito do TTAT no Desempenho de Revestimentos
Metálicos com a Liga INCONEL 625 Obtidos por
Processos ao Arco Elétrico**

Camila Pereira Alvarães

Prof. Orientador: Jorge Carlos Ferreira Jorge, D.Sc.

Prof. Coorientador: Leonardo Sales Araújo, D.Sc.

Prof. Coorientador: Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc.

Rio de Janeiro

Novembro de 2014

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Efeito do TTAT no Desempenho de Revestimentos
Metálicos com a Liga INCONEL 625 Obtidos por
Processos ao Arco Elétrico**

Camila Pereira Alvarães

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientador: Jorge Carlos Ferreira Jorge, D.Sc.

Prof. Coorientador: Leonardo Sales Araújo, D.Sc.

Prof. Coorientador: Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc.

Rio de Janeiro

Novembro de 2014

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A472 Alvarães, Camila Pereira
Efeitos do TTAT no desempenho de revestimentos metálicos
com a liga INCONEL 625 obtidos por processos ao arco elétrico /
Camila Pereira Alvarães.—2014.
xiv, 57f. + anexos : il.color. , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2014.

Bibliografia : f. 54-57

Orientadores : Jorge Carlos Ferreira Jorge

Leonardo Sales Araújo

Luís Felipe Guimarães de Souza

1. Ligas resistentes ao calor. 2. Revestimentos metálicos. 3.
Corrosão. I. Jorge, Jorge Carlos Ferreira (orient.). II. Araújo,
Leonardo Sales (co-orient.). III. Souza, Luís Felipe Guimarães (co-
orient.). IV. Título.

CDD 669.94

*“A inspiração que você procura já está dentro
de você. Fique em silêncio e escute.” - Rumi*

AGRADECIMENTOS

Aos meus amados pais, Marcio da Costa Alvarães e Lucia Maria Pereira Alvarães, por sempre acreditarem em mim. Vocês são minha eterna inspiração em buscar ser sempre melhor.

A minha irmã, Anna Luiza Pereira Alvarães, por estar sempre ao meu lado e me apoiar em todos os momentos da minha vida.

Aos queridos professores Jorge Carlos Ferreira Jorge, Luís Felipe Guimarães de Souza e Leonardo Sales Araújo pela paciência e pela atenção. Nossa convivência foi muito enriquecedora e agregou valores a mim que vão além dos conhecimentos acadêmicos.

A Vanderlei de Souza Almeida, que foi fundamental na conclusão dessa etapa, pelo seu companheirismo e carinho imensos.

Ao engenheiro Francisco Carlos Albuquerque Madalena por possibilitar a realização desse trabalho e estar sempre aberto a conversas.

Aos professores do CEFET/RJ que contribuíram imensamente para minha formação.

Ao Laboratório de Metalografia e Microscopia do CEFET/RJ pela disponibilidade para a realização das análises necessárias para o desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar o efeito do tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) em revestimentos metálicos com a superliga de níquel INCONEL 625 obtidos por processos ao arco elétrico. O metal de base (substrato) utilizado no presente trabalho foi o aço ASTM A 516 grau 70. Diversos ensaios e análises foram realizados para verificar a qualidade do revestimento depositado e o efeito do tratamento térmico. Todos os processos utilizados apresentaram bons resultados macrográficos para a deposição de revestimentos metálicos. Através das análises micrográficas foi possível verificar a presença de precipitados ao longo do metal de solda para o processo com arame tubular, independentemente do gás de proteção, precipitados esses que não foram observado para o processo eletrodo revestido. Foi possível verificar a existência de zonas parcialmente diluídas ao longo da interface entre o metal de base e o metal de solda em todas as amostras. Uma região predominantemente martensítica foi observada em todas as amostras ao longo do metal de base nas proximidades com o metal de solda. Dentre os procedimentos avaliados, o que se mostrou mais adequado para a deposição de revestimentos foi o por arame tubular com gás de proteção igual a 75% de argônio e 25% de CO₂. O procedimento de reparo em revestimentos por eletrodo revestido mostrou-se adequado. O tratamento térmico de alívio de tensões não mostrou nenhuma mudança significativa nas propriedades dos revestimentos, exceto para a propriedade de resistência à corrosão nos procedimentos de soldagem por eletrodo revestido e arame tubular com 100% de CO₂ como gás de proteção.

Palavras-chave: INCONEL 625; revestimentos metálicos; TTAT; corrosão; eletrodo revestido; reparo; arame tubular.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the influence of post welding heat treatment (PWHT) on welding overlays with the nickel super alloy INCONEL 625 obtained by arc processes. The base metal (substrate) used in the present study was ASTM A 516 Grade 70. Several tests and analysis were conducted to verify the quality of the coating and the influence of the heat treatment. All processes presented good macrographic results for the welding overlay of metallic coatings. Through the micrographic analysis it was possible to verify the presence of precipitates along the weld metal for the FCAW process, for both combinations of shielding gases, which was not observed for the covered electrode (SMAW) process. It was possible to verify the existence of partially scattered zones along the interface between the base metal and the weld metal in all samples. A predominantly martensitic region was observed in all samples along the base metal near the interface with the weld metal. Among the procedures evaluated, the most suitable for the welding overlay of metallic coatings was the FCAW with shielding gas equal to 75% argon and 25% CO₂. The procedure SMAW was considered qualified for repair procedures. The heat treatment showed no significant change in the properties of the coatings, except for the property of corrosion resistance in the welding procedures SMAW and FCAW with 100% CO₂ as shielding gas.

Key-words: INCONEL 625; metallic coatings; PWHT; corrosion; SMAW; repair; FCAW

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1 Motivação | 1 |
| 1.2 Objetivo | 2 |
| 1.3 Justificativa | 2 |
| 1.4 Metodologia e Trabalho Realizado | 3 |
| 1.5 Organização do Trabalho | 3 |
| 2. Revisão Bibliográfica | 5 |
| 2.1 Revestimentos Metálicos | 5 |
| 2.2 Processo de Soldagem por Arame Tubular | 7 |
| 2.3 Processo de Soldagem por Eletrodo Revestido | 8 |
| 2.4 Liga a Base de Níquel INCONEL 625 | 9 |
| 2.4.1 Metalurgia Física da Liga de Níquel INCONEL 625 | 10 |
| 2.5 Soldagem Dissimilar | 13 |
| 2.6 Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT) | 15 |
| 3. Materiais e Métodos | 17 |
| 3.1 Materiais | 17 |
| 3.1.1 Metal de Base | 17 |
| 3.1.2 Metal de Solda | 17 |
| 3.2 Procedimentos de Soldagem | 18 |
| 3.2.1 Arame Tubular | 18 |
| 3.2.2 Eletrodo Revestido | 19 |
| 3.3 Tratamento Térmico Pós-Soldagem | 20 |
| 3.4 Identificação das Amostras | 21 |
| 3.5 Preparação Metalográfica | 22 |
| 3.6 Ensaio Macrográfico | 22 |

| | |
|--|----|
| 3.7 Ensaio Micrográfico | 23 |
| 3.8 Ensaio de Microdureza | 23 |
| 3.9 Ensaio de Dobramento..... | 24 |
| 3.10 Análise Química | 25 |
| 3.11 Ensaio de Corrosão | 25 |
| 4. Resultados..... | 27 |
| 4.1 Análise Macrográfica..... | 27 |
| 4.2 Análise Micrográfica | 28 |
| 4.2.1 Metal de Base | 28 |
| 4.2.2 Metal de Solda..... | 32 |
| 4.3 Ensaio de Microdureza | 33 |
| 4.4 Ensaio de Dobramento..... | 36 |
| 4.5 Análise Química | 36 |
| 4.6 Ensaio de Corrosão | 37 |
| 5. Análise e Discussão dos Resultados..... | 39 |
| 5.1 Análises Macrográficas..... | 39 |
| 5.1.1 Diluição Global | 42 |
| 5.2 Análises Micrográficas | 44 |
| 5.2.1 Metal de Base | 44 |
| 5.2.2 Metal de Solda..... | 45 |
| 5.3 Ensaio de Microdureza | 46 |
| 5.4 Ensaio de Dobramento..... | 46 |
| 5.5 Análise Química | 47 |
| 5.6 Ensaio de Corrosão | 49 |
| 5.7 Considerações Finais | 49 |
| 6. Conclusão | 51 |
| 7. Sugestões Para Trabalhos Futuros..... | 53 |

Referências Bibliográficas.....54

ANEXO I.....57

ANEXO II.....60

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Exemplo de um vaso de pressão [1]..... | 2 |
| Figura 2: Revestimento por explosão [7] | 6 |
| Figura 3: Revestimento de soldagem por deposição através do processo arame tubular..... | 6 |
| Figura 4: Processo de soldagem com arame tubular e gás de proteção [10]..... | 7 |
| Figura 5: Perfil do cordão de solda de acordo com o gás de proteção [11]..... | 8 |
| Figura 6: Solda elétrica por eletrodo revestido [12] | 9 |
| Figura 7: Exemplo de estrutura do tipo “praia” [17] | 14 |
| Figura 8: Exemplo de estrutura do tipo “baía” [17] | 15 |
| Figura 9: Exemplo de estrutura do tipo “ilha” [17] | 15 |
| Figura 10: Esquema da Soldagem por Arame Tubular | 18 |
| Figura 11: Esquema da Soldagem com Eletrodo Revestido..... | 20 |
| Figura 12: Corpo de prova segundo ASME IX Parte QW-162.5(d) [20] | 24 |
| Figura 13: Esquema para análise química | 25 |
| Figura 14: Macrografia referente às amostras A e A1..... | 27 |
| Figura 15: Macrografia referente às amostras B e B1 | 27 |
| Figura 16: Macrografia referente às amostras D, D1, DR e DR1 | 27 |
| Figura 17: Micrografias ópticas das zonas parcialmente diluídas. Aumento 100x. (a) amostra A; (b) amostra A1 | 28 |
| Figura 18: Micrografias ópticas das zonas parcialmente diluídas. Aumento 100x. (a) amostra B; (b) amostra B1 | 28 |
| Figura 19: Micrografias ópticas das zonas parcialmente diluídas. Aumento 100x. (a) amostra D; (b) amostra D1 | 29 |
| Figura 20: Micrografias ópticas das zonas parcialmente diluídas. Aumento 100x. (a) amostra Dr; (b) amostra Dr1 | 29 |
| Figura 21: Martensita próxima à interface. Aumento 500x. (a) amostra A; (b) amostra A1 ... | 30 |
| Figura 22: Martensita próxima à interface. Aumento 500x. (a) amostra B; (b) amostra B1.... | 30 |
| Figura 23: Martensita próxima à interface. Aumento 500x. (a) amostra D; (b) amostra D1 ... | 30 |
| Figura 24: Martensita próxima à interface. Aumento 500x. (a) amostra Dr; (b) amostra Dr1 | 31 |
| Figura 25: Estrutura original do metal de base ASTM A516 Gr.70. Aumento 500x..... | 31 |
| Figura 26: Transformação da microestrutura do metal de base. Aumento 500x..... | 32 |

| | |
|--|----|
| Figura 27: Fases formadas ao longo da microestrutura do metal de solda. Microscopia óptica, Aumento 500x. | 32 |
| Figura 28: Fases formadas no processo de soldagem por arame tubular. MEV, Aumento 800x. | 33 |
| Figura 29: Identação de microdureza na amostra B | 33 |
| Figura 30: Gráfico comparativo de microdureza entre as amostras A e A1..... | 35 |
| Figura 31: Gráfico comparativo de microdureza entre as amostras B e B1 | 35 |
| Figura 32: Gráfico comparativo de microdureza entre as amostras D e D1..... | 35 |
| Figura 33: Gráfico comparativo de microdureza entre as amostras Dr e Dr1 | 36 |
| Figura 34: Corpos de prova resultantes do ensaio de dobramento | 36 |
| Figura 35: Profundidade de penetração com arame tubular. (a) amostra A; (b) amostra B..... | 39 |
| Figura 36: Zona termicamente afetada em vermelho (amostra A)..... | 40 |
| Figura 37: Zona termicamente afetada em vermelho (amostra B) | 40 |
| Figura 38: Zona termicamente afetada em vermelho (amostra D)..... | 40 |
| Figura 39: Comparação entre as extensões da ZTA nas amostras A, B e D | 41 |
| Figura 40: Parâmetros para cálculo de diluição amostra A..... | 43 |
| Figura 41: Parâmetros para cálculo de diluição amostra B | 43 |
| Figura 42: Parâmetros para cálculo de diluição amostra D | 43 |
| Figura 43: Fases presentes em ligas à base de níquel [16] | 45 |
| Figura 44: Variação do teor de ferro com o afastamento da linha de fusão | 47 |
| Figura 45: Variação do teor de níquel com o afastamento da linha de fusão..... | 48 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Fases que podem estar presentes em ligas de níquel [16] | 11 |
| Tabela 2: Composição Química do Aço ASTM A516 Gr 70 | 17 |
| Tabela 3: Composição Química do Metal de Adição..... | 18 |
| Tabela 4: Parâmetros de soldagem por arame tubular..... | 19 |
| Tabela 5: Parâmetros de soldagem por eletrodo revestido | 20 |
| Tabela 6: Parâmetros do Tratamento Térmico | 21 |
| Tabela 7: Identificação das amostras..... | 21 |
| Tabela 8: Valores de microdureza para as amostras analisadas | 34 |
| Tabela 9: Principais elementos presentes na análise química | 37 |
| Tabela 10: Resultados do ensaio de corrosão | 37 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI – American Iron and Steel Institute

API – American Petroleum Institute

ASME – American Society of Mechanical Engineers

ASTM – American Society for Testing and Materials

CCC – Cúbica de Corpo Centrado

CFC – Cúbica de Face Centrada

EDS – Electron Diffraction Scanning

FCAW – Flux-Cored Arc Welding

ISO – International Organization for Standardization

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

PREN – Pitting Resistance Equivalent Number

ZPD – Zona Parcialmente Diluída

ZTA – Zona Termicamente Afetada

Capítulo 01

Introdução

O desenvolvimento da indústria do petróleo fez crescer a necessidade de novos materiais para atender às condições cada vez mais severas de solicitação. Maiores profundidades de exploração exigem materiais cada vez mais resistentes mecanicamente e, os meios cada vez mais agressivos, com fluidos corrosivos, impulsionam as pesquisas por novos materiais que resistam a essas específicas aplicações.

Dentro desse contexto a técnica de revestimento por soldagem tornou-se amplamente utilizada quando há a necessidade de prover uma maior resistência à corrosão ou oxidação a um determinado componente. Esse processo consiste em utilizar um consumível de soldagem que supra as necessidades químicas da aplicação e, através de um procedimento de soldagem, depositar esse material sobre o metal base que cumprirá os requisitos mecânicos da solicitação.

1.1 Motivação

Vasos de pressão (Figura 1) são equipamentos vastamente utilizados na indústria e, têm como finalidade operar sob elevadas pressões e/ou temperaturas [1]. São reservatórios que podem ser destinados ao armazenamento ou processamento de líquidos e gases. Por ter as funções citadas, vasos de pressão precisam ser fabricados com materiais que apresentem elevada resistência mecânica e boa tenacidade. Além disso, nos casos em que o fluido processado ou armazenado for corrosivo é necessário que esse material também apresente uma boa resistência à corrosão.

Como a soldagem de aços inoxidáveis duplex, materiais esses que conseguem aliar excelentes propriedades mecânicas e químicas, não se dá de forma simples devido à presença de duas fases em sua composição [2], a forma mais usual e mais favorável economicamente de se obter um componente com maior resistência à corrosão é realizando um revestimento por soldagem, onde um depósito de material é feito através de um determinado processo de soldagem. O material a ser depositado, o consumível de soldagem, deve ser escolhido de forma a garantir as propriedades químicas necessárias para a aplicação. Além disso, adotando essa técnica é possível utilizar uma menor quantidade de material nobre na construção desses componentes.



Figura 1: Exemplo de um vaso de pressão [1]

Um material comumente utilizado em revestimentos para a indústria petroquímica é a liga Ni-Cr-Mo denominada INCONEL 625, uma liga de níquel-cromo com adição de molibdênio e nióbio. Essa liga além de apresentar excelente resistência à corrosão e oxidação em meios muito agressivos, apresenta também uma elevada resistência mecânica [3].

Devido à sua ampla aplicação, estudos referentes a essa liga em particular são de grande utilidade, pois novas descobertas e novas análises podem trazer benefícios para a indústria e para o desenvolvimento de novas técnicas e novos materiais.

1.2 Objetivo

O principal objetivo do presente trabalho é avaliar o efeito do tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) nas propriedades microestruturais dos revestimentos com a liga INCONEL 625 e, concomitantemente, avaliar o desempenho de revestimentos soldados pelo processo eletrodo revestido, tratados termicamente, com a finalidade da execução de reparos.

1.3 Justificativa

A realização desse trabalho se dá de forma a complementar os estudos sobre revestimentos com ligas INCONEL 625. Muito já foi visto sobre esse tipo de revestimento e muitos trabalhos já foram feitos com o intuito de validar os procedimentos de soldagem a serem realizados pela indústria. Porém, os estudos quanto ao efeito do tratamento térmico de alívio de tensões sobre esse revestimento ainda são escassos.

Pretende-se então, avaliar os efeitos do tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) nas amostras, sobre a propriedade de resistência à corrosão e avaliação de

microdureza, a fim de obter maiores informações para melhor compreender esse efeito de acordo com as condições experimentais utilizadas.

1.4 Metodologia e Trabalho Realizado

A metodologia utilizada nesse trabalho pode ser descrita em cinco etapas. Primeiramente foi realizada uma revisão bibliográfica a fim de conhecer os trabalhos já realizados e aprofundar os conhecimentos na área proposta. Dessa maneira, pesquisou-se sobre a necessidade da realização de revestimentos e sobre as ligas mais utilizadas.

Tratando-se de um trabalho experimental, em seguida foi necessário obter o metal base e o consumível de soldagem para que o revestimento fosse realizado. Após isso, realizou-se um tratamento térmico pós-soldagem e a amostra foi preparada, sendo cortada, lixada e polida para posteriormente ser atacada quimicamente com os reagentes cabíveis.

Análises macrográficas para a detecção de defeitos na soldagem foram realizadas e, em seguida, verificou-se as micrografias obtidas para a definição da microestrutura e avaliação das possíveis propriedades que podem ser esperadas através do resultado encontrado.

Considerando que as soldagens de revestimento são soldagens do tipo dissimilar, onde o metal de base e o metal de adição são diferentes, é necessário avaliar a região de encontro desses dois materiais. Essa região é conhecida por diferentes nomes, como zonas não misturadas, zonas de transição, zonas empobrecidas de metal de adição, zonas duras, zona parcialmente diluída, etc., variando de autor para autor [4]. Nesse trabalho, o termo zona parcialmente diluída ou ZPD será utilizado para designar essa região ao longo da linha de fusão onde a composição entre o metal de solda e do substrato é intermediária.

Finalmente, de posse dos resultados, será possível avaliar os efeitos do tratamento térmico pós-soldagem e as consequências de sua realização no revestimento estudado.

1.5 Organização do Trabalho

O presente trabalho está organizado em sete capítulos. O primeiro capítulo traz a introdução ao tema, explicitando a justificativa para a escolha do mesmo e os objetivos que se deseja atingir com o estudo.

O segundo capítulo trata da revisão bibliográfica realizada para o desenvolvimento e conclusão do trabalho. Nele é possível encontrar maiores informações sobre a liga INCONEL 625 e sobre os processos de soldagem avaliados.

O terceiro capítulo, intitulado “Materiais e Métodos” descreve os materiais utilizados no trabalho e como os ensaios e análises foram realizados a fim de se obter o resultado final.

No quarto capítulo há a apresentação dos resultados obtidos como, por exemplo, as análises realizadas com microscopia eletrônica de varredura e análises químicas das amostras.

O quinto capítulo traz as análises dos resultados, comparando-os com resultados presentes na literatura e com as normas utilizadas como critério de aceitação.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões obtidas através do estudo realizado, comparando as amostras com o tratamento térmico de alívio de tensões a estudos posteriores das mesmas amostras sem esse tratamento.

O trabalho é concluído com o sétimo e último capítulo fornecendo sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 02

Revisão Bibliográfica

Este capítulo tem como principal objetivo definir os conceitos básicos dos processos de soldagem utilizados na realização desse trabalho, bem como discorrer sobre a liga INCONEL 625 e suas principais características. Além disso, busca-se comentar sobre o tratamento térmico de alívio de tensões e sobre a soldagem dissimilar e suas zonas de interesse.

2.1 Revestimentos Metálicos

Revestimentos metálicos consistem na aplicação de uma camada de material sobre um substrato com a finalidade de alterar as propriedades desse último, otimizando as características finais do componente revestido. O principal desafio desse processo é chegar a um resultado que atenda às solicitações sem aumentar o custo final do produto. Alguns componentes necessitam ter a totalidade da sua superfície revestida enquanto outros necessitam de revestimento apenas em sua parte mais crítica, onde a solicitação será mais severa. Dentre os diferentes tipos de deposição de revestimentos encontrados na indústria, os mais comuns são o revestimento por laminação, revestimento por explosão e revestimento por “weld overlay”, ou soldagem por deposição [5].

