

**Murilo Chaves de Mello**

**COMPARAÇÃO DO USO DE DIFERENTES  
COMPOSIÇÕES DO GÁS DE PROTEÇÃO NA  
SOLDAGEM PELO PROCESSO TIG DO AÇO  
INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX UNS S32750**

Monografia apresentada ao Programa de  
Educação Continuada em Engenharia da Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
conclusão de curso de Especialização em  
Engenharia de Soldagem.

São Paulo

Maio/2015

**Murilo Chaves de Mello**

(Engenheiro Mecânico, Mackenzie, 2012)

**COMPARAÇÃO DO USO DE DIFERENTES  
COMPOSIÇÕES DO GÁS DE PROTEÇÃO NA  
SOLDAGEM PELO PROCESSO GTAW DO AÇO  
INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX UNS S32750**

Monografia apresentada ao Programa de  
Educação Continuada em Engenharia da Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração:  
Engenharia da Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi

São Paulo

Maio/2015

*A imaginação é mais importante que o conhecimento.*

*Albert Einstein*

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha noiva Tatiane pela compreensão,  
apoio e paciência.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço profundamente ao Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi pela orientação deste trabalho e por todos os ensinamentos transmitidos, que são de extrema importância para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradeço sinceramente ao engenheiro de soldagem Martial Yoran David que tornou possível a realização deste estudo. Agradeço ao meu amigo Jaime Casanova Soeiro Jr. pelo suporte prestado do começo até o final deste trabalho. Ao engenheiro de soldagem Eric Hanada Guedj pelo incentivo e apoio que foi de extrema importância no período final deste estudo.

Em ênfase, agradeço ao soldador, que se tornou um grande amigo, Pasqualino Pennuto pela soldagem de todos os corpos de prova. Da mesma maneira, agradeço ao soldador Giovanni Anastasia que prestou total suporte na preparação dos corpos de prova e no acompanhamento da soldagem dos mesmos.

Agradeço a AIR LIQUIDE BRASIL, em especial ao Rogério Veiga, pelo fornecimento dos gases utilizados nos experimentos.

Agradeço finalmente a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse concluído.

## **CURRICULUM VITAE**

### **Formação:**

Engenheiro Mecânico, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo-SP, 12/2012.

### **Experiência Profissional:**

Engenheiro de Soldagem, Saipem do Brasil, 06/2013 até Presente data.  
Fabricação de equipamentos *subsea*.

- Responsável pela elaboração, execução e emissão dos documentos de qualificação de procedimento de soldagem;
- Gerenciamento de qualificação de soldadores (planejamento, execução e emissão dos certificados);
- Suporte técnico a fabricação em problemas de soldagem e emissão de procedimentos de trabalho;
- Elaboração e emissão de consultas técnicas;
- Analisar e definir a ação corretiva de não conformidades relacionadas a soldagem.

## **RESUMO**

Os aços inoxidáveis duplex (AID) apresentam propriedades mecânicas superiores, melhor resistência a corrosão-sob-tensão, corrosão por pites e corrosão por frestas em meios agressivos, quando comparados aos aços inoxidáveis comuns austeníticos e ferríticos. Por apresentarem estas características, os AID se tornaram potenciais substitutos dos aços inoxidáveis convencionais nas indústrias químicas, petroquímicas, de óleo e gás, papel e celulose, entre outras. Os AID apresentam microestruturas balanceadas, com regiões de ferrita (CCC) e austenita (CFC). O que diferencia os aços inoxidáveis superduplex (AISD) dos AID é o seu índice superior de corrosão por pites (PRE), que está relacionado à composição química do material. Na soldagem de AID, diversos cuidados devem ser tomados para garantir as mesmas propriedades mecânicas e resistência à corrosão, quando comparadas ao metal de base, na zona fundida (ZF) e zona afetada pelo calor (ZAC). A composição da atmosfera protetora influencia diretamente a soldabilidade e as mudanças de fase na ZF e ZAC de uma junta soldada, no caso da soldagem pelo processo TIG. O presente trabalho compara a utilização de 99,99%Ar, 97,5%Ar + 2,5%N<sub>2</sub>, 90%Ar + 10%He e 88%Ar + 10%He + 2%N<sub>2</sub>, como atmosfera protetora, na soldagem do AISD UNS S32750 pelo processo de soldagem TIG. Na soldagem multipasse, a mistura ternária apresentou a energia absorvida mais elevada na ZF no ensaio de impacto, o balanço entre o teor de ferrita e o teor de austenita mais próximo do metal de base e a menor perda de massa no ensaio de corrosão.

## **ABSTRACT**

Duplex stainless steel (DSS) exhibit higher mechanical properties, better resistance to stress corrosion cracking, pitting and crevice corrosion when exposed to aggressive environments, when compared to austenitic and ferritic stainless steels. Due to this characteristics, DSS have become potential substitute of the common stainless steels in chemical, petrochemical, oil and gas, paper and other industries. DSS are characterized by a duplex microstructure comprised of regions of both ferrite (BCC) and austenite (FCC) phases. Superduplex stainless steels (SDSS) are differed to duplex stainless steels (DSS) by their higher pitting resistance equivalency (PRE), which is related to chemical compositions of the steels. In DSS welding, some points have to be taken in consideration to ensure the same mechanical properties and corrosion resistance, when compared to the base metal, in the fusion zone (FZ) and heated affected zone (HAZ). The shielding gas composition, when tungsten inert gas (TIG) welding process is chosen, affect directly the weldability and the phases transformation on the FZ and HAZ of a welded joint. The present study compare the use of 99,99%Ar, 97,5%Ar + 2,5%N<sub>2</sub>, 90%Ar + 10%He and 88%Ar +10%He + 2%N<sub>2</sub>, as shielding gas in the welding of the SDSS UNS S32750 by TIG welding process. In the multipass welding, the ternary mixture has shown the highest absorbed energy in the FZ in the impact test, the best balance between ferrite phase and austenite phase in comparison with the base metal and the lowest weight loss in the corrosion test.

## **LISTA DE FIGURAS**

|                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 – Diagrama de Schaeffler para estimar a microestrutura da zona fundida de Al [2] .....                                                                                | 15 |
| Figura 2.2 – Diagrama de DeLong para estimar a microestrutura da zona fundida de Al [2] .....                                                                                    | 17 |
| Figura 2.3 – Diagrama WRC-1992 [2] .....                                                                                                                                         | 18 |
| Figura 2.4 – Solubilidade do Nitrogênio na ferrita e na austenita [4] .....                                                                                                      | 23 |
| Figura 2.5 – Sistema operacional do processo de soldagem TIG [1] .....                                                                                                           | 27 |
| Figura 2.6 – Formato do arco elétrico e perfil da zona fundida em função da afiação do eletrodo em atmosfera protetora com argônio puro (150A; 2s; cordão sobre chapa) [1] ..... | 32 |
| Figura 2.7 – Sistema de coordenadas (x, y, z) para o deslocamento da fonte de calor [9] .....                                                                                    | 35 |
| Figura 2.8 – Diferentes ciclos térmicos de soldagem para uma junta soldada [8] .....                                                                                             | 38 |
| Figura 2.9 – Repartição térmica de uma junta soldada [8] .....                                                                                                                   | 39 |
| Figura 2.10 – Formato da poça de fusão na soldagem do aço inoxidável 304 pelo processo de soldagem TIG autógeno [9] .....                                                        | 40 |
| Figura 2.11 – Ciclo térmico de soldagem na ZAC em um ponto localizado perto da ZDL [4] .....                                                                                     | 44 |
| Figura 2.12 – Efeito do aporte de calor no crescimento de grãos de ferrita (tempo acima da temperatura solvus da ferrita) [4] .....                                              | 45 |
| Figura 4.1 – Equipamento para a afiação do eletrodo de tungstênio .....                                                                                                          | 53 |

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.2 – Soldagem dos corpos de prova na posição 5G, com progressão ascendente.....                                   | 54 |
| Figura 4.3 – Detalhe da junta .....                                                                                       | 55 |
| Figura 4.4 – Divisão dos quadrantes para o passe de raiz .....                                                            | 55 |
| Figura 4.5 – Identificação dos quadrantes para o segundo passe .....                                                      | 56 |
| Figura 4.6 – Sequência de rotação para o passe de raiz .....                                                              | 57 |
| Figura 4.7 – Sequência de rotação para o segundo passe .....                                                              | 57 |
| Figura 4.8 – Microscópio óptico Olympus BX60M.....                                                                        | 60 |
| Figura 5.1 – Variação da tensão para o passe de raiz do CP1 .....                                                         | 63 |
| Figura 5.2 – Variação da tensão para o segundo passe do CP1 .....                                                         | 63 |
| Figura 5.3 – Variação da tensão para o passe de raiz do CP2 .....                                                         | 64 |
| Figura 5.4 – Variação da tensão para o segundo passe do CP2 .....                                                         | 64 |
| Figura 5.5 – Variação da tensão para o passe de raiz do CP3 .....                                                         | 65 |
| Figura 5.6 – Variação da tensão para o segundo passe do CP3 .....                                                         | 65 |
| Figura 5.7 – Variação da tensão para o passe de raiz do CP4 .....                                                         | 66 |
| Figura 5.8 – Variação da tensão para o segundo passe do CP4 .....                                                         | 66 |
| Figura 5.9 – Comparação das energias de soldagem [kJ/mm] sem considerar a eficiência térmica do processo de soldagem..... | 69 |
| Figura 5.10 – Comparação das energias de soldagem [kJ/mm] considerando a eficiência térmica do processo de soldagem.....  | 69 |
| Figura 5.11 – Recomendação do fabricante de consumível para a energia de soldagem do segundo passe [13].....              | 70 |
| Figura 5.12 – Valores encontrados de energia absorvida no ensaio de impacto .....                                         | 72 |

|                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 5.13 – Valores do coeficiente de variação da energia absorvida no ensaio de impacto .....                                                                                                                                 | 72 |
| Figura 5.14 – Valores encontrados da expansão lateral no ensaio de impacto                                                                                                                                                       | 73 |
| Figura 5.15 – Valores do coeficiente de variação da expansão lateral no ensaio de impacto.....                                                                                                                                   | 73 |
| Figura 5.16 – Relação da dimensão do corpo de prova e o fator de redução para o requisito de energia absorvida para o ensaio de impacto .....                                                                                    | 75 |
| Figura 5.17 – Efeito da fração volumétrica de ferrita e da temperatura do ensaio Charpy na energia absorvida [7] .....                                                                                                           | 77 |
| Figura 5.18 – Resultado da análise do teor de ferrita para todas as condições                                                                                                                                                    | 78 |
| Figura 5.19 – Estimativa do tempo de resfriamento entre 1200°C e 800°C para o passe de raiz utilizando a energia de soldagem calculada desconsiderando a eficiência do processo de soldagem TIG, CP1(A), CP2(B), CP3(C) e CP4(D) | 80 |
| Figura 5.20 – Estimativa do tempo de resfriamento entre 1200°C e 800°C para o passe de raiz utilizando a energia de soldagem calculada considerando a eficiência do processo de soldagem TIG, CP1(A), CP2(B), CP3(C) e CP4(D)    | 81 |
| Figura 5.21 – Previsão do número de ferrita (FN) para o passe de raiz para todas condições .....                                                                                                                                 | 84 |
| Figura 5.22 – Previsão do número de ferrita (FN) com efeito do segundo passe para todas condições .....                                                                                                                          | 85 |
| Figura 5.23 – Microestrutura do metal de base UNS S32750, aumento 200x                                                                                                                                                           | 86 |
| Figura 5.24 – Resultado da análise microestrutural do CP1 para o passe de raiz .....                                                                                                                                             | 89 |
| Figura 5.25 – Resultado da análise microestrutural do CP1 com o efeito do segundo passe .....                                                                                                                                    | 90 |

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 5.26 – Resultado da análise microestrutural do CP2 para o passe de raiz .....               | 91 |
| Figura 5.27 – Resultado da análise microestrutural do CP2 com o efeito do segundo passe .....      | 92 |
| Figura 5.28 – Resultado da análise microestrutural do CP3 para o passe de raiz .....               | 93 |
| Figura 5.29 – Resultado da análise microestrutural do CP3 com o efeito do segundo passe .....      | 94 |
| Figura 5.30 – Resultado da análise microestrutural do CP4 para o passe de raiz .....               | 95 |
| Figura 5.31 – Resultado da análise microestrutural do CP4 com o efeito do segundo passe .....      | 96 |
| Figura 5.32 – Resultado do ensaio de corrosão para todas as condições .....                        | 97 |
| Figura 5.33 – Imagens com 20x de aumento do ensaio de corrosão para o passe de raiz .....          | 98 |
| Figura 5.34 – Imagens com 20x de aumento do ensaio de corrosão com o efeito do segundo passe ..... | 98 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1 – Relação de cromo e níquel equivalente para A1 austeníticos [2] .                                                                  | 16 |
| Tabela 2.2 – Composição química de aços inoxidáveis duplex típicos [2] .....                                                                   | 21 |
| Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis duplex e superduplex [2].....                                                   | 24 |
| Tabela 2.4 – Código de cores e elementos de liga para vários eletrodos de tungstênio [1].....                                                  | 30 |
| Tabela 4.1 – Composição química do metal de base.....                                                                                          | 51 |
| Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas do metal de base.....                                                                                      | 51 |
| Tabela 4.3 – Composição química do consumível de soldagem.....                                                                                 | 52 |
| Tabela 4.4 – Propriedades mecânicas do consumível de soldagem.....                                                                             | 52 |
| Tabela 4.5 – Composição química de cada atmosfera protetora .....                                                                              | 52 |
| Tabela 5.1 – Valores encontrados da energia de soldagem sem considerar a eficiência térmica do processo de soldagem para o passe de raiz ..... | 67 |
| Tabela 5.2 – Valores encontrados da energia de soldagem sem considerar a eficiência térmica do processo de soldagem para o segundo passe ..... | 68 |
| Tabela 5.3 – Valores encontrados da energia de soldagem considerando a eficiência térmica do processo de soldagem para o passe de raiz .....   | 68 |
| Tabela 5.4 – Valores encontrados da energia de soldagem considerando a eficiência térmica do processo de soldagem para o segundo passe .....   | 68 |
| Tabela 5.5 – Porcentagem da energia de soldagem do segundo passe em relação a energia de soldagem do passe de raiz .....                       | 71 |
| Tabela 5.6 – Critério de aceitação para teste de impacto conforme norma Norsok M-601.....                                                      | 74 |

|                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 5.7 – Tempos de resfriamento estimados .....                                                                                                                              | 82 |
| Tabela 5.8 – Diluição do consumível de soldagem com o metal de base para o<br>passe de raiz.....                                                                                 | 82 |
| Tabela 5.9 – Diluição do consumível de soldagem com o metal de base com o<br>efeito do segundo passe .....                                                                       | 83 |
| Tabela 5.10 – Valores de $Cr_{eq}$ e $Ni_{eq}$ do consumível de soldagem e metal de<br>base .....                                                                                | 83 |
| Tabela 5.11 – Comparação entre os valores encontrados do número de ferrita<br>(FN) e a fração volumétrica de ferrita pela análise de imagem para o passe de<br>raiz .....        | 86 |
| Tabela 5.12 – Comparação entre os valores encontrados do número de ferrita<br>(FN) e a fração volumétrica de ferrita pela análise de imagem com efeito do<br>segundo passe ..... | 86 |
| Tabela 5.13 – Propriedades físicas do material de base UNS S32750 .....                                                                                                          | 88 |
| Tabela 5.14 – Valores de distância encontrados para $T_p = 700^{\circ}\text{C}$ .....                                                                                            | 88 |
| Tabela 5.15 – Valores de distância encontrados para $T_p = 900^{\circ}\text{C}$ .....                                                                                            | 88 |

**LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS**

|        |                                            |
|--------|--------------------------------------------|
| AI:    | Aço Inoxidável                             |
| AID:   | Aço Inoxidável Duplex                      |
| AI SD: | Aço Inoxidável Superduplex                 |
| CP:    | Corpo de Prova                             |
| CC:    | Corrente Contínua                          |
| CCC:   | Cúbica de Corpo Centrado                   |
| CFC:   | Cúbica de Face Centrada                    |
| LE:    | Limite de Escoamento                       |
| LR:    | Limite de Resistência                      |
| PRE:   | Índice de Resistência a Corrosão por Pites |
| TMP:   | Temperatura Mínima de Projeto              |
| TCC:   | Tetragonal de Corpo Centrado               |
| TIG:   | Tungsten Inert Gas                         |
| ZAC:   | Zona Afetada pelo Calor                    |
| ZDL:   | Zona de Ligação                            |
| ZF:    | Zona Fundida                               |

## **SUMÁRIO**

|                                                             |      |
|-------------------------------------------------------------|------|
| DEDICATÓRIA.....                                            | ii   |
| AGRADECIMENTOS .....                                        | iii  |
| CURRICULUM VITAE .....                                      | iv   |
| RESUMO.....                                                 | v    |
| ABSTRACT .....                                              | vi   |
| LISTA DE FIGURAS.....                                       | vii  |
| LISTA DE TABELAS .....                                      | xi   |
| LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS .....              | xiii |
| SUMÁRIO.....                                                | xiv  |
| 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA. ....                         | 1    |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. ....                              | 4    |
| 2.1 Aços Inoxidáveis.....                                   | 4    |
| 2.1.1 História dos Aços Inoxidáveis. ....                   | 4    |
| 2.1.2 Tipos e Aplicações dos Aços Inoxidáveis. ....         | 6    |
| 2.1.3 Efeito dos Elementos de Liga. ....                    | 7    |
| 2.1.3.1 ELEMENTOS DE LIGA ALFAGÊNICOS. ....                 | 8    |
| 2.1.3.1.a Cromo (Cr).....                                   | 8    |
| 2.1.3.1.b Silício (Si) .....                                | 9    |
| 2.1.3.1.c Molibdênio (Mo) .....                             | 10   |
| 2.1.3.1.d Nióbio (Nb) e Titânio (Ti).....                   | 11   |
| 2.1.3.2 ELEMENTOS DE LIGA GAMAGÊNICOS.....                  | 11   |
| 2.1.3.2.a Níquel (Ni) .....                                 | 11   |
| 2.1.3.2.b Manganês (Mn) .....                               | 12   |
| 2.1.3.2.c Carbono (C) e Nitrogênio (N) .....                | 13   |
| 2.1.4 Diagramas de Schaeffler, DeLong e WRC-1988 e 1992.... | 14   |
| 2.2 Aços Inoxidáveis Duplex.....                            | 20   |
| 2.2.1 Composições e Propriedades.....                       | 20   |
| 2.2.2 Importância do Nitrogênio.....                        | 22   |
| 2.2.3 Propriedades Mecânicas. ....                          | 23   |
| 2.2.4 Resistência a Corrosão .....                          | 24   |
| 2.3 Processo de Soldagem TIG.....                           | 26   |
| 2.3.1 Princípios de Operação. ....                          | 26   |
| 2.3.2 Variáveis do Processo.....                            | 27   |
| 2.3.3 Atmosfera Protetora.....                              | 29   |
| 2.3.4 Eletrodo de Tungstênio.....                           | 30   |
| 2.3.5 Vantagens e Desvantagens.....                         | 33   |
| 2.4 Transferência de Calor na Soldagem. ....                | 34   |
| 2.4.1 Eficiência da Fonte de Energia. ....                  | 34   |
| 2.4.2 Modelos de Transferência de Calor na Soldagem .....   | 34   |
| 2.4.3 História Térmica .....                                | 38   |

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.4.4 Efeito dos Parâmetros de Soldagem .....                            | 39  |
| 2.5 Soldagem e Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis Duplex. ....           | 40  |
| 2.5.1 Definição de Soldabilidade. ....                                   | 40  |
| 2.5.2 Solidificação. ....                                                | 41  |
| 2.5.3 Transformações de Fase no Estado Sólido. ....                      | 42  |
| 2.5.4 Microestrutura Desbalanceada. ....                                 | 42  |
| 2.5.5 Crescimento de Grãos de Ferrita na Zona Afetada pelo<br>Calor..... | 43  |
| 2.5.6 Precipitação de Austenita Secundária. ....                         | 46  |
| 2.5.7 Precipitação de Nitreto de Cromo. ....                             | 46  |
| 2.5.8 Precipitação de Fase Sigma. ....                                   | 47  |
| 2.5.9 Precipitação $M_{23}C_6$ . ....                                    | 47  |
| 2.5.10 Precipitação Fase Chi.....                                        | 48  |
| 2.5.11 Fragilização de 475°C. ....                                       | 48  |
| 3. OBJETIVOS. ....                                                       | 50  |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS.....                                              | 51  |
| 4.1 Metal de Base.....                                                   | 51  |
| 4.2 Consumível de Soldagem.....                                          | 51  |
| 4.3 Processo de Soldagem TIG.....                                        | 52  |
| 4.3.1 ATMOSFERA PROTETORA. ....                                          | 52  |
| 4.3.2 ELETRODO DE TUNGSTÊNIO.....                                        | 53  |
| 4.3.3 PARÂMETROS DE SOLDAGEM. ....                                       | 53  |
| 4.4 Realização da Soldagem.....                                          | 54  |
| 4.4.1 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA. ....                                 | 55  |
| 4.4.2 SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM. ....                                        | 55  |
| 4.5 Ensaios Realizados. ....                                             | 57  |
| 4.5.1 ENSAIO POR LÍQUIDO PENETRANTE. ....                                | 57  |
| 4.5.2 ENSAIO RADIOGRÁFICO.....                                           | 58  |
| 4.5.3 ENSAIO DE IMPACTO.....                                             | 58  |
| 4.5.4 ANÁLISE DO TEOR DE FERRITA. ....                                   | 58  |
| 4.5.5 ANÁLISE MACROESTRUTURAL.....                                       | 59  |
| 4.5.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....                                       | 59  |
| 4.5.7 ENSAIO DE CORROSÃO. ....                                           | 61  |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                           | 62  |
| 5.1 Ensaio por Líquido Penetrante. ....                                  | 62  |
| 5.2 Ensaio Radiográfico.....                                             | 62  |
| 5.3 Energia de Soldagem. ....                                            | 62  |
| 5.4 Ensaio de Impacto.....                                               | 71  |
| 5.5 Análise do Teor de Ferrita. ....                                     | 77  |
| 5.6 Análise Macroestrutural. ....                                        | 82  |
| 5.7 Análise Microestrutural. ....                                        | 86  |
| 5.8 Ensaio de Corrosão. ....                                             | 97  |
| 6. CONCLUSÕES. ....                                                      | 100 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</i> .....                             | 101 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....                                     | 102 |
| ANEXO I – Certificado do material de base.....                          | 104 |
| ANEXO II – Certificado do consumível de soldagem.....                   | 104 |
| ANEXO III – Certificado do argônio puro – 99,99% .....                  | 108 |
| ANEXO IV – Certificado da mistura 97,5%Ar + 2,5%N <sub>2</sub> .....    | 109 |
| ANEXO V – Certificado da mistura 90%Ar + 10%He.....                     | 110 |
| ANEXO VI – Certificado da mistura 88%Ar + 2%N <sub>2</sub> + 10%He .... | 111 |
| ANEXO VII – Certificado do analisador de oxigênio .....                 | 112 |
| ANEXO VIII – Relatório de ensaio por líquido penetrante.....            | 113 |
| ANEXO IX – Relatório de ensaio radiográfico .....                       | 114 |

## **1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.**

Os aços inoxidáveis (AI) são ligas de ferro (Fe) contendo no mínimo 11% de cromo (Cr) em sua composição química, sendo que alguns deles contêm até 30% de Cr ou menos que 50% de Fe. A resistência à corrosão é alcançada através de uma camada aderente de óxido, rico em Cr, que se forma na superfície destas ligas. Esta camada de óxido se forma naturalmente na presença de oxigênio. Com o objetivo de elevar algumas características particulares, alguns elementos de liga são adicionados à composição química, tais como, o níquel (Ni), molibdênio (Mo), cobre (Cu), titânio (Ti), alumínio (Al), silício (Si), nióbio (Nb), nitrogênio (N), enxofre (S) e selênio (Se). Nos aços inoxidáveis martensíticos, o carbono (C) está presente em quantidades entre menos de 0,03% até superiores a 1,0% [1,2,3].

Quando os AI devem ser selecionados para algum tipo de aplicação, alguns fatores podem ser tomados como base, como por exemplo, a resistência à corrosão, características de fabricação, disponibilidade, propriedades mecânicas em faixas de temperaturas específicas e custo. Entretanto, resistência à corrosão e propriedades mecânicas são normalmente os fatores mais importantes na seleção de um AI para uma determinada aplicação [1,2,3].

As primeiras descobertas e desenvolvimentos de AI tiveram origem na Inglaterra e Alemanha por volta de 1910. A utilização de AI iniciou-se na década de 1920 nos Estados Unidos e as empresas Allegheny, Armco, Carpenter, Crible, Firth-Sterling, Jessop, Ludlum, Republic, Rustless e U.S. Steel foram as pioneiras na produção destas ligas de aço.

Com o passar do tempo, os AI se consolidaram firmemente. São os materiais utilizados nas indústrias de utensílios de cozinha, cutelarias, itens arquitetônicos de decoração, equipamentos de uso em plantas químicas, laticínios, processamento de alimentos, aplicações na saúde, saneamento, petróleo, petroquímica, têxtil, farmacêutica e de transporte. Algumas destas aplicações envolvem exposição a ambientes com temperaturas elevadas e criogênicas. O aço inoxidável austenítico é adequado para os dois tipos de aplicações [1,2,3].

Os AI são divididos em cinco grupos: aços inoxidáveis martensíticos, aços inoxidáveis ferríticos, aços inoxidáveis austeníticos, aço inoxidável duplex (ferrítico-austenítico) e aços inoxidáveis endurecidos por precipitação.

Os aços inoxidáveis duplex (AID) possuem uma microestrutura balanceada entre ferrita e austenita, de modo que a fração volumétrica de cada fase é função da composição química e o tratamento térmico. Normalmente, estas ligas apresentam frações iguais de cada fase microestrutural. Os principais elementos de liga são o Cr e o Ni. O N, Mo, Cu, silício (Si) e tungstênio (W) podem ser adicionados para controlar o balanço microestrutural e elevar a resistência à corrosão. A resistência à corrosão dos AID é similar a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos com elementos de liga similares. Porém, os AID possuem limite de resistência a tração (LR) e limite de escoamento (LE) superior aos aços inoxidáveis austeníticos, além de possuir superior resistência a corrosão sob tensão. A tenacidade do AID está entre os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos [1,2,3].

Do ponto de vista da soldagem os primeiros AID possuíam baixa soldabilidade, principalmente pela falta de conhecimentos de processos

metalúrgicos que acontecem na zona afetada pelo calor (ZAC) e na zona fundida (ZF). No começo estes aços não possuíam um balanço microestrutural preciso. Na maioria dos casos, a fração volumétrica de ferrita era muito elevada, chegando a 70%. Isto levava a uma microestrutura quase completa em ferrita na ZAC. Estas zonas possuem propriedades mecânicas e resistência à corrosão inferiores, podendo-se aferir por que motivo estes aços não eram populares naquele tempo. Ainda hoje existe algum ceticismo em relação à soldabilidade dos AID. Podemos concluir então que esta seja a razão pela qual diversos estudos foram desenvolvidos com foco neste assunto nas últimas décadas [2].