O revestimento por laminação se dá através da passagem de camadas de materiais de base e de revestimento em um laminador convencional a quente. Esse processo reduz a espessura e faz a ligação metalúrgica entre o aço base e o material de revestimento. Nesse processo há a necessidade de uma cuidadosa preparação da superfície [6].

O revestimento por explosão, Figura 2, é um processo de soldagem onde a união é feita entre duas chapas metálicas. Nesse processo não há alteração de fase na interface entre os dois materiais e a ligação é decorrente de forças entre os átomos das duas superfícies. A energia de uma carga explosiva é transformada em energia cinética e é aplicada à chapa considerada como revestimento. O revestimento adquire uma velocidade e ao atingir a chapa a ser revestida pressões são geradas e os óxidos que inibiriam a soldagem são eliminados, causando a fusão das chapas pelas forças inter-atômicas [7].

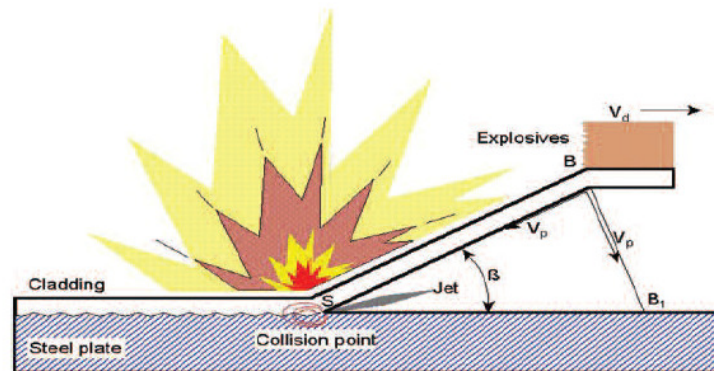


Figura 2: Revestimento por explosão [7]

Por fim, um dos meios mais comuns de se realizar um revestimento metálico, que é também o processo que será estudado ao longo desse trabalho, consiste no “weld overlay” ou revestimento de soldagem por deposição (Figura 3). Esse processo consiste em realizar um depósito do revestimento através de um procedimento de soldagem a ser escolhido, utilizando para isso um consumível de soldagem. A seleção do procedimento de soldagem é dependente de diversos fatores como o tamanho da área a ser revestida, o acesso a essa área, o tipo e espessura do revestimento, a composição química, entre outros. Uma das vantagens do revestimento por soldagem é que na maioria das vezes a resistência ao desgaste dos consumíveis desse processo é bem maior que a dos revestimentos sólidos ou forjados. Além disso, a versatilidade desse processo também é muito vantajosa, pois independentemente do tamanho ou forma da região a ser revestida, sempre haverá um processo de soldagem que poderá ser aplicado [8].



Figura 3: Revestimento de soldagem por deposição através do processo arame tubular

2.2 Processo de Soldagem por Arame Tubular

O processo de soldagem por arame tubular é um processo ao arco elétrico também conhecido como soldagem a arco com eletrodo tubular (FCAW – Flux Cored Arc Welding). Da mesma forma que outros processos ao arco elétrico, a união dos metais se dá pelo aquecimento de ambas as partes por um arco entre o arame e a peça, arame esse que é alimentado automaticamente [9].

Esse processo apresenta grande similaridade ao processo MIG/MAG, tendo como principal diferença a presença de um fluxo em forma de pó que auxilia na estabilidade e proteção do arco e que pode conter elementos de liga que trarão alterações às propriedades do metal de base. Existem nesse processo duas variações: a primeira é a do arame autoprottegido, onde os componentes do fluxo são suficientes para promover a proteção do arco e da poça de fusão. A segunda variação (Figura 4) é quando o fluxo não é suficiente para fornecer essa proteção e uma proteção gasosa é requerida. Para a segunda variação do processo, diferentes gases ativos podem ser utilizados, sendo os mais comuns a mistura de argônio com uma parcela de dióxido de carbono ou dióxido de carbono puro [10].

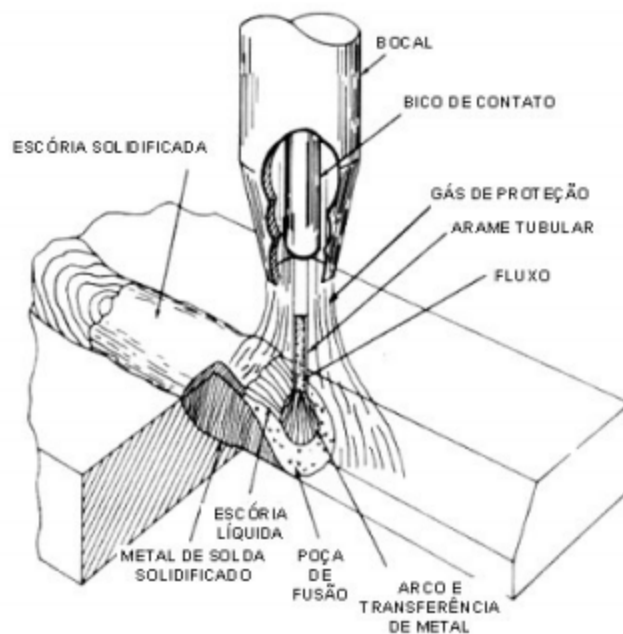


Figura 4: Processo de soldagem com arame tubular e gás de proteção [10]

A utilização do dióxido de carbono puro como gás de proteção nesse processo de soldagem traz como vantagens o baixo custo e a alta penetração. Esse gás é geralmente

utilizado em transferências do tipo globular, mas alguns tipos de fluxo produzem também transferência do tipo spray [11].

Já a mistura de gases (Figura 5) como, por exemplo, dióxido de carbono e argônio pode aliar efeitos benéficos de ambos os gases. A presença de argônio diminui a oxidação quando comparado à proteção com 100% de dióxido de carbono. A mistura mais utilizada nesse processo de soldagem é a de 75% de argônio com 25% de dióxido de carbono, pois essa mistura confere ao metal de solda alto limite de escoamento e alta resistência à tração comparada ao depósito realizado com 100% de dióxido de carbono [11].

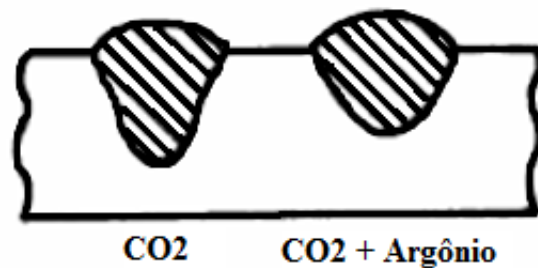


Figura 5: Perfil do cordão de solda de acordo com o gás de proteção [11]

A soldagem por arame tubular pode ser utilizada em diversas aplicações e em uma ampla variedade de materiais e espessuras. Esse processo permite a soldagem inclusive em campo, pois o fluxo fornece proteção até para altas correntes de ar [9].

Entre as vantagens desse processo estão a elevada produtividade devido à alta taxa de deposição, a alta qualidade e aparência da solda, o custo relativamente baixo e a possibilidade da soldagem em todas as posições [9].

Com relação às limitações pode-se falar sobre a necessidade da limpeza após a soldagem e sobre a elevada quantidade de fumos que pode ser gerada no processo [9].

2.3 Processo de Soldagem por Eletrodo Revestido

A solda elétrica por eletrodo revestido é um processo de soldagem ao arco elétrico que consiste na abertura e manutenção de um arco entre o eletrodo e a peça a ser soldada, Figura 6. O eletrodo é composto de um núcleo metálico revestido por uma camada de minerais. O núcleo metálico, também chamado de alma do eletrodo, ao mesmo tempo em que conduz a corrente elétrica responsável pela fusão dos materiais, serve de metal de adição. O revestimento que é composto de minerais gera escória e gases que protegem a região soldada [12].

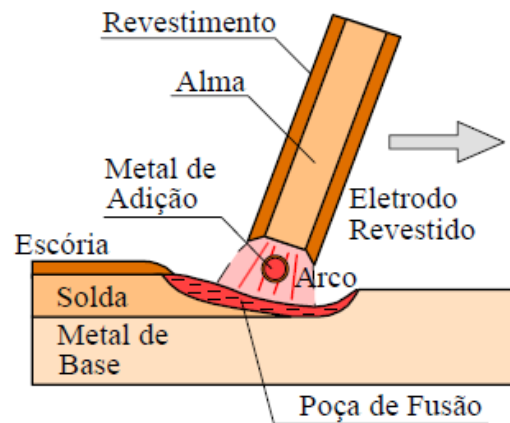


Figura 6: Solda elétrica por eletrodo revestido [12]

A soldagem nesse processo é realizada manualmente e o arco é iniciado tocando-se o eletrodo na peça a ser soldada. O soldador controla o comprimento do arco e a poça de fusão. Quando o eletrodo é quase todo consumido, o processo deve ser interrompido para que seja feita a remoção da escória e o eletrodo substituído, para que a solda seja continuada [12].

O revestimento do eletrodo tem papel importante nesse processo. Dentre suas funções principais estão a proteção do arco contra o oxigênio e nitrogênio do ar através dos gases gerados de sua decomposição, a estabilização do arco e a introdução de elementos de liga no material depositado com a finalidade de desoxidar o metal de solda. Os revestimentos podem ser oxidantes, básicos, ácidos, rúflicos e celulósicos [12].

Dentre as vantagens desse processo estão a soldagem em locais internos e externos, a facilidade de acesso a qualquer geometria e tipo de junta, uma vez que os equipamentos são muito portáteis e a possibilidade de trabalho em campo, uma vez que é pouco sensível a presença de correntes de ar. Isso faz que com bastante frequência esse tipo de soldagem ao arco seja utilizado em situações de reparo e, por esse motivo, o estudo desse processo se mostra tão interessante [12].

Quanto às limitações do processo, pode-se citar o comprimento fixo dos eletrodos que requer reposição manual, a necessidade de remoção da escória o que diminui a produtividade e a necessidade de operadores com grande habilidade manual [12].

2.4 Liga a Base de Níquel INCONEL 625

Superligas à base de níquel representam uma importante família de materiais com uma ampla aplicação na área de engenharia. Tais ligas possuem uma excelente resistência à

oxidação, elevada resistência mecânica e elevada resistência à corrosão em diversos meios. A resistência à corrosão é obtida de forma similar aos aços inoxidáveis, onde elementos de liga formam uma película apassivadora protegendo a liga do meio corrosivo [13].

Dentre as possíveis composições comerciais de ligas de níquel destacam-se as ligas binárias como Ni-Cu, Ni-Mo, ligas ternárias como Ni-Cr-Fe e Ni-Cr-Mo e as ligas complexas como as Ni-Fe-Mo-Cu, com a possibilidade de outros elementos adicionais [14].

A superliga de níquel INCONEL 625 se enquadra na família de ligas ternárias Ni-Cr-Mo e possui sua dureza e excelentes propriedades metalúrgicas devido ao efeito da adição de molibdênio e nióbio em sua matriz [15]. Foi desenvolvida em 1964 inicialmente com a finalidade de ser utilizada em operações em altas temperaturas, mas sua elevada resistência à corrosão possibilitou sua aplicação em outras diversas áreas. Os teores de ferro e carbono dessa liga são mantidos em níveis baixos para que o efeito de precipitação nos contornos de grão não ocorra, evitando problemas de corrosão localizada [13].

No entanto, as propriedades descritas anteriormente são válidas quando se trata do material em seu estado solubilizado. Quando se trata do material depositado por soldagem, sua resistência à corrosão pode ser afetada pela segregação de elementos durante a solidificação. Além disso, em soldagens dissimilares a diluição dessa liga com o metal base pode também afetar amplamente seu comportamento [13].

2.4.1 Metalurgia Física da Liga de Níquel INCONEL 625

As ligas de níquel possuem uma única estrutura cristalina até seu ponto de fusão. Sendo assim, essas ligas não mudam de fase e não é possível refinar seu tamanho de grão apenas pelo tratamento térmico. Para que esse refino seja feito é necessário executar algum tipo de trabalho mecânico como laminação ou forjamento, seguido de um tratamento térmico de recozimento [16].

A microestrutura dessas ligas consiste de uma matriz austenítica com a presença de algumas outras fases particulares. Algumas dessas fases podem ser indesejáveis e são formadas a partir da variação de composição, do processamento ou da exposição do material a altas temperaturas. As fases que podem estar presentes estão representadas na Tabela 1.

Tabela 1: Fases que podem estar presentes em ligas de níquel [16]

| Fase | Estrutura | Parâmetro do Reticulado | Fórmula |
|--------------------------------|--------------|--|---|
| γ' | CFC | 0,33561 Ni ₃ Al 0,3568 Ni ₃ (Al _{0,5} ,Ti _{0,5}) | Ni ₃ Al Ni ₃ (Al,Ti) |
| η | HC | a ₀ =0,5093 c ₀ =0,8276 | Ni ₃ Ti |
| γ'' | TCC | a ₀ =0,3624 | Ni ₃ Nb |
| δ | Ortorrômbica | a ₀ =0,5106-0,511 b ₀ =0,421-0,4251 c ₀ =0,452-0,4556 | Ni ₃ Nb |
| MC | CFC | a ₀ =0,430-0,470 | TiC; NbC; HfC |
| M ₂₃ C ₆ | CCC | a ₀ =1,050-1,070 | (Cr,Fe,W,Mo) ₂₃ C |
| M ₆ C | CCC | a ₀ =1,085-1,175 | (Fe,Mo,W,Nb,Ta) ₃ C |
| M ₇ C ₃ | Hexagonal | a ₀ =1,398 c ₀ =0,4223 | Cr ₇ C ₃ |
| MN | Cúbica | a ₀ =0,4240 | (Ti,Nb,Zr)N |
| μ | Romboédrica | a ₀ 0,475 c ₀ =2,577 | (Fe,Co) ₇ (Mo,W) ₆ |
| Laves | Hexagonal | a ₀ =0,475-0,795 c ₀ =0,770-0,815 | Fe ₂ (Nb,Ti,Mo,Ta) |
| σ | Tetragonal | a ₀ =0,880-0,910 c ₀ =0,450-0,480 | FeCrMoNi |

- Fase Gama (γ)

É uma fase contínua na matriz das ligas a base de níquel e pode ser endurecida por solução sólida adicionando-se elementos como Cr, Mo, entre outros [16].

- Fase Gama Linha (γ')

Pode precipitar nas ligas através de tratamentos térmicos de endurecimento. É uma fase do tipo CFC [16].

- Fase Gama Duas Linhas (γ'')

É um precipitado do tipo TCC. É uma fase metaestável que tem como catalisador o Fe. O seu crescimento causa uma perda de resistência na liga e sua identificação não é feita de forma simples, sendo necessário a utilização de técnicas especiais, como, por exemplo, a utilização de um microscópio eletrônico de transmissão [16].

- Fase Eta (η)

Possui uma estrutura cristalina hexagonal. Pode se formar em ligas de níquel com alta razão de titânio e alumínio que tenham sido expostas a altas temperaturas. Essa fase não solubiliza outros elementos e cresce rapidamente. Ela pode surgir na forma de um constituinte celular ou em placas na forma de agulhas de Widmanstätten. Ambas as formas afetam a tenacidade do material [16].

- Fase Delta (δ)

É uma fase ortorrômbica formada a partir da fase γ ” quando submetidas a altas temperaturas [16].

- Carbonetos

Formam-se no interior e no contorno de grão. Como são mais duros e frágeis, afetam a resistência a altas temperaturas e as propriedades de fluência da liga. Apesar disso, há uma proporção ótima entre o número de carbonetos e a sua distribuição ao longo do contorno de grão. Os carbonetos mais encontrados em ligas à base de níquel são os MC, $M_{23}C_6$, e M_6C , onde M representa um metal [16].

- Fase Sigma (σ)

É uma fase tetragonal e apresenta algumas morfologias que podem ser bastante prejudiciais para as propriedades das ligas, principalmente quando são encontradas na forma de placas ou nos contornos de grão. O material que apresenta a fase sigma pode fraturar fragilmente em baixas temperaturas e, em altas temperaturas, a presença dessa fase é prejudicial, pois acarreta uma perda de elementos de liga na matriz [16].

- Fase Laves

Assim como a fase sigma, a fase laves é uma fase de arranjo topologicamente fechado e apresenta estrutura hexagonal compacta. A presença em grande quantidade dessa fase prejudica a ductilidade em baixa temperatura, porém as propriedades de fluência não são afetadas [16].

- Fase Mu (μ)

É uma fase romboédrica que em geral tem pouca influência sobre as propriedades da liga. Ela se precipita de forma grosseira e irregular na forma de placas de Widmanstätten [16].

Os procedimentos de soldagem para ligas à base de níquel são similares aos utilizados para os aços inoxidáveis austeníticos, devendo-se apenas tomar maiores cuidados na deposição da solda, pois o metal da poça de fusão é mais viscoso. Na soldagem do Inconel 625 todos os processos de soldagem ao arco podem ser utilizados. É necessário, porém, ser cauteloso com o aporte térmico a ser utilizado, pois um elevado aporte térmico pode produzir uma excessiva precipitação de carbonetos ou outros fenômenos que podem levar à formação de trincas [16].

Na soldagem com ligas à base de níquel pode-se observar que a solda é mais sensível que o metal de base e, isso ocorre porque o material, nessa situação, é exposto a altas temperaturas. Essa exposição ocasiona a segregação de elementos de liga na estrutura fundida da solda, o que pode ser prejudicial para o resultado da junta soldada. Isso pode ser corrigido com o uso de consumíveis que compensarão esse efeito [16].

2.5 Soldagem Dissimilar

O conceito de soldagem dissimilar consiste na coalescência de dois materiais de composição e propriedades distintas, realizada através de um processo de soldagem a ser definido. É possível a utilização de qualquer processo de soldagem por fusão na soldagem dissimilar. Esse procedimento é utilizado principalmente na união de aços carbonos a aços inoxidáveis e, na união de aços carbono com outras ligas, com a finalidade principal de se obter um componente final que apresente um misto das melhores características e propriedades de cada material [17].

O comportamento de solidificação de soldas dissimilares pode ser bastante diferente do observado em soldas homogêneas ou similares. Isso fica claro com a formação de uma região de grande interesse de estudo chamada de zona parcialmente diluída ou ZPD. Essa região se forma ao longo da linha de fusão entre os dois materiais distintos e apresenta uma composição intermediária entre eles. Para estimar a composição química dessa região e da solda dissimilar é necessário determinar e conhecer a diluição do processo adotado. A diluição pode ser descrita como a alteração na composição do metal de adição depositado devido à sua mistura com o metal base. Altas porcentagens de diluição podem ocasionar

defeitos na solda, uma vez que estruturas susceptíveis ao endurecimento podem se formar, fragilizando a região [17].

As zonas parcialmente diluídas (ZPDs) são zonas fragilizadas que podem tornar a solda susceptível a ataques localizados de corrosão, fragilização por hidrogênio e ruptura por fadiga. A espessura das ZPDs pode ser prevista em função dos parâmetros de soldagem utilizados e é influenciada principalmente pela convecção da poça de fusão. O formato dessas zonas pode ser dividido em três estruturas distintas: estruturas de praias, estruturas de baías e estruturas de ilhas [17].

As estruturas de praias são compostas por faixas finas e estreitas ao longo da linha de fusão, como pode ser observado na Figura 7. São descontínuas, podendo conter partes internas ou externas da linha de fusão. A dureza dessa região pode variar e a sua medição se torna muito difícil devido à sua pequena espessura [17].

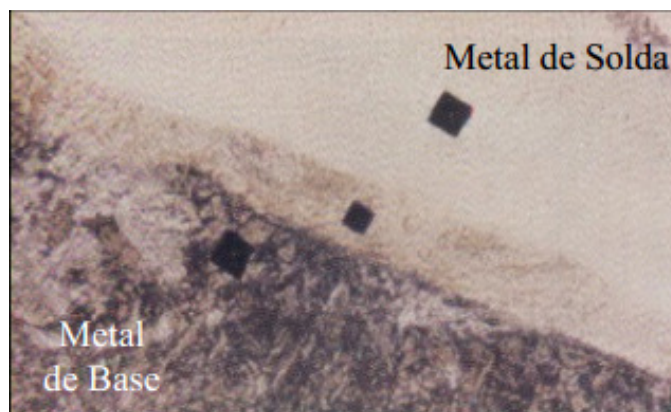


Figura 7: Exemplo de estrutura do tipo “praia” [17]

As estruturas do tipo baía são áreas parcialmente circundadas pelo metal de base (Figura 8). Elas tendem a ser ligeiramente mais largas que as do tipo praias e geralmente são acompanhadas por elas, entendendo-se para um ou ambos os lados. A dureza é mais facilmente medida nessa estrutura e por isso, muitas vezes os valores são maiores quando comparados às praias [17].

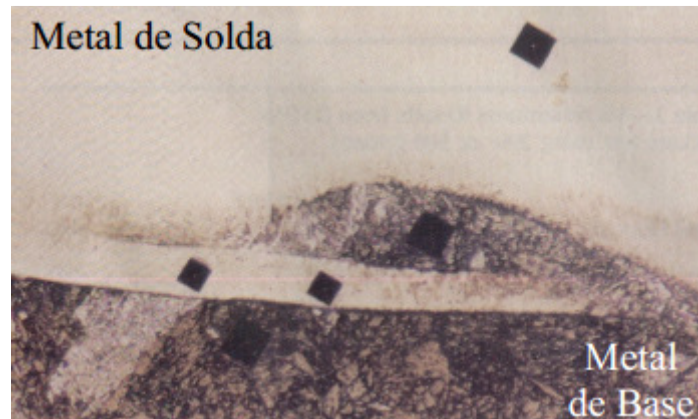


Figura 8: Exemplo de estrutura do tipo “baía” [17]

Finalmente, outro tipo de estrutura que pode ser encontrada ao longo da ZPD é a do tipo “ilha”. Essas são regiões completamente envolvidas pelo metal de solda, grandes e abauladas (Figura 9). São muito maiores e menos comuns que os outros tipos citados anteriormente e ocorrem principalmente nos passes de raiz [17].



Figura 9: Exemplo de estrutura do tipo “ilha” [17]

Qualquer um desses formatos de ZPD's podem estar presentes em uma junta soldada. Para a clara visualização dessas zonas no microscópio ótico, deve-se realizar um ataque químico nas amostras a serem analisadas [17].

2.6 Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT)

A operação de soldagem confere à junta soldada tensões residuais provenientes do fenômeno de dilatação térmica, causada pelo calor gerado durante o processo. A variação de temperatura entre a zona fundida e o metal de base gera tensões de contração e dilatação e, se a resultante dessas tensões não é nula, tensões residuais são geradas. Essas tensões podem

gerar distorções e falhas prematuras na peça. A fim de minimizar essas tensões, um tratamento térmico de alívio de tensões pode ser realizado [18].

Esse tratamento térmico consiste no aquecimento da peça a uma temperatura inferior à temperatura crítica de transformação do material, ou seja, antes que alguma mudança de fase ocorra. A peça então é mantida nessa temperatura durante algum tempo e em seguida é resfriada uniformemente. Os principais objetivos desse tratamento térmico são o aumento da ductilidade, a diminuição da dureza da zona fundida e da zona termicamente afetada, redução de empeno, aumento da resistência à fadiga e aumento da resistência à corrosão sob tensão [18].

O tratamento térmico de alívio de tensões se faz necessário principalmente na soldagem de aços com elevado teor de elementos de liga, em peças com elevadas espessuras e em componentes submetidos a carregamentos cíclicos [18].

Os parâmetros desse tratamento são definidos de acordo com normas internacionais e são baseados nas dimensões da peça a ser tratada ou no consumível de soldagem utilizado. Esses parâmetros são: taxa de aquecimento, tempo e a temperatura de patamar e a taxa de resfriamento [18].

O tratamento térmico pós-soldagem em juntas dissimilares deve sempre ser evitado. Porém, em alguns casos, os tratamentos de alívio de tensões e revenido são requeridos. Os tratamentos devem ser adaptados conforme as exigências do aço baixa liga que compõe a junta [17].

A realização do tratamento térmico pós-soldagem (TTPS) pode trazer malefícios à junta soldada, como por exemplo, fragilização do metal de solda devido à precipitação de novas fases, a formação de uma estrutura grosseira, entre outros. O enriquecimento em carbono no metal de solda austenítico devido à difusão de carbono proveniente do aço baixa liga também é maléfico e pode causar perda em resistência e em tenacidade no lado ferrítico da junta. É necessário então, avaliar os efeitos desse tratamento para derrogar se é possível realizá-lo sem comprometer a estrutura ou se seu uso deve ser coibido [17].

Capítulo 03

Materiais e Métodos

A descrição da metodologia utilizada em trabalhos experimentais é de suma importância, entre outros fatores, para garantir a repetibilidade dos experimentos. No presente capítulo serão apresentados com detalhes os materiais utilizados, os processos e os ensaios realizados para a avaliação das condições propostas.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados no presente trabalho podem ser divididos em dois itens, metal de base e metal de solda. Ambos estão descritos abaixo, seguidos da respectiva composição química informada pelo fabricante.

3.1.1 Metal de Base

Como metal de base o aço ASTM A516 Gr 70 foi adotado. De acordo com a norma ASTM A516 [19] esse é um aço destinado ao emprego na construção de vasos de pressão soldados onde a melhora da ductilidade é importante. Esse aço possui limite de resistência à tração de 485 a 620 MPa.

A composição química desse aço informada pelo fabricante pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 2: Composição Química do Aço ASTM A516 Gr 70

| Elemento | Fe | C | Ni | Cr | Mo | Mn | Al | V | Cu | Si |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| % em peso | Bal. | 0,15 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,95 | 0,02 | 0,03 | 0,4 | 0,2 |

3.1.2 Metal de Solda

A liga de níquel-cromo-molibdênio INCONEL 625 foi utilizada como material de adição nas amostras estudadas. Para a soldagem através do processo arame tubular foi utilizado o arame da marca Böhler do tipo Nibas 625 PW-FD de acordo com a AWS A5.11, ENiCrMo3T1-4. A bitola do arame utilizado foi de Ø 1,2 mm para todas as camadas. A composição química do arame indicada pelo fabricante está apresentada na Tabela 3.

Para a soldagem através do processo eletrodo revestido foi utilizado o metal de adição ENiCrMo-3 de acordo com a AWS A5.11 da marca Böhler tipo 6222-Mo. Esse é um eletrodo à base de níquel com revestimento básico. Para a primeira camada de deposição foram utilizados eletrodos com a bitola de Ø 4,0 mm e, eletrodos com bitola de Ø 3,2 mm foram utilizados para as demais camadas. A composição química do eletrodo utilizado está indicada na Tabela 3.

Tabela 3: Composição Química do Metal de Adição

| Elemento (% em peso) | Ni | Cr | Mo | Nb | Mn | Si | Fe | C |
|----------------------|------|------|-----|-----|-----|------|------|-------|
| Arame ENiCrMo3T1-4 | Bal. | 21,0 | 8,5 | 3,3 | 0,4 | 0,4 | <1,0 | 0,05 |
| Eletrodo ENiCrMo-3 | Bal. | 22,0 | 9,0 | 3,3 | 0,6 | <0,5 | 3,0 | <0,04 |

3.2 Procedimentos de Soldagem

Nesse trabalho dois diferentes procedimentos de soldagem foram utilizados nas oito amostras analisadas. Empregou-se o processo de soldagem por arame tubular em quatro amostras e, o procedimento através de eletrodo revestido foi utilizado nas quatro amostras restantes. Cada um dos procedimentos está descrito de maneira mais detalhada abaixo.

3.2.1 Arame Tubular

A soldagem através de arame tubular foi realizada depositando-se o metal de adição, o arame ENiCrMo3T1-4, sobre uma placa de aço ASTM A516 Gr.70 de dimensões 12,5 x 200 x 250 mm na posição plana de soldagem. O revestimento para esse procedimento de soldagem teve como dimensões finais 100 x 250 mm, com passes depositados em três camadas, a primeira com 15 passes, a segunda com 13 e a última com 12 passes com 50% de sobreposição cada. O detalhe da junta pode ser observado na Figura 10.

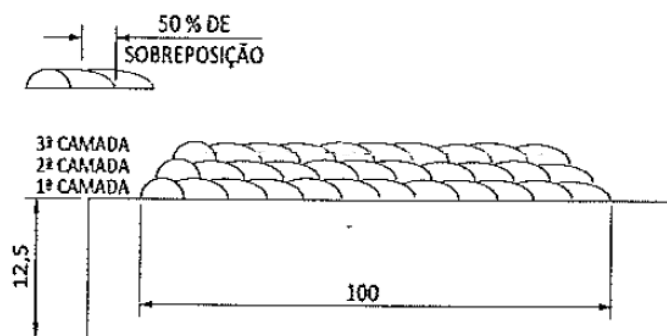


Figura 10: Esquema da Soldagem por Arame Tubular

A soldagem foi realizada utilizando-se corrente contínua com polaridade positiva de 160 a 170 A na primeira camada, 170 a 220 A para as demais camadas e tensão de 24 a 30 V. A transferência se deu de forma globular e a velocidade de avanço apresentou uma variação de 38 a 45 cm/min. Para esse procedimento foi necessário um pré-aquecimento de 15°C e a temperatura interpasse não ultrapassou 150°C.

Duas diferentes composições de gás de proteção foram utilizadas. Duas amostras foram soldadas com o gás de proteção igual a 100% de dióxido de carbono, enquanto outras duas foram soldadas com uma mistura de gases na proporção de 75% de argônio e 25% de dióxido de carbono. Para ambas as composições de gases, porém foi utilizada uma vazão de 15 a 20 l/min. Na Tabela 4 é possível avaliar resumidamente os parâmetros de soldagem utilizados em ambas as amostras preparadas através do procedimento arame tubular.

Tabela 4: Parâmetros de soldagem por arame tubular

| Arame Tubular com Gás de Proteção de 100% de Gás Carbônico | | | | | | | |
|---|------------|------|------------|----------|------------|-----------------|---------------------|
| Passe N.º | Camada N.º | (mm) | Tensão (V) | Corrente | | Intensidade (A) | Velocidade (cm/min) |
| | | | | Tipo | Polaridade | | |
| 1-15 | 1 | 1,2 | 27 | CC | + | 167 | 39-40 |
| 16-28 | 2 | 1,2 | 25 | CC | + | 105 | 25-27 |
| 29-40 | 3 | 1,2 | 26 | CC | + | 120 | 28-30 |
| Arame Tubular com Gás de Proteção de 75% de Argônio e 25% de Gás Carbônico | | | | | | | |
| Passe N.º | Camada N.º | (mm) | Tensão (V) | Corrente | | Intensidade (A) | Velocidade (cm/min) |
| | | | | Tipo | Polaridade | | |
| 1-15 | 1 | 1,2 | 25 | CC | + | 167 | 38 |
| 16-28 | 2 | 1,2 | 26 | CC | + | 185 | 40 |
| 29-40 | 3 | 1,2 | 26 | CC | + | 185 | 40 |

3.2.2 Eletrodo Revestido

O procedimento de soldagem por eletrodo revestido foi realizado de forma similar ao de arame tubular. Depositou-se o metal de adição sobre uma placa de dimensões 12,5 x 200 x 250 mm na posição plana de soldagem. Para esse procedimento foi utilizado corrente contínua com polaridade reversa. Foram depositadas três camadas de material, a primeira com uma corrente entre 90 e 110 A e as demais camadas variando entre 70 e 90 A. A variação de tensão utilizada foi de 22 a 28 V e a velocidade de avanço de 25 a 45 cm/min. Os passes foram dispostos com uma configuração apresentando 50% de sobreposição cada.

Para esse procedimento foi necessária a realização de um pré-aquecimento de 15°C. A máxima temperatura interpasse foi de 150°C. Na tabela 5 é possível avaliar os parâmetros utilizados na soldagem por eletrodo revestido.

Tabela 5: Parâmetros de soldagem por eletrodo revestido

| Eletrodo Revestido | | | | | | | |
|--------------------|------------|------|------------|----------|------------|-----------------|---------------------|
| Passe N.º | Camada N.º | (mm) | Tensão (V) | Corrente | | Intensidade (A) | Velocidade (cm/min) |
| | | | | Tipo | Polaridade | | |
| 1-13 | 1 | 4,0 | 26 | CC | + | 120 | 28-30 |
| 14-24 | 2 | 3,2 | 25 | CC | + | 105 | 25-27 |
| 25-35 | 3 | 4,0 | 26 | CC | + | 120 | 28-30 |

Adicionalmente, com a finalidade de avaliar uma possível situação de reparo no revestimento, uma porção do material de adição foi removida e, posteriormente, novamente depositada. Os parâmetros de soldagem para o reparo foram os mesmos utilizados para o revestimento. Na Figura 11 o esquema para a soldagem com o procedimento eletrodo revestido está representado. É possível observar também a região considerada para o reparo. O revestimento total possui as dimensões de 80 x 250 mm e o reparo foi realizado no centro do revestimento com a largura de aproximadamente 20 mm.

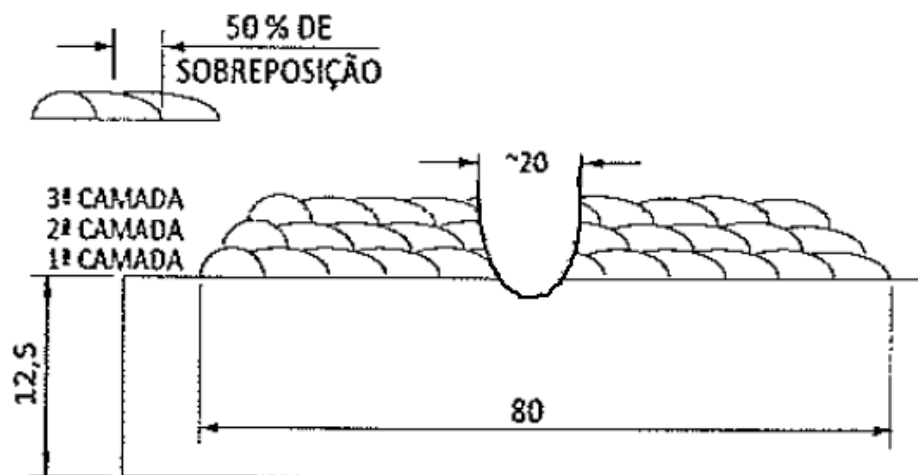


Figura 11: Esquema da Soldagem com Eletrodo Revestido

3.3 Tratamento Térmico Pós-Soldagem

Após o término da soldagem, um tratamento térmico de alívio de tensões foi realizado e, para esse tratamento, foram utilizadas amostras soldadas por todos os procedimentos citados no item 3.2 do presente trabalho. O resultado final foi a obtenção de quatro amostras tratadas termicamente e quatro amostras idênticas às tratadas, porém mantidas no estado como

soldado. Essas últimas permaneceram no estado como soldado para que servissem de parâmetro para a avaliação do efeito do tratamento térmico no revestimento.

O tratamento térmico de alívio de tensões constituiu na realização de três ciclos com aquecimento entre 620 e 640°C e com o patamar de 210 a 220 min para cada ciclo. A taxa de aquecimento foi de 50°C/h e o resfriamento foi de 60°C/h. Os parâmetros para o tratamento térmico encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros do Tratamento Térmico

| Temperatura (°C) | Tempo (min) | Número de Ciclos | Taxa de Aquecimento (°C/h) | Taxa de Resfriamento (°C/h) |
|------------------|-------------|------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 620 a 640 | 210 | 3 | 50 | 60 |

3.4 Identificação das Amostras

As amostras foram identificadas através de letras e de combinações de letras e números. A amostra soldada com o gás de proteção composto de 100% de dióxido de carbono foi nomeada pela letra “A”. Já a soldada através do procedimento arame tubular com o gás de proteção composto pela mistura de 75% de argônio e 25% de dióxido de carbono recebeu a nomenclatura “B”. Para a amostra soldada com eletrodo revestido, a letra “D” foi atribuída e, para a amostra retirada da região da simulação de reparo, as letras “DR” foram utilizadas. As amostras tratadas termicamente receberam a mesma nomenclatura das como soldadas, porém, seguidas pelo número 1, ou seja, “A1”, “B1”, “D1” e “DR1”, Tabela 7.

Tabela 7: Identificação das amostras

| Identificação | Processo | Gás de Proteção | Tratamento Térmico |
|---------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------|
| A | Arame Tubular | 100% CO ₂ | Não |
| A1 | Arame Tubular | 100% CO ₂ | Sim |
| B | Arame Tubular | 75% Ar e 25% CO ₂ | Não |
| B1 | Arame Tubular | 75% Ar e 25% CO ₂ | Sim |
| D | Eletrodo Revestido | N/A | Não |
| D1 | Eletrodo Revestido | N/A | Sim |
| Dr | Eletrodo Revestido (Reparo) | N/A | Não |
| Dr1 | Eletrodo Revestido (Reparo) | N/A | Sim |

3.5 Preparação Metalográfica

Parte essencial para um bom resultado dos ensaios micro e macrográficos é a preparação correta das amostras. Essa preparação consiste no corte da amostra, seu lixamento, polimento e ataque químico. Todas as etapas devem ser cuidadosamente realizadas para que a integridade da amostra se preserve.

Nesse trabalho, as amostras iniciais de aproximadamente 18 x 100 x 250 mm foram cortadas com a máquina Cor-80 e o resultado final foi a obtenção de amostras de dimensões aproximadas de 18 x 15 x 5 mm. Em seguida, utilizou-se de lixas do tipo “lixa d’água”, fixadas em discos rotativos para o lixamento das amostras a serem analisadas. O lixamento deve ser feito delicadamente para que a amostra não crie planos que prejudicarão durante a análise micrográfica. Foram utilizadas lixas metalográficas de granulometria de 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 meshs. O processo foi realizado sob refrigeração com água.

Logo em seguida, as amostras foram polidas e, para isso, utilizou-se de feltros colados a pratos rotatórios. O polimento deve ser meticuloso para garantir a isenção de riscos que poderão prejudicar a qualidade das imagens obtidas. Foram utilizadas pastas de diamante com granulometria de 6, 3 e 1 μm com a refrigeração feita à base de álcool.

O metal de base teve sua microestrutura revelada através do ataque químico por Nital 2%, composto por 2% de ácido nítrico e 98% de álcool PA. O ataque foi realizado esfregando-se um algodão previamente imerso na solução sobre a superfície da amostra. Após terminada a análise do metal de base, a revelação da microestrutura do metal de adição foi feita, porém, dessa vez, utilizando a solução química de trióxido de cromo, composta por 20% de CrO_3 e 80% de água destilada. O ataque com a solução de trióxido de cromo foi realizado em meio eletrolítico, com os parâmetros de tensão de 4 V durante 30 segundos aproximadamente.

3.6 Ensaio Macrográfico

A análise macrográfica permite observar a interface entre o metal de adição e o metal de base e a presença ou não de descontinuidades macroscópicas nessa região. É possível também, observar a sequência de deposição dos cordões de solda e se eles seguiram a sobreposição indicada na especificação do procedimento de soldagem. A sobreposição é importante, pois ela garante que não haverá espaços entre a sequência de cordões para que o meio que está em contato com o revestimento atinja o metal de base. Caso isso ocorra, o revestimento perde toda sua função.

Para o ensaio macrográfico as amostras foram preparadas conforme o procedimento indicado na seção 3.5 desse trabalho. Além de analisar as possíveis discontinuidades presentes na interface do revestimento, as imagens que são obtidas através da análise macrográfica servem para determinar o cálculo da diluição que será discutido mais adiante.

3.7 Ensaio Micrográfico

Para determinar a microestrutura dos materiais e a existência de precipitados ou fases secundárias é necessária a realização de análises micrográficas. Como instrumento de análise, um microscópio óptico da marca Olympus modelo BX60M foi utilizado. Essa técnica proporcionou uma avaliação da microestrutura de ambos os materiais e possibilitou mensurar a zona parcialmente diluída (ZPD). Para um maior detalhamento da microestrutura, um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca CamScan modelo 3200LV foi utilizado.

Primeiramente analisou-se a microestrutura do metal de base para observar o quanto a energia fornecida pelo processo de soldagem alterou a microestrutura original de laminação. Em seguida observou-se a interface entre os materiais para analisar a diluição entre ambos. Por último, foi necessário verificar a microestrutura de soldagem formada no metal de adição e a presença de fases que podem ser formadas na superliga de níquel INCONEL 625 que podem prejudicar suas propriedades. As amostras com e sem tratamento térmico de alívio de tensões foram observadas em pares, para que fosse estabelecida uma base de comparação entre ambas microestruturas e, assim poder avaliar o efeito do tratamento térmico nesse tipo de revestimento.

3.8 Ensaio de Microdureza

Ensaio de microdureza Vickers foram realizados em todas as amostras à temperatura ambiente. O ensaio foi realizado através da aplicação de uma carga de 500 gf por 20 segundos com um durômetro Wilson Instruments modelo 422MVD. Em média 30 identificações foram feitas em cada amostra perpendicularmente à linha de fusão. O espaçamento das identificações foi de aproximadamente 0,25 mm até a distância de 2,5 mm da linha de fusão e no intervalo de 2,5 mm a 5,0 mm da linha de fusão o espaçamento foi de aproximadamente 0,5 mm. Esse ensaio serve para possibilitar a localização de uma possível região endurecida na interface entre os materiais, que pode vir a se tornar uma região frágil localizada.