Os AID modernos possuem um balanço bem preciso entre ferrita e austenita em sua microestrutura, 50% ferrita e 50% austenita, o que facilitará a formação da austenita na ZAC em juntas soldadas, garantindo então propriedades mecânicas e resistência à corrosão próxima ao metal de base. Recentemente a importância do N foi descoberta. O N é um potente estabilizador de austenita, fato que garantirá o balanço entre austenita e ferrita. Por apresentar esta característica, o N tornou a soldabilidade dos AID igual a dos aços inoxidáveis austeníticos [2].

Porém, na soldagem de AID, diversos cuidados devem ser tomados para garantir as mesmas propriedades mecânicas e resistência à corrosão, quando comparadas ao metal de base, na zona fundida (ZF) e ZAC. Caso estes cuidados não sejam tomados, as vantagens dos AID sobre os aços inoxidáveis tradicionais serão perdidas.

Um fator que influencia diretamente a soldabilidade e as mudanças de fase na ZF e ZAC é a composição da atmosfera protetora, no caso da

soldagem pelo processo TIG de AID. Desta maneira, o presente trabalho se torna importante, uma vez que serão estudadas em detalhes as mudanças microestruturais utilizando quatro atmosferas protetoras distintas, na soldagem do aço inoxidável superduplex (AID) UNS S32750 pelo processo TIG, além da soldabilidade para cada uma delas.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.**

### **2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS.**

Como dito anteriormente os aços inoxidáveis (AI) são ligas que contêm no mínimo 11% de Cromo (Cr) em sua composição química, com ou sem outras adições de liga. A resistência à corrosão e oxidação destas ligas de aço, se dá pela presença de um filme de óxido passivo rico em Cr. Este filme pode ser danificado, mas irá se recuperar rapidamente com a presença de oxigênio. Quando expostos a meios que possam danificar a camada passiva de óxido, os AI podem sofrer algum tipo de ataque à corrosão. A taxa de desenvolvimento da camada passiva de óxido depende da quantidade de Cr que o material possui em sua composição química e do meio onde o material está em contato [1,3,4].

#### **2.1.1 HISTÓRIA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS.**

Em 1821, o Francês Berthier desenvolveu uma liga de aço com 1,5% de Cr, recomendado para aplicações em cutelaria. Os primeiros experimentos com este tipo de liga, revelaram que com o aumento de Cr a formação do aço se

deteriorava dramaticamente, devido à grande quantidade de carbono (C) presente nestas primeiras ligas desenvolvidas, o que diminuiu o interesse por estes materiais até o século XX [1,4,5]. O interesse em ligas de aço, com resistência à corrosão ressurgiu entre os anos de 1900 e 1915, dando crédito a inúmeros metalurgistas pelo desenvolvimento de ligas resistentes a corrosão. Aparentemente o pioneiro por esta atividade renovada é Goldschmidt, que em 1897 na Alemanha, desenvolveu uma técnica para produzir ligas de baixo carbono [1,4,5].

Logo após, publicações descrevendo a microestrutura e propriedades de ligas de aços inoxidáveis martensíticos com 13% de Cr e ferríticos com 17% de Cr foram feitas por Guillet em 1904 e por Portevin e Giesen em 1909 [5]. Um estudo sobre ligas de aço Cr-Ni, precursoras dos aços inoxidáveis austeníticos, também foi feito por Guillet em 1909. Os estudos realizados em laboratório alavancaram consideravelmente o interesse por aços resistentes à corrosão em diferentes aplicações industriais. Entre 1910 e 1915 existiu um grande esforço para a comercialização destas ligas [5]. O primeiro lingote de aço inoxidável foi fundido nos Estados Unidos pela companhia Firth Sterling Ltd em março de 1915, que levou a patente atribuída ao metalurgista Harry Brearly. A patente cobria a faixa de 9 a 16% de Cr e menos que 0,7% de C. Os aços fabricados sob esta patente logo foram chamados de *Firth Stainless*.

Embora Brearly seja vastamente reconhecido como sendo o inventor dos aços inoxidáveis baseado em sua patente de 1915, é importante mencionar que sua patente só se tornou possível pelos estudos realizados anteriormente na França e Alemanha na década antecessora. Os trabalhos contemporâneos também devem ser reconhecidos: os americanos Dansitzen e

Becket pelas ligas ferríticas e os alemães Maurer e Strauss pelas ligas austeníticas [1,3,4,5].

### **2.1.2 TIPOS E APLICAÇÕES DOS AÇOS INOXIDÁVEIS.**

Os AI são largamente utilizados. Por apresentarem inúmeras variações, uma vasta gama de propriedades é alcançada e estes materiais são desejados em diferentes aplicações. A microestrutura e as propriedades destes aços foram definidas pelos inúmeros estudos conduzidos no passado [1,4,5].

Ao contrário dos outros tipos de materiais nos quais o sistema de classificação é normalmente definido baseando-se na composição química, os AI são classificados de acordo com a sua estrutura cristalina em temperatura ambiente. Existem algumas categorias gerais de aços inoxidáveis, incluindo as seguintes:

- Austeníticos – Cúbica de Face Centrada (CFC);
- Ferríticos – Cúbica de Corpo Centrado (CCC);
- Martensíticos – Tetragonal de Corpo Centrado (TCC);
- Duplex – Ligas contendo dois tipos de estruturas cristalinas (CFC) e (CCC);
- Ligas endurecidas por precipitação.

Aços inoxidáveis duplex (AID) são normalmente magnéticos, devido à sua concentração de ferrita [1,3,5].

As propriedades mecânicas e físicas dos AI são controladas pela composição química do material, fração volumétrica e morfologia das fases presentes, portanto variam bastante para cada tipo de AI [1,3,5]. Propriedades físicas como condutividade térmica, expansão térmica, resistividade elétrica influenciam as características de soldagem destes materiais. Por exemplo,

como os aços inoxidáveis austeníticos apresentam baixa condutividade térmica e alta expansão térmica, requerem técnicas mais complexas para minimizar a distorção durante a soldagem do que os aços inoxidáveis ferríticos ou martensíticos [1,3,5].

As características metalúrgicas dos aços inoxidáveis estão relacionadas com os efeitos das adições de elementos de liga em suas composições químicas e que afetam diretamente as transformações de fase destes materiais [3].

### **2.1.3 EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA.**

Os AI são ligas à base de Ferro (Fe) que contem de 12 até 50% de elementos de liga em sua composição química. Os elementos de liga, afetam o equilíbrio e a estabilidade das fases austenita, ferrita e martensita. Pode-se dividir os elementos de liga em dois grupos: elementos de liga alfa-gênicos, que estabilizam a ferrita, e elementos de liga gama-gênicos, que estabilizam a austenita. A fase martensita é produto de uma transformação a partir da austenita, através do resfriamento a partir de temperaturas elevadas. Caso não exista a formação de austenita em temperaturas elevadas, não ocorrerá a formação da martensita em baixas temperaturas.

Os principais elementos de liga, que afetam as características dos aços inoxidáveis são o Cromo (Cr), Silício (Si), Molibdênio (Mo), Nióbio (Nb) e Titânio (Ti), considerados alfa-gênicos, e o Níquel (Ni), Manganês (Mn), Cobre (Cu), Carbono (C) e Nitrogênio (N), considerados gama-gênicos. Outros elementos de liga também contribuem para as características metalúrgicas e

resistência à corrosão dos aços inoxidáveis, além de intencionalmente melhorar as propriedades mecânicas [1,3,5].

### 2.1.3.1 ELEMENTOS DE LIGA ALFAGÊNICOS.

#### 2.1.3.1.a Cromo (Cr).

O Cr é adicionado à composição química dos aços, principalmente para promover a resistência à corrosão. Este efeito é realmente eficaz em ambientes oxidantes como, por exemplo, ácido nítrico. Com a adição do Cr, o óxido  $(Fe,Cr)_2O_3$  irá se formar na superfície do aço. A presença do Cr aumenta a estabilidade da camada de óxido, uma vez que este elemento apresenta maior afinidade com o oxigênio do que o Fe. Quando a quantidade de Cr presente na composição química do aço exceder aproximadamente 11%, o aço é considerado inoxidável em ambientes naturais, como dito anteriormente. Em ambientes agressivos, a quantidade de Cr presente na composição química do material poderá ser superior [1,5,6].

Em ligas Fe-Cr contendo níveis superiores a 12% de Cr, a microestrutura formada será apenas de ferrita [5]. Em ligas Fe-Cr-C e Fe-Cr-Ni-C, o aumento de Cr em sua composição irá promover o aumento de ferrita e a redução de martensita e austenita. Portanto, em ligas duplex favorecerá a ferrita no balanço microestrutural. Nos aços ferríticos, o Cr é o elemento principal que estabiliza a microestrutura ferrítica.

O Cr também é um forte formador de carboneto. O carboneto mais comum rico em Cr é o  $M_{23}C_6$ , onde M é considerado predominantemente Cr mas pode conter frações de Fe e Mo. Este carboneto é encontrado praticamente em todos os Al. Também é possível formar o carboneto  $Cr_7C_3$ ,

que no entanto não é comum. Outros carbonetos mais complexos também podem ser formados, tal como o  $[M_{23}(C,N)_6]$ . O Cr também reage com o N formando nitretos, como por exemplo o  $Cr_2N$ , que pode ser encontrado tanto em aços ferríticos como em ligas de aços duplex [5,6,8].

O Cr também pode ser um elemento chave para formar componentes intermetálicos, ressaltando-se que muitos tendem a fragilizar a liga de Al. O mais comum é a fase sigma ( $\sigma$ ), que no sistema Fe-Cr se forma em temperaturas ao redor de  $815^{\circ}C$ . A fase sigma é mais comum em ligas austeníticas, ferríticas e duplex, com alto teor de Cr, apesar de poder se formar em praticamente qualquer aço inoxidável. O Cr também está presente em fases como Chi e outras fases intermetálicas [5,6,8].

Teores elevados de Cr em ligas ferríticas podem deteriorar o nível de tenacidade e ductilidade do material, principalmente quando C e N estão presentes. Em fabricação, a soldagem de ligas ferríticas, possuindo teores elevados de Cr, deve ser tratada com muito cuidado, ou o teor de C e N deve ser reduzido a níveis muito baixos para se atingir propriedades mecânicas aceitáveis.

#### *2.1.3.1.b Silício (Si).*

O Si pode ser adicionado a qualquer tipo de aço inoxidável, com função desoxidante durante a fusão. A faixa de composição presente na maioria das ligas é de 0,3 até 0,6%. Valores entre 4 e 5% de Si melhoram a resistência à corrosão, e quando adicionado entre 1 e 3% as ligas que trabalham em temperaturas elevadas, melhoram a resistência à oxidação pela formação de uma camada de óxido na superfície. A função do Si em promover a formação

de ferrita ou austenita não é muito clara. Em aços inoxidáveis austeníticos, adições de até 1% parece não alterar o balanço da fase microestrutural, mas adições superiores promovem a formação de ferrita. Em aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos. O Si ajuda na formação da ferrita [5,6,8].

O Si forma inúmeros silicetos, tais como  $\text{FeSi}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Si}$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}$ ,  $\text{Fe}_5\text{Si}_3$  e o intermetálico  $\text{Cr}_3\text{Si}$  [5,6], sendo que todos ajudam a fragilizar a microestrutura. Silício é conhecido por segregar durante solidificação, resultando na formação de constituintes eutéticos de baixo ponto de fusão e particularmente em combinação com o Ni. Portanto a adição do silício deve ser limitada em 1% [1,5].

O Si também aumenta a fluidez do material fundido, podendo por esta razão ser adicionado em quantidade, às vezes elevada, em materiais de adição para soldagem. Alguns Al, em particular os aços inoxidáveis austeníticos, apresentam fluidez muito baixa, de modo que a adição deste elemento de liga pode melhorar referida questão [5].

#### *2.1.3.1.c Molibdênio (Mo).*

O Mo é adicionado a inúmeros Al e apresenta diferentes funções, dependendo de cada material. Para aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos e duplex o Mo é adicionado em até 6%, ou em particular, em quantidades mais elevadas em aços inoxidáveis super austeníticos, com o objetivo de aumentar a resistência à corrosão, em específico a resistência à corrosão por pites e por frestas. Nos aços inoxidáveis austeníticos o Mo aumenta as propriedades em temperaturas elevadas. Como exemplo, com a adição de 2% de Mo na composição química da liga 18Cr-8Ni, a resistência a tração a 760°C irá

aumentar em 40%. Alguns aços inoxidáveis martensíticos contêm Mo como um formador de carboneto. Adições baixas como 0,5% de Mo contribuem para aumentar as características de endurecimento secundário, resultando no aumento do limite de escoamento e da resistência à tração em temperatura ambiente e o aumento das propriedades do material em temperaturas elevadas. Mo é um elemento formador de ferrita e sua presença irá promover a formação e retenção da ferrita na microestrutura. Tal fato pode constituir um problema para os aços martensíticos, nos quais a ferrita residual em temperatura ambiente pode reduzir a tenacidade e ductilidade [3,5].

#### *2.1.3.1.d Níobio (Nb) e Titânio (Ti).*

Nos aços inoxidáveis austeníticos o Nb e o Ti podem ser adicionados à composição do material para evitar a corrosão intergranular, pois estes elementos de liga estabilizam o C. Os dois elementos formam o carboneto tipo MC que é resistente à dissolução durante a soldagem e durante o tratamento térmico, prevenindo assim a formação de carbonetos ricos em Cr, que são associados com o início da corrosão intergranular [3,5].

### 2.1.3.2 ELEMENTOS DE LIGA GAMAGÊNICOS.

#### *2.1.3.2.a Níquel (Ni).*

A função principal do Ni é promover a formação de austenita, o que permite, então, a fabricação de ligas contendo predominantemente austenita ou austenita-ferrita. Adicionando quantidade suficiente de Ni na liga de aço, é possível expandir o campo da fase austenita, de modo a estabilizar esta fase

em temperatura ambiente ou inferior. O Ni não é um forte formador de carbonetos ou de modo geral não forma nenhum componente intermetálico. Por outro lado, existem evidências de que a presença deste elemento de liga pode influenciar na cinética de precipitação de fases [5]. Já se constatou que a presença de Ni em ligas ferríticas aumenta a resistência à corrosão, particularmente em ambientes contendo ácido sulfúrico. Mas de qualquer maneira, o Ni está associado à redução da resistência à corrosão sob tensão. Podemos considerar o Ni como sendo uma solução para elevar as propriedades do material, sendo mais eficaz, em termos de tenacidade, em materiais martensíticos e ferríticos. Adições de até 2% de Ni em aços inoxidáveis ferríticos com alto teor de Cr podem reduzir drasticamente a temperatura de transição dúctil-frágil do material [3,5,6].

#### *2.1.3.2.b Manganês (Mn).*

O Mn pode ser adicionado praticamente em qualquer tipo de aço. Para os aços inoxidáveis austeníticos, adiciona-se normalmente de 1 a 2% deste elemento. Já nos aços inoxidáveis ferríticos e martensítico adiciona-se menos que 1% de Mn. Este elemento de liga é considerado como sendo um elemento formador de austenita, mas sua eficiência em formar austenita depende da quantidade presente de Ni na composição química do aço. Podemos considerar que este elemento é eficiente em estabilizar a austenita em baixas temperaturas para prevenir a transformação em martensita. Já sua eficiência em promover austenita em temperaturas elevadas depende da composição química total da liga de aço [3,5,6].

O Mn também pode ser adicionado com a intenção de solubilizar o N, na austenita. Por exemplo, a adição de 15% de Mn na liga de Fe-20Cr aumenta a solubilidade do N de 0,25 para aproximadamente 0,4%. Os efeitos do Mn em relação às propriedades mecânicas são mínimos [3,5,6].

#### *2.1.3.2.c Carbono (C) e Nitrogênio (N).*

O C está presente em todos os aços. Para a liga C-Mn e aços baixa liga, é desejável controlar o C em quantidades inferiores a 0,1%, com exceção das ligas martensíticas onde o carbono é responsável pela transformação de fase que eleva a resistência mecânica destas ligas. Na maior parte das ligas, o C irá se combinar com outros elementos de liga formando carbonetos. No caso da formação do carboneto  $M_{23}C_6$ , a resistência à corrosão irá se degradar. Por este motivo, são fabricados AI de baixo carbono em que se deve manter o C abaixo de 0,04%. Note-se que o carboneto  $M_{23}C_6$  contém cerca de quatro vezes mais átomos metálicos, basicamente Cr, do que átomos de C (um átomo de Cr é um pouco mais do que quatro vezes o peso de um átomo de C). Portanto, com base percentual de peso, a formação do carboneto  $M_{23}C_6$  pode remover 16 vezes mais Cr do que C da solução sólida [3,5,6,8].

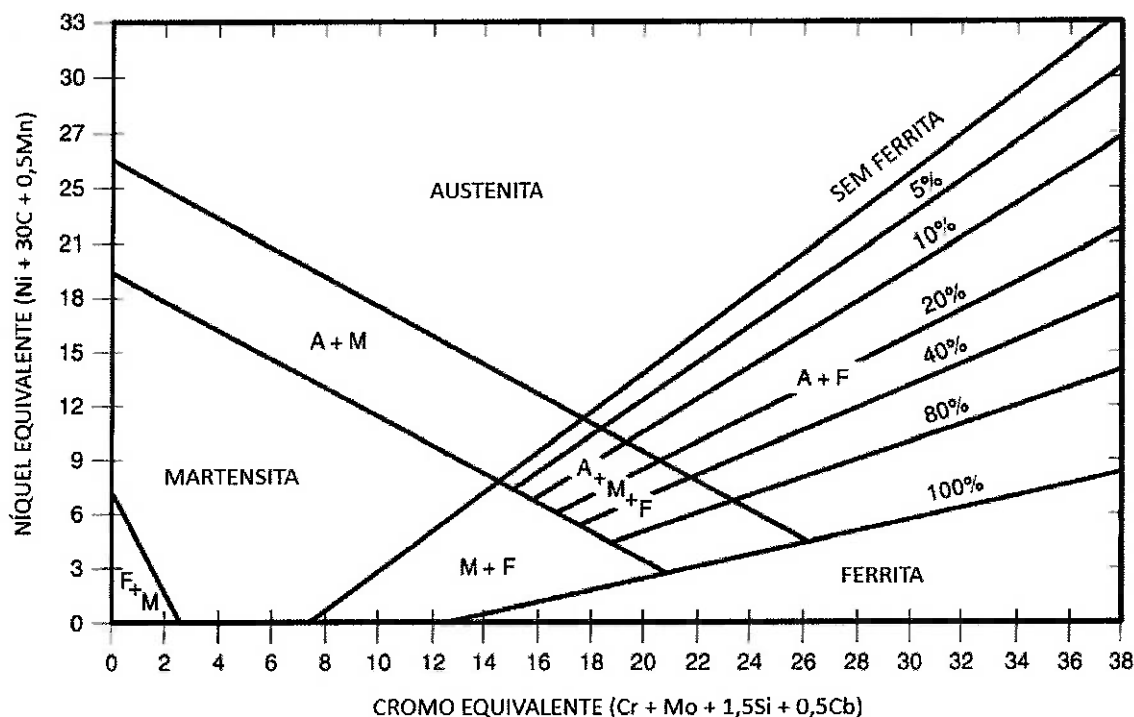
Normalmente, o N está presente como impureza nos AI, mas no caso de alguns aços inoxidáveis austeníticos e em quase todos os AID o N é adicionado intencionalmente. Baixas adições, como 0,15%, deste elemento pode elevar drasticamente a resistência mecânica das ligas austeníticas. O efeito de elevar a resistência mecânica da austenita pela adição de N é muito evidente em temperaturas criogênicas [3,5].

Para os AID, o N é adicionado não só para elevar a resistência mecânica, mas também para elevar a resistência à corrosão por pites e por fresta. Alguns AID possuem até 0,3% de N. A solubilidade do N é relativamente baixa em Al, em particular na ferrita. A adição de Mn nos aços inoxidáveis austeníticos eleva a solubilidade do N. Nos aços inoxidáveis ferríticos e AID, se o limite de solubilidade do N for ultrapassado,  $\text{Cr}_2\text{N}$  irá se precipitar na ferrita, na ZF e ZAC, se uma formação consideravelmente baixa de austenita venha a acontecer durante o resfriamento, a partir de temperaturas acima de  $1100^\circ\text{C}$ .

Dentre os elementos de liga gamagênicos, o C e o N são os mais potentes para promover a formação de austenita. Importante ressaltar que tais elementos devem ser controlados cuidadosamente, caso seja desejada uma microestrutura precisamente balanceada. O controle pode ser feito através da composição química final da liga. Em aços inoxidáveis austeníticos contendo teores elevados de N e em AID, a perda de N durante a soldagem pode ser um problema para estas ligas. Para os AID, o N é adicionado ao gás de proteção, para garantir o teor mínimo desejado na ZF.

#### **2.1.4 DIAGRAMAS DE SCHAEFFLER, DELONG E WRC-1988 E 1992.**

A fim de descrever amplamente os efeitos da adição de elementos de liga na microestrutura dos Al, foi desenvolvido o conceito de Cr e Ni equivalente, agrupando os elementos de liga que apresentam características semelhantes a cada um destes dois elementos. O diagrama de Schaeffler, conforme ilustrado na figura 2.1, ordena a evolução do Ni equivalente perpendicular à evolução do Cr equivalente, relacionando a composição química com a microestrutura de um Al soldado [1,3,5].



**Figura 2.1** – Diagrama de Schaeffler para estimar a microestrutura da zona fundida de AI [3].

A quantidade de martensita na ZF de uma junta soldada de aços inoxidáveis ferríticos pode ser prevista através da composição química do material depositado. Algumas relações de equivalência e diagramas foram determinados para este propósito. Mesmo tendo muito mais trabalhos focados em desenvolver diagramas para prever a microestrutura de juntas soldadas de ligas austeníticas, considerável esforço foi dedicado para prever o balanço de ferrita e austenita em juntas soldadas de aço inoxidável ferrítico. O diagrama de Schaeffler vem sendo utilizado durante muitos anos e apresenta uma boa base para determinar a microestrutura de uma ZF, mas mostrou ser impreciso para determinar a microestrutura de ZF de aços inoxidáveis que contêm ferrita e martensita em sua constituição microestrutural [1,3,5].

Os diagramas criados utilizam o conceito de Cr e Ni equivalente. Elementos como Mo, Si, e Nb atuam como o Cr, como um estabilizador de

ferrita. De tal feita, são relacionados na equação de Cr equivalente, enquanto outros elementos como o C, N, Cu e Mn atuam como o níquel, estabilizador de austenita, e portanto estão relacionados na equação de Ni equivalente. As duas equações somam as porcentagens de cada elemento que compõe o material, multiplicado de um fator, que está relacionado com o potencial de cada elemento de atuar como o Cr ou o Ni. A tabela 2.1 mostra algumas relações de equivalência que levam este conceito.

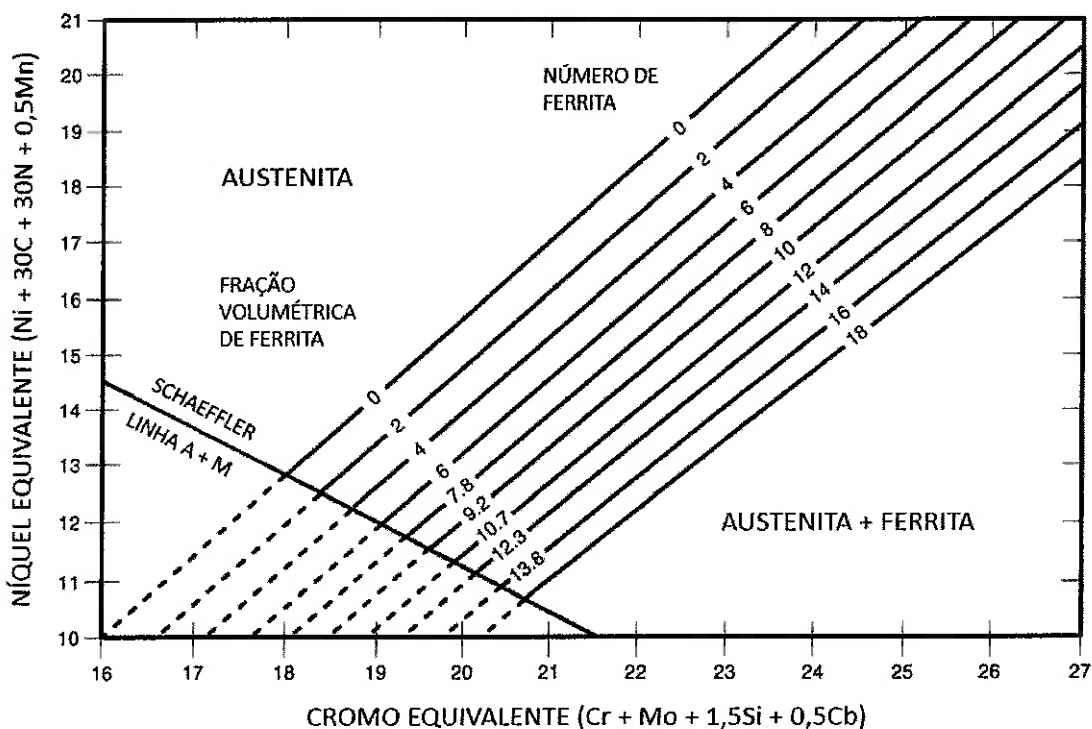
**Tabela 2.1** – Relação de cromo e níquel equivalente para AI austeníticos [3].

| Autor                               | Ano  | Cr <sub>eq</sub>                                                                                                                                                            | Ni <sub>eq</sub>                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Schaeffler                          | 1949 | $\%Cr + \%Mo + (1,5 \times \%Si) + (0,5 \times \%Nb)$                                                                                                                       | $\%Ni + (0,5 \times \%Mn) + (30 \times \%C)$                                                                                                                                                   |
| DeLong                              | 1956 | $\%Cr + \%Mo + (1,5 \times \%Si) + (0,5 \times \%Nb)$                                                                                                                       | $\%Ni + (0,5 \times \%Mn) + (30 \times \%C) + (30 \times \%N)$                                                                                                                                 |
| Hull                                | 1973 | $\%Cr + (1,21 \times \%Mo) + (0,48 \times \%Si) + (0,14 \times \%Nb) + (2,27 \times \%V) + (0,72 \times \%W) + (2,2 \times \%Ti) + (0,21 \times \%Ta) + (2,48 \times \%Al)$ | $\%Ni + [(0,11 \times \%Mn) - (0,0086 \times \%Mn^2)] + (24,5 \times \%C) + (14,2 \times \%N) + (0,41 \times \%Co) + (0,44 \times \%Cu)$                                                       |
| Hammer e Svenson                    | 1979 | $\%Cr + (1,37 \times \%Mo) + (1,5 \times \%Si) + (2 \times \%Nb) + (3 \times \%Ti)$                                                                                         | $\%Ni + (0,31 \times \%Mn) + (22 \times \%C) + (14,2 \times \%N) + \%Cu$                                                                                                                       |
| Espy                                | 1982 | $\%Cr + \%Mo + (1,5 \times \%Si) + (0,5 \times \%Nb) + (5 \times \%V) + (3 \times \%Al)$                                                                                    | $\%Ni + (30 \times \%C) + (0,87 \times \%Mn) + (0,33 \times \%Cu) + [A \times (\%N - 0,045)]$ ,<br>onde A=30 para N 0,00 até 0,20%,<br>A=22 para N 0,21 até 0,25%, A=20 para N 0,26 para 0,35% |
| McCowan, Stewert e Olson (WRC-1988) | 1988 | $\%Cr + \%Mo + (0,7 \times \%Nb)$                                                                                                                                           | $\%Ni + (35 \times \%C) + (20 \times \%N)$                                                                                                                                                     |
| Kotecki e Siewert (WRC-1992)        | 1992 | $\%Cr + \%Mo + (0,7 \times \%Nb)$                                                                                                                                           | $\%Ni + (35 \times \%C) + (20 \times \%N) + (0,25 \times \%Cu)$                                                                                                                                |

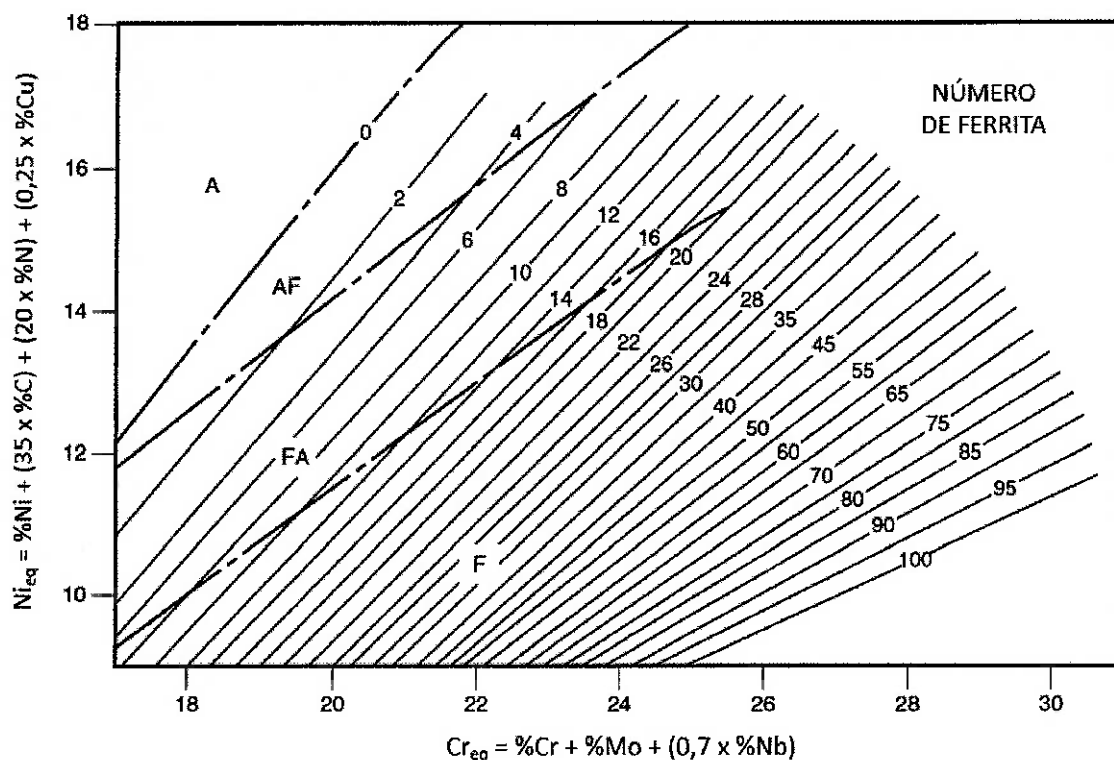
Analisando as relações apresentadas na tabela, temos a indicação de que elementos como C e N apresentam maior potencial em formar austenita, quando comparados com o Ni, constatando-se que, uma pequena variação

destes elementos pode apresentar grande influência na quantidade de ferrita. Os outros elementos de liga possuem efeitos significativos menores [3].

No diagrama de Schaeffler, o cálculo da fração volumétrica de ferrita foi determinado através de métodos de medição por análise de imagens em microscópio ótico. Os diagramas DeLong, WRC-1998 e WRC-1992 cobrem alguns tipos de AI que o diagrama de Schaeffler não é capaz de cobrir. O diagrama de DeLong (figura 2.2) e o diagrama WRC-1992 (figura 2.3) determinam a quantidade de ferrita em termos numéricos (*ferrite number* (FN) em inglês), através de métodos magnéticos ou análise de imagens, definidos em normas. Cada um destes diagramas apresenta um refinamento em relação aos diagramas anteriores, o que pode então gerar resultados discrepantes [3].



**Figura 2.2** – Diagrama de DeLong para estimar a microestrutura da zona fundida de AI [3].



**Figura 2.3** – Diagrama WRC-1992 [3].

O diagrama de Schaeffler incorpora uma amplitude maior de variações de composições do que os diagramas de DeLong ou WRC-1992 e, portanto, apresenta maior utilidade para avaliação da soldagem de juntas de aços dissimilares para aços inoxidáveis austeníticos. Por outro lado, a precisão deste diagrama é inferior quando comparado com os diagramas de DeLong e WRC-1992. Desta maneira, é recomendado o diagrama WRC-1992 para estimar a quantidade de ferrita, em termos de composição química, em juntas soldadas [1,3,5].

Além da incorporação do conceito do número de ferrita (FN), o diagrama de DeLong apresenta também uma melhoria na precisão, em relação ao diagrama de Schaeffler, de determinar a quantidade de ferrita em juntas soldadas de aços inoxidáveis austeníticos. Esta melhoria foi possível através

do estreitamento da amplitude de composições - o que é mais representativo para estes aços - e incluindo um fator para a quantidade de N [1,3,5].

O diagrama WRC-1988 apresenta uma evolução sobre o diagrama de DeLong e aumentou o campo em termos de Cr equivalente para incluir muitos dos AID. O diagrama WRC-1992 é uma versão mais recente do diagrama WRC-1988 e inclui um fator para o Cu no Ni equivalente. Sem considerar este ponto, é idêntico ao diagrama WRC-1988. O diagrama WRC-1992 apresenta os valores mais próximos para medições, em soldagem de *pads* realizados de acordo com os requisitos da AWS A5.4/A5.4M e com instrumentos calibrados de acordo com a AWS A4.2M. O diagrama WRC-1992 pode não ser aplicável para materiais com composições de N superiores a 0,25% e composições de Mn superiores a 10% [1,3,5].

No diagrama WRC-1992, os fatores de equivalência para o Mn e Si foram eliminados e os fatores de potência para o C, N, Mo e Ni foram alterados comparados com o diagrama de DeLong. O diagrama WRC-1992 também fornece a variação dos modos de solidificação (A, AF, FA e F) que são possíveis em aços inoxidáveis austeníticos e AID. O diagrama WRC-1992 foi reconhecido como o principal diagrama para prever a quantidade de ferrita em aços inoxidáveis austeníticos e foi incorporado na norma ASME *Boiler and pressure Vessel Code*. O antigo e menos preciso diagrama de Schaeffler continua sendo utilizado para prever a microestrutura de ligas dissimilares soldadas e revestimentos, devido à incorporação da faixa em que se pode prever a existência de martensita. Para aumentar a utilização do diagrama WRC-1992, uma modificação foi realizada para incluir uma faixa de martensita para ligas contendo 1% de Mn em sua composição química, baseado em

técnicas de medição magnéticas e testes de dobramento de face longitudinal. Outra modificação ainda foi realizada para incluir faixas de martensita para materiais de adição para Al que em seu depósito apresentam em sua composição química teor de Mn entre 4% e 10%. Igualmente relevantes foram os métodos de medição magnéticos e testes de dobramento de face longitudinal [1,3,5].

## **2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX.**

### **2.2.1 COMPOSIÇÕES E PROPRIEDADES.**

Os aços inoxidáveis duplex (AID) apresentam propriedades mecânicas superiores, melhor resistência a corrosão-sob-tensão, corrosão por pites e corrosão por frestas em meios agressivos, quando comparados aos aços inoxidáveis comuns austeníticos e ferríticos. Por apresentarem estas características, os aços inoxidáveis duplex se tornaram potenciais substitutos dos aços inoxidáveis convencionais nas indústrias químicas, petroquímicas, de óleo e gás, papel e celulose, entre outras [1,3,6].

Os AID apresentam microestruturas balanceadas, com regiões de ferrita (CCC) e austenita (CFC). Este grupo de Al é composto basicamente por Fe-Cr-Ni-N com adições de Mo, W e Cu dependendo da classificação da liga. O N é um elemento de liga utilizado em substituição do Ni para melhorar as propriedades mecânicas e de corrosão dos AISD, como dito anteriormente. A composição química de alguns AISD é listada na tabela 2.2.

O que diferencia os aços inoxidáveis superduplex (AISD) dos AID é o seu índice superior de corrosão por pites (PRE), que está relacionado à composição química do material, baseado nos elementos de liga Cr, Mo, W e

N, que dão aos AI maior resistência à corrosão por pites em meios que apresentam cloretos ou  $H_2S$ . Alguns outros elementos também aumentam esta resistência à corrosão, mas não estão incluídos na equação do cálculo do PRE. Por definição, os AISD apresentam valor mínimo de 40 PRE, enquanto os AID apresentam valor mínimo de 35 PRE

**Tabela 2.2** – Composição química de aços inoxidáveis duplex típicos [3].

|             | Classificação da liga |                   | Composição química (%) <sup>a</sup> |            |           |           |           |                             | PRE Ind. <sup>b</sup> |
|-------------|-----------------------|-------------------|-------------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------|-----------------------|
|             | Número UNS            | Nome Comercial    | C                                   | Cr         | Ni        | Mo        | N         | Outros                      |                       |
| Duplex      | S31100                | XM26              | 0,06                                | 25,0-27,0  | 6,0-7,0   | -         | -         | 0,25Ti                      | 26,0                  |
|             | S32304                | 2304              | 0,030                               | 21,5-24,5  | 3,0-5,5   | 0,05-0,6  | 0,05-0,20 | -                           | 26,1                  |
|             | S32101                | 2101              | 0,040                               | 21,0-22,0  | 1,35-1,75 | 0,10-0,80 | 0,20-0,25 | 0,10-0,80 Cu                | 26,2                  |
|             | S32003                | 2003              | 0,03                                | 19,5-22,5  | 3,0-4,0   | 1,5-2,0   | 0,14-0,20 | -                           | 28,3                  |
|             | S31500                | 3RE60             | 0,03                                | 18,0-19,00 | 4,25-5,25 | 2,5-3,0   | 0,05-0,10 | -                           | 28,8                  |
|             | S32900                | 329, 44L, 453S    | 0,08                                | 23-28      | 2,5-5,0   | 1,0-2,0   | -         | -                           | 30,5                  |
|             | S31200                | 44LN              | 0,030                               | 24,0-26,0  | 5,5-6,5   | 1,2-2,0   | 0,14-0,20 | -                           | 33,0                  |
|             | S31803                | 2205              | 0,030                               | 21,0-23,0  | 4,5-6,5   | 2,5-3,5   | 0,08-0,20 | -                           | 34,1                  |
|             | S32205                | 2205, UR45N       | 0,030                               | 22,0-23,0  | 4,5-6,5   | 3,0-3,5   | 0,14-0,20 | -                           | 35,9                  |
|             | S32950                | 7Mo Plus          | 0,030                               | 26,0-29,0  | 3,5-5,2   | 1,0-2,50  | 0,15-0,35 | -                           | 38,3                  |
|             | S31260                | DP3               | 0,03                                | 24,0-26,0  | 5,5-7,5   | 2,5-3,5   | 0,10-0,30 | 0,20-0,80 Cu<br>0,10-0,50 W | 39,1                  |
|             | S32550                | Ferralium 255     | 0,04                                | 24,0-27,0  | 4,5-6,5   | 2,9-3,9   | 0,10-0,25 | 1,5-2,5 Cu                  | 39,5                  |
| Superduplex | S32520                | UR 52N+           | 0,030                               | 24,0-26,0  | 5,5-8,0   | 3,0-4,0   | 0,20-0,35 | 0,5-2,0 Cu                  | 41,0                  |
|             | S32906                | 2906 <sup>c</sup> | 0,030                               | 29         | 7         | 2,2       | 0,35      | -                           | 42,0                  |
|             | S32750                | 2507              | 0,03                                | 24,0-26,0  | 6,0-8,0   | 3,0-5,0   | 0,24-0,32 | -                           | 42,7                  |
|             | S32760                | Zeron 100         | 0,03                                | 24,0-26,0  | 6,0-8,0   | 3,0-4,0   | 0,20-0,30 | 0,50-1,0 Cu<br>0,50-1,0 W   | 43,0                  |
|             | S39277                | AF918             | 0,025                               | 24,0-26,0  | 6,5-8,0   | 3,0-4,0   | 0,23-0,33 | 1,2-2,0 Cu<br>0,8-1,20 W    | 45,0                  |
|             | S30274                | DP3W              | 0,03                                | 24,0-26,0  | 6,0-8,0   | 2,5-3,5   | 0,24-0,32 | 0,20-0,80 Cu<br>1,50-2,50 W | 46,0                  |
|             | S32707                | 2707 HD           | 0,030                               | 27         | 6,5       | 4,8       | 0,40      | 1,0 Co                      | 49,2                  |

a. Valores individuais são valores máximos.  
b. PRE (Índice de resistência a Corrosão por Pites) calculado pelos valores médios de composição química.  
c. Valores nominais médios.

A equação (1) é considerada a mais utilizada para o cálculo do PRE [3].

$$\text{PRE} = \% \text{CR} + 3.3 \times (\% \text{Mo} + 0.5 \times \% \text{W}) + 16 \times \% \text{N} \quad (1)$$

Os AID modernos podem ser classificados da seguinte forma:

- Ligas Cr-Ni-N livres de Mo, com 22% de Cr;
- Ligas Cr-Ni-Mo-N, com 22% de Cr;
- Ligas Cr-Ni-Mo-N-Cu, com 25% de Cr, e até 2,5% de Cu;
- Ligas Cr-Ni-Mo-N, com 25% de Cr, 4% de Mo, e 0,2% de N;
- Ligas Cr-Ni-Mo-N-W-Cu, com 25% de Cr e 0,2% ou mais de N.

Os últimos dois grupos são denominados superduplex [3].

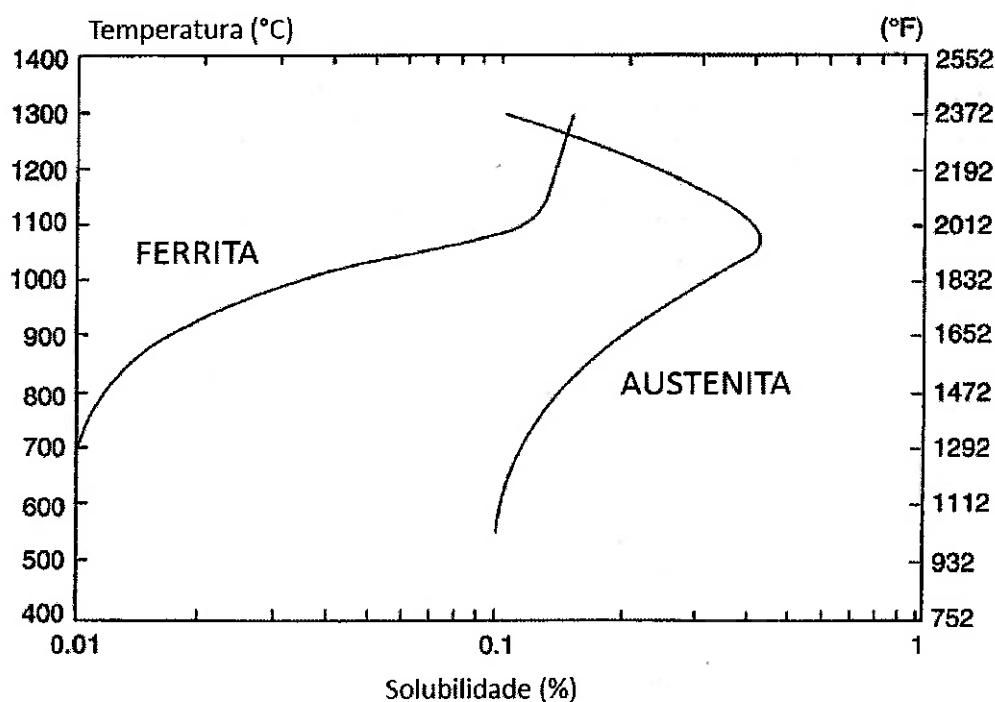
### 2.2.2 IMPORTÂNCIA DO NITROGÊNIO.

O N é adicionado na composição química dos AID, em uma faixa entre 0,08 e 0,35%, para elevar as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão por pites. Podemos observar através da figura 2.4 que estes níveis de adição são muito superiores à solubilidade de N na ferrita, em temperaturas próximas e superiores a 1000°C. Em contraste, o nível de solubilidade na austenita é muito elevado. Este diferencial de solubilidade de N tem uma implicância direta em relação à precipitação de nitretos nestas ligas [1,3,5,6].

Nos AID, onde a microestrutura é balanceada, 50% ferrita e 50% austenita, como dito anteriormente, o N é distribuído entre a ferrita e a austenita e permanece predominantemente em solução sólida. Caso o resfriamento seja muito rápido na ZF e na ZAC, impedindo a formação da austenita, o limite de solubilidade de N na ferrita será atingido e o excesso de N

irá se precipitar em nitreto de Cr. Este tipo de precipitação causará redução de ductilidade, tenacidade e resistência à corrosão [5,7,8].

O N é considerado o elemento chave para alcançar o balanço de fases em AID ou AISD no resfriamento da ZF e ZAC. O N se difunde da ferrita para a austenita, quando a liga está a uma temperatura abaixo da temperatura solvus da ferrita. Se o resfriamento é muito rápido, não haverá tempo suficiente para a difusão ocorrer e o N irá se aprisionar na ferrita. Logo em seguida, irá precipitar como nitreto de Cr [5,7,8].



**Figura 2.4** – Solubilidade do Nitrogênio na ferrita e na austenita [5].

### 2.2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS.

De modo geral, os AID apresentam propriedades mecânicas superiores, quando comparados com os aços inoxidáveis austeníticos da série 300, como por exemplo os aços inoxidáveis AISI 304L e AISI 316L, e quando comparados

com os aços inoxidáveis ferríticos da série 400, como por exemplo os aços inoxidáveis AISI 409 e AISI 430. A resistência superior dos AID e AISD os tornam como sendo a melhor escolha, quando comparados com os aços inoxidáveis ferríticos ou austeníticos, em aplicações em que a redução de peso é desejada. Este resultado é obtido através da estrutura balanceada dos AID, que combinam as vantagens da microestrutura ferrítica com a microestrutura austenítica. As propriedades mecânicas típicas dos AID e AISD são mostradas na tabela 2.3 [3].

**Tabela 2.3** – Propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis duplex e superduplex [3].

|             | Classificação da Liga |                | Propriedades Mecânicas               |                                          |                 |              |
|-------------|-----------------------|----------------|--------------------------------------|------------------------------------------|-----------------|--------------|
|             | Número UNS            | Nome Comercial | Limite de escoamento, 0,2% MPa [ksi] | Limite de resistência a tração MPa [ksi] | Alongamento (%) | Charpy V (J) |
| Austenítico | S30400                | 304            | 290 [42]                             | 84 [579]                                 | 55              |              |
| Ferrítico   | S43000                | 430            | 345 [50]                             | 75 [517]                                 | 25              |              |
| Duplex      | S32304                | 2304           | 400 [58]                             | 91 [630]                                 | 25              | 40           |
|             | S32101                | 2101           | 450 [65]                             | 94 [650]                                 | 30              | 27           |
|             | S32003                | 2003           | 450 [65]                             | 95 [655]                                 | 25              | 54           |
|             | S32900                | 329            | 485 [70]                             | 90 [620]                                 | 15              |              |
|             | S31200                | 44LN           | 450 [65]                             | 100 [690]                                | 25              |              |
|             | S31803                | 2205           | 460 [67]                             | 93 [640]                                 | 25              | 40           |
|             | S31260                | DP3            | 485 [70]                             | 100 [690]                                | 20              |              |
|             | S32550                | 255            | 550 [80]                             | 110 [760]                                | 15              | 70           |
| Superduplex | S32750                | 2507           | 530 [77]                             | 106 [730]                                | 20              | 40           |
|             | S32760                | Zeron 100      | 550 [80]                             | 109 [750]                                | 25              |              |
|             | S39274                | DP3W           | 550 [80]                             | 116 [800]                                | 25              |              |
|             | S32707                | 2707 HD        | 700 [101]                            | 133 [920]                                | 25              |              |

## 2.2.4 RESISTÊNCIA À CORROSÃO.

Os AID e AISD exibem maior resistência à corrosão, na maioria dos ambientes, do que os aços inoxidáveis austeníticos. Estas ligas de aço são normalmente selecionadas quando a resistência à corrosão sob tensão é um

fator preocupante e, particularmente, quando as juntas soldadas estarão em ambientes ou soluções contendo cloretos ou  $H_2S$ . Devido ao fato destes materiais apresentarem em sua composição química elementos de liga como Cr, Mo, W, e N, eles apresentam elevada resistência à corrosão uniforme em ambientes ácidos e cáusticos e também elevadas resistências à corrosão por pites e por frestas. O agravamento da corrosão por pites e por frestas é controlado pela temperatura, exposição a ambientes químicos contendo cloretos ou  $H_2S$ , composição química do metal de base, e presença de fases deletérias [3].

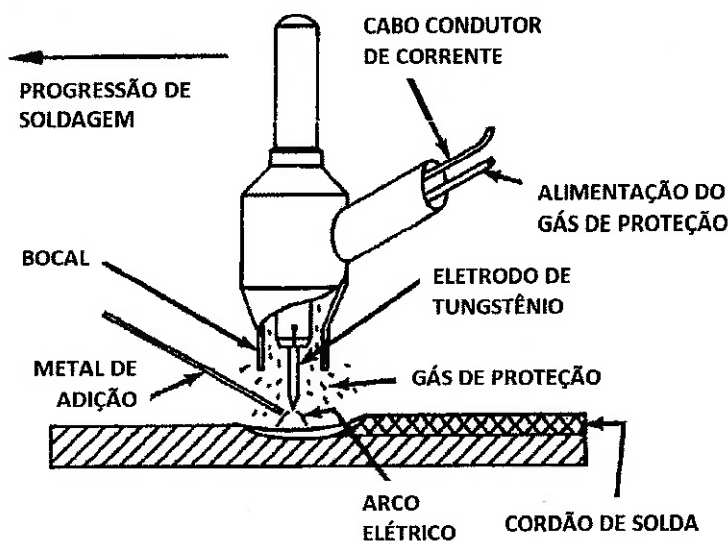
O conceito de temperatura crítica é utilizado quando a resistência à corrosão de Al está sendo tratada. O efeito da temperatura nas taxas de corrosão é normalmente caracterizado pela temperatura crítica de corrosão por pites (CPT) e temperatura crítica de corrosão por frestas (CCCT). Para um determinado ambiente, cada AID ou AISD é caracterizado pela temperatura em que a corrosão por pites ou frestas se inicia e se propaga, até se visualmente determinada a olho nu dentro de 24 horas. Abaixo desta temperatura, corrosão por pites ou por frestas não irá ocorrer. Tome-se como exemplo um Al que possui um CPT de  $35^{\circ}C$  e que é resistente a soluções contendo cloreto de ferro até esta temperatura, conforme a norma ASTM G 48. Caso o ambiente seja extremamente corrosivo, o AID deve ser substituído por outro tipo com maior CPT. Os AID apresentam CPT entre  $10^{\circ}C$  e  $35^{\circ}C$ , já os AISD apresentam CPT superiores a  $55^{\circ}C$ . Os AID apresentam CCCT de aproximadamente  $-5^{\circ}C$  até  $10^{\circ}C$  e os AISD possuem CCCT por volta de  $25^{\circ}C$  [3]. Os ensaios de corrosão são realizados conforme normas ASTM, NACE e EM-ISSO.

## **2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG.**

TIG (Tungsten Inert Gas) é um processo de soldagem a arco elétrico que utiliza um eletrodo de tungstênio não consumível e proteção gasosa sem a aplicação de pressão. Este processo de soldagem pode ser utilizado com ou sem adição de material. O processo de soldagem TIG se tornou uma ferramenta indispensável para as indústrias, devido às juntas soldadas de alta qualidade produzidas e o baixo custo do equipamento [9,10].

### **2.3.1 PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO.**

O processo de soldagem TIG é ilustrado na figura 2.5. O eletrodo de tungstênio não consumível é fixado na tocha. O gás de proteção é alimentado por dentro da tocha de modo a proteger o eletrodo, a poça de fusão e a solidificação do metal depositado contra contaminação da atmosfera. O arco elétrico é produzido pela passagem de corrente através do gás de proteção ionizado e é estabelecido entre a ponta do eletrodo e o metal de base. O calor é gerado pelo arco elétrico e transferido para a peça de trabalho, o que leva à fusão do metal de base. Uma vez que o arco elétrico e a poça de fusão são gerados, a tocha começa a ser deslocada ao longo da junta e o arco elétrico progressivamente funde a superfície. O metal de adição, quando é utilizado, é alimentado à frente da poça de fusão preenchendo a junta [9,10].



**Figura 2.5** – Sistema operacional do processo de soldagem TIG [9].

### 2.3.2 VARIÁVEIS DO PROCESSO.

Consideram-se como variáveis primárias do processo de soldagem TIG a tensão (distância do arco), corrente de soldagem, velocidade de deslocamento e gás de proteção. O valor da energia produzida pelo arco elétrico é diretamente proporcional à tensão e à corrente. A quantidade de energia transferida por unidade de comprimento é inversamente proporcional à velocidade de deslocamento. A penetração é maior quando utilizado o hélio como gás de proteção quando comparado ao argônio. Como todas estas variáveis estão diretamente relacionadas, não é possível tratá-las de uma forma independente para o desenvolvimento de especificação de procedimento de soldagem em fabricações [9,10].

Na soldagem, a corrente elétrica controla a penetração, o efeito sendo diretamente proporcional ou até mesmo de modo exponencial. A tensão também é afetada pela corrente e a distância do arco elétrico vai aumentando

conforme o incremento da referida corrente. Devido a este motivo, para manter um comprimento mínimo da distância do arco, é necessário alterar os ajustes de tensão enquanto a corrente é ajustada [9,10].

Dependendo do material a ser soldado, o processo de soldagem pode ser utilizado em corrente direta ou corrente alternada. Corrente direta com o eletrodo na polaridade negativa oferece como vantagem penetração profunda e altas velocidades de soldagem, especialmente quando é utilizado o hélio como gás de proteção. Corrente alternada promove uma ação de limpeza catódica, o que remove óxidos refratários da superfície das juntas de alumínio e magnésio. Neste caso o argônio deve ser utilizado como gás de proteção porque o hélio não permite este tipo de ação [9,10].

Raramente é utilizada corrente direta com o eletrodo positivo porque esta regulação gera um aquecimento muito elevado do eletrodo, podendo levar à fusão da sua extremidade em contato com o arco elétrico.

A tensão medida entre o eletrodo de tungstênio e o metal de base é considerada a tensão do arco elétrico. A corrente elétrica, a afiação do eletrodo de tungstênio, a distância entre o eletrodo de tungstênio e o metal de base e o tipo de gás utilizado como atmosfera protetora afetam diretamente a tensão do arco elétrico. Como a largura da poça de fusão está diretamente proporcional à distância do arco elétrico, esta variável se torna extremamente importante. Normalmente, a distância do arco elétrico é a mínima possível.

A velocidade de deslocamento afeta a largura e a penetração do cordão de solda, mas o efeito na largura é maior do que o efeito na penetração [9,10].