3.9 Ensaio de Dobramento

O ensaio de dobramento é parte importante para a qualificação do processo de soldagem utilizado. Ele é capaz de fornecer uma análise qualitativa e evidenciar defeitos na deposição do material, como a falta de penetração, microtrincas, deslocamento ou outras discontinuidades internas. A sua realização é fundamental para avaliar a qualidade da junta soldada, tanto em juntas de união quanto em deposições de revestimento.

De acordo com a norma ASME Seção IX Parte QW-163 [20], para deposição de revestimentos resistentes à corrosão por soldagem, não é aceitável a existência de discontinuidades que excedam 1/16" (1.5 mm), medidas em qualquer direção no revestimento. Além disso, nenhuma discontinuidade excedendo 1/8" (3 mm) é permitida nas proximidades da interface com a solda.

Os corpos de prova para o ensaio de dobramento foram preparados de acordo com a norma ASME Seção IX Parte QW-162.5(d) [20] que especifica a quantidade de corpos de prova e as dimensões para o ensaio de dobramento de revestimentos resistentes à corrosão, Figura 12.

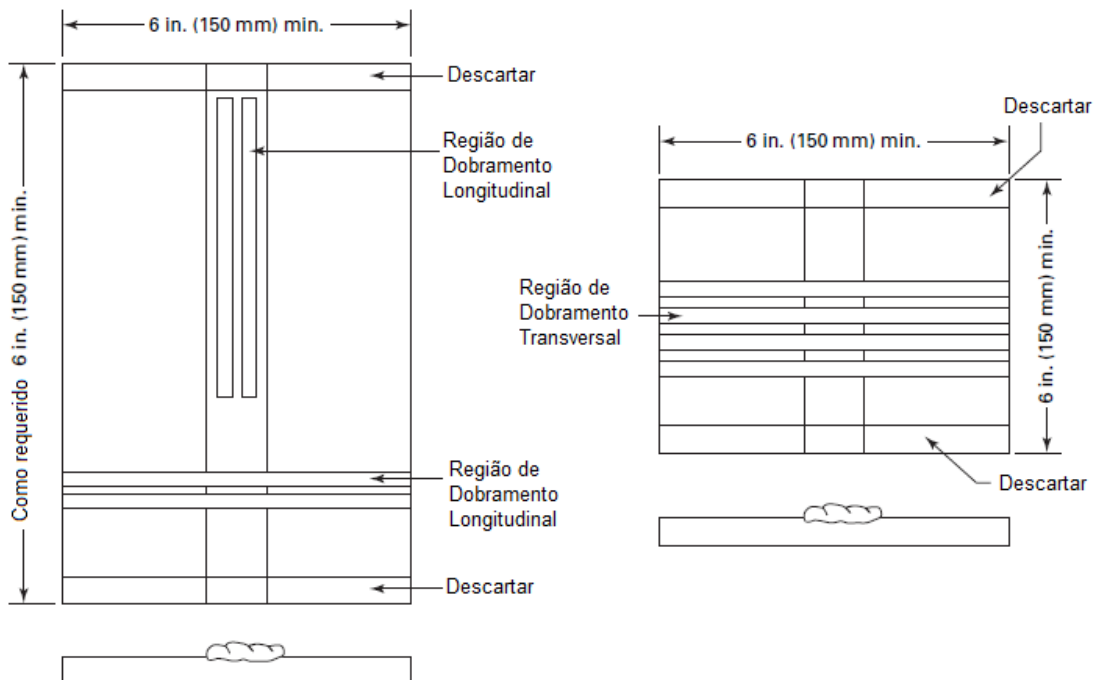


Figura 12: Corpo de prova segundo ASME IX Parte QW-162.5(d) [20]

A espessura da peça teste foi de 12,7 mm mais o revestimento. O diâmetro do cutelo utilizado foi de 40 mm e o dobramento foi realizado em um ângulo de 180°.

3.10 Análise Química

A análise química dos revestimentos foi feita utilizando um espectrômetro de emissão ótica modelo ARL 3460 Metals Analyzer. O objetivo principal dessa análise foi avaliar os elementos químicos presentes no revestimento depositado e os teores de cada elemento.

As análises foram feitas em três diferentes regiões da amostra. Avaliou-se a composição da zona de fusão e a composição a 3 e a 5 mm a partir da zona de fusão, Figura 13. A média das análises foi definida como a composição final do revestimento depositado. A diferente composição química vista em cada cota analisada pode também possibilitar um maior entendimento da diluição ocorrida em casa processo de soldagem.

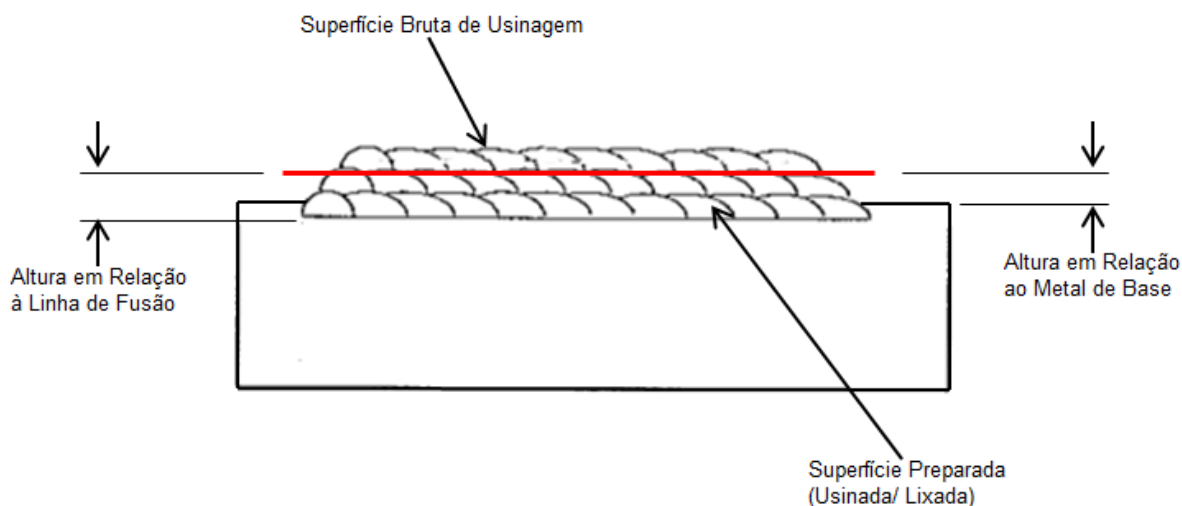


Figura 13: Esquema para análise química

3.11 Ensaio de Corrosão

O ensaio de corrosão serve para avaliar a resistência à corrosão de determinado material. Nesse trabalho, foi utilizado como parâmetro de estudo a norma ASTM G-48 [21], que especifica os métodos de teste para a avaliação da resistência à corrosão por pites e por trincas de aços inoxidáveis e outras ligas relacionadas através da aplicação da solução de cloreto férrico. Dessa forma é possível avaliar o comportamento desses materiais quando expostos a meios oxidantes.

A norma ASTM G-48 [21] apresenta seis diferentes procedimentos de teste. O procedimento utilizado no presente trabalho foi o Método A que avalia a corrosão por pites com cloreto férrico.

As amostras foram imersas na solução de cloreto férrico composta pela proporção de 100 g de cloreto férrico para 900 ml de água destilada. Para remover qualquer partícula que não tenha se dissolvido, a solução foi filtrada utilizando-se um filtro de papel. O teste foi realizado à temperatura controlada de $40 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 h. Ao término do ensaio, as amostras foram cuidadosamente limpas para a completa remoção dos resíduos corrosivos. As amostras foram então pesadas individualmente e a comparação com o seu peso inicial foi feita.

Esse ensaio, além de avaliar a resistência à corrosão do INCONEL 625, teve também como objetivo, avaliar o efeito do tratamento térmico sobre as amostras e verificar como diferiu a resposta à corrosão em espécimes como soldadas quando comparadas às amostras com tratamento térmico de alívio de tensões.

Capítulo 04

Resultados

O presente capítulo conta com a apresentação dos resultados dos ensaios e das análises, obtidos através dos métodos descritos no Capítulo 03. A discussão sobre os resultados será feita com mais detalhes no Capítulo 05.

4.1 Análise Macrográfica

Os resultados das análises macrográficas estão dispostos a seguir nas Figuras 14-16, seguindo a ordem de apresentação da identificação das amostras. Todas as análises foram feitas segundo os métodos descritos no Capítulo 03 deste trabalho.

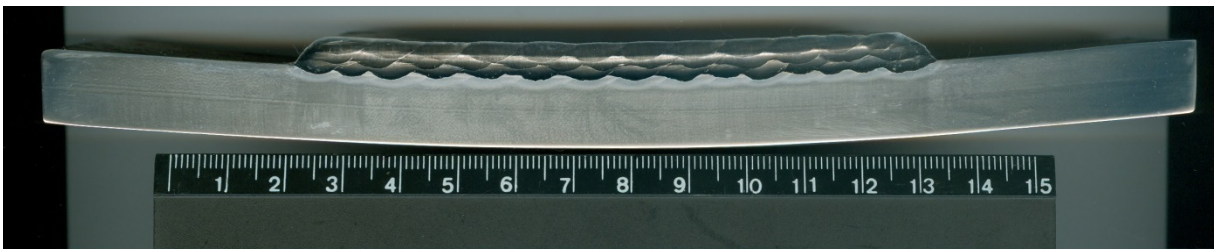


Figura 14: Macrografia referente às amostras A e A1

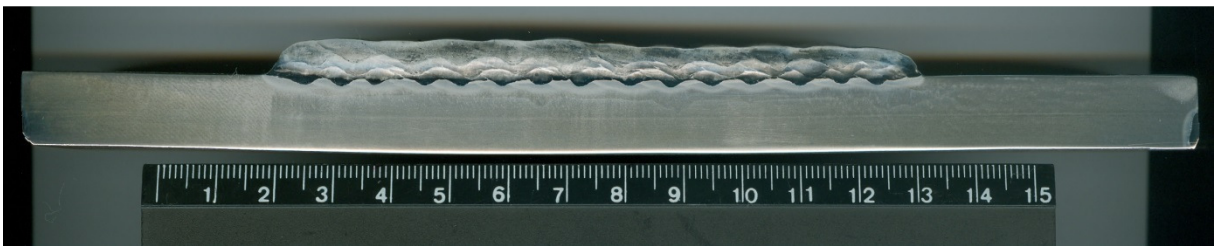


Figura 15: Macrografia referente às amostras B e B1

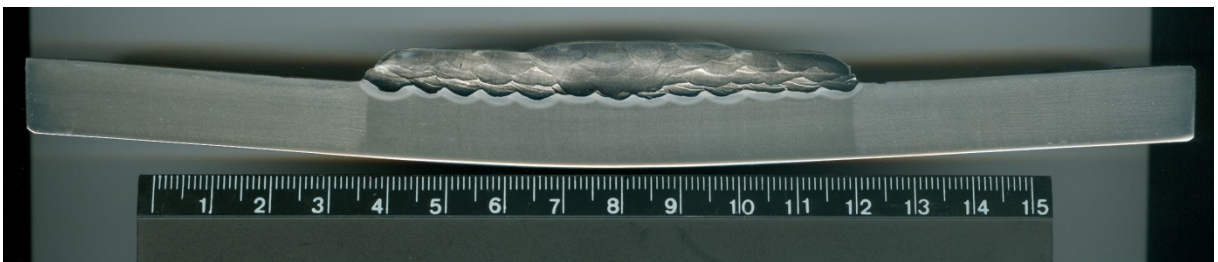


Figura 16: Macrografia referente às amostras D, D1, DR e DR1

4.2 Análise Micrográfica

Os resultados das análises micrográficas feitas com o microscópio óptico e com o microscópio eletrônico de varredura estão dispostos nos subitens abaixo. Os resultados foram divididos em dois tópicos, um com o título metal de base e outro intitulado metal de solda, para melhor entendimento e maior clareza.

4.2.1 Metal de Base

As análises micrográficas indicaram um comportamento semelhante para as oito amostras avaliadas. Zonas parcialmente diluídas foram encontradas na interface do metal de solda (revestimento) com o metal de base (substrato) como se era esperado, Figuras 17-20.

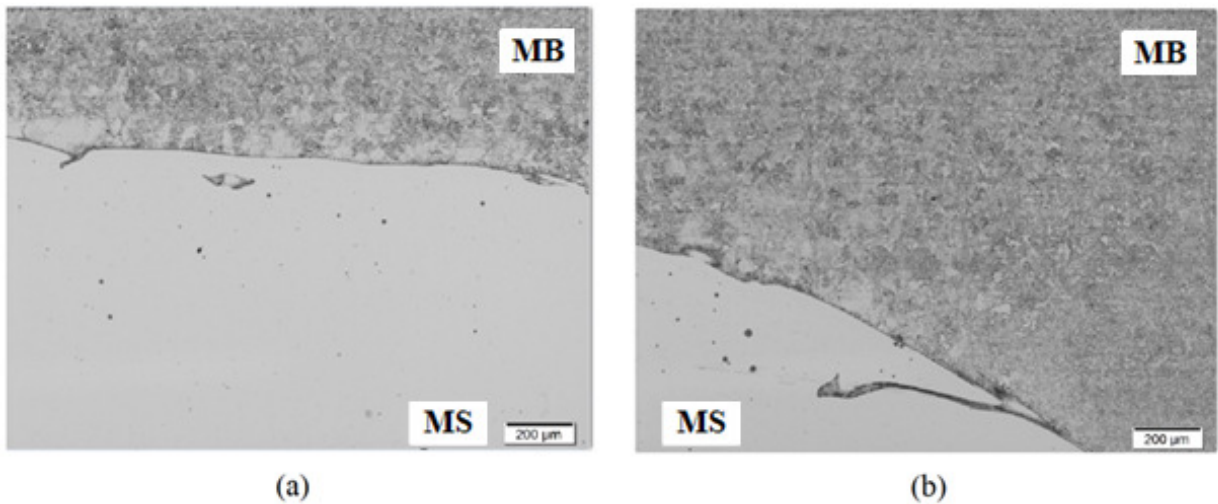


Figura 17: Micrografias ópticas das zonas parcialmente diluídas. Aumento nominal de 100x.
(a) amostra A; (b) amostra A1

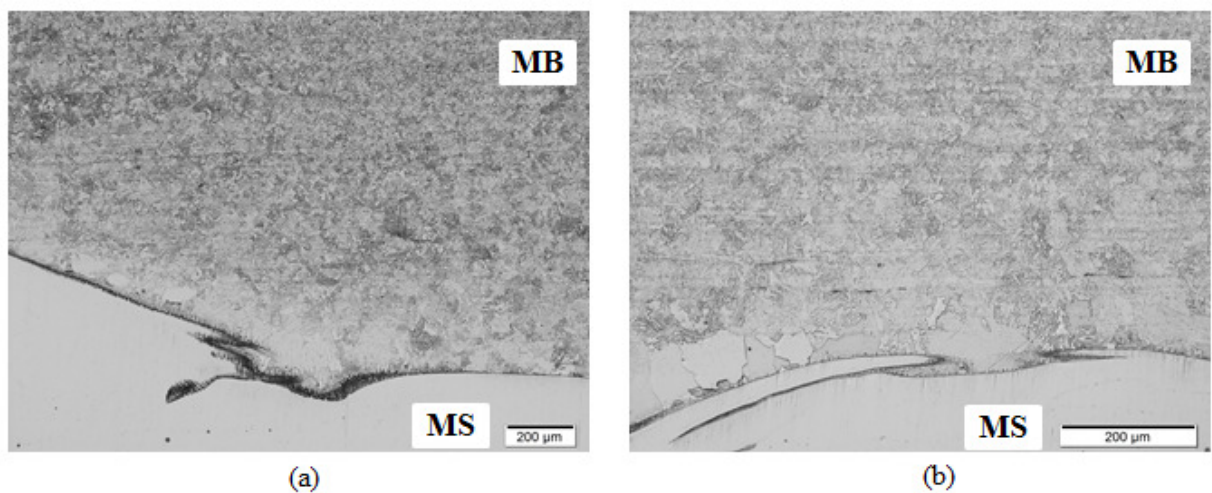


Figura 18: Micrografias ópticas das zonas parcialmente diluídas. Aumento nominal de 100x.
(a) amostra B; (b) amostra B1

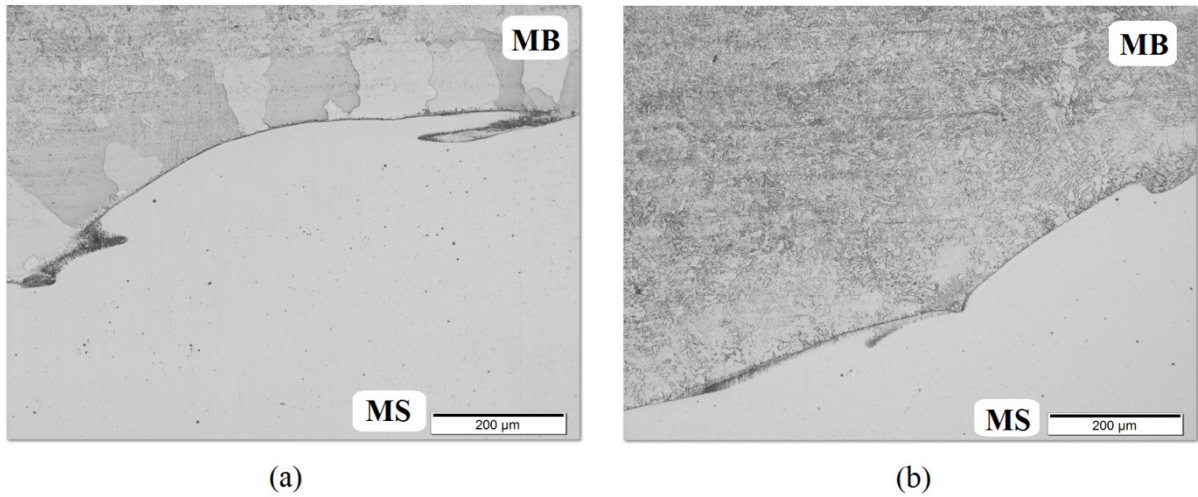


Figura 19: Micrografias ópticas das zonas parcialmente diluídas. Aumento nominal de 100x.
(a) amostra D; (b) amostra D1

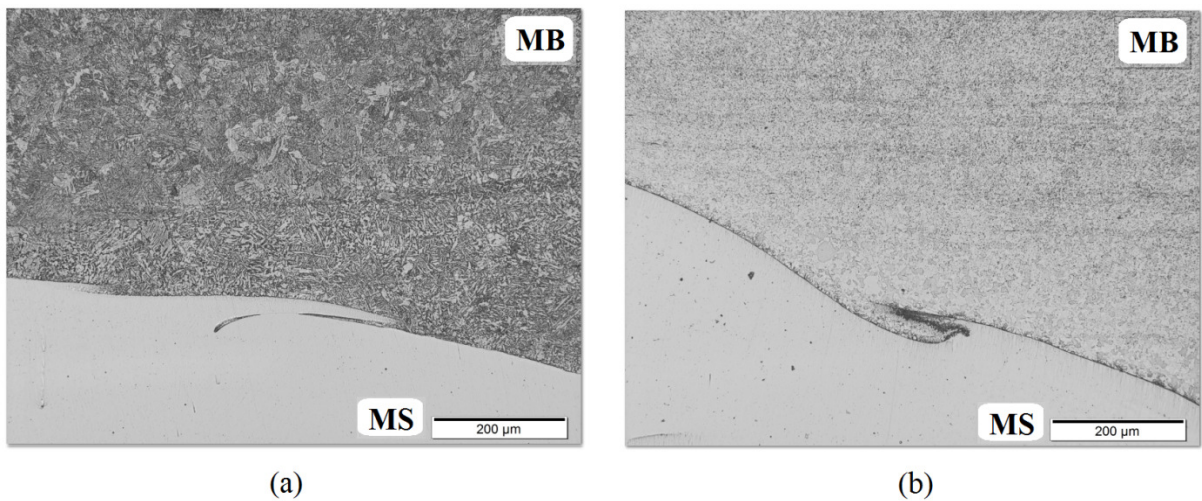


Figura 20: Micrografias ópticas das zonas parcialmente diluídas. Aumento nominal de 100x.
(a) amostra Dr; (b) amostra Dr1

Todas as amostras apresentaram uma região rica em martensita próxima à linha de fusão do metal de base ASTM 516 Gr.70, Figuras 21-24.

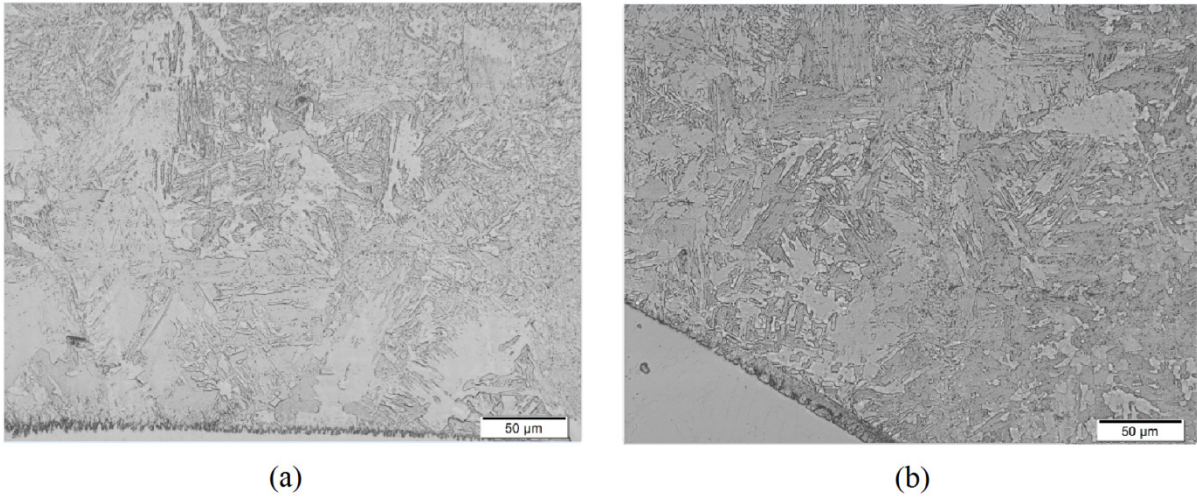


Figura 21: Martensita próxima à interface. Aumento nominal de 500x.
(a) amostra A; (b) amostra A1

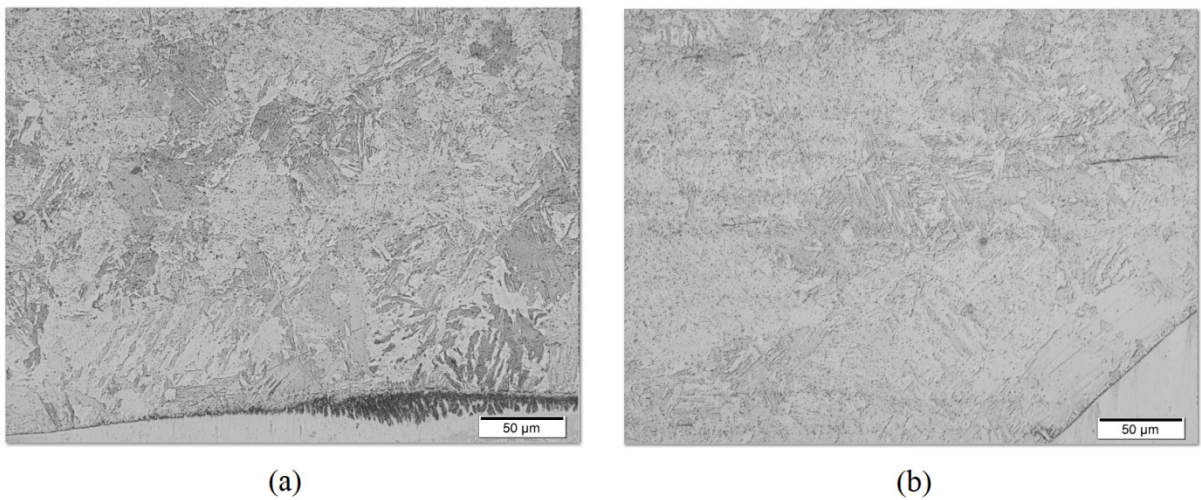


Figura 22: Martensita próxima à interface. Aumento nominal de 500x.
(a) amostra B; (b) amostra B1

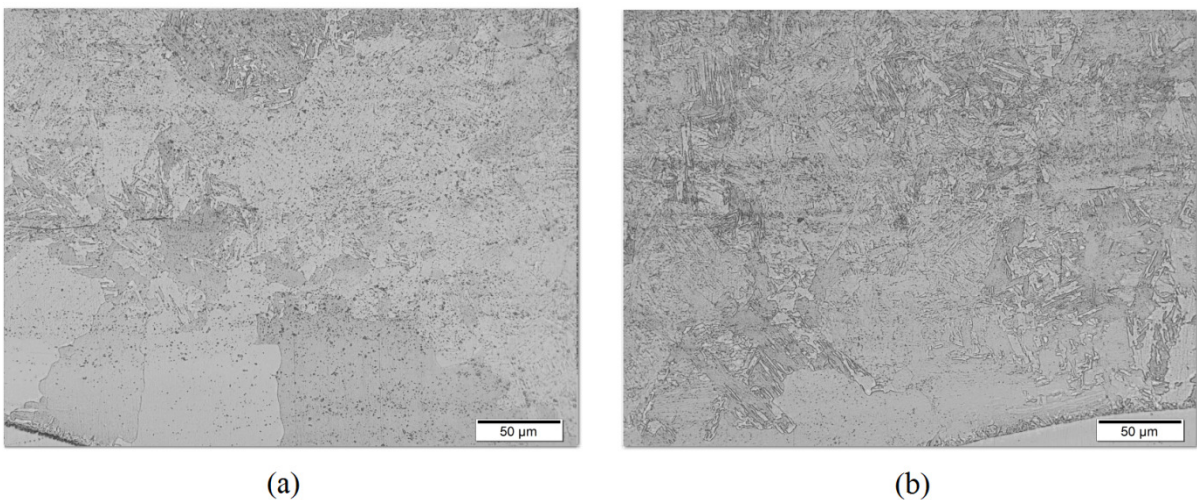


Figura 23: Martensita próxima à interface. Aumento nominal de 500x.
(a) amostra D; (b) amostra D1

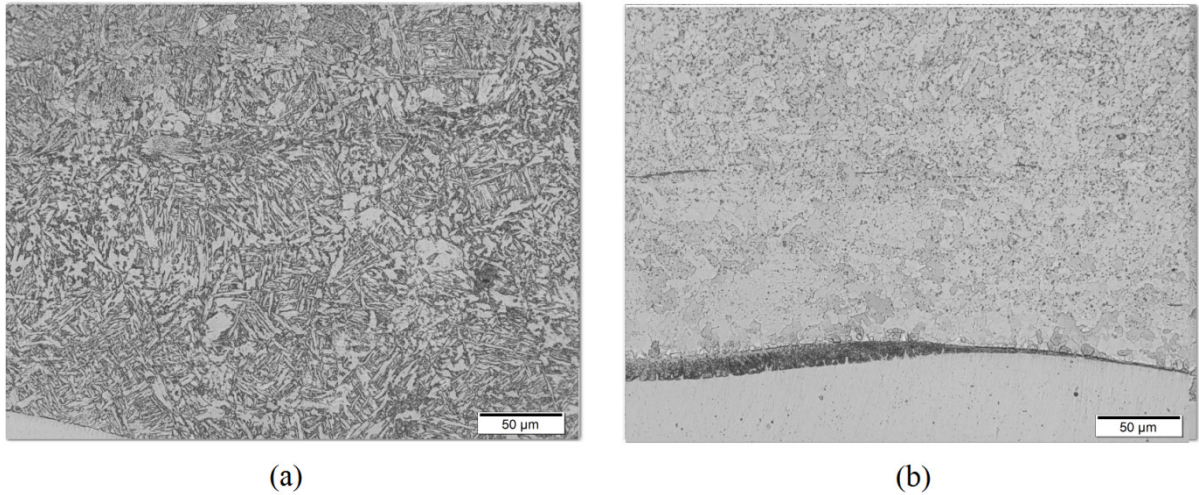


Figura 24: Martensita próxima à interface. Aumento nominal de 500x.
(a) amostra Dr; (b) amostra Dr1

O metal de base não teve sua microestrutura afetada a partir da cota que equivale a distância de aproximadamente 2 mm da linha de fusão. Na Figura 25 se pode observar a microestrutura original do material ASTM A516 Gr. 70. Todas as amostras apresentaram o mesmo aspecto para a estrutura original do metal de base.

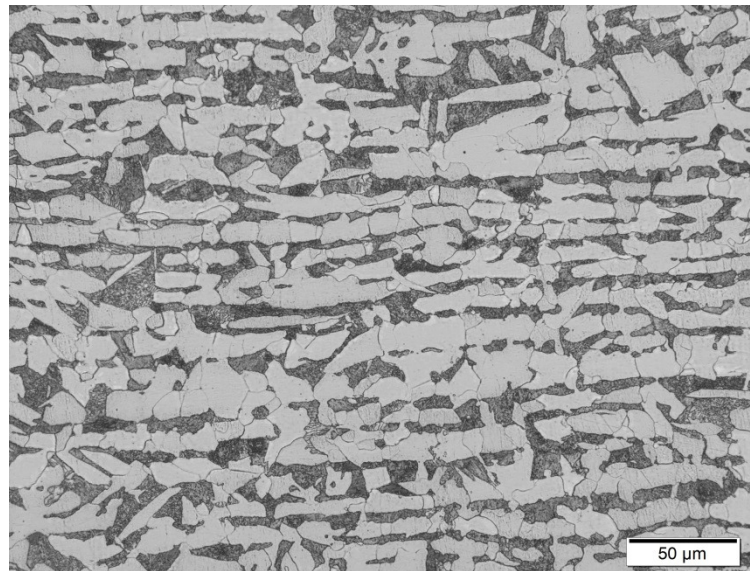


Figura 25: Estrutura original do metal de base ASTM A516 Gr.70. Aumento nominal 500x.

A estrutura do metal de base foi afetada devido ao aporte térmico dos processos de soldagem. Na Figura 26 é possível ver essa transformação na microestrutura.

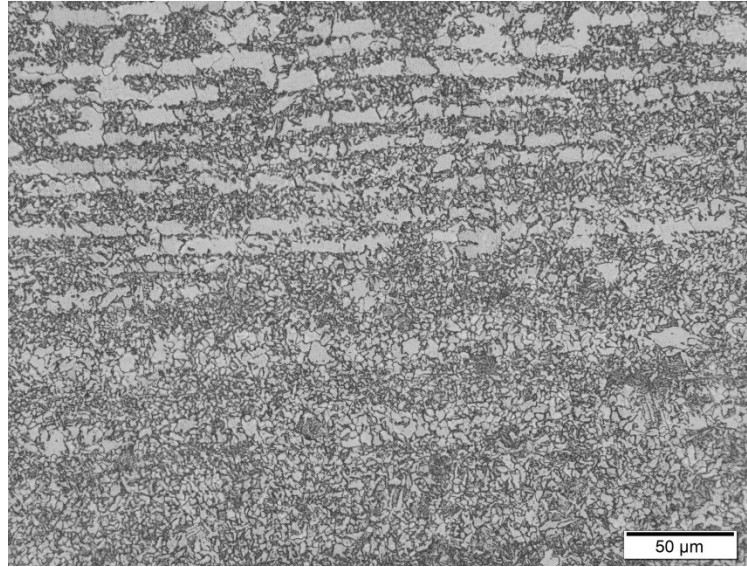


Figura 26: Transformação da microestrutura do metal de base. Aumento nominal de 500x.

4.2.2 Metal de Solda

Analisando o metal de solda, pode-se perceber que algumas fases foram formadas ao longo de sua microestrutura para o processo de soldagem com arame tubular, Figuras 27 e 28. Essas fases, assim como a microestrutura do metal de base e de solda avaliados serão discutidas no capítulo a seguir.

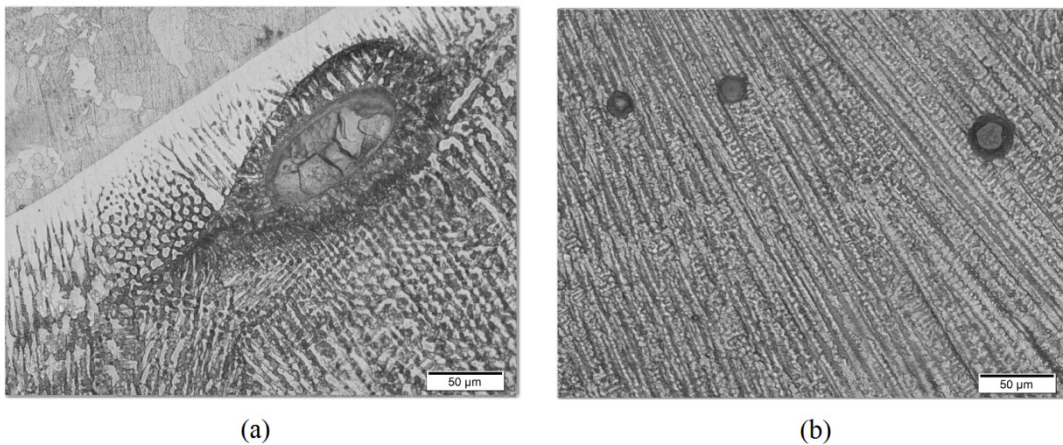


Figura 27: Fases formadas ao longo da microestrutura do metal de solda. Microscopia óptica, Aumento nominal de 500x.

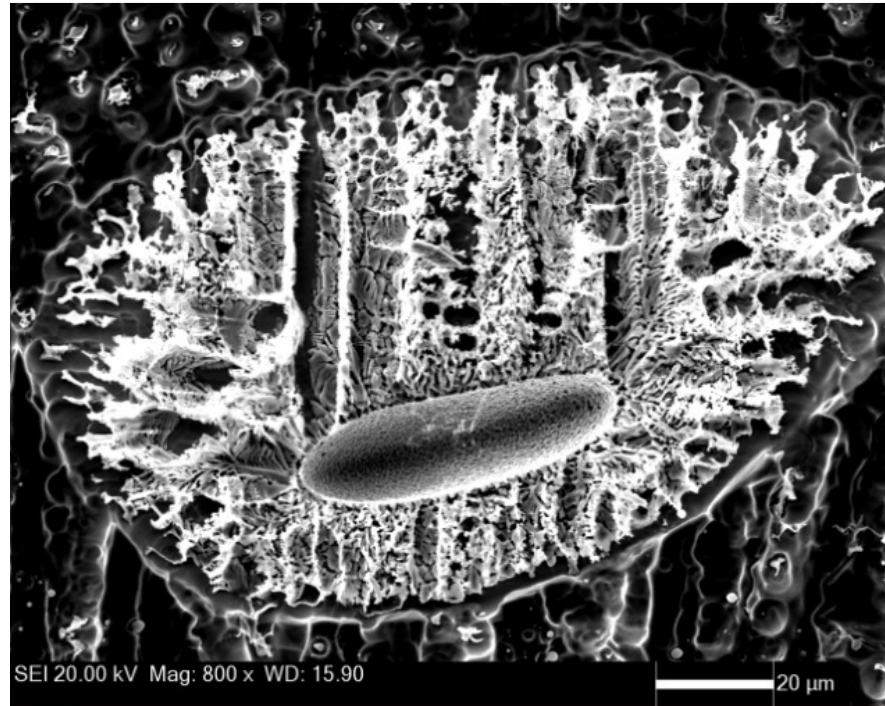


Figura 28: Fases formadas no processo de soldagem por arame tubular. MEV, Aumento nominal de 800x.

4.3 Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza avaliou a dureza nas amostras em uma linha perpendicular à de fusão. As identações percorreram 5 mm acima e 5 mm abaixo da linha de fusão, como pode ser observado na Figura 29.

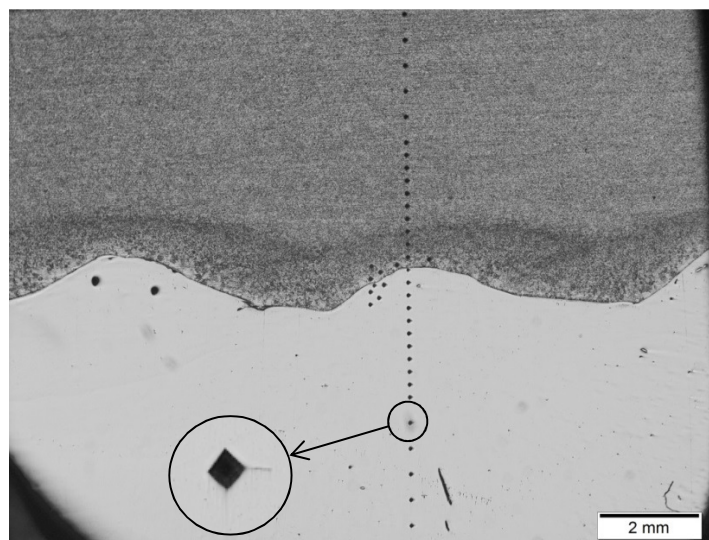


Figura 29: Identação de microdureza na amostra B

Os valores encontrados para cada amostra estão representados na Tabela 8. As distâncias negativas à linha de fusão representam as durezas encontradas no metal de solda, enquanto as distâncias positivas indicam os valores encontrados para o metal de base.

Tabela 8: Valores de microdureza para as amostras analisadas

| Distância da Linha de Fusão (mm) | | Microdureza Vickers / Amostra | | | | | | | |
|----------------------------------|----------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | A | A1 | B | B1 | D | D1 | Dr | Dr1 |
| -5 | Metal de Solda | 241,8 | 237,7 | 242,2 | 243,1 | 260,5 | 278,7 | 265,2 | 252,6 |
| -4,5 | | 224,8 | 237,2 | 235,3 | 247,5 | 267,5 | 300,2 | 254,5 | 253,7 |
| -4 | | 235,5 | 224,4 | 220,4 | 252,9 | 252,3 | 298,4 | 256,7 | 274,1 |
| -3,5 | | 226,9 | 225,4 | 242,1 | 253,6 | 259,5 | 315,6 | 264,1 | 287,4 |
| -3 | | 232,5 | 218,3 | 234,7 | 239,1 | 277,3 | 288,0 | 266,9 | 276,5 |
| -2,5 | | 241,0 | 225,8 | 239,7 | 239,0 | 232,6 | 291,5 | 252,5 | 274,3 |
| -2,25 | | 241,8 | 214,5 | 219,4 | 245,9 | 236,2 | 275,1 | 267,4 | 273,8 |
| -2 | | 235,9 | 210,2 | 235,0 | 246,3 | 252,7 | 315,8 | 263,8 | 275,0 |
| -1,75 | | 240,7 | 215,5 | 224,5 | 233,5 | 251,0 | 296,7 | 255,1 | 284,7 |
| -1,5 | | 234,7 | 222,1 | 225,5 | 241,6 | 251,3 | 298,5 | 254,5 | 291,8 |
| -1,25 | | 213,6 | 224,9 | 228,0 | 248,4 | 231,2 | 280,7 | 256,3 | 299,0 |
| -1 | | 217,8 | 225,4 | 236,7 | 242,1 | 242,7 | 276,4 | 249,7 | 283,4 |
| -0,75 | | 222,0 | 231,4 | 228,3 | 251,1 | 243,4 | 272,2 | 253,1 | 255,6 |
| -0,5 | | 223,5 | 227,9 | 242,1 | 256,8 | 216,8 | 267,9 | 248,8 | 242,4 |
| -0,25 | | 220,0 | 235,8 | 253,3 | 246,5 | 263,1 | 296,5 | 253,8 | 272,2 |
| 0 | | 194,8 | 212,8 | 323,3 | 204,3 | 248,7 | 280,0 | 259,2 | 228,1 |
| 0,25 | Metal de Base | 180,8 | 194,9 | 179,7 | 182,3 | 174,8 | 233,8 | 224,8 | 172,1 |
| 0,5 | | 174,5 | 185,4 | 177,3 | 192,4 | 179,8 | 211,1 | 215,1 | 173,5 |
| 0,75 | | 171,5 | 179,7 | 168,8 | 182,3 | 174,0 | 195,9 | 213,7 | 177,5 |
| 1 | | 145,5 | 162,1 | 150,7 | 168,9 | 162,0 | 192,3 | 202,5 | 160,2 |
| 1,25 | | 159,5 | 160,1 | 150,2 | 169,6 | 158,6 | 166,3 | 206,7 | 156,5 |
| 1,5 | | 139,3 | 158,4 | 149,4 | 160,4 | 148,6 | 160,4 | 211,4 | 155,9 |
| 1,75 | | 145,5 | 150,8 | 150,5 | 149,4 | 149,0 | 171,1 | 199,2 | 160,3 |
| 2 | | 149,5 | 146,0 | 155,3 | 157,6 | 153,2 | 169,3 | 202,4 | 160,4 |
| 2,25 | | 151,6 | 144,8 | 152,3 | 151,0 | 148,0 | 170,5 | 209,8 | 156,1 |
| 2,5 | | 142,9 | 144,3 | 146,8 | 141,8 | 147,2 | 168,3 | 201,0 | 156,2 |
| 3 | | 149,8 | 144,6 | 150,5 | 144,0 | 149,6 | 172,8 | 203,1 | 151,8 |
| 3,5 | | 151,0 | 148,9 | 150,7 | 152,0 | 147,0 | 174,0 | 190,2 | 158,9 |
| 4 | | 150,3 | 147,3 | 144,6 | 133,3 | 147,7 | 166,0 | 198,5 | 156,7 |
| 4,5 | | 141,9 | 150,0 | 148,2 | 141,8 | 155,5 | 173,3 | 204,5 | 149,6 |
| 5 | | 156,6 | 160,9 | 149,6 | 139,2 | 144,3 | 185,4 | 195,9 | 144,6 |

Os gráficos apresentados nas Figuras 30-33, comparativos entre a dureza das amostras como soldadas e após o tratamento térmico, são apresentados logo em seguida para fim de comparação entre as duas condições.