### 2.3.3 ATMOSFERA PROTETORA.

O gás de proteção tem por objetivo proteger o eletrodo e a poça de fusão contra contaminação da atmosfera. Gás de purga também pode ser utilizado para proteger o cordão de solda e a superfície adjacente, na parte interna, contra oxidação durante a soldagem.

Argônio e Hélio ou a mistura dos dois são os tipos mais comuns de gás de proteção inertes. O argônio é um gás inerte monoatômico com peso molecular de 40 g/mol. O argônio é mais utilizado do que o hélio devido às seguintes características:

- Penetração reduzida;
- Ação de limpeza em soldagem de alumínio e magnésio;
- Baixo custo e alta disponibilidade;
- Baixa vazão para boa proteção;
- Maior facilidade em abrir o arco elétrico.

Para a soldagem manual, a penetração reduzida para a proteção gasosa com argônio passa a ser uma vantagem para a soldagem de materiais de espessuras reduzidas, em que existe o risco de acontecer penetração excessiva. Esta mesma característica acontece em soldagem na posição vertical ou sobre-cabeça. O hélio é um gás inerte monoatômico muito leve, tendo um peso atômico de 4 g/mol. Para um mesmo valor de corrente de soldagem e distância de arco elétrico, o hélio transfere maior calor para a peça de trabalho quando comparado ao argônio. A utilização de hélio como gás de proteção pode ser uma escolha vantajosa para a soldagem de materiais com

alta condutividade térmica e para aumentar a velocidade de deslocamento em processos mecanizados ou automatizados. Na soldagem de chapas com espessuras elevadas, o hélio também passa a ser mais utilizado do que o argônio. Misturas de argônio e hélio são utilizadas quando se busca um balanço entre as duas características [9,10].

### 2.3.4 ELETRODO DE TUNGSTÊNIO.

Os eletrodos de tungstênio são classificados com base na sua composição química, como especificado na tabela 2.4. Os quesitos para os eletrodos de tungstênio são dados na ANSI-AWS A5.12 *Specification for Tungsten and Tungsten Alloy Electrodes for Arc Welding and Cutting*. O sistema de identificação por cor de acordo com cada classe de eletrodo de tungstênio é dado na Tabela 2.4.

**Tabela 2.4** – Código de cores e elementos de liga para vários eletrodos de tungstênio [9].

| Classificação AWS | Cor <sup>a</sup> | Elemento de liga              | Óxido de liga                  | Porcentagem de óxido de liga em peso nominal |
|-------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|
| EWP               | Verde            | -                             | -                              | -                                            |
| EWCe-2            | Laranja          | Cério                         | CeO <sub>2</sub>               | 2                                            |
| EWLa-1            | Preto            | Lantânio                      | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1                                            |
| EWTh-1            | Amarelo          | Tório                         | ThO <sub>2</sub>               | 1                                            |
| EWTh-2            | Vermelho         | Tório                         | ThO <sub>2</sub>               | 2                                            |
| EWZr-1            | Marrom           | Zircônio                      | ZrO <sub>2</sub>               | 0,25                                         |
| EWG               | Cinza            | Não especificado <sup>b</sup> | -                              | -                                            |

a. A cor pode ser marcada em qualquer local na superfície do eletrodo.  
b. Fabricante deve identificar o tipo e fração volumétrica do óxido de terra raras adicionado.

A afiação do tungstênio é uma variável muito importante no processo de soldagem TIG. Existem diferentes maneiras de afiar o eletrodo de tungstênio, sendo cada maneira apropriada a uma determinada aplicação. Na soldagem em corrente alternada, os eletrodos de tungstênio puro ou com adição de zircônia formam uma esfera na ponta do eletrodo. Para soldagem em corrente direta, os eletrodos de tungstênio com adição de tória, céria ou lantânia são os mais utilizados e a afiação é tipicamente realizada com um ângulo determinado. Como mostrado na figura 2.6, a variação da geometria da afiação do eletrodo de tungstênio afeta diretamente o formato e tamanho do cordão de solda. De modo geral, com o aumento do ângulo de afiação, a penetração do cordão de solda aumenta e a largura do passe diminui [9].

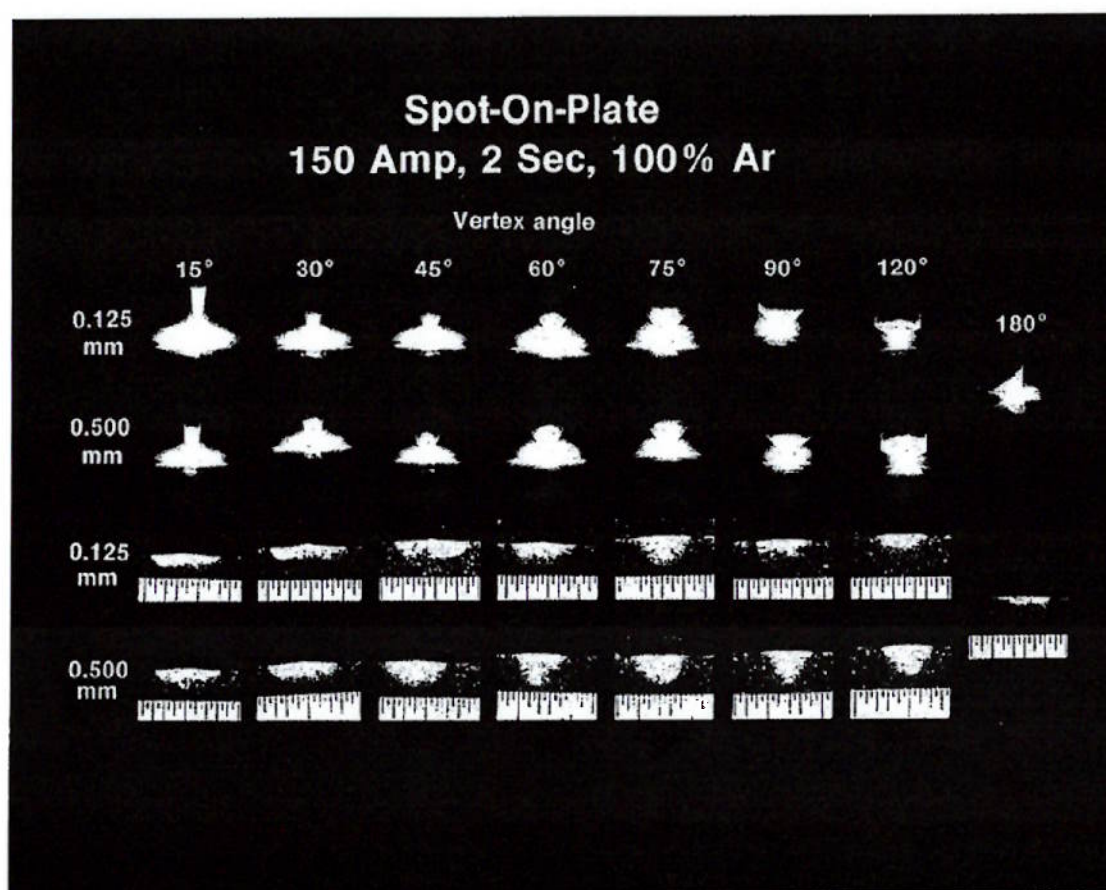
Portanto, quando uma especificação de procedimento de soldagem é determinada, é importante definir a geometria da afiação do eletrodo de tungstênio, uma vez que qualquer mudança pode afetar o perfil e tamanho do cordão de solda.

A afiação do eletrodo de tungstênio é geralmente realizada por boleamento, esmerilhamento ou afiação química. Quando a afiação é feita por esmerilhamento, é importante manter o eixo axial do eletrodo perpendicular ao eixo do rebolo, a fim de se obter estabilidade do arco elétrico. Além disto, o rebolo deve ser dedicado à utilização apenas para este tipo de aplicação, de modo a evitar contaminação do eletrodo de tungstênio com outros materiais [9].

Contaminação do eletrodo de tungstênio normalmente ocorre quando o soldador, acidentalmente, deixa a ponta do eletrodo tocar a poça de fusão durante a soldagem ou quando o soldador toca o eletrodo com o material de adição. Um gás de proteção inadequado ou vazão insuficiente do gás de

proteção podem causar oxidação do eletrodo de tungstênio durante a soldagem ou quando o arco elétrico é extinto. A vaporização de metais através do arco elétrico, erupção da poça de fusão e vaporização de impurezas na superfície são outras fontes que causam a contaminação do eletrodo de tungstênio [9].

A contaminação da ponta do eletrodo irá afetar as características do arco elétrico e pode gerar inclusão de tungstênio na zona fundida. Se isso acontecer, a soldagem deve ser imediatamente interrompida e a área contaminada do eletrodo deve ser removida [9].



**Figura 2.6** – Formato do arco elétrico e perfil da zona fundida em função da afiação do eletrodo em atmosfera protetora com argônio puro (150A; 2s; cordão sobre chapa) [9].

### 2.3.5 VANTAGENS E DESVANTAGES.

A seguir estão descritas algumas vantagens do processo de soldagem

TIG:

- A qualidade das juntas soldadas é superior, normalmente isentas de defeitos;
- É livre de respingos, o que ocorre em outros processos de soldagem;
- Pode ser utilizado com ou sem a adição de material, dependendo da aplicação;
- Permite excelente controle da penetração do passe de raiz;
- Permite o controle preciso das variáveis inerentes a soldagem;
- Pode ser utilizado para soldar quase todos os tipos de metais, incluindo juntas dissimilares;
- Permite o controle independente da fonte de energia e a adição de material.

A seguir estão descritas algumas desvantagens do processo de soldagem TIG:

- Taxas de deposição são inferiores quando comparado com processos de soldagem que possuem eletrodo consumível;
- É menos econômico que processos de soldagem com eletrodo consumível para juntas com espessuras maiores que 10 mm, devido à sua baixa taxa de deposição.

## **2.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM.**

O calor gerado pelo arco elétrico na soldagem por processos a arco elétrico deve ser suficiente para fundir o metal de base e de adição. Esta energia irá determinar o volume da poça de fusão, o tempo de solidificação, a velocidade de resfriamento e as temperaturas na junta soldada [8,9,12].

### **2.4.1 EFICIÊNCIA DA FONTE DE ENERGIA.**

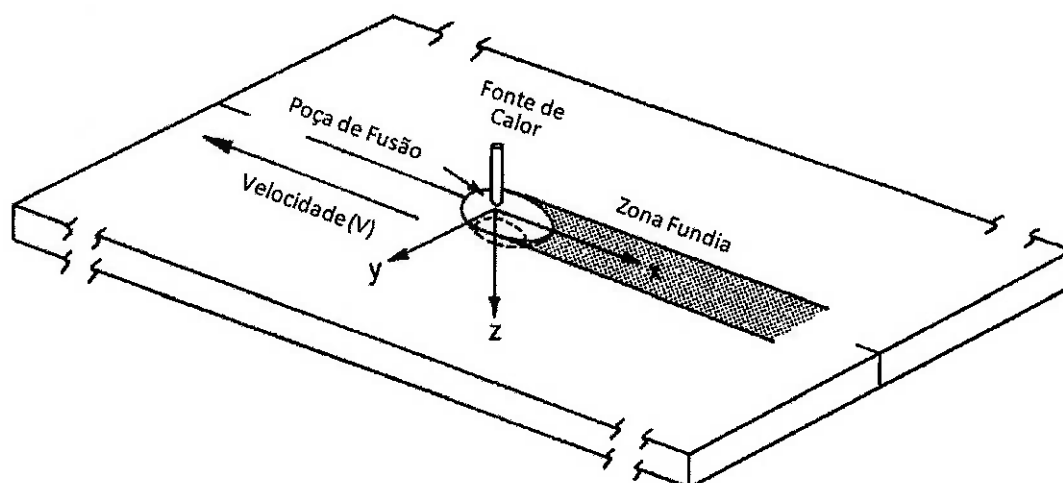
A eficiência térmica do processo de soldagem ( $\eta$ ) é definida como sendo a razão do calor introduzido na peça e o calor suprido pela fonte de energia. Isto porque uma parte do calor é dissipada por radiação e convecção pelo meio circundante [8].

Para o processo de soldagem TIG podemos considerar a eficiência térmica como sendo 0,6. Mas este valor pode alterar conforme as técnicas de soldagem utilizadas. Alguns estudos mostram uma dispersão entre 0,4 e 0,8 e apontam que  $\eta$  diminui com o aumento da corrente de soldagem e aumenta com uma diminuição do comprimento do arco elétrico [8,9,12].

### **2.4.2 MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM.**

A figura 2.7 mostra o esquema da soldagem de uma peça estacionária. A fonte de calor se desloca em linha reta com velocidade constante ( $V$ ) no sentido negativo do eixo  $x$ . No início e no final do processo de soldagem o regime de transferência de calor é transiente, de modo que entre estas duas regiões a transferência de calor é em equilíbrio, ou em regime quase-estacionário, em relação ao deslocamento da fonte de calor. Em outras

palavras, a distribuição de temperaturas e a geometria da poça de fusão não se alteram com o tempo [11].



**Figura 2.7** – Sistema de coordenadas  $(x, y, z)$  para o deslocamento da fonte de calor [11].

Esta suposição de estado-estacionário foi primeiramente utilizada por Rosenthal para simplificar a tratativa analítica de um modelo matemático de distribuição de calor na soldagem. Para isto, Rosenthal utilizou as seguintes simplificações:

- Estado-estacionário de transferência de calor;
- Fonte de calor localizada em um ponto;
- O calor latente de fusão é desprezível;
- Propriedades térmicas constantes;
- A perda de calor pela superfície da peça é desprezível;
- A convecção na poça de fusão é desprezível.

A equação (2) foi proposta por Rosenthal para transferência de calor bidimensional, em que as variações de temperatura na direção da espessura da peça são desprezíveis  $T(z)$ .

$$\frac{2\pi(T - T_0)kg}{Q} = \exp\left(\frac{Vx}{2\alpha}\right) K_0\left(\frac{Vr}{2\alpha}\right) \quad (2)$$

Onde:

$T$  = temperatura;

$T_0$  = temperatura da peça antes da soldagem;

$k$  = condutividade térmica do material de base;

$g$  = espessura do material de base;

$Q$  = Energia de soldagem;

$V$  = Velocidade de deslocamento;

$\alpha$  = difusividade térmica;

$K_0$  = Função modificada de Bessel de segunda espécie e ordem zero;

$r$  = Distância da linha de centro do cordão ao ponto de interesse,  $(x^2 + y^2)^{1/2}$

Pode-se utilizar a equação (2) para calcular qualquer temperatura  $T(x, y)$ , em qualquer localização  $(x, y)$  em relação ao deslocamento da fonte de calor.

A equação (3) representa a solução analítica proposta por Rosenthal para a transferência de calor tridimensional em peça semi-infinita durante a soldagem.

$$\frac{2\pi(T - T_0)kR}{Q} = \exp\left[\frac{-V(R - x)}{2\alpha}\right] \quad (3)$$

Onde  $R$  é a distância da linha de centro do cordão ao ponto de interesse,  $(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ . A equação (3) estabelece que em qualquer seção transversal

à solda, todas as isothermas possuem formatos semicirculares. Pode-se utilizar esta equação para calcular qualquer temperatura  $T(x, y, z)$ , em qualquer localização  $(x, y, z)$  em relação ao deslocamento da fonte de calor.

A distribuição da temperatura máxima de pico no metal de base adjacente a ZF é expressa pela equação (4). Na ZDL, onde  $(y = 0)$ , a temperatura máxima de pico ( $T_p$ ) é igual a temperatura de fusão do material ( $T_m$ ). A equação da distribuição da temperatura máxima de pico pode ser utilizada para determinar a temperatura de pico em um ponto específico na ZAC, estimar a extensão da ZAC e demonstrar a influência do pré-aquecimento na extensão da ZAC [12].

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{\sqrt{2\pi e} \rho C h y}{E} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (4)$$

Onde:

$T_p$  = temperatura máxima de pico [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$T_0$  = temperatura inicial ou temperatura de pré-aquecimento [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$T_m$  = temperatura de fusão do material [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$\pi = 3,1416$ ;

$\rho$  = densidade do material de base [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ];

$C$  = calor específico [ $\text{J}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$ ];

$e = 2,718$ , base dos logaritmos naturais;

$h$  = espessura da chapa [ $\text{mm}$ ];

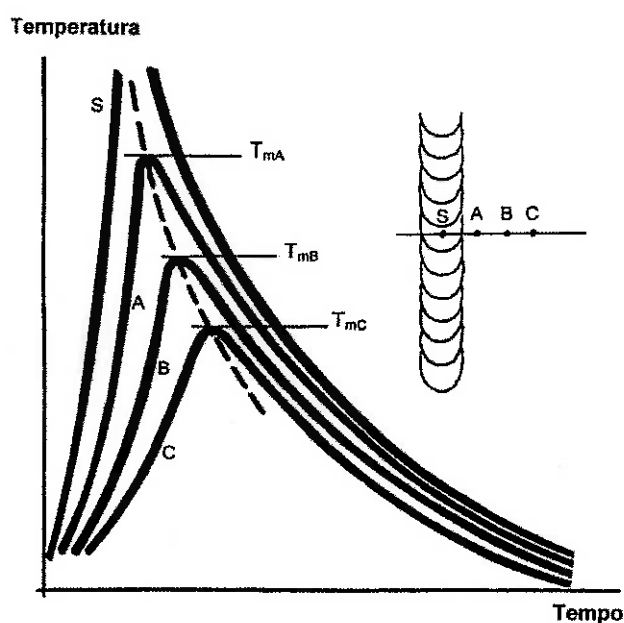
$E$  = energia de soldagem [ $\text{kJ}/\text{mm}$ ];

$y$  = distância a partir da ZDL [ $\text{mm}$ ];

### 2.4.3 HISTÓRIA TÉRMICA.

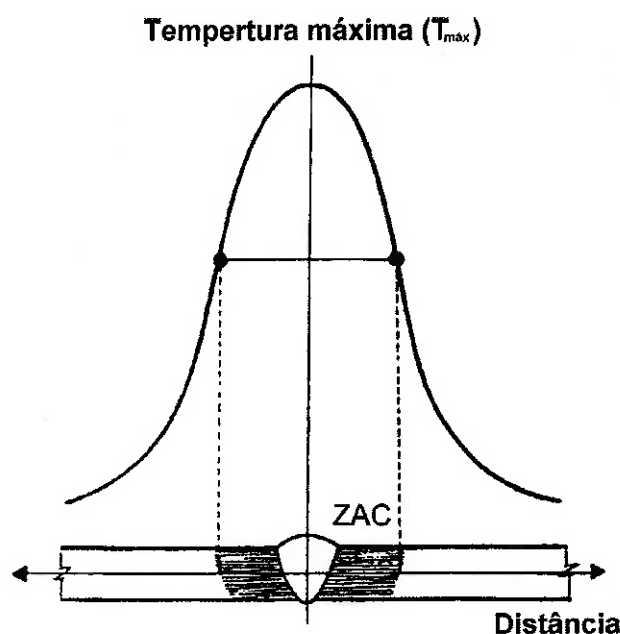
Para uma junta soldada, a história térmica é composta por uma repartição térmica e infinitos ciclos térmicos de soldagem.

O ciclo térmico determina a variação da temperatura no tempo para um determinado ponto de uma junta soldada e está relacionado com a microestrutura do material. A figura 2.8 apresenta quatro ciclos térmicos, sendo possível observar que cada ciclo térmico está relacionado com a distância do ponto à fonte de calor.



**Figura 2.8** – Diferentes ciclos térmicos de soldagem para uma junta soldada [8].

A repartição térmica relaciona a temperatura máxima dos ciclos térmicos e a distância relativa ao centro do cordão de solda, determinando portanto a extensão da ZAC. A figura 2.9 mostra esquematicamente a repartição térmica de uma junta soldada.

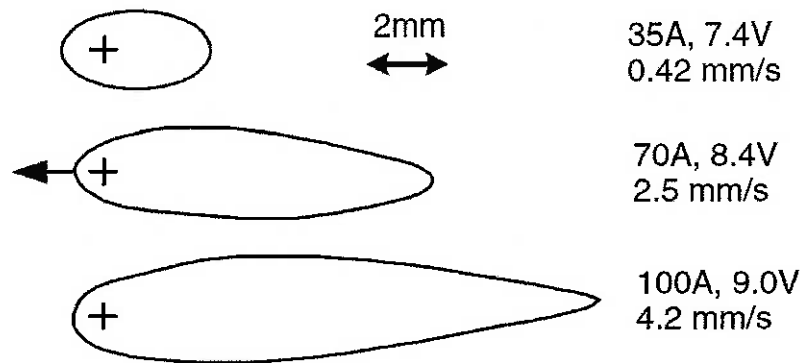


**Figura 2.9** – Repartição térmica de uma junta soldada [8].

#### 2.4.4 EFEITO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM.

Com o aumento do aporte de calor e da velocidade de deslocamento, o formato da poça de fusão se torna mais alongado, mudando do formato elíptico para o formato de gota.

A figura 2.10 mostra a poça de fusão a partir de fotos tiradas durante a soldagem pelo processo TIG autógeno de uma folha de aço inoxidável 304 de 1.6 mm de espessura. Como as fotos não foram tiradas na vertical e sim de lado, com um ângulo em relação a poça de fusão, a escala só é aplicável ao comprimento, na mesma direção da soldagem. O sinal de positivo indica a posição relativa do eletrodo de tungstênio na poça de fusão. Quanto maior a velocidade de soldagem, maior é a razão entre comprimento e largura [11].



**Figura 2.10** – Formato da poça de fusão na soldagem do aço inoxidável 304 pelo processo de soldagem TIG autógeno [11].

O efeito dos parâmetros de soldagem no formato do cordão é mais significativo nos A1 do que no alumínio porque a condutividade térmica nos A1 é inferior, tornando mais difícil a dissipação de calor da poça de fusão e, portanto, sua solidificação [11].

## **2.5 SOLDAGEM E SOLDABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX.**

### **2.5.1 DEFINIÇÃO DE SOLDABILIDADE.**

O termo soldabilidade se refere à capacidade do material de ser soldado sob as condições impostas de fabricação de modo que preencha todos os requisitos de projeto e apresente desempenho satisfatório no serviço pré-estabelecido [12].

Segundo essa definição, alguns materiais podem apresentar baixa soldabilidade em determinada condição, mas boa soldabilidade em uma outra condição.

### 2.5.2 SOLIDIFICAÇÃO.

Todos os AID se solidificam com microestrutura ferrítica e permanecem com esta microestrutura até o final da solidificação. A transformação da ferrita para austenita ocorrerá quando a temperatura cair abaixo da temperatura solvus da ferrita. Esta transformação de fase, ferrita para austenita, depende da composição química e taxa de resfriamento. Portanto, esta transformação irá determinar o balanço final de ferrita e austenita e a distribuição da austenita na ZF em uma junta soldada [5,7,8]. A sequência de transformações de fases nos AID, durante a solidificação, é definida da seguinte forma:

Líquido → Líquido + Ferrita → Ferrita → Ferrita + Austenita

A ZF em juntas soldadas de AID apresenta frações volumétricas de austenita e ferrita. Uma vez que a solidificação ocorre como ferrita e nenhuma austenita se forma até o final da solidificação, concluímos que a ferrita é estável no estado sólido em altas temperaturas. Quando a transformação de ferrita para austenita inicia abaixo da temperatura solvus da ferrita, a austenita se forma primeiramente em volta dos contornos de grão de ferrita. Isto ocorre por processo de nucleação e crescimento e, normalmente, os contornos de grão de ferrita se tornam completamente preenchidos por austenita [5]. Adicionalmente, austenita de Widmanstätten pode se formar nos contornos de grão de austenita ou intergranularmente nos grãos de ferrita.

### 2.5.3 TRANSFORMAÇÕES DE FASE NO ESTADO SÓLIDO.

As transformações de fase que ocorrem durante o aquecimento e resfriamento dos AID e AISD podem promover uma microestrutura desbalanceada, crescimento de grão de ferrita na ZAC, precipitação de austenita secundária, precipitação de nitreto de cromo, precipitação de fase sigma, precipitação  $M_{23}C_6$  e precipitação de fase Chi. Todas estas transformações podem diminuir a resistência mecânica e a resistência à corrosão de juntas soldadas dos AID e AISD [3,5,7,8].

### 2.5.4 MICROESTRUTURA DESBALANCEADA.

Com o objetivo de se atingir uma microestrutura balanceada, com a fração volumétrica de 50% ferrita e 50% austenita para AID e AISD, estes materiais são normalmente recozidos por solubilização a uma temperatura mínima entre 980°C e 1050°C para AID e entre 1050°C e 1150°C para AISD. Portanto, quando estas ligas de AID e AISD são aquecidas a temperaturas superiores à temperatura de solubilização e resfriadas com velocidade suficiente para não haver a reprecipitação de austenita ou a precipitação de nitreto de cromo em ferrita, o balanço de fases microestruturais original, 50% ferrita e 50% austenita, irá se modificar. Caso esta mesma microestrutura seja reaquescida a temperaturas superiores às faixas de solubilização, a austenita irá se precipitar em nítretos como austenita secundária intergranular. A austenita secundária apresenta um teor de elementos de liga mais baixo do que o teor de elementos de liga da austenita primária. Consequentemente, apresenta uma resistência à corrosão inferior, causada pela diminuição do PREN. Por outro

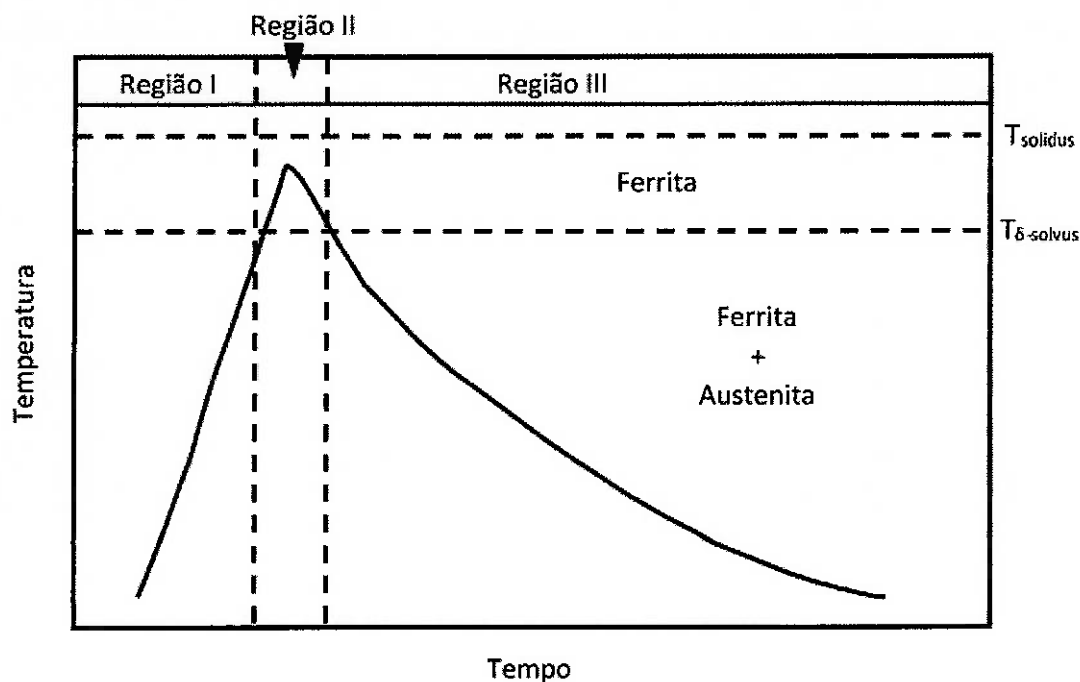
lado, a austenita secundária intergranular eleva a tenacidade devido à sua morfologia acicular e sua relação de orientação com a ferrita [3,5,7,8].