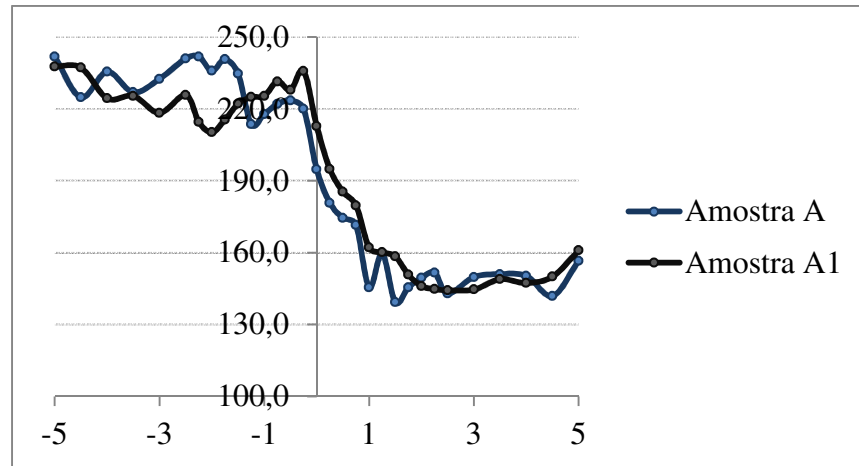


Figura 30: Gráfico comparativo de microdureza entre as amostras A e A1

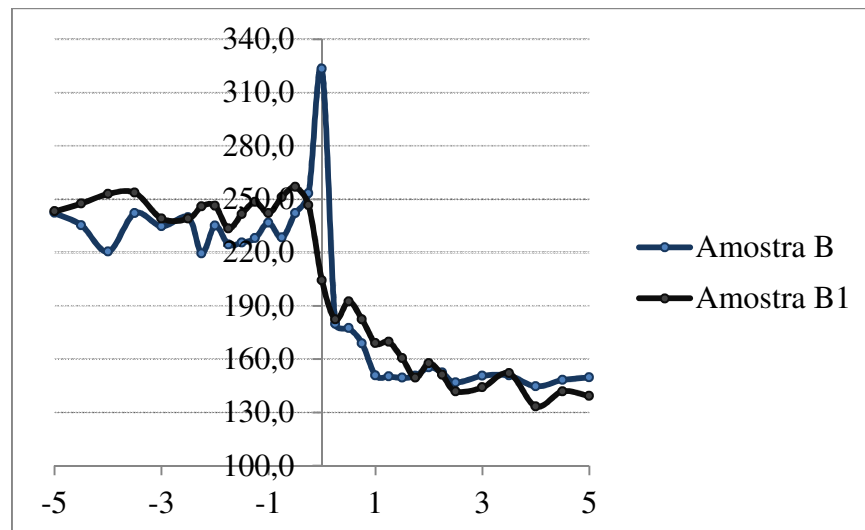


Figura 31: Gráfico comparativo de microdureza entre as amostras B e B1

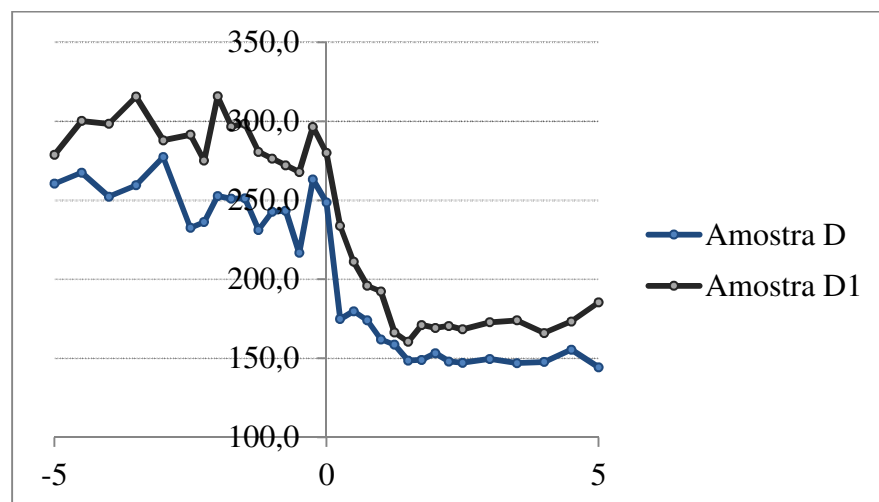


Figura 32: Gráfico comparativo de microdureza entre as amostras D e D1

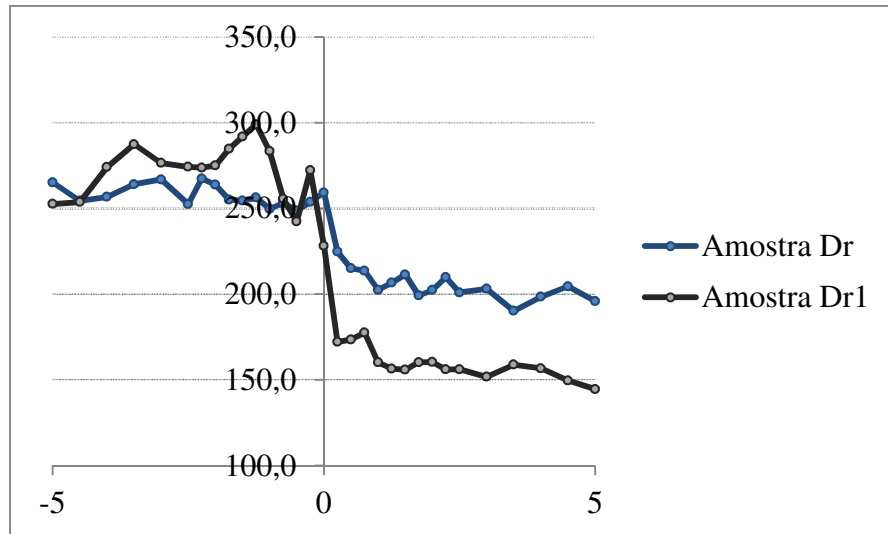


Figura 33: Gráfico comparativo de microdureza entre as amostras Dr e Dr1

4.4 Ensaio de Dobramento

O resultado final após o ensaio mecânico de dobramento é apresentado na Figura 34. Uma amostra soldada por cada procedimento foi avaliada. Todas se comportaram de forma similar durante o ensaio.



Figura 34: Corpos de prova resultantes do ensaio de dobramento

4.5 Análise Química

O resultado da análise química que será utilizado para os cálculos de diluição está apresentado na Tabela 9 abaixo. Apenas os principais elementos estão representados na tabela, a fim de uma maior objetividade.

Tabela 9: Principais elementos presentes na análise química

| Amostra / Processo | Distância da Linha de Fusão (mm) | Elementos (%) | | | | | | | |
|--|----------------------------------|---------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | C | Cr | Ni | Mn | Si | Mo | Nb | Fe |
| Amostra A Arame Tubular 100% CO ₂ | 0,17 | 0,231 | 0,79 | 1,59 | 1,087 | 0,26 | 0,21 | 0,12 | 95,6 |
| | 1,17 | 0,994 | 15,479 | Rest. | 0,3251 | 0,3354 | 5,575 | 1,6853 | 28,333 |
| | 2,17 | 0,0544 | 17,271 | Rest. | 0,1777 | 0,3953 | 6,762 | 2,3757 | 16,764 |
| | 3,17 | 0,0281 | 19,778 | Rest. | 0,0436 | 0,4161 | 8,264 | 2,8394 | 4,6874 |
| | 5,17 | 0,0232 | 19,973 | Rest. | 0,0199 | 0,4194 | 8,6456 | 3,0498 | 2,0814 |
| | 6,84 | 0,0210 | 20,22 | Rest. | 0,0190 | 0,4139 | 8,772 | 3,0849 | 1,9117 |
| Amostra B Arame Tubular 75% Ar e 25% CO ₂ | 0,30 | 0,2380 | 0,02 | 0,02 | 1,116 | 0,240 | 0 | NE | 98,28 |
| | 1,30 | 0,0807 | 15,446 | Rest. | 0,2713 | 0,360 | 5,705 | 1,707 | 26,844 |
| | 2,30 | 0,077 | 15,537 | Rest. | 0,2633 | 0,357 | 5,746 | 1,744 | 25,863 |
| | 3,30 | 0,0357 | 18,16 | Rest. | 0,0887 | 0,402 | 7,421 | 2,331 | 10,761 |
| | 5,30 | 0,0230 | 19,391 | Rest. | 0,0322 | 0,421 | 8,093 | 2,663 | 4,3847 |
| | 6,71 | 0,0242 | 19,668 | Rest. | 0,0336 | 0,419 | 8,158 | 2,707 | 4,5438 |
| Amostra D Eletrodo Revestido | -0,64 | 0,2350 | 0,02 | 0,01 | 1,113 | 0,24 | 0 | 0,000 | 98,3 |
| | -0,14 | 0,1705 | 6,83 | 17,3 | 0,92 | 0,31 | 2,23 | 1,192 | 70,7 |
| | 0,36 | 0,0696 | 17,297 | Rest. | 0,522 | 0,268 | 6,0954 | 2,415 | 22,891 |
| | 1,36 | 0,0394 | 19,973 | Rest. | 0,195 | 0,326 | 7,8291 | 3,083 | 9,349 |
| | 2,36 | 0,0279 | 20,126 | Rest. | 0,172 | 0,326 | 7,9661 | 3,141 | 8,384 |
| | 3,36 | 0,0269 | 21,124 | Rest. | 0,314 | 0,311 | 8,469 | 3,363 | 3,137 |
| | 5,36 | 0,0263 | 21,007 | Rest. | 0,327 | 0,312 | 8,484 | 3,430 | 3,197 |
| | 5,66 | 0,0271 | 21,103 | Rest. | 0,329 | 0,301 | 8,516 | 3,459 | 3,322 |

Além dos cálculos de diluição, a quantidade dos elementos também servirá para o cálculo do *Pitting Resistance Equivalent Number* – PREN, número que é capaz de prever a capacidade de resistência à corrosão por pites de um determinado material.

4.6 Ensaio de Corrosão

O ensaio de corrosão feito de acordo com a norma G-48 como descrito no capítulo 3, item 11, apresentou resultados similares para as amostras com e sem tratamento, quando soldadas por um mesmo processo. Os resultados estão dispostos na Tabela 10.

Tabela 10: Resultados do ensaio de corrosão

| Amostra / Processo | Tratamento Térmico | Pitting | Perda de Massa (g/m ²) |
|---|--------------------|---------|------------------------------------|
| Amostra A Arame Tubular 100% CO ₂ | Não | Sim | 8,97 |
| | Sim | Não | 0,52 |
| Amostra B Arame Tubular 75% Ar e 25% CO ₂ | Não | Não | 0,35 |
| | Sim | Não | 0,34 |
| Amostra D Eletrodo Revestido | Não | Não | 2,09 |
| | Sim | Não | 0,89 |

Entre todas as condições avaliadas, apenas a amostra sem tratamento térmico soldada pelo processo de arame tubular com o gás de proteção igual a 100% de CO₂ apresentou um resultado anômalo. Os resultados serão discutidos no capítulo seguinte.

Capítulo 05

Análise e Discussão dos Resultados

Os resultados apresentados no capítulo 4 serão discutidos no presente capítulo. Para melhor compreensão, a discussão será feita na mesma ordem de subitens em que os resultados foram apresentados.

5.1 Análises Macrográficas

As imagens obtidas através das análises macrográficas permitem observar a interface entre os dois materiais e a deposição dos cordões. Nenhuma descontinuidade macroscópica foi observada na interface entre o metal de base e o metal de solda e nenhuma porosidade no nível macroscópico foi vista nos cordões depositados.

Todas as amostras apresentaram resultados similares para a macrografia, diferindo apenas na aparência dos cordões depositados. A aparência dos cordões se refere à largura e à profundidade, parâmetros afetados pelo aporte térmico e pelo gás de proteção de cada processo em particular.

Era esperado que a utilização de dióxido de carbono puro aumentasse a penetração do cordão de solda [22] e, pela macrografia, foi possível perceber que esse foi o resultado, quando comparadas ambas as amostras soldadas por arame tubular. Com o auxílio do software AutoCAD foi possível avaliar a profundidade de penetração dessas duas amostras como segue na Figura 35.

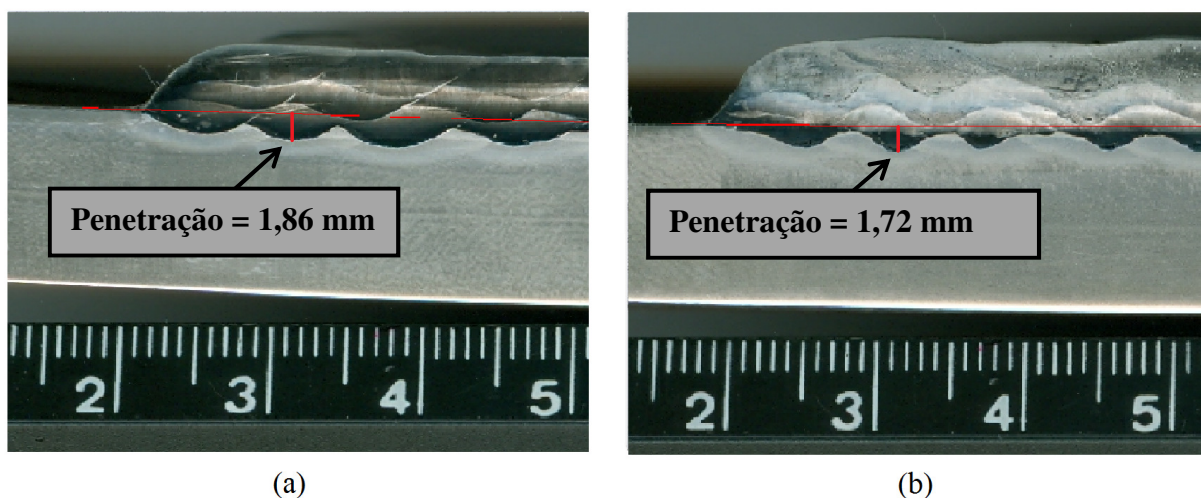


Figura 35: Profundidade de penetração com arame tubular. (a) amostra A; (b) amostra B

Avaliando os comprimentos mostrados na Figura 35, observa-se que com a utilização do CO₂ puro a penetração aumentou em 8,1% quando comparado com a utilização da mistura de CO₂ com o gás inerte. Analisando a amostra soldada por eletrodo revestido, pode-se ver que essa foi a amostra que apresentou menor penetração, com um valor de aproximadamente 1,34 mm de profundidade. Quanto maior a penetração, maior a diluição entre os dois materiais, portanto uma menor penetração é sempre desejada quando se trata de revestimentos por soldagem.

Outra informação importante que se pode obter através da análise macrográfica é a extensão da zona termicamente afetada (ZTA), Figuras 36-38. É na ZTA que estruturas que podem ser prejudiciais ao desempenho do revestimento, como a martensita, podem se formar, portanto aí se dá a importância em poder mensurar essa região.

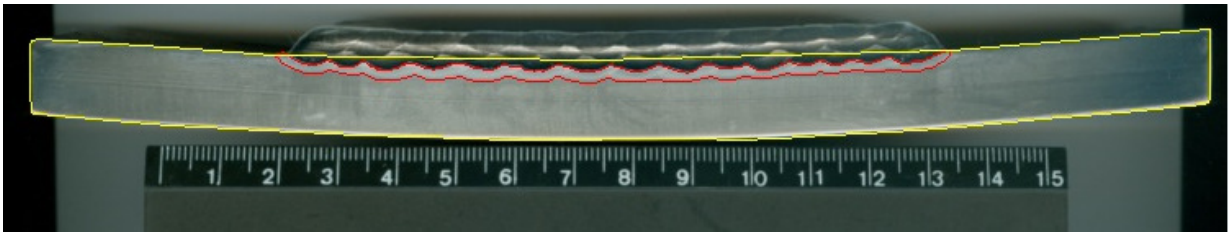


Figura 36: Zona termicamente afetada em vermelho (amostra A)

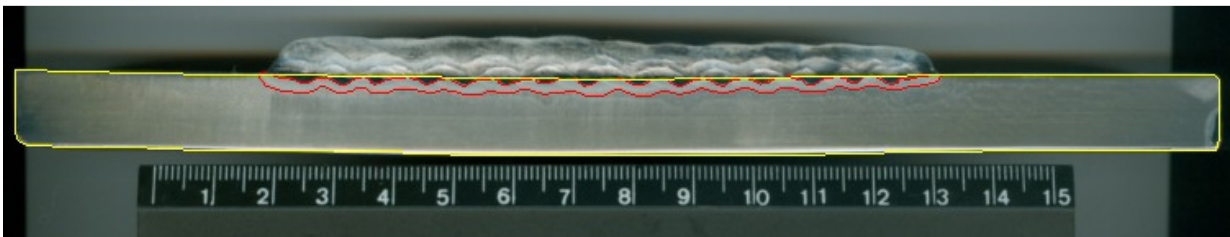


Figura 37: Zona termicamente afetada em vermelho (amostra B)

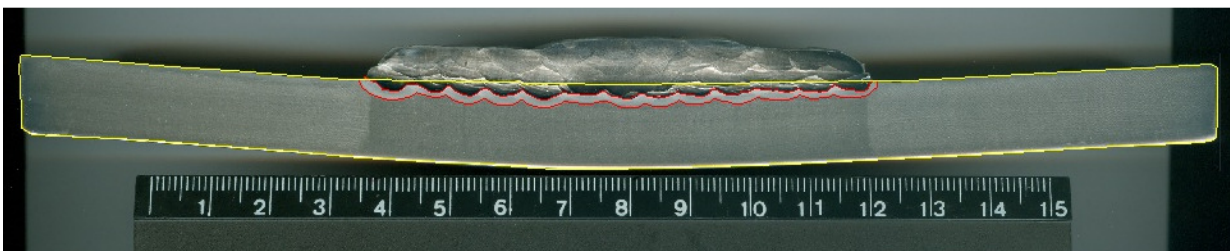


Figura 38: Zona termicamente afetada em vermelho (amostra D)

Com o auxílio do software AutoCAD é possível mensurar a área das zonas termicamente afetadas e a área total da chapa inicial e então, fazer uma comparação da porcentagem do metal de base que foi afetada pelos ciclos térmicos de soldagem. De acordo com a análise feita, a amostra A, soldada pelo procedimento arame tubular com 100% de CO₂

como gás de proteção apresentou uma ZTA com a extensão de aproximadamente 1,8 mm. A amostra B, soldada também pelo procedimento arame tubular, mas com gás de proteção igual a 75% de argônio e 25% de CO₂ apresentou uma ZTA com a extensão de aproximadamente 1,6 mm. Já a amostra D, soldada por eletrodo revestido, apresentou uma extensão de ZTA de aproximadamente 1,5 mm.

Um gráfico comparativo entre a extensão da ZTA nas três amostras pode ser visto na Figura 39.

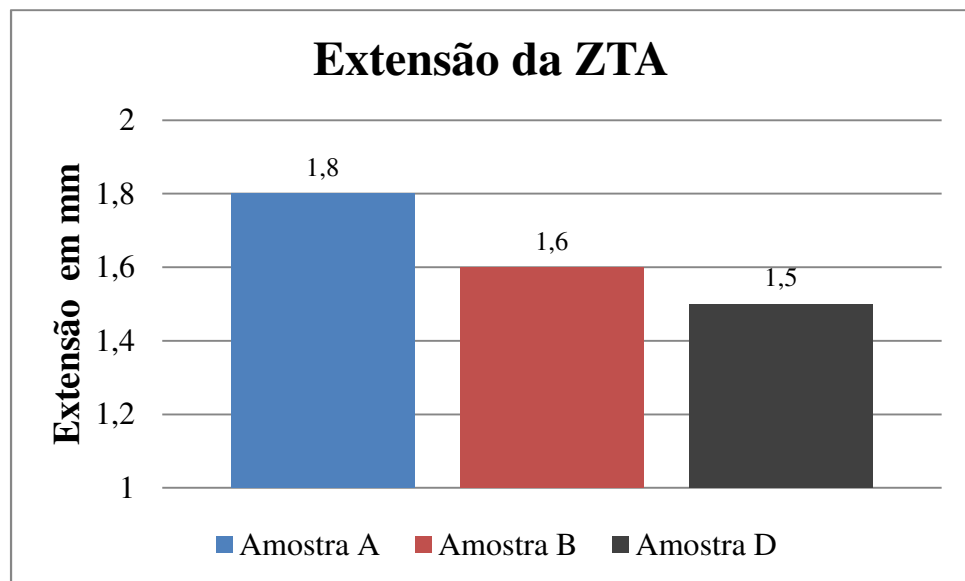


Figura 39: Comparação entre as extensões da ZTA nas amostras A, B e D

Através do gráfico apresentado é possível observar que a ZTA teve maior extensão na amostra A. O aporte térmico do processo de soldagem é um fator importante para avaliar o tamanho da ZTA e pode ser definido como a quantidade de energia gerada pela fonte de calor por unidade de comprimento da junta. Espera-se que quanto maior o aporte térmico, maior a extensão da ZTA, porém outros fatores, como o rendimento térmico do processo também podem influenciar nessa medida [23].