#### **2.5.5 CRESCIMENTO DE GRÃOS DE FERRITA NA ZONA AFETADA PELO CALOR.**

O ciclo térmico de soldagem na ZAC, na área adjacente à zona de ligação (ZDL), pode ser dividida em três regiões de tempo, no que se refere às temperaturas durante o ciclo térmico. A figura 2.11 representa o ciclo térmico de soldagem na ZAC de um AID que é completamente ferrítico em temperaturas elevadas. Na região I, o metal de base é aquecido até próximo à temperatura solvus da ferrita ( $T_{\text{solvus}}$ ). Durante o aquecimento, a austenita se transforma em ferrita por meio de um processo de difusão controlada até o momento em que toda a estrutura se torne completamente composta por ferrita. Durante este mesmo período de aquecimento alguns precipitados presentes na microestrutura irão se dissolver [5,8].

Na região II, em temperaturas acima da  $T_{\text{solvus}}$ , grãos de ferrita começam a crescer e coalescer uma vez que não existe a presença de outra fase microestrutural ou precipitados que possam inibir o crescimento. O crescimento de grão é proporcional ao tempo acima da  $T_{\text{solvus}}$ . Este tempo depende da energia de soldagem, geometria da junta e composição química da liga [5,8].

No resfriamento abaixo da  $T_{\text{solvus}}$  da ferrita, na região III, tem-se a nucleação e crescimento da austenita. Durante este resfriamento pode ocorrer a precipitação de outras fases tais como, nitretos, carbonetos e carbonitretos [5,8].

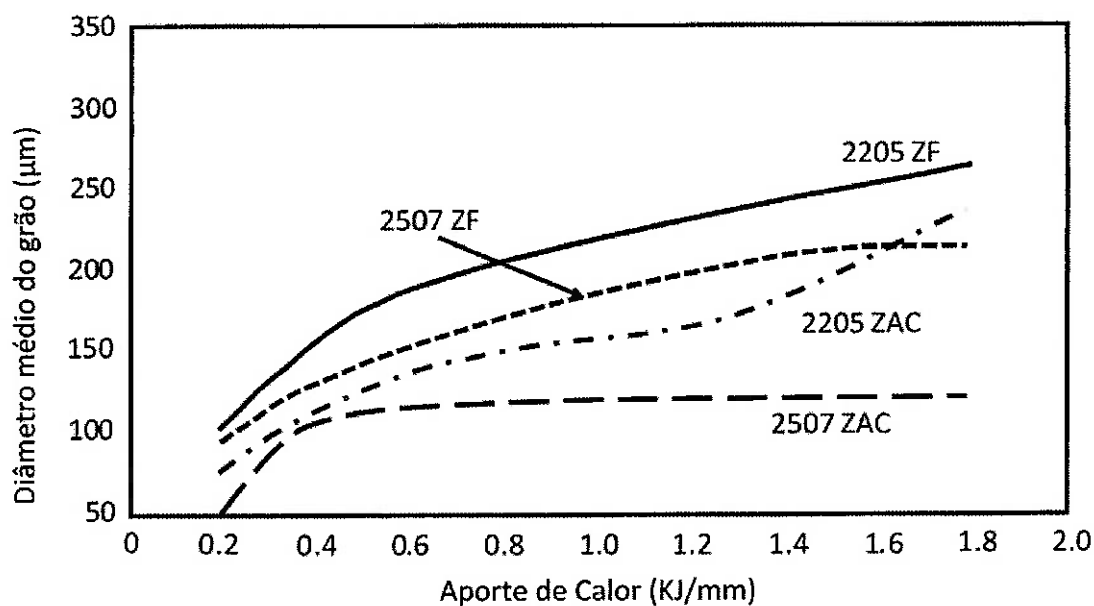


**Figura 2.11** – Ciclo térmico de soldagem na ZAC em um ponto localizado perto da ZDL [5].

Como dito anteriormente o tempo acima da  $T_{solvus}$  da ferrita apresenta um efeito muito forte em relação ao crescimento de grãos de ferrita. Acima desta temperatura, não existe efetivamente nada que impeça o crescimento de grão e desta maneira o tamanho do referido grão irá aumentar drasticamente. Este crescimento pode acarretar uma elevada queda na tenacidade e ductilidade do material. Portanto, o tempo de permanência na região completamente ferrítica deve ser minimizado. Isto pode ser feito através do controle da composição química ou controle do aporte de calor. Com a diminuição da relação  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ , a  $T_{solvus}$  da ferrita irá aumentar e o tempo de permanência acima desta temperatura irá diminuir, para um determinado ciclo térmico na ZAC. Para uma determinada relação de  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ , a diminuição do aporte de calor promoverá um gradiente térmico acentuado e reduzirá o tempo

de permanência na região completamente ferrítica, durante o ciclo térmico [5,7,8].

O tamanho de grão na ZF e na ZAC aumenta em função da energia de soldagem. A figura 2.12 mostra que para a soldagem da liga de AID 2205 pelo processo de soldagem TIG autógeno, o tamanho de grão tanto na ZF como na ZAC aumenta quase que 5 vezes com o aumento do aporte de calor de 0,25 para 1,7 kJ/mm. Para a liga de AISD 2507, o tamanho de grão na ZF também apresenta considerável crescimento em função do aumento do aporte de calor, porém na ZAC o crescimento de grão é retardado devido a  $T_{\text{solvus}}$  da ferrita ser superior, o que irá estreitar a ZAC [5,8].



**Figura 2.12** – Efeito do aporte de calor no crescimento de grãos de ferrita (tempo acima da temperatura solvus da ferrita) [5].

### **2.5.6 PRECIPITAÇÃO DE AUSTENITA SECUNDÁRIA.**

Sob condições de elevadas taxas de resfriamento, como no caso da ZF e ZAC de juntas soldadas de AID e AISD, o balanço de fases ferrita-austenita pode tender para teores superiores de ferrita quando comparado com a condição em equilíbrio para uma determinada composição química, isto porque o resfriamento elevado pode prejudicar a formação da austenita primária. Desta maneira, reaquecendo estas regiões, por tratamento isotérmico ou pelo reaquecimento de um segundo passe durante o processo de soldagem, a austenita secundária ( $\gamma_2$ ) precipita a partir da ferrita [5,7,8].

A precipitação da austenita secundária pode notavelmente elevar a tenacidade das juntas soldadas. Por outro lado, existem algumas evidências de que a presença desta fase reduz a resistência à corrosão por pites, uma vez que a nucleação de pite apresenta uma preferência pela interface austenita secundária e ferrita. Esta redução da resistência à corrosão por pites pode ser explicada pelo teor de nitrogênio na austenita secundária ser de aproximadamente metade do teor de nitrogênio na austenita primária [5,6,7,8].

### **2.5.7 PRECIPITAÇÃO DE NITRETO DE CROMO.**

Quando juntas soldadas de AID e AISD apresentam microestrutura desbalanceada, a fração volumétrica de ferrita pode ser elevada. Neste caso, nitrato de cromo ( $\text{CrN}$  ou  $\text{Cr}_2\text{N}$ ) pode se precipitar devido à baixa solubilidade de nitrogênio na ferrita. Em contraste, a austenita apresenta alta solubilidade de nitrogênio, como já discutido anteriormente. Como consequência, uma zona empobrecida em cromo é formada em torno dos precipitados. Esta zona empobrecida em cromo reduz a resistência à corrosão localmente. Além disto,

a combinação de fase frágil e dura, no interior de uma matriz ferrítica, pode também reduzir a tenacidade desta região. Para evitar a precipitação de nitreto de cromo, é importante manter o balanço da microestrutura através do controle da composição química e da história térmica [3,5,7,8]

#### **2.5.8 PRECIPITAÇÃO DE FASE SIGMA.**

A precipitação de fase sigma em AID e AISD ocorre em uma faixa de temperatura entre 700°C e 950°C. A fase sigma normalmente se precipita na interface entre ferrita e austenita e cresce em direção à ferrita, devido ao teor mais elevado de Cr, Mo, e W presente nesta fase. Como a difusividade na ferrita é superior à austenita, a zona empobrecida na ferrita é superior à austenita. A zona empobrecida na ferrita também apresenta uma diferença em composição, devido ao crescimento da fase sigma ser preferencial nesta fase, em relação a zona empobrecida na austenita. De modo geral, com a presença da fase sigma ou outras fases intermetálicas, a resistência à corrosão e a tenacidade são reduzidas. A cinética da precipitação da fase sigma em aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos é lenta, quando comparada nos AID e AISD. Nestes últimos, a taxa de precipitação de fase sigma aumenta com o aumento do teor de cromo e é favorecida pela presença da interface entre as fases ferrita e austenita [3,5,7,8].

#### **2.5.9 PRECIPITAÇÃO $M_{23}C_6$ .**

O carboneto  $M_{23}C_6$  possui um reticulado CFC e apresenta basicamente cromo e carbono em sua composição química, mas quantidades consideráveis

de ferro e molibdênio podem ser dissolvidas. A precipitação deste carboneto ocorre a temperaturas entre 600°C e 900°C e empobrece em cromo a região vizinha reduzindo a resistência à corrosão. Além disto, as propriedades mecânicas podem ser prejudicadas. A cinética de precipitação destes carbonetos é influenciada pelo local de precipitação, composição química, tipo de matriz e tamanho de grão [7].

#### **2.5.10 PRECIPITAÇÃO FASE CHI.**

A composição básica da fase chi é ferro, cromo e molibdênio, mas existe a possibilidade de dissolver níquel e carbono. A precipitação desta fase é bem rápida e ocorre próximo a faixa de temperatura para precipitação da fase sigma. A precipitação da fase chi só irá ocorrer com a presença de Molibdênio na composição química do aço. O carbono não atrasa a precipitação da fase chi como no caso da precipitação da fase sigma, já que a fase chi dissolve carbono. Já o nitrogênio atrasa a precipitação desta fase porque ele é insolúvel tanto na fase chi como na fase sigma. Para aços 17Cr-13Ni-5Mo, teores acima de 0,25% de nitrogênio são suficientes para inibir a precipitação de fase chi [7,8].

#### **2.5.11 FRAGILIZAÇÃO DE 475°C.**

A fragilização de 475°C pode acontecer nos AID e AISD a temperaturas abaixo de 550°C e superiores a 300°C causada pela formação de uma fase CCC rica em cromo chamada  $\alpha'$  por nucleação e crescimento ou por uma reação de decomposição espinodal. A fase  $\alpha'$  se forma com a ferrita,

apresentando morfologia esférica ou tipo disco. Esta fragilização causa principalmente um aumento na temperatura de transição dúctil-frágil. A perda de tenacidade na zona fundida e zona afetada pelo calor, que está relacionada com a quantidade elevada de ferrita, justifica por que estes materiais são recomendados para trabalhar em uma faixa de temperatura entre  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $260^{\circ}\text{C}$  [3,5,7,8].

### **3. OBJETIVOS.**

Este trabalho tem por objetivo comparar as mudanças microestruturais que afetam as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão das juntas soldadas, com base na norma Norsok M-601 e especificação da Petrobras N-133 Rev.L, alterando-se a composição da atmosfera protetora na soldagem pelo processo TIG do aço inoxidável superduplex UNS S32750. Para tanto foram empregadas as seguintes proteções gasosas: 99,99%Argônio, mistura de 97,5%Argônio mais 2,5%Nitrogênio, mistura 90%Argônio mais 10%Hélio e mistura ternária de 88%Argônio, mais 2%Nitrogênio e mais 10%Hélio.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS.**

### ***4.1 METAL DE BASE.***

Para a realização dos ensaios experimentais deste estudo foi utilizado como metal de base o AISD UNS S32750. Foram extraídos 4 corpos de prova de um tubo de 168,28mm de diâmetro e espessura de 10,97mm. As composições químicas e propriedades mecânicas deste material foram fornecidas pelo fabricante e constam nas tabelas 4.1 e 4.2. O certificado do material é apresentado no anexo I.

**Tabela 4.1** – Composição química do metal de base.

| Classificação | C     | Mn    | P     | S     | Si    | Cr     | Ni    | Mo    | N     | Cu    |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| UNS S32750    | 0,018 | 0,490 | 0,023 | 0,000 | 0,530 | 25,400 | 7,100 | 3,590 | 0,270 | 0,450 |

**Tabela 4.2** – Propriedades mecânicas do metal de base.

| Classificação | Limite de escoamento (N/mm <sup>2</sup> ) Rp1,0% | Limite de resistência à tração (N/mm <sup>2</sup> ) | Alongamento (%) |
|---------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------|
| UNS S32750    | 665,00                                           | 869,00                                              | 33,5            |

### ***4.2 CONSUMÍVEL DE SOLDAGEM.***

A vareta, para soldagem de aço inoxidável superduplex, ER2594 de 2,4mm de diâmetro foi utilizada como metal de adição, e as composições químicas e propriedades mecânicas deste consumível foram fornecidas pelo fabricante e estão presentes nas tabelas 4.3 e 4.4. O certificado do consumível é apresentado no anexo II.

**Tabela 4.3** – Composição química do consumível de soldagem.

| Classificação | C     | Si    | Mn    | P     | S     | Cr     | Mo    | Ni    | W     | Cu    | N     |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ER 2594       | 0,020 | 0,300 | 0,900 | 0,020 | 0,010 | 25,700 | 3,800 | 9,600 | 0,500 | 0,600 | 0,250 |

**Tabela 4.4** – Propriedades mecânicas do consumível de soldagem.

| Classificação | Limite de escoamento (MPa) | Limite de resistência à tração (MPa) | Alongamento (%) |
|---------------|----------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| ER 2594       | 600                        | 760                                  | 15              |

### 4.3 PROCESSO DE SOLDAGEM.

Para a realização deste experimento foi utilizado o processo de soldagem TIG manual, sendo o equipamento utilizado uma fonte inversora, de corrente contínua, com o corpo de prova conectado ao polo positivo. Afim de proporcionar maior conforto ao soldador, foi utilizado uma tocha com refrigeração líquida.

#### 4.3.1 ATMOSFERA PROTETORA.

Para realização deste experimento, foi utilizado quatro atmosferas protetoras diferentes, uma atmosfera protetora para cada corpo de prova. Para o gás de purga foi utilizado sempre o argônio (Ar) como atmosfera protetora. A composição de cada atmosfera protetora é descrita na tabela 4.5. O certificado dos gases é apresentado nos anexos III, IV, V e VI.

**Tabela 4.5** – Composição química de cada atmosfera protetora.

| Número do CP | Argônio (Ar) | Hélio (He) | Nitrogênio (N <sub>2</sub> ) |
|--------------|--------------|------------|------------------------------|
| 01           | 99,99%       | -          | -                            |
| 02           | 97,5%        | -          | 2,5%                         |
| 03           | 90%          | 10%        | -                            |
| 04           | 88%          | 10%        | 2%                           |

Para controlar a quantidade de oxigênio, na purga, antes e durante o processo de soldagem, foi utilizado um analisador de oxigênio. A soldagem de cada corpo de prova teve início, após a quantidade de oxigênio ser menor que 100 partes por milhão (PPM). O certificado de calibração do equipamento é apresentado no anexo VII.

#### 4.3.2 ELETRODO DE TUNGSTÊNIO.

Para a soldagem de todos os corpos de prova foi utilizado o eletrodo de tungstênio de 2,4 mm de diâmetro com adição de 1,5% de La (EWLa-1.5) conforme classificação da AWS A5.12 e afiação de 45°, utilizando o equipamento ilustrado na figura 4.1.



**Figura 4.1** – Equipamento para a afiação do eletrodo de tungstênio.

#### 4.3.3 PARÂMETROS DE SOLDAGEM.

Com a finalidade de reduzir as variáveis do processo de soldagem manual, foi mantido a mesma corrente para a soldagem dos quatro corpos de prova. A corrente foi definida após a realização de testes preliminares, em corpos de prova com as mesmas dimensões dos corpos de prova em estudo, utilizando o argônio como atmosfera protetora. Foi definido 94A para o passe de raiz e 111A para o segundo passe.

A fim de minimizar a variação da tensão, que varia com a distância peça-eletro de tungstênio, foi mantido o mesmo tamanho do bocal e a mesma extensão do eletrodo de tungstênio. Optou-se em deixar livre a velocidade de soldagem, com objetivo de verificar se existe alguma alteração com a variação das quatro atmosferas protetora.

#### **4.4 REALIZAÇÃO DA SOLDAGEM.**

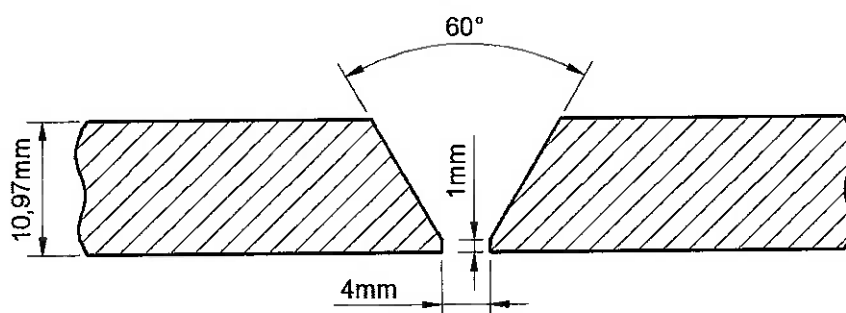
Os corpos de provas foram soldados sem pré-aquecimento, na posição 5G, com progressão de soldagem ascendente, conforme ilustrado na figura 4.12. Durante a soldagem, o teor de oxigênio no gás de purga atingiu valor máximo de 200 ppm.



**Figura 4.2** – Soldagem dos corpos de prova na posição 5G, com progressão ascendente.

#### 4.4.1 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA.

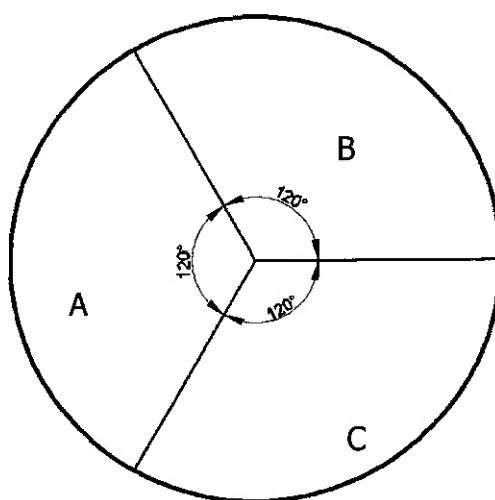
Os corpos de prova foram preparados com chanfro simples V, com ângulo de  $60^\circ$ , abertura de raiz de 4 mm e 1 mm de face de raiz. Cada peça foi cortada com comprimento de 140 mm. O croqui da junta pode ser observado na figura 4.13.



**Figura 4.3** – Detalhe da junta.

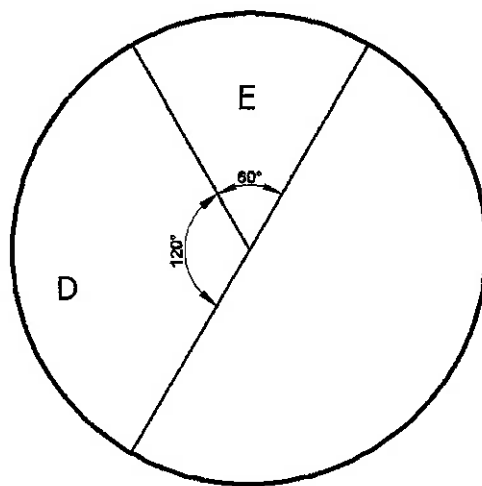
#### 4.4.2 SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM.

Para a soldagem do primeiro passe, cada corpo de prova foi dividido em três quadrantes, cada quadrante com  $120^\circ$ . A figura 4.14 ilustra esta divisão de quadrantes.



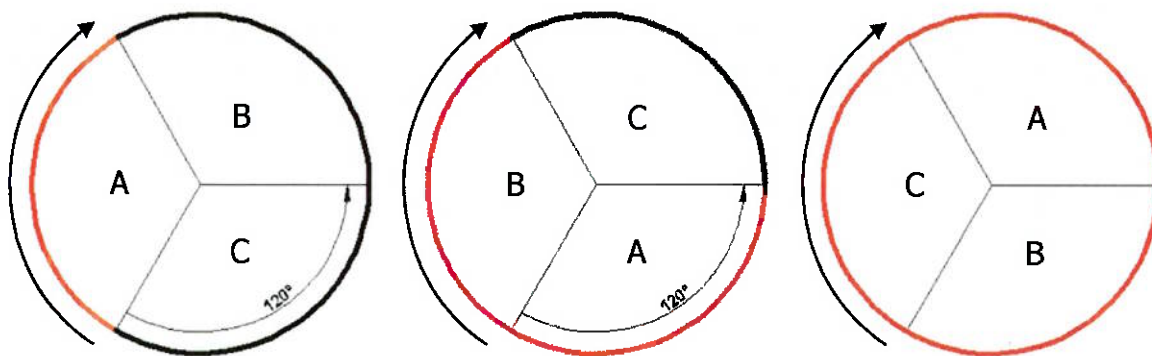
**Figura 4.4** – Divisão dos quadrantes para o passe de raiz.

Para a soldagem do segundo passe, após a soldagem do passe de raiz, cada corpo de prova foi dividido em dois quadrantes, um quadrante sobrepondo inteiramente um dos quadrantes da primeira divisão e um segundo quadrante sobrepondo  $60^\circ$  do quadrante subsequente da primeira divisão, ou seja, para o segundo passe foi soldado somente metade da circunferência do tubo. Optou-se em realizar a soldagem desta maneira, para verificar a influência do segundo passe sobre o passe de raiz. A figura 4.15 ilustra esta divisão de quadrantes.

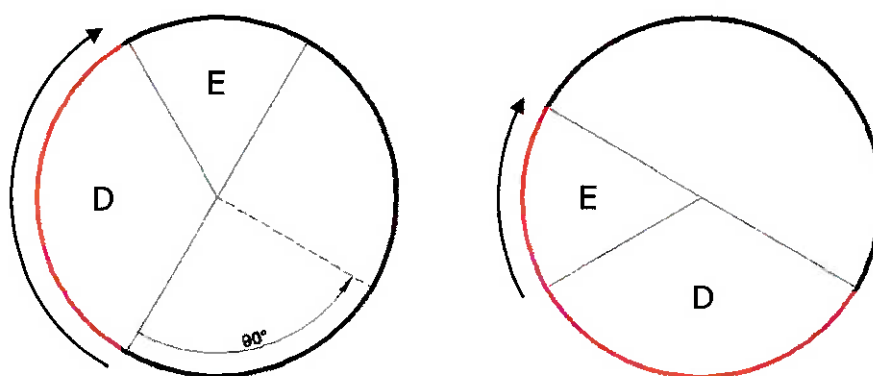


**Figura 4.5** – Identificação dos quadrantes para o segundo passe.

A soldagem foi realizada na posição 5G ascendente. O tubo foi rotacionado em  $120^\circ$  manualmente ao final da soldagem de cada quadrante, conforme detalhes da figura 4.16 para o passe de raiz e 4.17 para o segundo passe. Foi adotado este método de divisão de quadrantes e de soldagem, com o objetivo de permanecer maior parte do tempo na posição vertical ascendente, afim de se obter a maior energia de soldagem. Desta maneira, também foi possível minimizar as variações de energia de soldagem em torno da junta soldada.



**Figura 4.6** – Sequência de rotação para o passe de raiz.



**Figura 4.7** – Sequência de rotação para o segundo passe.

## 4.5 ENSAIOS REALIZADOS.

### 4.5.1 ENSAIO POR LÍQUIDO PENETRANTE.

Com o objetivo de identificar qualquer descontinuidade superficial da junta soldada, foi realizado ensaio por líquido penetrante em todos os corpos de prova, conforme norma ASME B31.1.

Para a realização do ensaio por líquido penetrante, as superfícies das juntas soldadas foram limpas com escova rotativa. Em seguida, foi utilizado o removedor Magnaflux Spotcheck SKC-S para limpeza da superfície do cordão de solda, afim de remover qualquer resíduo remanescente. Após a superfície

estar seca e isenta de resíduos, foi aplicado o líquido penetrante Magnaflux Spotcheck SKL-WP. Após 15 minutos de penetração, o excesso de líquido penetrante foi removido por pulverização de água, e a superfície foi seca através de panos absorventes isentos de resíduos. Após a secagem, o revelador Magnaflux Spotcheck SKD-S2 foi aplicado. A avaliação das juntas soldadas foi realizada após 20 minutos da aplicação de revelador, com iluminação natural.

#### 4.5.2 ENSAIO RADIOGRÁFICO.

A fim de se verificar a integridade da junta soldada, foi realizado ensaio radiográfico em todos os corpos de prova, conforme norma ASME IX Ed. 2013.

Para a realização do ensaio radiográfico foi utilizado IQI ASTM 1A, sem colimador, com isótopo Iridio 192, com radioatividade 27 Ci. A distância utilizada da fonte à peça foi de 152 mm com tempo de exposição de 5 minutos, através da técnica PDVS.

#### 4.5.3 ENSAIO DE IMPACTO.

Como a tenacidade é uma propriedade mecânica seriamente afetada pelas mudanças microestruturais, o ensaio Charpy entalhe em "V" foi utilizado para avaliar esta propriedade. As dimensões dos corpos de prova foram reduzidas em 10 x 2,5 x 55 mm, conforme a norma ASTM A370. Os ensaios foram realizados à temperatura de -46°C. Além da energia absorvida, foi verificado a expansão lateral de cada corpo de prova.

#### 4.5.4 ANÁLISE DO TEOR DE FERRITA.

A fração volumétrica de ferrita foi analisada utilizando a técnica de análise de imagem através do software AxioVision, segundo norma ASTM

E1245. Esta técnica utiliza meios estatísticos para estimar a fração volumétrica de uma fase.

#### 4.5.5 ANÁLISE MACROESTRUTURAL.

A preparação da face das amostras foi realizada com lixas de granulometrias de 50, 200, 300, 400, 600 e 1200 “meshes”, nesta mesma sequência crescente de granulometria. Em seguida, foi polida com pasta de diamante de 6, 3 e 1  $\mu\text{m}$  de tamanho médio de partícula, respeitando esta mesma sequência decrescente em tamanho de partícula.

Quando obtida a superfície totalmente polida, as faces das amostras foram submetidas a ataque químico utilizando Behara.

A aquisição de imagens foi realizada através do microscópio óptico Olympus BX51M.

#### 4.5.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL.

A preparação para análise microestrutural das juntas soldadas foi realizada segundo norma ASTM E3.

Foram preparadas amostras metalográficas dos corpos de prova nas condições estabelecidas. A sequência de preparação foi:

- i. Corte: a região de corte considerada foi a seção transversal do cordão de solda, sendo o material cortado no equipamento “Isomet” com fluido de resfriamento, evitando assim o aquecimento localizado da amostra;
- ii. Embutimento: realizado em resina termofixa de cura a quente (baquelite);

- iii. Lixamento: realizada em equipamento rotativa com fluxo de água sobre a amostra embutida, utilizando-se lixas de carbeto de silício de 100, 240, 300, 400, 600 e 1000mesh, nesta sequência;
- iv. Polimento da amostra em pano, com pasta abrasiva de diamante, de 9, 3 e 1 $\mu$ m, nesta sequência;
- v. Polimento final com sílica coloidal com 0,05  $\mu$ m de granulometria.

Uma vez obtida a superfície totalmente polida o material foi submetido a ataque eletrolítico utilizando ácido oxálico 10% (NaOH), com tempo aproximado de 80s e uma tensão de 3V. O equipamento utilizado para o ataque foi o Polectrol da Struers.

A aquisição de imagens foi realizada utilizando a câmera digital Opticam OPT 10000 acoplada no microscópio Olympus BX60M, como apresentado na Figura 4.18. As regiões de interesse foram: MB, ZAC e ZF.



**Figura 4.8** – Microscópio óptico Olympus BX60M.

#### 4.5.7 ENSAIO DE CORROSÃO.

A resistência à corrosão por pites é seriamente afetada pela precipitação de fases intermetálicas e austenita secundária. Tendo isto em vista, a resistência a corrosão por pites, foi avaliada pela norma ASTM G48 Método A, utilizando como solução para ataque o cloreto de ferro. O tempo de ataque utilizado foi de 24h à temperatura de 40°C.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.**

### ***5.1 ENSAIO POR LÍQUIDO PENETRANTE.***

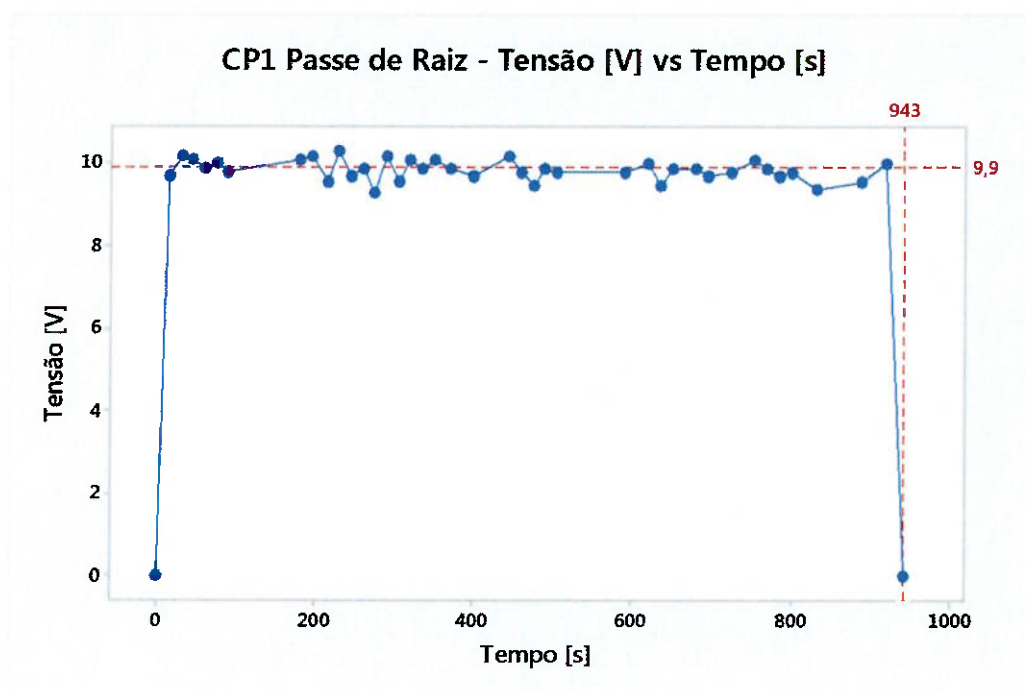
A avaliação do ensaio por líquido penetrante, foi realizado utilizando como critério de aceitação a norma ASME VIII divisão I apêndice 8. Não observou-se descontinuidades ou defeitos em nenhum corpo de prova, obtendo-se portanto resultado satisfatório. O relatório é apresentado no anexo VIII.

### ***5.2. ENSAIO RADIOGRÁFICO.***

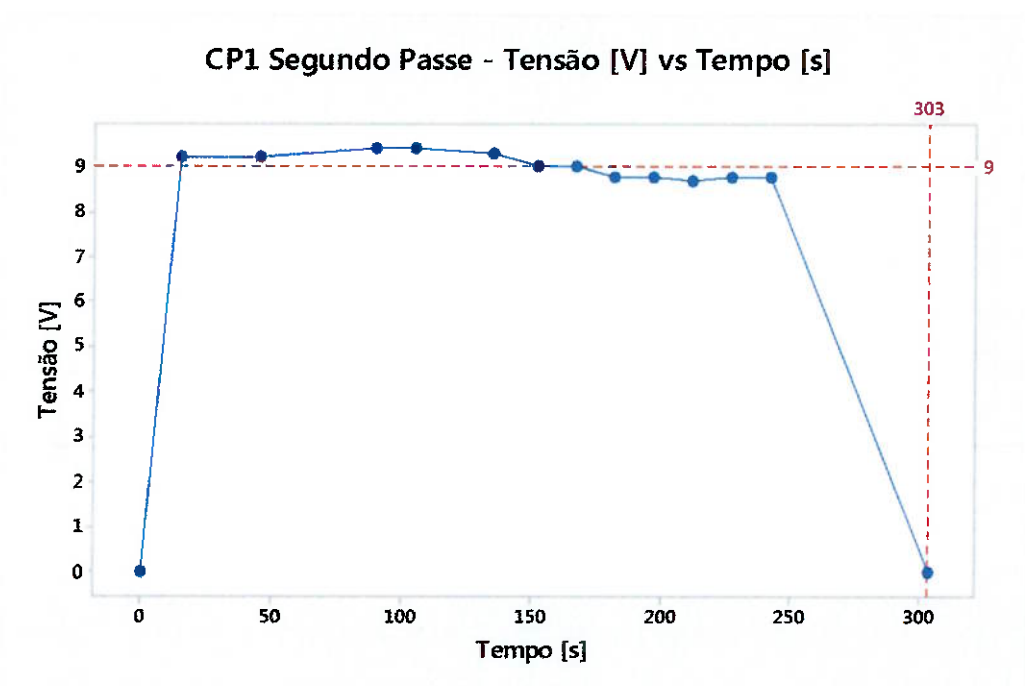
A avaliação do ensaio radiográfico, foi realizado utilizando como critério de aceitação o item QW-191.1.2 da norma ASME IX Ed. 2013. Não observou-se descontinuidades ou defeitos nos corpos de prova 1, 2, e 3. Para o corpo de prova 4, observou-se duas regiões com porosidade, porém, segundo o critério de aceitação não foi considerado defeito. Portanto, o resultado foi satisfatório para todos os corpos de prova. O relatório é apresentado no anexo IX.

### ***5.3 ENERGIA DE SOLDAGEM.***

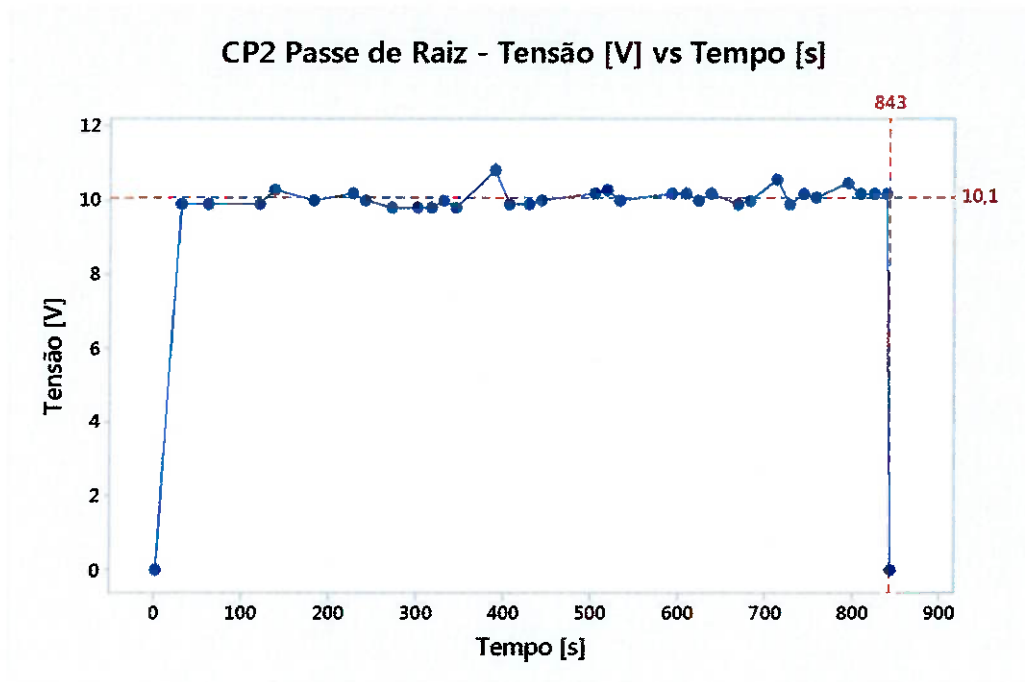
As figuras de 5.1 até 5.8 ilustram as variações de tensão, para cada corpo de prova soldado. Além do tempo, em segundos, de arco elétrico “aberto” durante a soldagem dos corpos de prova.



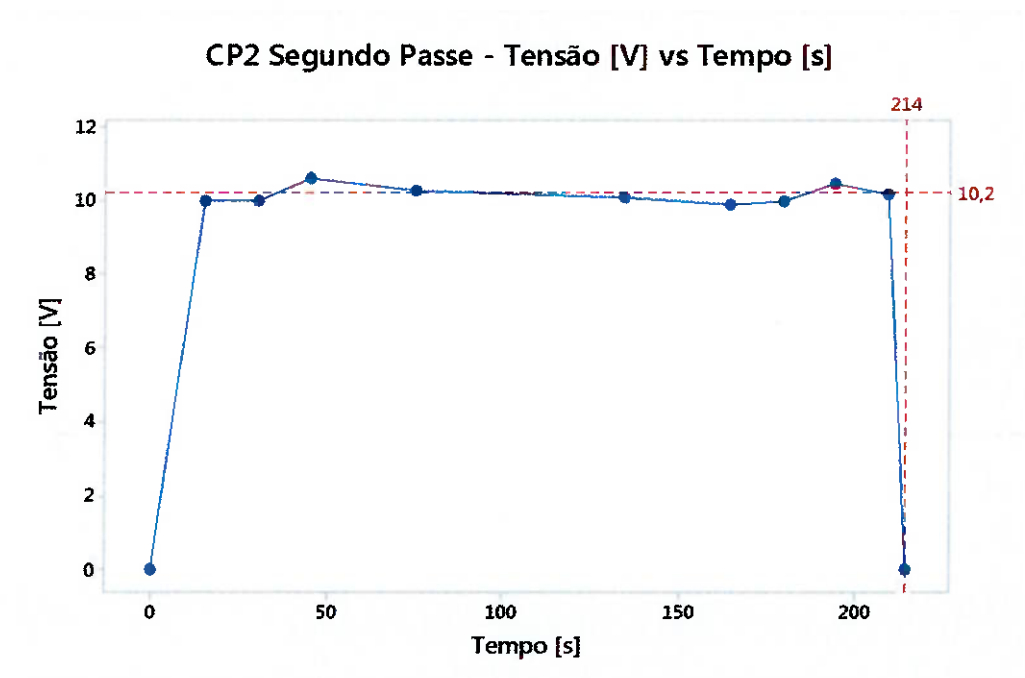
**Figura 5.1** – Variação da tensão para o passe de raiz do CP1.



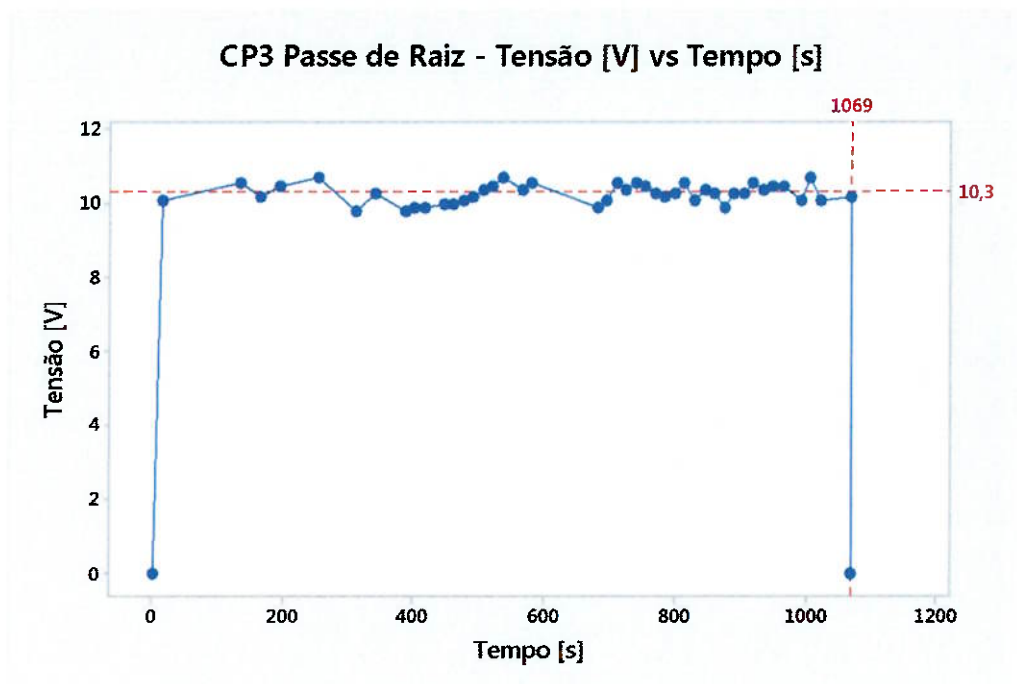
**Figura 5.2** – Variação da tensão para o segundo passe do CP1.



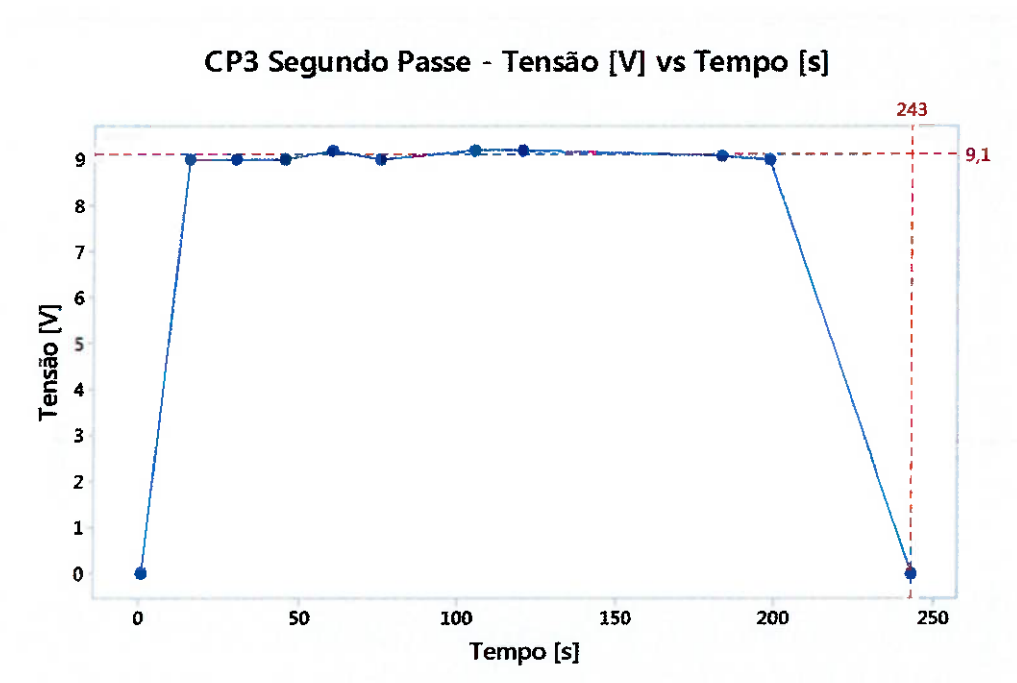
**Figura 5.3** – Variação da tensão para o passe de raiz do CP2.



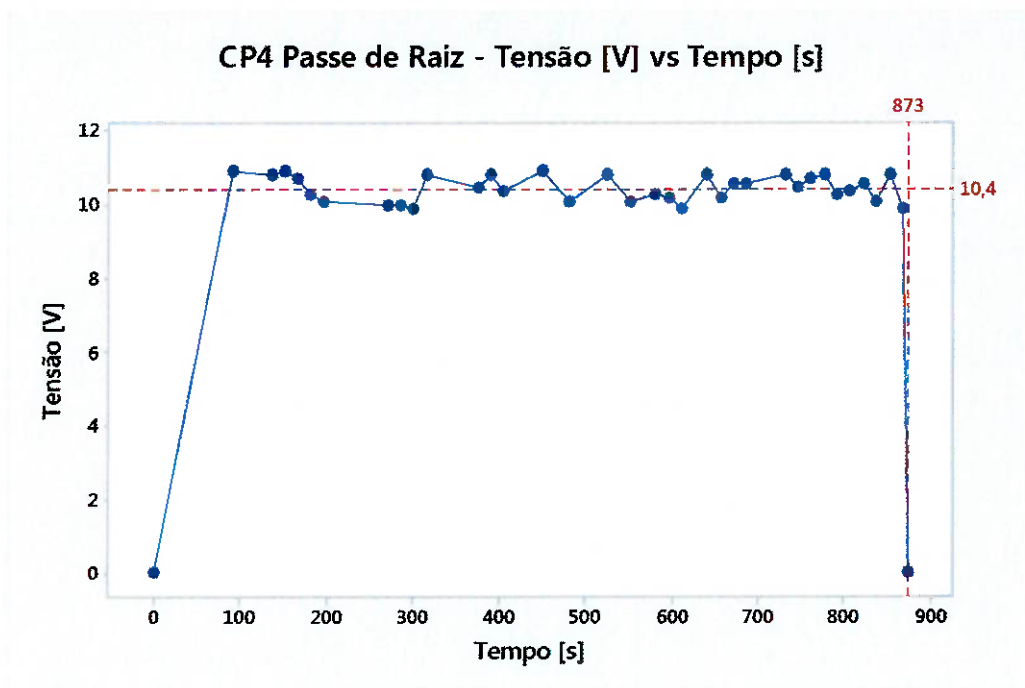
**Figura 5.4** – Variação da tensão para o segundo passe do CP2.



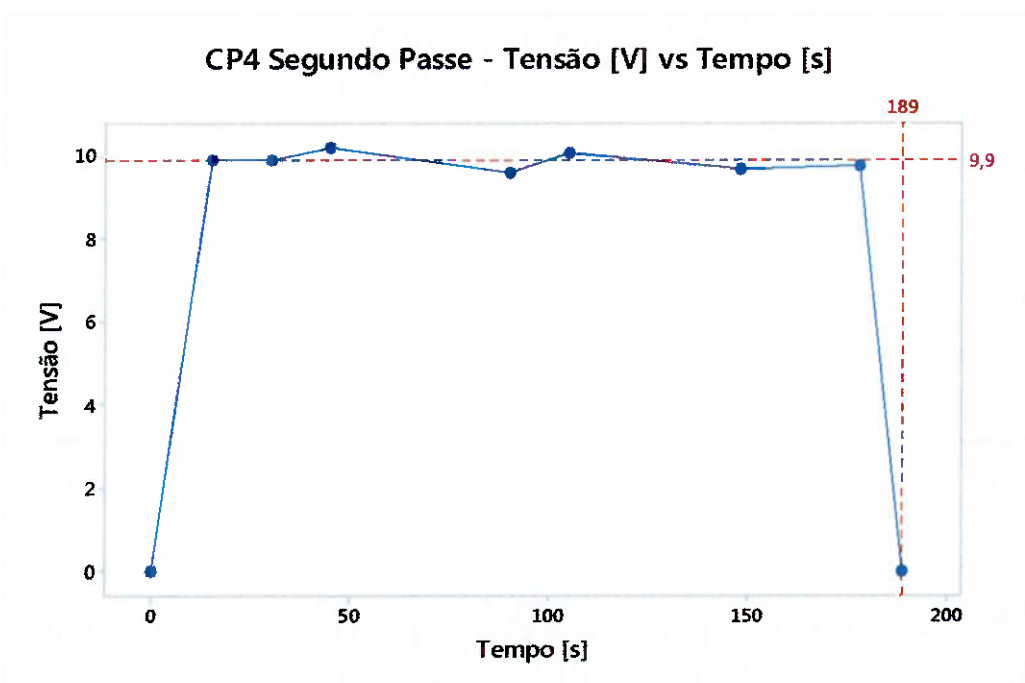
**Figura 5.5** – Variação da tensão para o passe de raiz do CP3.



**Figura 5.6** – Variação da tensão para o segundo passe do CP3.



**Figura 5.7** – Variação da tensão para o passe de raiz do CP4.



**Figura 5.8** – Variação da tensão para o segundo passe do CP4.

A partir destes valores encontrados e através da equação (5), foi calculado a energia de soldagem para cada corpo de prova.

O primeiro cálculo não considerara a eficiência térmica do processo de soldagem ( $\eta$ ), já o segundo cálculo considera a eficiência térmica do processo de soldagem. Os valores obtidos estão descritos nas tabelas de 5.1 até 5.4 e figura 5.9 e 5.10.

$$H = \eta \frac{V \times I}{v \times 1000} \quad (5)$$

Onde:

$\eta$  = eficiência térmica do processo de soldagem;

$H$  = energia de soldagem [kJ/mm];

$V$  = tensão de soldagem [V];

$I$  = corrente de soldagem [A];

$v$  = velocidade de soldagem [mm/s];

Como discutido anteriormente, o valor da eficiência térmica do processo de soldagem pode alterar dependendo das técnicas de soldagem utilizadas. Para este estudo foi adotado a eficiência térmica de 0,6 para o processo de soldagem TIG.

**Tabela 5.1** – Valores encontrados da energia de soldagem sem considerar a eficiência térmica do processo de soldagem para o passe de raiz.

|                               |      |      |      |      |
|-------------------------------|------|------|------|------|
| Número do CP                  | 01   | 02   | 03   | 04   |
| Tensão [V]                    | 9,9  | 10,1 | 10,3 | 10,4 |
| Corrente [A]                  | 94   |      |      |      |
| Velocidade de soldagem [mm/s] | 0,51 | 0,57 | 0,45 | 0,55 |
| Energia de soldagem [kJ/mm]   | 1,82 | 1,66 | 2,15 | 1,78 |

**Tabela 5.2** – Valores encontrados da energia de soldagem sem considerar a eficiência térmica do processo de soldagem para o segundo passe.

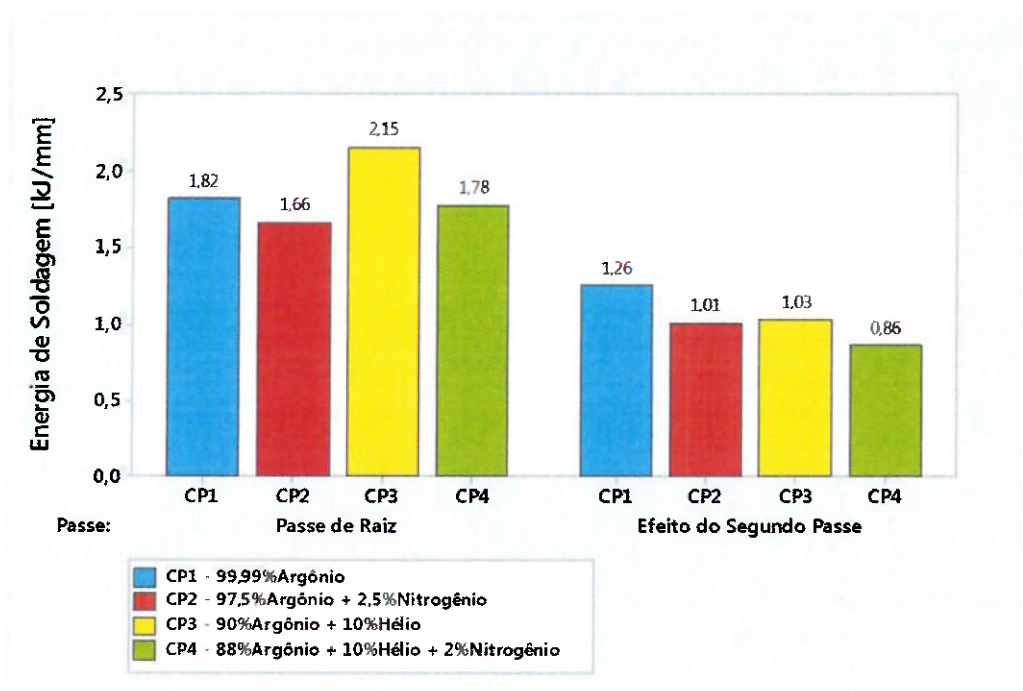
|                               |      |      |      |      |
|-------------------------------|------|------|------|------|
| Número do CP                  | 01   | 02   | 03   | 04   |
| Tensão [V]                    | 9,0  | 10,2 | 9,1  | 9,9  |
| Corrente [A]                  | 111  |      |      |      |
| Velocidade de soldagem [mm/s] | 0,79 | 1,12 | 0,98 | 1,27 |
| Energia de soldagem [kJ/mm]   | 1,26 | 1,01 | 1,03 | 0,86 |

**Tabela 5.3** – Valores encontrados da energia de soldagem considerando a eficiência térmica do processo de soldagem para o passe de raiz.

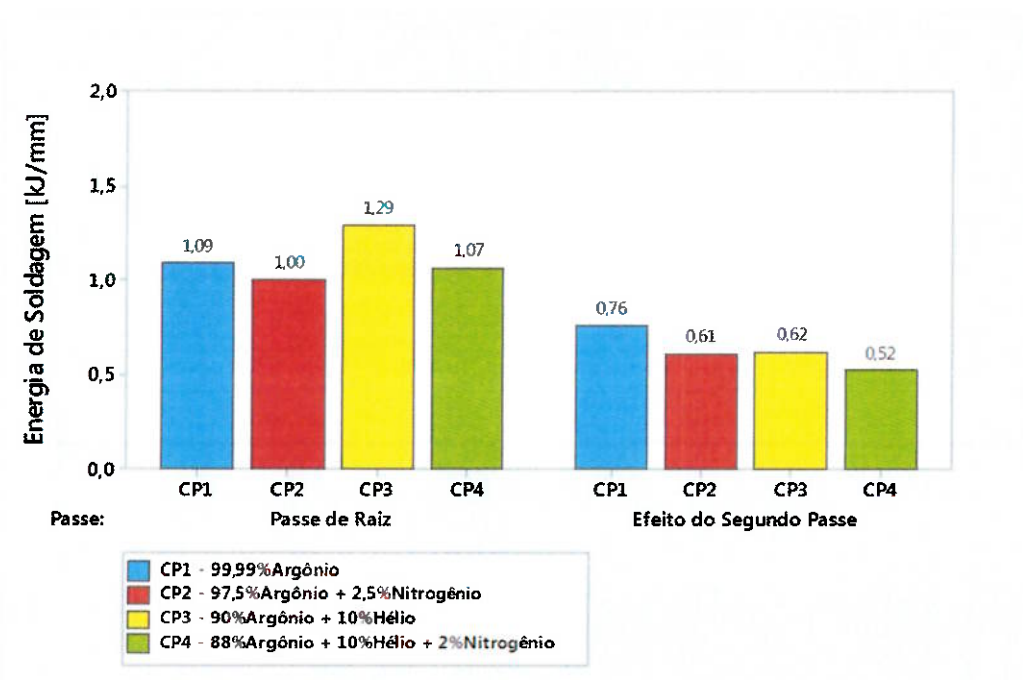
|                               |      |      |      |      |
|-------------------------------|------|------|------|------|
| Número do CP                  | 01   | 02   | 03   | 04   |
| $\eta$                        | 0,6  |      |      |      |
| Tensão [V]                    | 9,9  | 10,1 | 10,3 | 10,4 |
| Corrente [A]                  | 94   |      |      |      |
| Velocidade de soldagem [mm/s] | 0,51 | 0,57 | 0,45 | 0,55 |
| Energia de soldagem [kJ/mm]   | 1,09 | 1,00 | 1,29 | 1,07 |

**Tabela 5.4** – Valores encontrados da energia de soldagem considerando a eficiência térmica do processo de soldagem para o segundo passe.

|                               |      |      |      |      |
|-------------------------------|------|------|------|------|
| Número do CP                  | 01   | 02   | 03   | 04   |
| $\eta$                        | 0,6  |      |      |      |
| Tensão [V]                    | 9,0  | 10,2 | 9,1  | 9,9  |
| Corrente [A]                  | 111  |      |      |      |
| Velocidade de soldagem [mm/s] | 0,79 | 1,12 | 0,98 | 1,27 |
| Energia de soldagem [kJ/mm]   | 0,76 | 0,61 | 0,62 | 0,52 |



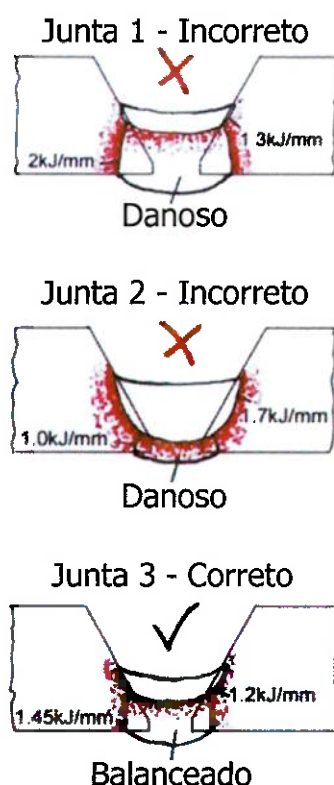
**Figura 5.9** – Comparação das energias de soldagem [kJ/mm] sem considerar a eficiência térmica do processo de soldagem.