A fórmula para o cálculo do aporte térmico (H) é escrita como:

$$H = \frac{VI}{v}$$

Onde:

V = tensão do arco em kV

I = corrente de soldagem em A

v = velocidade de soldagem em mm/s

Sendo assim, fazendo os cálculos para cada um dos processos, utilizando os valores apresentados no capítulo 3 - item 3.2, encontra-se um valor de 0,033 kJ/mm para o procedimento de soldagem por arame tubular com 100% de CO₂ (amostras A e A1), 0,035 kJ/mm para o procedimento de soldagem por arame tubular com 75% de argônio e 25% de CO₂ (amostras B e B1) e 0,032 kJ/mm para o processo de soldagem por eletrodo revestido (amostras D, D1, Dr e Dr1). Para comparar os aportes térmicos é necessário levar em conta o rendimento térmico de cada processo. Sendo assim, o rendimento para o procedimento arame tubular é de 0,75 a 0,95, numa média de 0,85 e, para o procedimento eletrodo revestido, o rendimento térmico é de 0,70 a 0,90, numa média de 0,80. Através dos cálculos é possível observar que para a amostra B o aporte térmico foi maior quando comparado às outras amostras, sendo assim, o esperado era que a ZTA fosse maior nesse processo. Porém, como dito anteriormente, outros fatores influenciam o tamanho da ZTA e, nesse caso, pode-se especular que o gás de proteção tenha influenciado nessa diferença, uma vez que para um mesmo nível de energia de soldagem, o procedimento arame tubular com 100% de CO₂ como gás de proteção implica em uma maior largura de cordão e penetração, quando comparado ao mesmo procedimento com 75% de argônio e 25% de CO₂ como gás de proteção. Essa diferença na morfologia do cordão pode ser explicada considerando-se que a utilização de CO₂ puro gera uma menor estabilidade ao arco, criando assim um arco mais disperso, que afetará diretamente a deposição dos cordões [22].

5.1.1 Diluição Global

Outra informação importante que se pode retirar das imagens resultantes da análise macrográfica é a diluição global de cada procedimento. A diluição global pode ser entendida como a relação entre a área penetrada, A_p , e a soma da mesma com a área depositada, A_d , como segue abaixo:

$$D(\%) = \frac{A_p}{(A_p + A_d)} \times 100$$

Utilizando das macrografias e com o auxílio do software AutoCAD é possível calcular as áreas citadas previamente, Figuras 40-42, para poder estabelecer uma relação entre elas e averiguar a diluição global de cada processo.

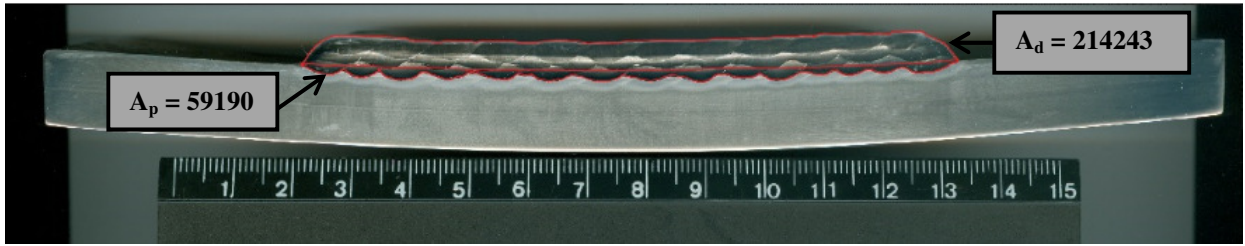


Figura 40: Parâmetros para cálculo de diluição amostra A

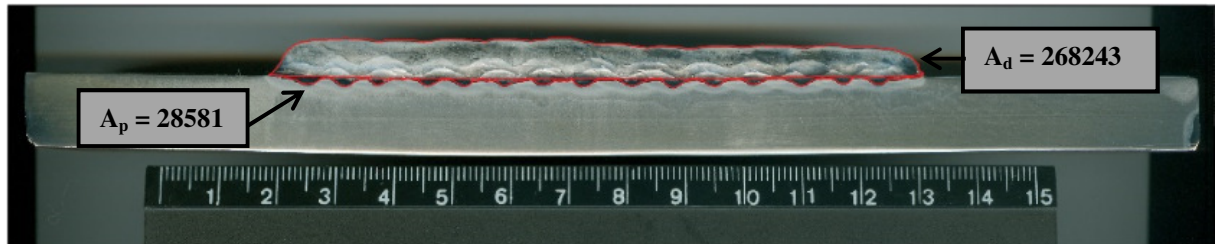


Figura 41: Parâmetros para cálculo de diluição amostra B

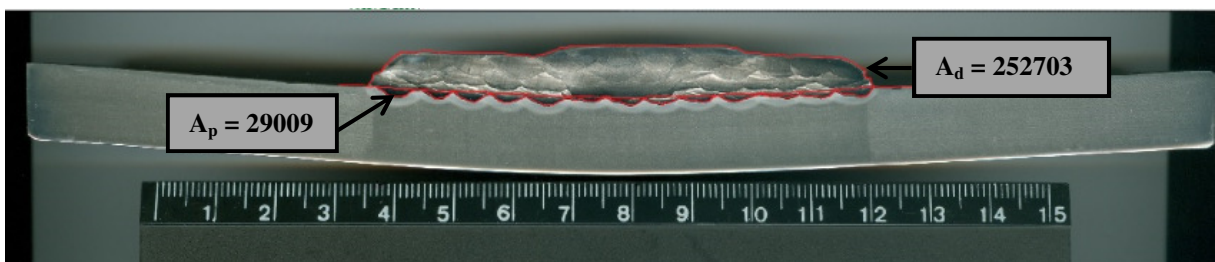


Figura 42: Parâmetros para cálculo de diluição amostra D

De acordo com as áreas obtidas pelo software e com a fórmula apresentada para o cálculo de diluição, tem-se que as diluições para as amostras A, B e D são de 21,6%, 9,6% e 10,3%, respectivamente.

As diferentes taxas de diluição podem ser explicadas devido aos diferentes aportes térmicos aplicados em cada processo. Um maior aporte térmico equivale a uma maior diluição. Isso se prova válido quando observado as amostras A e D, porém a amostra B, que foi soldada com maior aporte térmico foi a que obteve a menor diluição quando comparada às outras. Essa anomalia pode ser explicada através do mesmo princípio observado para a formação da ZTA. Apesar de o processo apresentar um maior aporte térmico, o gás de proteção utilizado influenciou diretamente no comportamento da deposição dos cordões. A mistura do gás inerte com 25% de CO₂ proporciona uma menor diluição por promover uma maior estabilidade e menor dispersão do arco [22].

Quanto menor a diluição, melhor o processo para soldagem de revestimento, pois a redução da diluição minimiza a formação de microestruturas de alta temperabilidade, que podem vir a se tornar susceptíveis a ataques corrosivos. Além disso, altos valores de diluição

podem proporcionar uma maior probabilidade de formação de trincas de solidificação no metal de solda [24].

5.2 Análises Micrográficas

As análises micrográficas têm como principal objetivo avaliar a microestrutura do revestimento e do substrato e, de como o substrato pode ter sido afetado pela deposição do revestimento. É possível dessa forma, avaliar o crescimento da zona parcialmente diluída (ZPD) e avaliar a presença de fases que podem deteriorar as propriedades de resistência à corrosão do revestimento. A seguir serão discutidos os resultados de micrografia para o metal de base e, em seguida, para o metal de solda.

5.2.1 Metal de Base

Através das análises da microestrutura do metal de base pelo microscópio óptico, foi possível verificar que a deposição do revestimento ocasionou uma mudança na sua microestrutura original.

Na Figura 25 é possível observar a estrutura original do metal de base, composta por perlita e ferrita em uma disposição típica do processo de laminação. Os grãos alongados em uma direção indicam como a laminação se deu nesse aço. Todas as amostras apresentaram o mesmo padrão para o metal de base, indicando que todas as chapas utilizadas nesse trabalho como substrato foram provenientes do mesmo processo conformação.

Na Figura 26 se pode notar o início da zona termicamente afetada, região onde os grãos grosseiros de perlita e ferrita, afetados pelo calor do processo de soldagem, se tornam mais finos e desorientados, formando uma estrutura sem um padrão de distribuição claro como visto na microestrutura original. Todas as amostras apresentaram o mesmo padrão de transformação. A variação entre as amostras se deu na extensão da zona termicamente afetada devido ao processo de soldagem utilizado e ao aporte térmico.

É importante observar que nas regiões próximas à interface uma região rica em martensita foi encontrada. Como essa região foi vista em todas as amostras, como soldadas e após tratamento térmico de alívio de tensões, pode-se concluir que sua formação se deu devido aos diversos ciclos térmicos de soldagem. A presença de martensita pode aumentar a tendência à formação de zonas frágeis localizadas devido à sua alta dureza, portanto a presença dessa microestrutura é indesejada.

5.2.2 Metal de Solda

A microestrutura presente no metal de solda é predominantemente dendrítica, característica da solidificação proveniente dos cordões de solda depositados. A mesma estrutura colunar foi observada em todos os espécimes. As amostras A, A1, B e B1 diferiram das demais, pois apresentaram a formação de fases ao longo do metal de solda. Com o auxílio da microscopia eletrônica de varredura e utilizando sua função de espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDS), foi possível entender que as fases formadas são ricas em molibdênio. A identificação correta das fases só é possível se utilizado o sistema de difração de elétrons retroespalhados (EBSD), porém com base na literatura, pode-se especular que as fases formadas podem ser do tipo carbeto primários e Laves [16]. Para avaliar essas estruturas, a utilização da Figura 43 se mostra interessante.

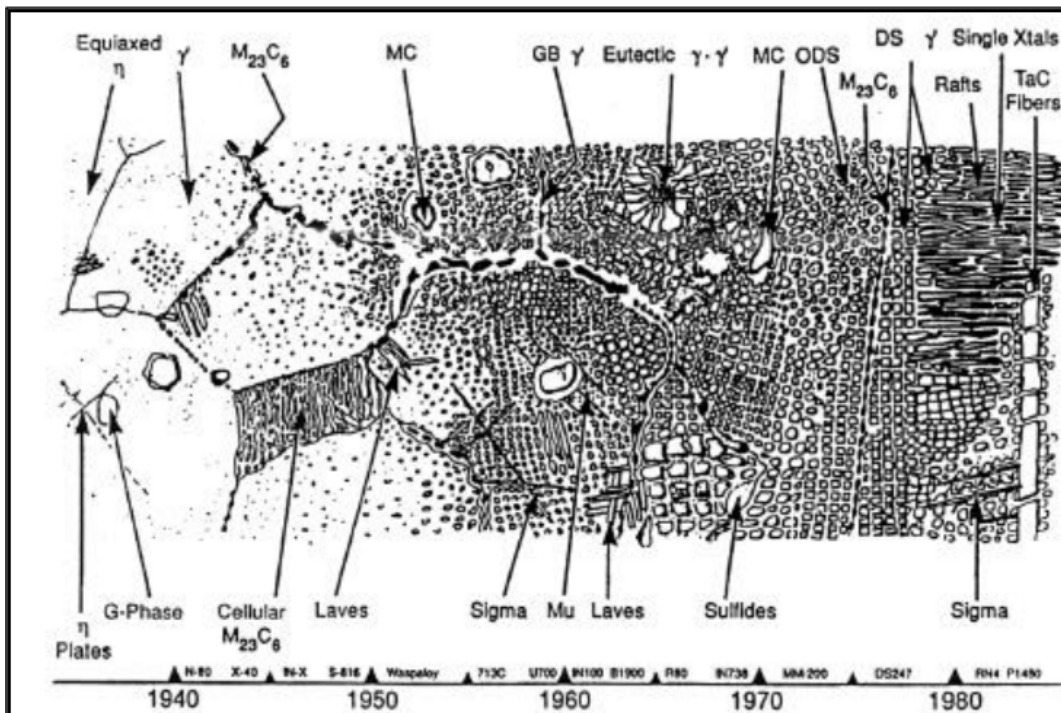


Figura 43: Fases presentes em ligas à base de níquel [16]

Os carbeto podem afetar a resistência a altas temperaturas e as propriedades de fluência da liga, como visto no Capítulo 2. Já a presença em grande quantidade da fase Laves prejudica a ductilidade em baixas temperaturas.

As fases esféricas apresentadas na Figura 27 podem ser entendidas como inclusões provenientes do processo de soldagem por arame tubular, uma vez que não apresentam geometria equivalente a nenhuma fase relacionada às ligas de níquel-cromo.

5.3 Ensaio de Microdureza

Utilizando como critério de avaliação para o ensaio de microdureza a norma NACE MR 0175 [25], confere-se que a dureza para o metal de base não deve ultrapassar 250 HV. De acordo com os resultados apresentados anteriormente, todas as amostras foram aprovadas. Para a linha de fusão, a literatura evidencia que valores em torno de 400 HV podem ser encontrados [17]. O valor de 323,3 HV encontrado na linha de fusão para a amostra B indica a presença de uma zona frágil localizada que pode se tornar um ponto provável de formação e propagação de trincas. Para comprovar a existência dessas zonas de elevada dureza nas demais amostras, novas medidas de dureza devem ser feitas. Esses pontos estão localizados em sua maior parte na zona parcialmente diluída, o que torna difícil sua medição, uma vez que as ZPD's possuem pequeníssima extensão.

As medições realizadas no metal de base, ZTA, região predominantemente martensítica, não apresentaram valores superiores aos 250 HV aceitáveis. Eram esperados altos valores de microdureza nessa região, característicos da microestrutura. A baixa microdureza na região martensítica pode ser explicada devido a um possível revenimento que a microestrutura possa ter sofrido durante os ciclos térmicos de soldagem.

Outra observação importante é a comparação entre as microdurezas das amostras tratadas termicamente e como soldadas. Era esperado que a microdureza das amostras tratadas termicamente fosse ser maior do que as como soldadas, pois com o tratamento térmico carbeto podem se precipitar ao longo da estrutura [26]. Porém, ao avaliar os resultados obtidos, nota-se que os valores entre ambas as condições não diferiu significativamente. Pode-se concluir que o tratamento térmico realizado não foi suficiente para precipitar os carbeto que são responsáveis pela elevação da microdureza vista na literatura.

5.4 Ensaio de Dobramento

As amostras submetidas ao ensaio de dobramento pela norma ASME Seção IX Parte QW-163 não apresentaram quaisquer descontinuidades no revestimento, nem qualquer deslocamento entre os materiais na interface onde ocorreu a deposição. Sendo assim, todos os corpos de prova foram aprovados e os processos qualificados como apropriados para a aplicação de deposição de revestimentos com a liga INCONEL 625, de acordo com a norma Petrobras N-2568 [27], onde o corpo de prova é considerado ideal quando não há microtrincas ou, existem microtrincas superficiais.

5.5 Análise Química

A análise química realizada é importante para avaliar a extensão da zona parcialmente diluída. Além disso, é essencial para que seja calculado o número que indica capacidade de resistência por pites (PREN) do revestimento. Esse número é característico para cada material em particular e pode ser preditivo do meio a que o material poderá ser submetido.

Averiguando os resultados apresentados no capítulo 4 é possível observar que na interface entre o metal de base e o metal de solda, ou seja, na linha de fusão, o elemento predominante na composição química foi o ferro, com o teor de aproximadamente 98%. Esse teor é indicador da forte presença do metal de base nessa região. É interessante notar que os teores de ferro e de níquel são inversamente proporcionais, ou seja, na medida em que há o afastamento da linha de fusão, os teores de ferro e de carbono caem e, os teores de níquel e cromo se elevam até atingirem o patamar da composição química final do consumível de soldagem, aproximadamente 65% de níquel. Ao atingir essa estabilidade na composição, é possível afirmar que a zona parcialmente diluída findou-se, tendo a partir dessa cota a presença do metal de solda de acordo com o fornecido pelo fabricante. As Figuras 44 e 45 apresentam gráficos comparativos dos principais elementos presentes na zona de diluição e como seus teores variam conforme há o afastamento da linha de fusão.

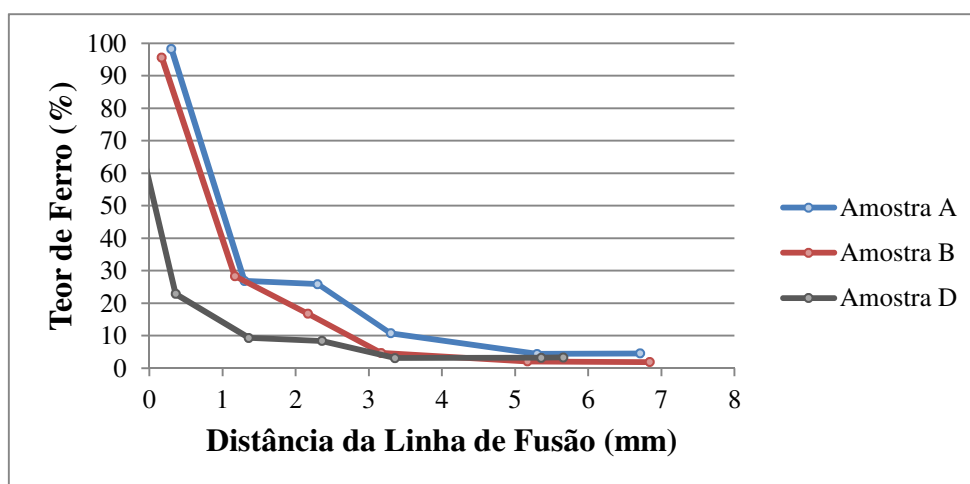


Figura 44: Variação do teor de ferro com o afastamento da linha de fusão

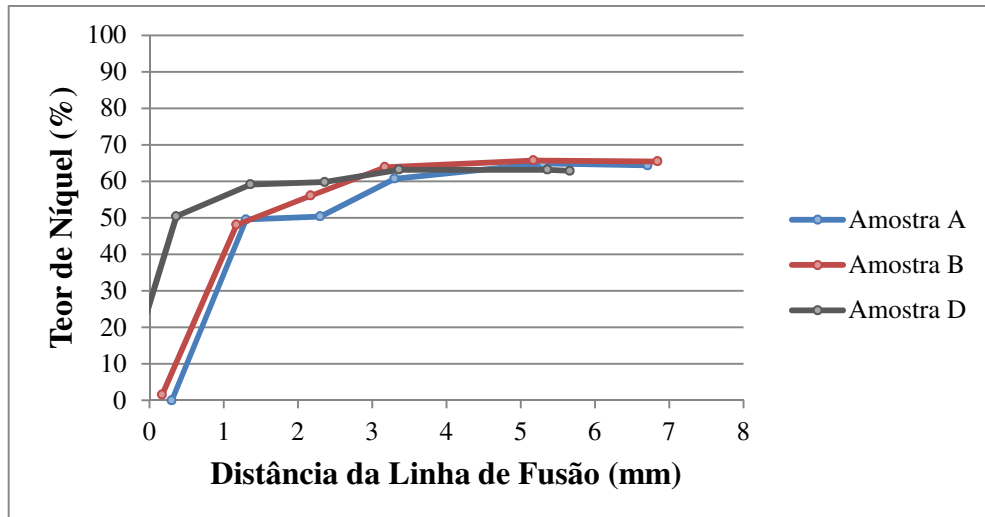


Figura 45: Variação do teor de níquel com o afastamento da linha de fusão

A composição química dos elementos citados se estabiliza em torno de 3 mm a partir da linha de fusão, como se pode observar pelos gráficos apresentados. Os revestimentos depositados por soldagem não devem possuir espessura inferior a 3 mm [28] e pode-se entender que essa instrução se deve à essa espessura de diluição que não garante as propriedades anti-corrosão do revestimento.

Além de avaliar a extensão da zona parcialmente diluída, a análise química possibilita o cálculo do PREN [29], que avalia a resistência à corrosão de um determinado material, como se segue:

$$\text{PREN} = \%Cr + 3,3 \times (\%Mo + 0,5 \times \%W) + 16 \times \%N$$

Como observado na norma ISO 15156-3 [29], existem diferentes fórmulas para a obtenção do PREN. Outra forma de calculá-lo seria através da seguinte fórmula para ligas austeníticas:

$$\text{PREN} = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 30 \times \%N$$

Tomando os valores apresentados na análise química para uma distância de 3 mm da linha de fusão, tem-se os valores de PREN iguais a 42 para a amostra A, 47 para a amostra B e 49 para a amostra D, para ambas as fórmulas citadas. Quanto maior o PREN, melhor é o comportamento do material em relação à corrosão por pites. Valores acima de 40 estão associados aos aços super duplex que apresentam excelente resistência à corrosão por pites [30]. Sendo assim, percebe-se que a liga de níquel INCONEL 625 utilizada no presente

trabalho possui excelente resistência à corrosão por pites, podendo ser comparada à família dos aços inoxidáveis super duplex.