**Figura 5.10** – Comparação das energias de soldagem [kJ/mm] considerando a eficiência térmica do processo de soldagem.

Valores de energia de soldagem entre 0,5 até 2,0 kJ/mm podem ser aceitos para AISD, mas muitas normas ou especificações restringem o limite máximo para 1,5 ou 1,75 kJ/mm para garantir as melhores propriedades da junta soldada [13,14].

Nota-se através da Figura 5.9 que apenas o CP2 apresenta energia de soldagem para o passe raiz dentro da faixa estabelecida pelas normas e especificações, quando não levamos em consideração a eficiência térmica do processo de soldagem. Analisando a figura 5.10 pode-se observar que todos os corpos de prova apresentam energia de soldagem para o passe de raiz dentro dos limites estabelecidos pelas normas e especificações, quando levamos em consideração a eficiência térmica do processo de soldagem.



**Figura 5.11** – Recomendação do fabricante de consumível para a energia de soldagem do segundo passe [13].

Para garantir elevada resistência a corrosão, deve-se controlar também a energia de soldagem do segundo passe. Segundo recomendações do fabricante de consumível, o segundo passe deve possuir aproximadamente 75% da energia de soldagem do passe de raiz, conforme ilustrado na figura 5.11 [13,14]. A tabela 5.5 apresenta os valores encontrados da porcentagem da energia de soldagem do segundo passe em relação a energia de soldagem do passe de raiz.

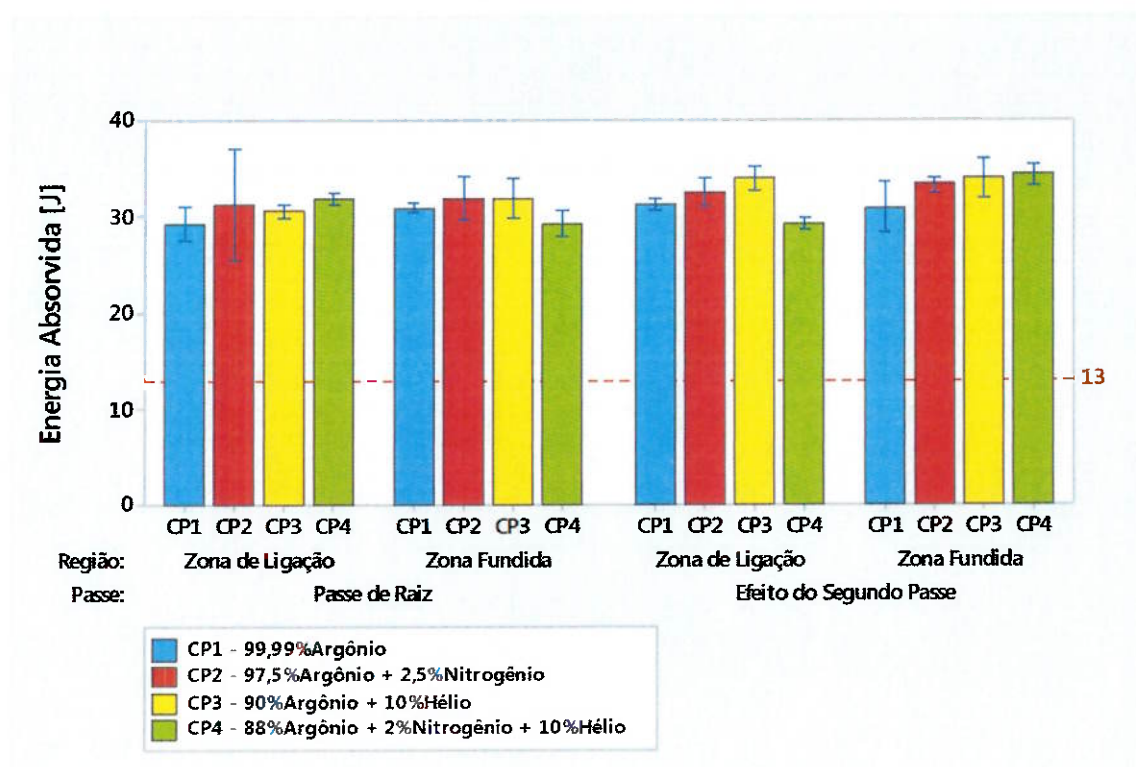
**Tabela 5.5** – Porcentagem da energia de soldagem do segundo passe em relação a energia de soldagem do passe de raiz.

| Número do CP                                            | 01    | 02    | 03    | 04    |
|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Energia de soldagem do passe de raiz [kJ/mm]            | 1,09  | 1,00  | 1,29  | 1,07  |
| Energia de soldagem do segundo passe [kJ/mm]            | 0,76  | 0,61  | 0,62  | 0,52  |
| Porcentagem da energia de soldagem do segundo passe [%] | 69,72 | 61,00 | 48,06 | 48,60 |

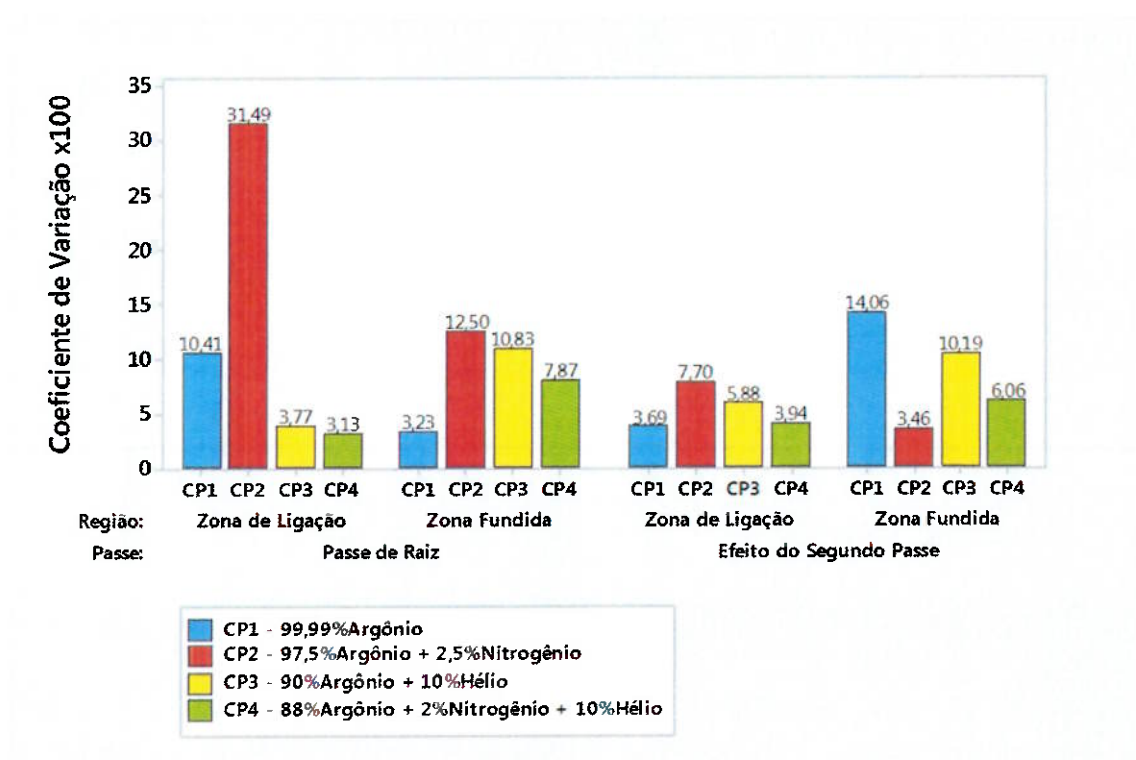
Pode-se observar que todos os corpos de prova apresentam porcentagem da energia de soldagem do segundo passe abaixo da recomendação do fabricante de consumível. O corpo de prova que mais se aproxima da recomendação do fabricante de consumível é o CP01.

#### **5.4 ENSAIO DE IMPACTO.**

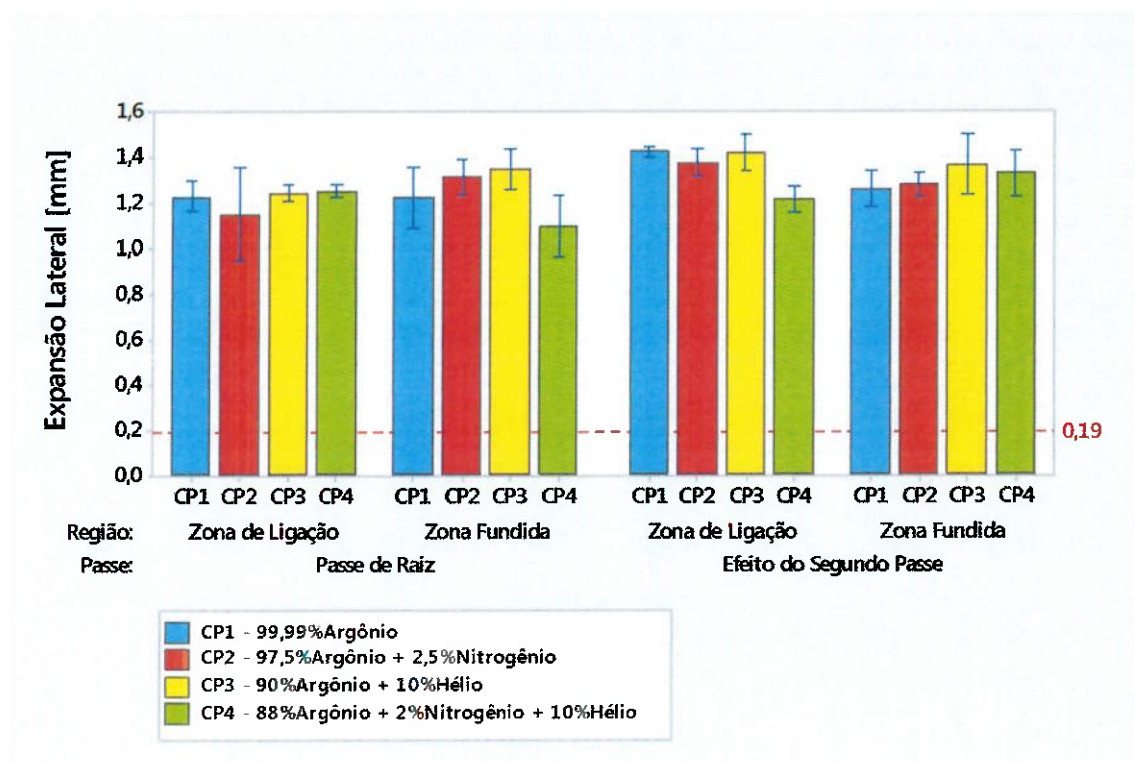
A tenacidade da ZF e ZDL foi avaliada mediante ao ensaio de impacto Charpy, em corpos de prova reduzidos de 10 X 2.5 x 55 mm, com entalhe em “V”, segundo norma ASTM A370, realizado à -46°C. Foram testados três corpos de prova para cada condição. Os resultados da energia absorvida são apresentados na figura 5.12 e os coeficientes de variação são apresentados na figura 5.13. Os resultados da expansão lateral são apresentados na figura 5.14 e os coeficientes de variação são apresentados na figura 5.15.



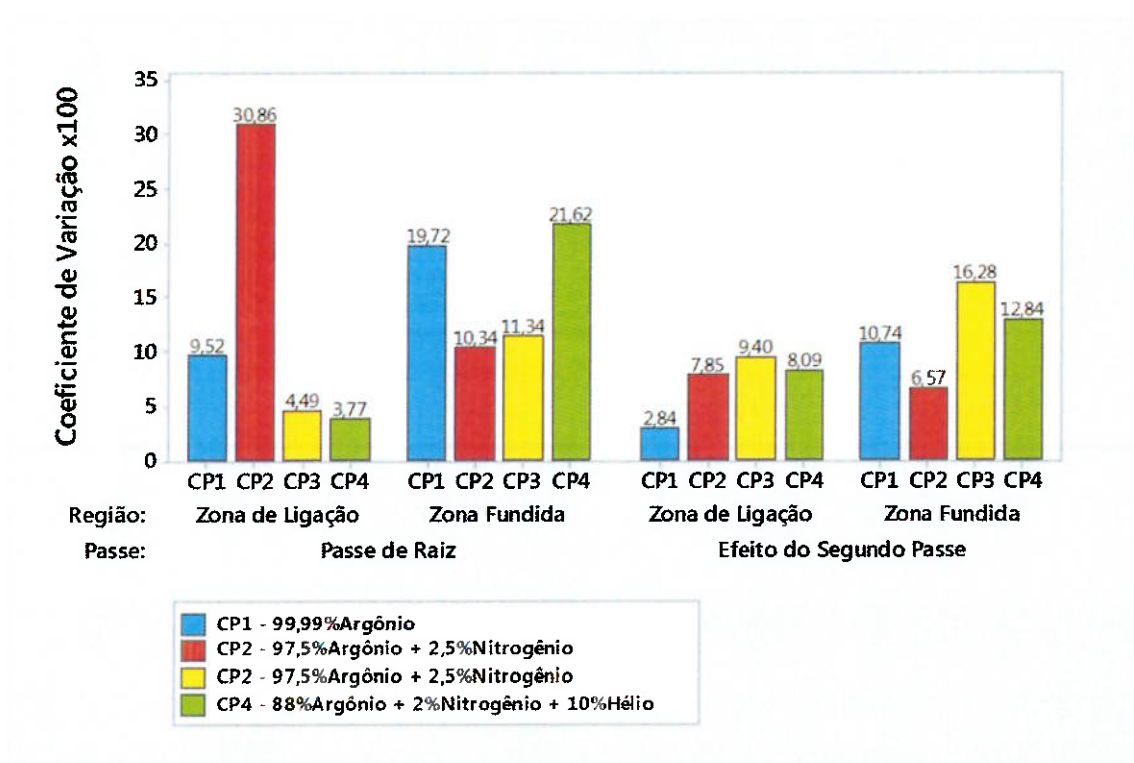
**Figura 5.12** – Valores encontrados de energia absorvida no ensaio de impacto.



**Figura 5.13** – Valores do coeficiente de variação da energia absorvida no ensaio de impacto.



**Figura 5.14** – Valores encontrados da expansão lateral no ensaio de impacto.



**Figura 5.15** – Valores do coeficiente de variação da expansão lateral no ensaio de impacto.

Conforme a norma Norsok M-601 item 4.3.2 o critério de aceitação para teste de impacto é dado conforme tabela 5.6. Observa-se na nota "d" que não é estabelecido o fator de redução para o requisito de energia absorvida em corpos de prova com tamanho reduzido de 2,5mm. Desta maneira, a partir dos valores de redução para corpos de prova de tamanhos reduzidos de 7,5 mm e 5 mm, é possível levantar a reta mostrada na figura 5.16 e determinar a equação (6). Através desta equação é obtido o valor de 0,49 para o fator de redução do requisito de energia absorvida para o corpo de prova de tamanho reduzido de 2,5mm. Aplicando este fator de redução, o critério de aceitação para a energia absorvida é reduzido para 13J e a expansão lateral mínima é reduzida para 0,19mm.

**Tabela 5.6** – Critério de aceitação para teste de impacto conforme norma Norsok M-601.

| Material <sup>a</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Localização do Entalhe <sup>b</sup> | Temperatura do Teste                       | Critério de Aceitação <sup>c d</sup>         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Aço carbono tipo 235                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Não aplicável                       |                                            |                                              |
| Aço carbono tipo 235LT e 360LT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | ZF e ZAC                            | -46 °C                                     | 27 J para Tipo 235LT<br>36 J para tipo 360LT |
| Aço carbono e aço baixa liga com LE > 360 MPa                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | ZF e ZAC                            | TMP ou inferior                            | 42 J                                         |
| Aço tipo 3.5Ni                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | ZF e ZAC                            | -101 °C                                    | 27 J                                         |
| Tipo 316 e 6Mo e ligas-Ni                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | ZF e ZAC                            | TMP ou inferior se TMP é abaixo de -101 °C | Expansão lateral mínima de 0,38 mm.          |
| Tipo 22Cr duplex e Tipo 25Cr duplex                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | ZF e ZAC                            | -46 °C ou TMP                              | 27 J ou expansão lateral mínima de 0,38 mm   |
| a. Ensaio de impacto não é requerido para espessuras < 6 mm.<br>b. Localização do corpo de prova na ZAC deve ser realizado conforme ISSO 15614-1.<br>c. Nenhum valor individual deve ser abaixo de 70% do valor médio requerido.<br>d. Os fatores de redução do requisito de energia absorvida para corpo de prova de tamanho reduzido deve ser 5/6 para corpo de prova de 7,5 mm e 2/3 para corpo de prova de 5 mm. |                                     |                                            |                                              |

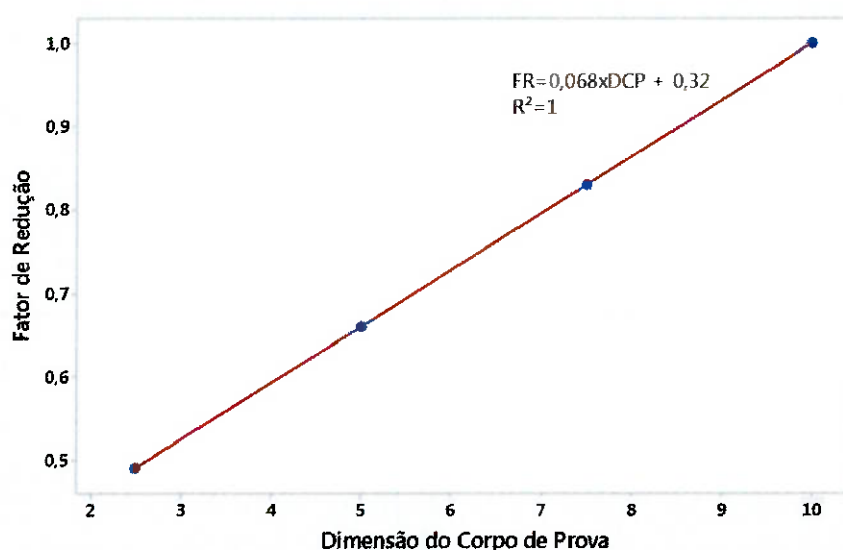
Analisando os valores obtidos, pode-se observar que todos os corpos de prova apresentam valores superiores a 13J para a energia absorvida e valores superiores a 0,19mm para expansão lateral, o que os considera aprovados. Nota-se que os valores obtidos estão acima de duas vezes o valor estabelecido pelo critério de aceitação. A grande variação dos valores obtidos no CP2 na ZDL para o passe de raiz pode ser explicada pelo mal posicionamento do entalhe “V” durante a preparação dos corpos de prova.

$$FR = 0,068 \times DCP + 0,32 \quad (6)$$

Onde:

$FR$  = Fator de redução;

$DCP$  = Dimensão do Corpo de prova.



**Figura 5.16** – Relação da dimensão do corpo de prova e o fator de redução do requisito de energia absorvida para o ensaio de impacto.

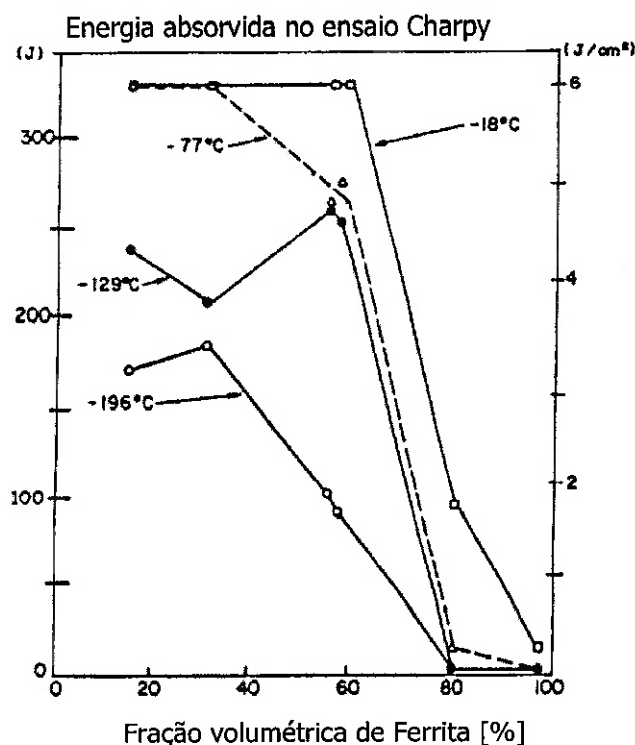
Ao analisar as figuras, nota-se que na ZF do passe de raiz os corpos de prova CP2 e CP3 apresentam valores superiores de energia absorvida e expansão lateral quando comparados com os corpos de prova CP1 e CP4. Comparando o corpo de prova CP1 com o corpo de prova CP4, para este mesmo passe e mesma região, o CP1 apresenta valores superiores de energia absorvida e expansão lateral. O coeficiente de variação para a energia absorvida dos corpos de prova CP2 e CP3 são mais elevados do que os coeficientes de variação do CP1 e CP4. Para o coeficiente de variação dos valores de expansão lateral os corpos de prova CP1 e CP4 apresentam valores superiores aos coeficientes dos corpos de prova CP2 e CP3.

Na ZF com o efeito do segundo passe, o CP4 passa a apresentar o maior valor de energia absorvida e expansão lateral. O CP1 passa a apresentar o menor valor de energia absorvida e expansão lateral. Os valores obtidos de energia absorvida e expansão lateral do CP3 são superiores aos valores obtidos do CP2. O coeficiente de variação do CP1 para a energia absorvida é o mais elevado e para a expansão lateral o CP3 apresenta o maior coeficiente de variação.

Na ZDL do passe de raiz, o CP4 apresenta o maior valor obtido de energia absorvida e expansão lateral. Já na ZDL com o efeito do segundo passe o CP4 passa a apresentar o menor valor de energia absorvida e expansão lateral. Os valores de energia absorvida e expansão lateral para os corpos de prova CP1, CP2 e CP3 aumentam com o efeito do segundo passe, apresentando a mesma tendência.

A tenacidade é determinada basicamente em função da fração volumétrica e distribuição da ferrita [7]. A figura 5.17 mostra a influência do teor

de ferrita e da temperatura na energia absorvida do ensaio Charpy. O limite de escoamento diminui com o decréscimo da temperatura para esta fase, o que comprova a existência de temperatura de transição dúctil-frágil [7].

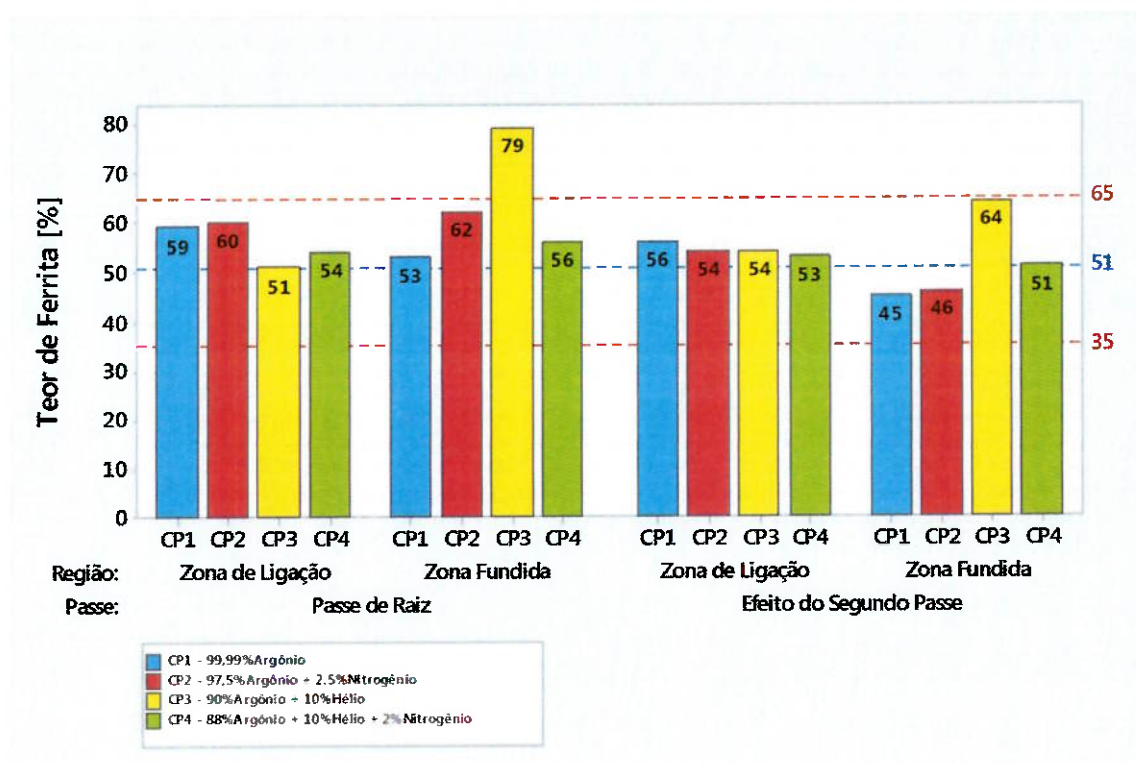


**Figura 5.17** – Efeito da fração volumétrica de ferrita e da temperatura do ensaio Charpy na energia absorvida [7].

A fração volumétrica de ferrita é influenciada diretamente pela energia de soldagem, os valores encontrados de fração volumétrica serão apresentados no próximo item.