A análise química também permite fazer uma avaliação da porcentagem de ferro existente na superfície no revestimento. De acordo com a norma ISO 10423 [31], para ligas que resistentes à corrosão para a aplicação em revestimentos, não é permitido que haja mais do que 5% de ferro na última camada (superfície) do revestimento para a garantia de um bom desempenho em serviço. Pela análise química é possível ver que para todos os revestimentos o teor de ferro foi inferior a 5%, garantindo a qualidade do revestimento de acordo com a norma.

5.6 Ensaio de Corrosão

Todas as amostras foram submetidas aos ensaios de corrosão de acordo com a norma ASTM G48 [21] como apresentado no capítulo 4, item 6. Todas as amostras, exceto a amostra A, soldada por arame tubular e com 100% de CO₂ como gás de proteção, apresentaram resultados satisfatórios, uma vez que não apresentaram perda de massa inferior a 4,0 g/m² [32]. A amostra A, além de apresentar pites, obteve perda de massa igual a 8,97 g/m². Esse resultado contradiz o número PREN encontrado para a composição do arame, uma vez que foi visto no item anterior que números acima de 40 implicam em uma excelente resistência à corrosão por pites.

Outro fato importante que deve ser observado foi a melhoria da resposta para a resistência à corrosão das amostras tratadas termicamente. Era esperado que a resistência à corrosão diminuísse nas amostras após o TTAT, uma vez que os ciclos térmicos aos quais as peças foram submetidas tornam prováveis o aparecimento de carbeto e precipitação de fases prejudiciais a essa característica metalúrgica.

5.7 Considerações Finais

A solução de utilizar revestimentos metálicos, como por exemplo, revestimentos por soldagem com a superliga de níquel INCONEL 625, visto nesse trabalho, se mostra muito interessante quando se tem a necessidade de aliar uma boa resistência mecânica com excelente resistência à corrosão. Um componente mecânico composto inteiramente pela superliga de níquel não é economicamente viável e, como visto, a construção desses componentes por aços duplex não se dá de forma simples.

Os estudos que visam entender como se dá a soldagem dissimilar entre esse materiais são muito importantes para que o procedimento se dê de forma correta, a fim de garantir as características exigidas pelo projeto.

Os procedimentos de soldagem apresentados nesse trabalho mostraram resultados satisfatórios para a deposição de revestimentos metálicos. Dentre as condições avaliadas, a melhor e mais recomendada é a deposição por arame tubular com gás de proteção igual a 75% de argônio e 25% de gás carbônico (amostra B). Comparando as duas amostras soldadas por esse procedimento, a amostra B obteve menor extensão da ZTA, menor diluição e melhores resultados no ensaio de corrosão. Sendo assim, uma especificação de procedimento de soldagem (EPS) para esse procedimento pode ser encontrada no Anexo I.

O procedimento de simulação de reparo por eletrodo revestido também apresentou excelente resultado, não havendo diferenças microestruturais entre a amostra como soldada originalmente e a amostra retirada da região de reparo. Ambas as condições apresentaram características muito próximas e, sendo assim, a situação de reparo por eletrodo revestido também foi aprovada. Uma especificação de procedimento de soldagem para essa condição é apresentada no Anexo II desse trabalho. Sobre a ótica das propriedades dos revestimentos obtidos é possível verificar que o procedimento de soldagem por eletrodo revestido se mostra adequado não apenas para a situação de reparo, mas também para a deposição de revestimentos como um todo.

Com relação ao tratamento térmico realizado, pode-se verificar que, como foi realizado abaixo da temperatura crítica de transformação, não houve mudança de fases. Pelas análises realizadas não foi possível afirmar que houve precipitação de carbeto ou fases prejudiciais ao revestimento. O tratamento térmico teve efeito significativo apenas na propriedade de resistência à corrosão. Nas demais propriedades não foi possível observar alterações substanciais. Para as amostras soldadas com arame tubular e 100% de gás carbônico (amostras A e A1) e, soldadas com eletrodo revestido (amostras D, D1, Dr e Dr1), o tratamento térmico ocasionou uma melhora substancial na resistência à corrosão. Contudo, não foi possível identificar a causa microestrutural dessa melhoria. Sendo assim, novas análises microestruturais se tornam necessárias para identificar a precipitação ou não de novas fases após o tratamento térmico de alívio de tensões que expliquem os resultados dos ensaios de corrosão. Além disso, estudos complementares relativos à resistência a corrosão devem ser realizados, uma vez que os resultados obtidos no presente trabalho não foram condizentes com o esperado, tomando-se como base o PREN da superliga INCONEL 625.

Capítulo 06

Conclusão

Os objetivos principais do trabalho foram avaliar o efeito do tratamento térmico de alívio de tensões nos revestimentos depositados pelos procedimentos de soldagem citados e, estudar a possibilidade da utilização da soldagem por eletrodo revestido com a finalidade de reparo.

Com base nos resultados dos ensaios e análises macro e micrográficas realizadas foi possível concluir que:

- (i) Todos os revestimentos apresentaram boa qualidade de deposição, sem descontinuidades ou defeitos superficiais, baseados nos ensaios de dobramento e análises macrográficas.
- (ii) Apesar de uma região martensítica ter sido encontrada na região termicamente afetada no metal de base, essa região não apresentou uma dureza correspondente à microestrutura, indicando um revenimento da martensita devido aos ciclos térmicos de soldagem.
- (iii) O procedimento de deposição de revestimentos por eletrodo revestido se mostrou adequado tanto para situações onde há a necessidade de reparo, quanto para a deposição de revestimentos para produção como um todo.
- (iv) O procedimento de deposição de revestimentos pelo processo arame tubular com 75% de argônio e 25% de gás carbônico apresentou excelentes resultados de acordo com as análises realizadas e se encontra qualificado segundo às condições informadas no presente trabalho.
- (v) Precipitados ricos em Molibdênio e Nióbio surgiram no metal de solda das amostras soldadas por arame tubular em ambas as condições, como soldadas e após TTAT. Não foi possível avaliar o efeito do surgimento desses precipitados no revestimento. Comparando os resultados com os obtidos por eletrodo revestido, procedimento que não apresentou a presença de tais precipitados, é possível especular que esses precipitados não influenciaram as propriedades do revestimento de forma geral.
- (vi) Foi possível identificar a presença de uma zona parcialmente diluída em todas as amostras, porém a composição química se estabilizou na distância de aproximadamente 3 mm da linha de fusão, espessura mínima para o revestimento metálico.

(vii) A amostra soldada pelo procedimento arame tubular com o gás de proteção igual a 100% de CO₂ não obteve resultados satisfatórios para o ensaio de corrosão no seu estado como soldado.

(viii) O tratamento térmico de alívio de tensões proporcionou uma melhoria na resistência à corrosão de todas as amostras avaliadas.

Capítulo 07

Sugestões Para Trabalhos Futuros

Com o trabalho realizado até o presente momento foi possível avaliar que muitas questões ainda precisam ser estudadas para melhor entender o comportamento de revestimentos metálicos resistentes à corrosão. Como sugestões para trabalhos futuros é possível citar:

- (i) Realizar estudos metalográficos dos revestimentos soldados para identificar as fases e precipitados formados ao longo da microestrutura do metal de solda.
- (ii) Realizar a deposição do revestimento pelo processo de soldagem TIG, pois é sabido que esse processo proporciona menor diluição.
- (iii) Realizar um estudo sobre o resultado do ensaio de corrosão e o porquê da diferença substancial entre as amostras soldadas por arame tubular com diferentes gases de proteção.
- (iv) Avaliar de forma mais extensiva o efeito do tratamento térmico de alívio de tensões, uma vez que à parte do ensaio de resistência à corrosão não foi possível observar nenhuma outra mudança entre as amostras soldadas e após TTAT.

Referências Bibliográficas

- [1] BRUNNSCHWEILER; **Vasos de Pressão**. São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.brunnschweiler.com.br/produtos.php?p=9>>. Acesso em: 10 maio 2014.
- [2] GIRALDO, C. P. S.; *Precipitação de Fases Intermetálicas na Zona Afetada pelo Calor de Temperatura Baixa (ZACTB) na Soldagem Multipasse de Aços Inoxidáveis Duplex*, Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2001.
- [3] PFINGSTAG, M. E.; SCHROEDER R. M.; MÜLLER I. L.; “Avaliação do Comportamento à Fadiga e à Corrosão-Fadiga de Juntas Soldadas da Liga Inconel 625 Testada para Uso em Plataformas Off-Shore”. *17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 15-19 Novembro 2006.
- [4] SILVA, C. C.; MENEZES, T. I. S.; MOTTA, M. F.; MIRANDA, H. C.; FARIAS, J. P.; “Evolução Microestrutural e Composicional de Interfaces de Soldas de Revestimentos Dissimilares Entre a Liga Inconel 625 e o Aço ASTM A516 Gr.60”. *ConSolda – Congresso Nacional de Soldagem*, CNS073, Natal, RN, Brasil, 03-06 Outubro 2011.
- [5] JOINING. Special Metals Corporation, SMC-055. 2003.
- [6] Soldagem de Metais Dissimilares para Aplicações de Alto Desempenho – Chapa Revestida. Ametek Specialty Metal Products. 2012.
- [7] Soldagem por Explosão – Processo de Soldagem para Obtenção de Chapas Cladeadas. MultiClad Indústria e Comércio de Processamento de Metais por Explosão Ltda. 2012.
- [8] BROWN, A.; “Weld Overlay Cladding – The Solution to Pump Corrosion?”, *World Pumps*, v. 0262, n. 1762/05, pp 50-53, October 2005.
- [9] CAMPOS, P. T.; *Caracterização Mecânica e Microestrutural de Juntas Soldadas Pelos Processos MIG/MAG (GMAW) e Arame Tubular (FCAW)*; Dissertação M.Sc., Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Curitiba, PR, Brasil, 2005.
- [10] Arames Tubulares OK, ESAB Product Brief, 2004.
- [11] BRACARENSE, A. Q.; *Processo de Soldagem com Arame Tubular – FCAW*; Universidade Federal de Minas Gerais.

- [12] MODENESI, P. J., MARQUES, P. V.; *Introdução aos Processos de Soldagem*; Belo Horizonte, 2006.
- [13] SILVA, C. C.; AFONSO, C. R. M.; RAMIREZ, A. J.; MOTTA, M. F.; MIRANDA, H. C.; FARIAS, J. P.; “Aspectos Metalúrgicos de Revestimentos Dissimilares com a Superliga à Base de Níquel Inconel 625”, *Soldag. Insp.*, São Paulo, v. 17, n. 3, p251-263, Set. 2012.
- [14] CARRETEIRO, R.; TERERAN, A.; “A Utilização de Ligas de Inconel 625 Plus no Segmento de Petróleo e Gás”, *TN Petróleo*, n 68, pp140-141.
- [15] INCONEL ALLOY 625. Special Metals Corporation, SMC-063. 2006.
- [16] PÉREZ, G. J. A.; *Caracterização das Fases Presentes em Depósito de Níquel ER-NiCrMo-3 em Tubos de Aço de 9Cr1Mo Usados em Fornos de Refinaria de Petróleo*; Dissertação M.Sc., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, 2005.
- [17] KEJELIN, N. Z.; *Influência dos Parâmetros de Soldagem na Formação de Zonas Parcialmente Diluídas em Soldas de Metais Dissimilares*; Dissertação M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2006.
- [18] ESAB, **Tratamento Térmico de Alívio de Tensões na Soldagem**. Minas Gerais, 2014. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/artigos_dissertacoes/tratamento_termico_alivio_tensoes.cfm> . Acesso em: 14 maio 2014.
- [19] ASTM A516/A516M – 10 Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Moderate- and Lower-Temperature Service.
- [20] ASME Boilers and Vessels Code, Section IX, Qualification Standard for welding and Brazing Procedures, Welders, Brazes, and Welding and Brazing Operators, July 1, 2000.
- [21] ASTM G48, Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution.
- [22] BERNARDI, V. B.; VALENTE, C. A. G. S.; SILVA, D. C.; MARANHO, O.; COLACO, F. H. G.; *Avaliação da influência de gases de proteção na soldagem de revestimentos duros aplicados pelo processo de soldagem com arames tubulares (FCAW)*; In: XVI Sicite - Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, 2011, Ponta Grossa.

Anais do XVI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Curitiba: Editora da UTFPR, 2011. v. 3. p. 100-104.

[23] MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B.; *Introdução à Metalurgia da Soldagem*; Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2006.

[24] SILVA, M. M.; OLIVEIRA, W. C.; MACIEL, T. M.; SANTOS, M. A.; MOTTA, M. F.; “Caracterização de solda de revestimento de AWS 317L depositados por GMAW duplo arame em aços ASTM a 516 gr 60 para uso na indústria do petróleo”; *Soldag. Insp.*, São Paulo, v. 15, n. 3, Set. 2010

[25] NACE MR 0175; Petroleum and natural gas industries - Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production; Part 2: Cracking-resistant carbon and low-alloy steels, and the use of cast irons, 2009.

[26] CATARIN, T. N.; NEVES, M. D. M.; “Caracterizações Mecânicas e Microestruturais do aço AISI 8630 modificado Revestido com a liga de Níquel 625 pelo processo de Soldagem TIG após vários ciclos térmicos de Alívio de Tensões”; *ConSolda – Congresso Nacional de Soldagem*, CNS033, Natal, RN, Brasil, 03-06 Outubro 2011.

[27] N- 2568, Revestimentos Metálicos por Aspersão Térmica; 2011.

[28] N-1707, Projeto de Vaso de Pressão com Revestimento Metálico.

[29] ISO 15156-3; Petroleum and natural gas industries - Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production; Part 3: Cracking-resistant CRAs (corrosion-resistant alloys) and other alloys (ISO 15156-3:2009).

[30] RIBEIRO, F. A.; SANTOS, H.; “Modificações da Composição Química do Aço Inoxidável Duplex Vazado 25Cr-6Ni-3Mo-3Cu para Melhoria da Resistência à Corrosão por Picadas”; *Ciência & Tecnologia dos Materiais*; Porto, Portugal, v.21, n. 1/2, 2009.

[31] ISO 10423, Petroleum and Natural Gas Industries—Drilling and Production Equipment - Wellhead and Christmas Tree Equipment; 2011.

[32] Norsok M-601; Welding and Inspection of Piping, Rev. 4, 2004.

ANEXO I

| | | |
|------------|--|-----------------------|
| EPS | ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM | Page: 1/2 Rev.: 00 |
| | Ref.: XXX-XX | Data: 13/11/14 |

EPS No.:

Procedimento de Soldagem: FCAW

Tipo: Semi-Automático

Norma de Referência: Código ASME Seção IX

| | |
|---|---|
| <p>JUNTA</p> <p>Detalhe da junta: ver croqui</p> <p>Reforço: N/A</p> <p>Outros: -----</p> | <p>METAL DE BASE</p> <p>Especificação do Material: ASTM A 516 Gr. 70</p> <p>Tipo ou Grau: P1 G.2</p> <p>Certificado: 776475</p> <p>Dimensões: 12,5 mm x 200 mm x 500 mm</p> <p>Outros: RG-20866 DS</p> |
| <p>METAL DE ADIÇÃO</p> <p>Especificação: AWS ENiCrMo-3 T1</p> <p>Diâmetro: 1,2 mm</p> <p>Marca Comercial : BOHLER Nibas 625</p> <p>PW-FD</p> <p>Outros: N/A</p> | <p>POSIÇÃO</p> <p>Posição do chanfro: 1 G (Plana)</p> <p>Progressão da junta: N/A</p> <p>Outros: -----</p> <p>PRÉ-AQUECIMENTO</p> <p>Temperatura de pré-aquecimento: 15 °C</p> <p>Temperatura interpasse: 150 °C</p> <p>Outros: -----</p> |
| <p>TRATAMENTO TÉRMICO PÓS-SOLDAGEM</p> <p>Temperatura: N/A // 620 a 640°C</p> <p>Tempo: N/A // 210 a 220 min (3 ciclos)</p> <p>Outros: N/A // Taxa de aquecimento/resfriamento: 50°C/h</p> | <p>GÁS</p> <p>Gás de proteção: Ar + CO2</p> <p>Composição: 75% Ar + 25 CO2</p> <p>Fluxo: 16 L/min</p> <p>Outros: -----</p> |

| | | |
|------------|--|----------------------------|
| EPS | ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM | Page: 2/2 |
| | Ref.: XXX-XX | Rev.: 00 Data: 13/11/14 |

| | |
|---|--|
| <p>CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS</p> <p>Corrente: Contínua Polaridade: Positiva Amperagem: 160 a 220 A Voltagem: 24 a 30V Outros: AT (max) – 2,0 kJ/mm</p> | <p>TÉCNICA</p> <p>Deposição: Filetada Oscilação: N/A Passe múltiplo ou único: Múltiplo Eletrodo múltiplo ou simples: Simples Velocidade de soldagem: 38 a 45 cm/min</p> |
| <p>LIMPEZA</p> <p>Inicial: Escovamento / Esmerilhamento Entre passes: Escovamento Goivagem: N/A Outros: -----</p> | <p>DETALHE DA JUNTA</p> <p style="text-align: center;">TRÊS CAMADAS</p> |

| | |
|--|---|
| <hr style="width: 80%; margin: auto;"/> <p>EMPRESA</p> | <hr style="width: 80%; margin: auto;"/> <p>AUTORIDADE CERTIFICADORA</p> |
| DATA: | DATA: |

ANEXO II

| | | |
|------------|--|-----------------------|
| EPS | ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM | Page: 1/2 Rev.: 00 |
| | Ref.: XXX-XX | Data: 13/11/14 |

EPS No.:

Procedimento de Soldagem: SMAW

Tipo: Manual

Norma de Referência: Código ASME Seção IX

| | |
|--|---|
| <p>JUNTA</p> <p>Detalhe da junta: ver croqui</p> <p>Reforço: N/A</p> <p>Outros: -----</p> | <p>METAL DE BASE</p> <p>Especificação do Material: ASTM A 516 Gr. 70</p> <p>Tipo ou Grau: P1 G2</p> <p>Certificado: 776475</p> <p>Dimensões: 12,5 mm x 200 mm x 500 mm</p> <p>Outros: RG-20866 DS</p> |
| <p>METAL DE ADIÇÃO</p> <p>Especificação: AWS ENiCrMo-3</p> <p>Diâmetro: 3,2 / 4,0 mm</p> <p>Marca Comercial : BOHLER 6222-MO</p> <p>Outros: N/A</p> | <p>POSIÇÃO</p> <p>Posição do chanfro: 1 G (Plana)</p> <p>Progressão da junta: N/A</p> <p>Outros: -----</p> <hr/> <p>PRÉ-AQUECIMENTO</p> <p>Temperatura de pré-aquecimento: 15 °C</p> <p>Temperatura interpasse: 150 °C</p> <p>Outros: -----</p> |
| <p>TRATAMENTO TÉRMICO PÓS-SOLDAGEM</p> <p>Temperatura: 620@640 °C</p> <p>Tempo: 210@220 °C (3 ciclos)</p> <p>Outros: Taxa de aquecimento/ resfriamento – 50°C/h</p> | <p>GÁS</p> <p>Gás de proteção: N/A</p> <p>Composição: N/A</p> <p>Fluxo: N/A</p> <p>Outros: -----</p> |

| | | |
|------------|--|----------------------------|
| EPS | ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM | Page: 2/2 |
| | Ref.: XXX-XX | Rev.: 00 Data: 13/11/14 |

| | |
|--|--|
| <p>CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS</p> <p>Corrente: Contínua Polaridade: Positiva Amperagem: 100 @ 130 A Voltagem: 23 @ 26V Outros: -----</p> | <p>TÉCNICA</p> <p>Deposição: Globular Oscilação: N/A Passe múltiplo ou único: Múltiplo Eletrodo múltiplo ou único: N/A Velocidade de soldagem: 28@30 cm/min</p> |
| <p>LIMPEZA</p> <p>Inicial: Escovamento / Esmerilhamento Entre passes: Escovamento Goivagem: N/A Outros: -----</p> | <p>DETALHE DA JUNTA</p> <p>50% DE SOBREPOSIÇÃO</p> <p>3ª CAMADA 2ª CAMADA 1ª CAMADA</p> <p>12,5</p> <p>80</p> <p>~20</p> |

| | |
|----------------------|---------------------------------------|
| <hr/> EMPRESA | <hr/> AUTORIDADE CERTIFICADORA |
| DATA: | DATA: |