## 5.5 ANÁLISE DO TEOR DE FERRITA.

A fração volumétrica de ferrita na ZF e ZDL foi avaliada mediante ao método da análise de imagem, através do software AxioVision, os resultados são apresentados na figura 5.18.



**Figura 5.18** – Resultado da análise do teor de ferrita para todas as condições.

Conforme a norma Norsok M-601 [15] item 4.3.6 a fração volumétrica de ferrita no passe de raiz deve estar entre 30% até 70%, a especificação da Petrobras N-133 Revisão J [16] restringe estes valores para 35% até 65%, linhas de referência, na cor vermelha, da figura 5.18. A linha de referência na cor azul representa o teor de ferrita encontrado no metal de base.

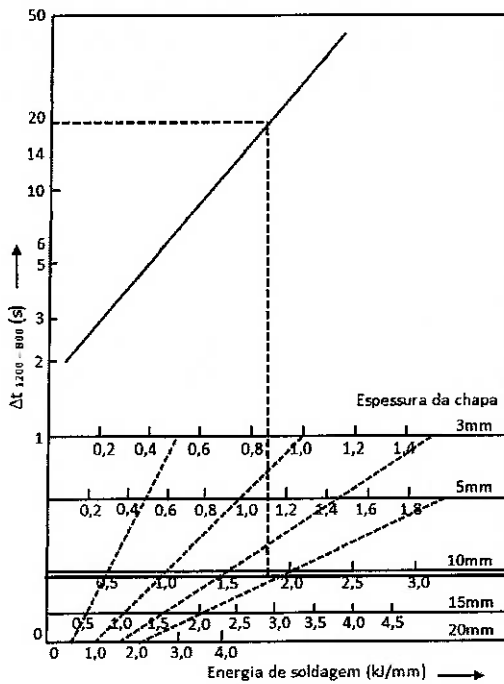
Observar-se que o CP3 é considerado reprovado na ZF do passe de raiz, a fração volumétrica de ferrita é de 79%, o que significa que este valor está 21,5% acima do critério de aceitação da especificação da Petrobras.

Com a energia de soldagem do passe de raiz e com a espessura do corpo de prova, é possível estimar o tempo recomendado para o resfriamento entre 1200°C e 800°C deste passe. As figuras 5.19 e 5.20 ilustram o ábaco utilizado para estimar este tempo. A tabela 5.7 apresenta os valores obtidos

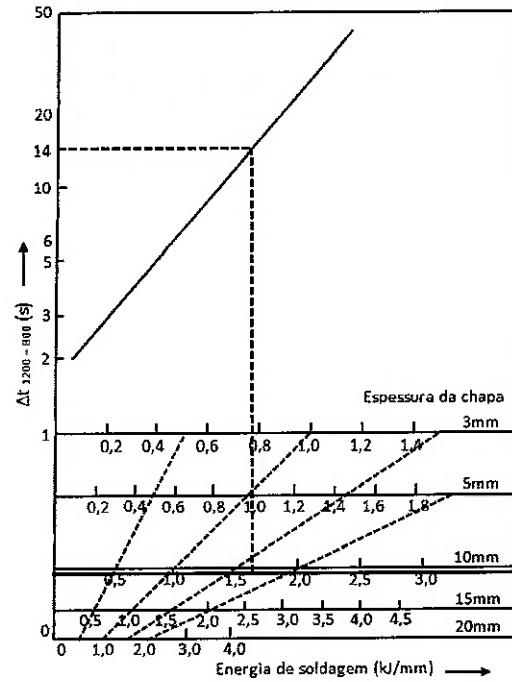
para o tempo de resfriamento recomendado utilizando a energia de soldagem calculada desconsiderando a eficiência térmica do processo de soldagem TIG e os valores encontrados para o tempo de resfriamento recomendado utilizando a energia de soldagem calculada considerando a eficiência térmica do processo de soldagem. Avaliando estes resultados, observa-se que o tempo de resfriamento recomendado calculado com a energia de soldagem considerando a eficiência térmica do processo de soldagem não corresponde a 60% do tempo de resfriamento recomendado calculado com a energia de soldagem desconsiderando a eficiência térmica do processo de soldagem.

Para o CP3, provavelmente o tempo de resfriamento foi abaixo do valor estimado de 9 segundos ou 27, o que desfavoreceu a formação da austenita. Outro fator que possa ter influenciado na formação da austenita é o teor de N durante a soldagem, pode ter ocorrido perda significativa de N durante a soldagem e influenciado negativamente a formação da austenita. Pode-se notar que o teor de ferrita dos corpos de prova CP1 e CP4 na ZF do passe raiz foram os mais próximos do teor de ferrita do metal de base, provavelmente os tempos de resfriamento foram próximos aos recomendados.

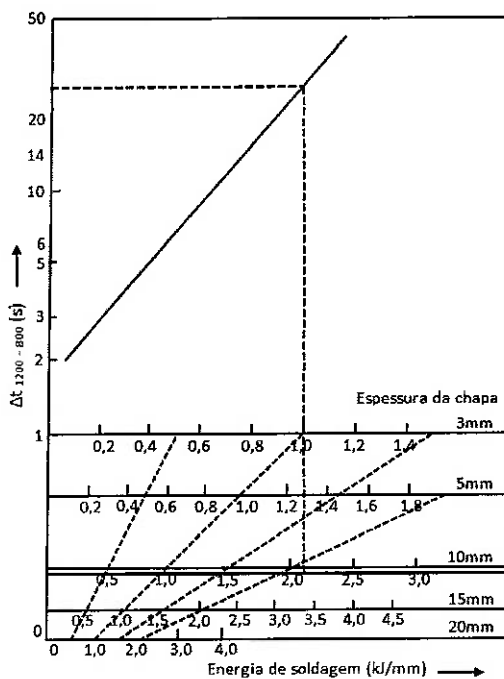
Com o efeito do segundo passe, a fração volumétrica de ferrita do CP3 na ZF é reduzida para 64%, desta maneira o CP3 se torna aprovado segundo o critério definido pela norma. Na ZDL com o efeito do segundo passe todos os corpos de prova apresentaram teores de ferrita próximo ao metal de base. Exceto para o CP3 na ZDL, a fração volumétrica de ferrita é reduzida com o efeito do segundo passe. Isto pode ser explicado pela precipitação de austenita secundária, devido ao reaquecimento do passe de raiz, ou seja, o passe de raiz é submetido a um novo ciclo térmico.



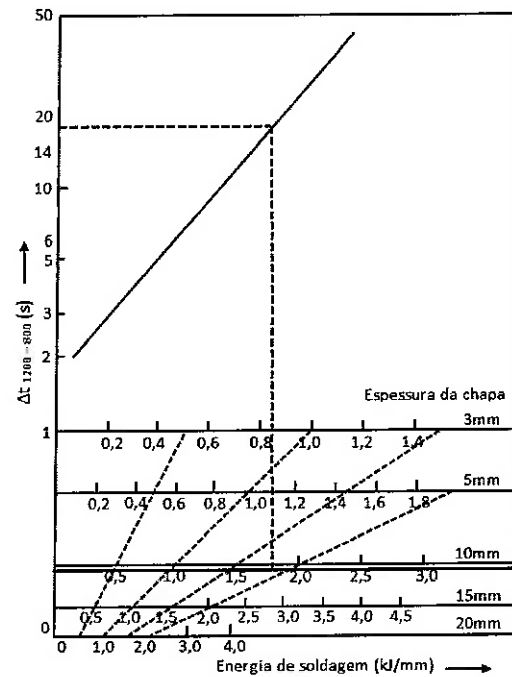
(A)



(B)

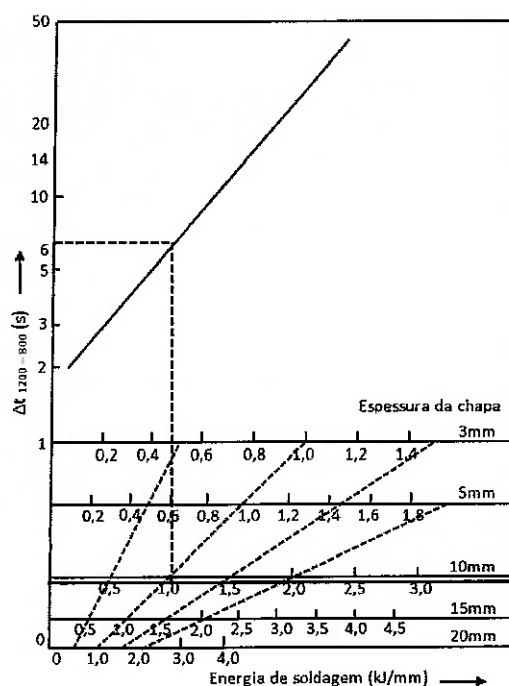


(C)

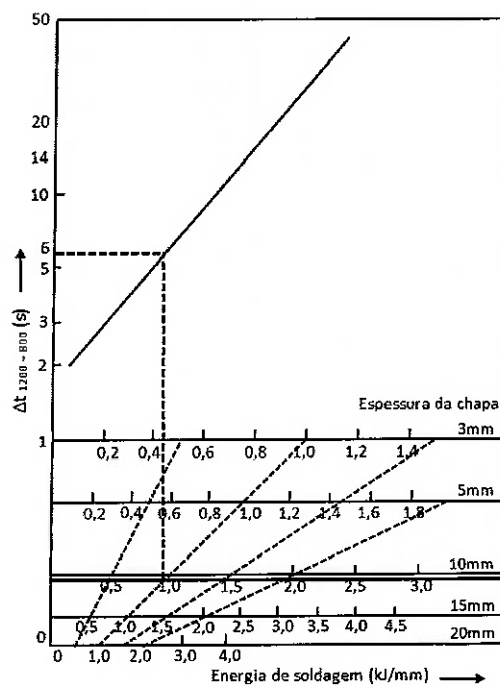


(D)

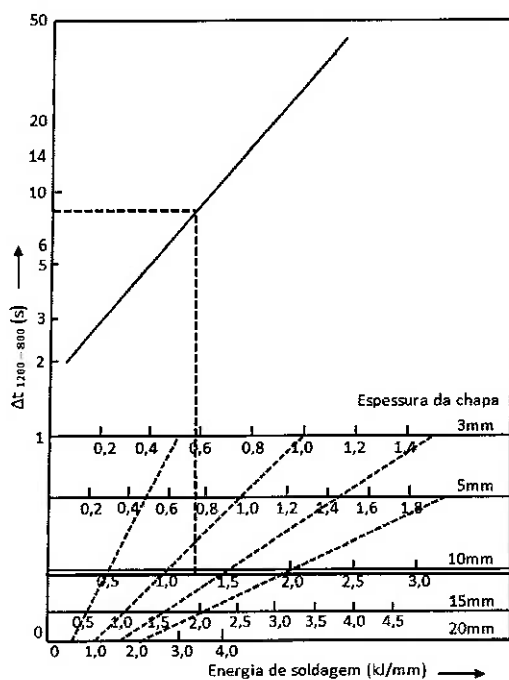
**Figura 5.19** – Estimativa do tempo de resfriamento entre 1200°C e 800°C para o passe de raiz utilizando a energia de soldagem calculada desconsiderando a eficiência do processo de soldagem TIG, CP1(A), CP2(B), CP3(C) e CP4(D).



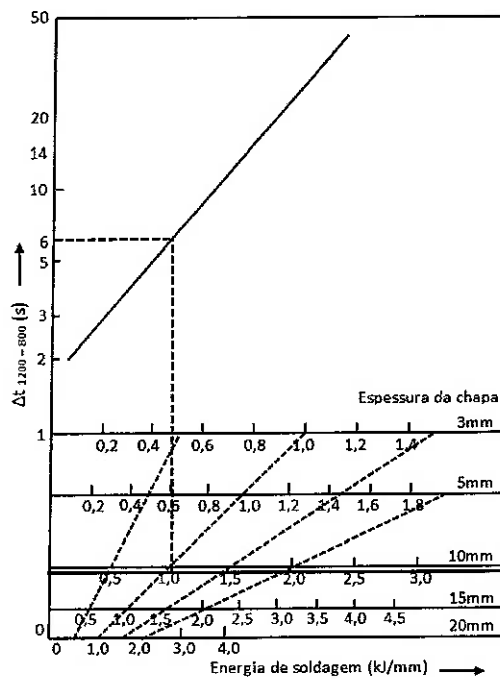
(A)



(B)



(C)



(D)

**Figura 5.20** – Estimativa do tempo de resfriamento entre 1200°C e 800°C para o passe de raiz utilizando a energia de soldagem calculada considerando a eficiência do processo de soldagem TIG, CP1(A), CP2(B), CP3(C) e CP4(D).

**Tabela 5.7** – Tempos de resfriamento estimados.

| Número do CP                                    | 01  | 02  | 03 | 04  |
|-------------------------------------------------|-----|-----|----|-----|
| Tempo de resfriamento estimado, figura 5.19 [s] | 19  | 14  | 27 | 18  |
| Tempo de resfriamento estimado, figura 5.20 [s] | 6,0 | 5,5 | 9  | 6,0 |

## 5.6 ANÁLISE MACROESTRUTURAL.

A partir das macrografias das juntas soldadas é possível identificar a ZF e ZAC, as mesmas são apresentadas nas figuras 5.10 até 5.17. Observa-se que para todos os corpos de prova, ocorreu o refinamento de grãos na ZF com o efeito do segundo passe.

Através das macrografias é possível calcular a diluição do consumível de soldagem com o metal de base e prever no diagrama WRC – 1992 o número de ferrita (FN).

Através da equação (7) foi calculado a diluição do consumível de soldagem com o metal de base de cada corpo de prova.

$$Diluição = \frac{\% \text{ Metal de base}}{\% \text{ Metal de Adição} + \% \text{ Metal de Base}} \quad (7)$$

Os valores encontrados para o passe de raiz são apresentados na tabela 5.8 e os valores encontrados com o efeito do segundo passe são apresentados na tabela 5.9.

**Tabela 5.8** – Diluição do consumível de soldagem com o metal de base para o passe de raiz.

| Número do CP | 01    | 02    | 03    | 04    |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| Diluição [%] | 38,77 | 18,34 | 27,71 | 33,64 |

**Tabela 5.9** – Diluição do consumível de soldagem com o metal de base com o efeito do segundo passe.

| Número do CP | 01    | 02    | 03    | 04    |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| Diluição [%] | 19,40 | 25,16 | 21,81 | 23,31 |

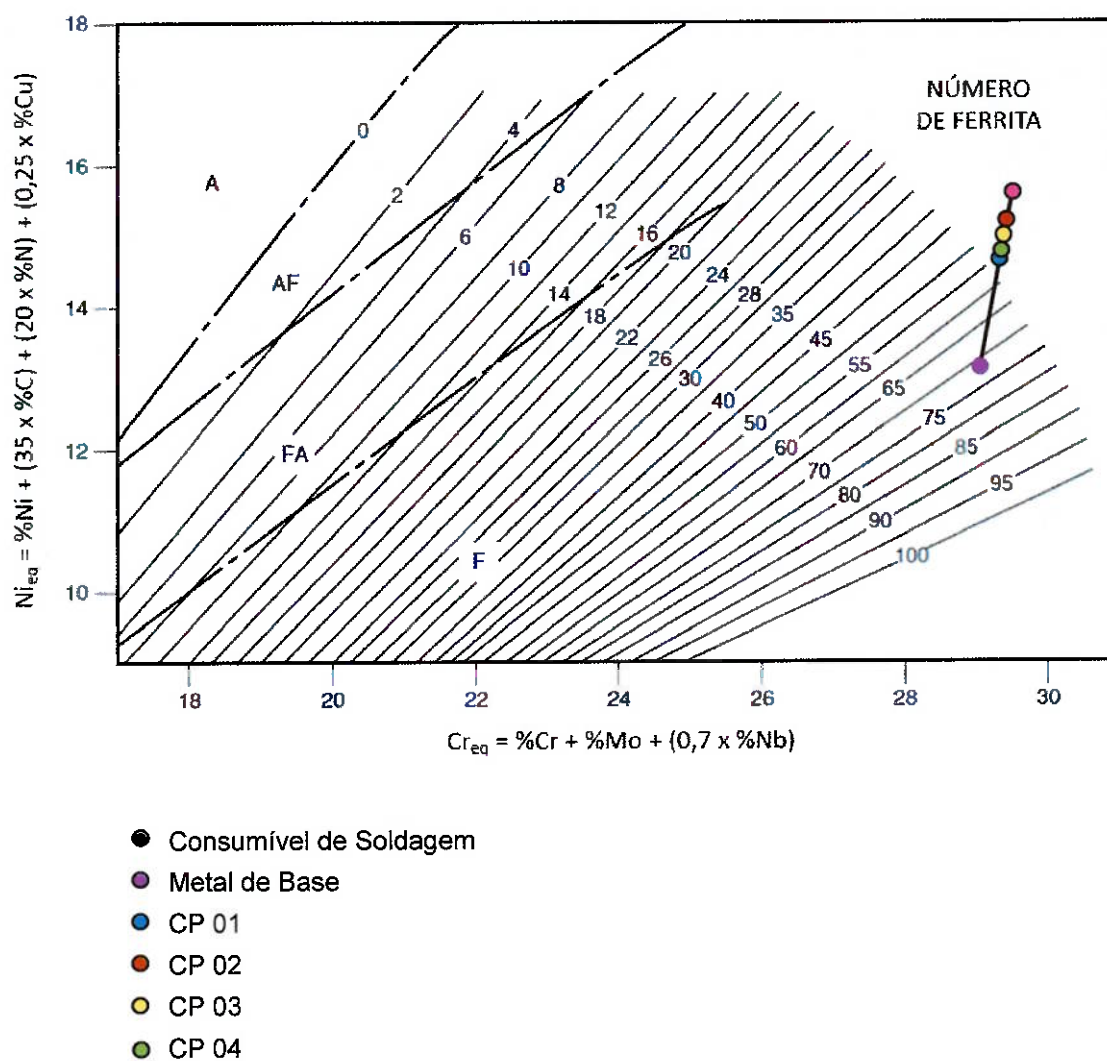
Utilizando as equações apresentados no diagrama WRC – 1992 para o cálculo do  $Cr_{eq}$  e do  $Ni_{eq}$  foi, figura 2.3, foram encontrados os valores apresentados na tabela 5.4 para o consumível de soldagem e o metal de base, através da composição química fornecida pelo fabricante.

**Tabela 5.10** – Valores de  $Cr_{eq}$  e  $Ni_{eq}$  do consumível de soldagem e metal de base.

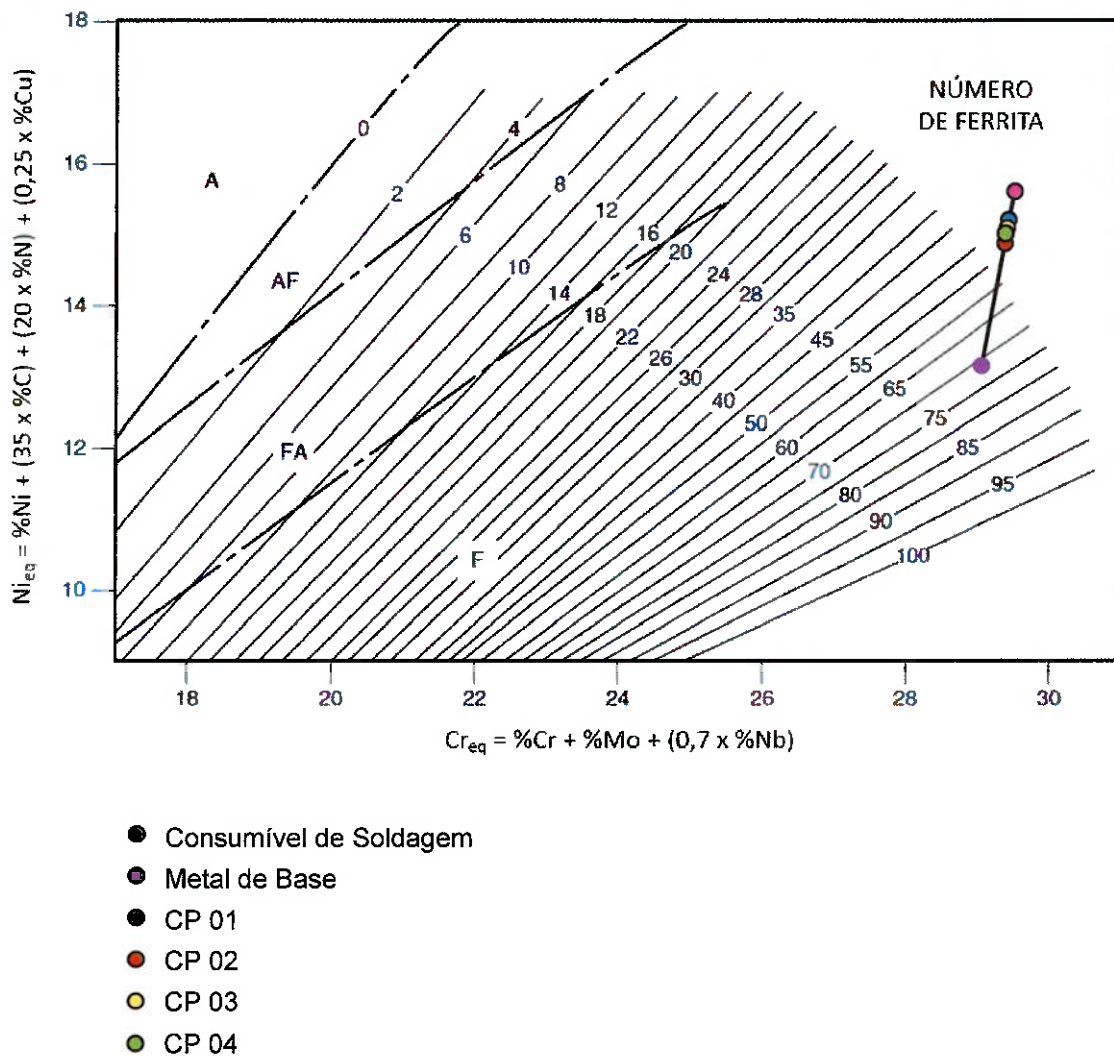
| Consumível de Soldagem e Metal de base | $Cr_{eq}$ [%] | $Ni_{eq}$ [%] |
|----------------------------------------|---------------|---------------|
| Vareta ER 2594                         | 29,50         | 15,45         |
| UNS S32750                             | 28,99         | 13,24         |

Através dos valores obtidos na tabela 5.10 e com os valores de diluição obtidos nas tabelas 5.8 e 5.9, pode-se prever o número de ferrita conforme apresentado nas figuras 5.21 e 5.22. As tabelas 5.11 e 5.12 comparam os valores obtidos do número de ferrita, através do diagrama WRC – 1992, com os valores obtidos através da contagem de ferrita pelo método de análise de imagem.

Observa-se que apenas alguns valores medidos através da análise de imagem estão próximos dos valores estimados através do diagrama WRC – 1992, isto comprava que este diagrama pode ser utilizado para estimar o número de ferrita, porém, deve-se tomar cuidado. O diagrama WRC – 1992 não leva em consideração o tempo de resfriamento entre 1200°C e 800°C da junta soldada.



**Figura 5.21** – Previsão do número de Ferrita (FN) para o passe de raiz para todas condições.



**Figura 5.22** – Previsão do número de Ferrita (FN) com o efeito do segundo passe para todas condições.

**Tabela 5.11** – Comparação entre os valores encontrados do número de ferrita (FN) e a fração volumétrica de ferrita pela análise de imagem para o passe de raiz.

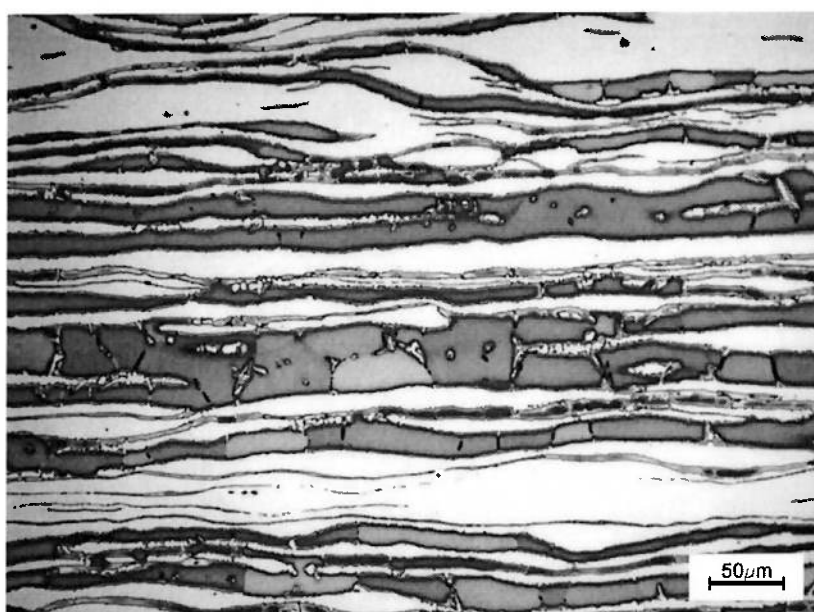
|                                  |    |    |    |    |
|----------------------------------|----|----|----|----|
| Número do CP                     | 01 | 02 | 03 | 04 |
| Número de Ferrita [FN]           | 56 | 52 | 54 | 55 |
| Análise de Imagem [% de Ferrita] | 53 | 62 | 79 | 56 |

**Tabela 5.12** – Comparação entre os valores encontrados do número de ferrita (FN) e a fração volumétrica de ferrita pela análise de imagem com efeito do segundo passe.

|                                  |    |    |    |    |
|----------------------------------|----|----|----|----|
| Número do CP                     | 01 | 02 | 03 | 04 |
| Número de Ferrita [FN]           | 52 | 55 | 53 | 54 |
| Análise de Imagem [% de Ferrita] | 45 | 46 | 64 | 51 |

## 5.7 ANÁLISE MICROESTRUTURAL.

A microestrutura do aço inoxidável UNS S32750 é apresentada na figura 5.23. Observa-se uma microestrutura contendo as fases ferrita e austenita, onde os grãos mais escuros correspondem a ferrita e os grãos mais claros a austenita.



**Figura 5.23** – Microestrutura do metal de base UNS S32750, aumento 200x.

As figuras 5.24 até 5.31 ilustram a ZF, ZAC e aspecto visual do passe de raiz para cada condição testada. Observa-se na figura 5.28 o desbalanceamento entre as fases ferrita e austenita na ZF. Na figura 5.29 nota-se uma fração volumétrica de nitreto de cromo e austenita secundária, no interior dos grãos de ferrita, o que justifica a redução da fração volumétrica de ferrita neste passe.

Como discutido anteriormente, os nitretos de cromo precipitam por nucleação e crescimento. Esta nucleação pode ocorrer nas discordâncias, inclusões, contornos de grão ferrita/ferrita e interfaces ferrita/austenita. A cinética de precipitação depende da temperatura, composição química da liga e da história térmica. A formação de austenita secundária, em soldagem multipasse, está relacionada com a dissolução dos precipitados de nitretos de cromo, atuando como elemento estabilizador da austenita, promovendo assim a formação de austenita secundária. A precipitação de austenita secundária e nitretos de cromo pode ocorrer em temperaturas entre 700°C e 900°C [8].

Com o objetivo de verificar a possibilidade de formação de nitreto de cromo e austenita secundária no interior da ferrita, foi calculado as distâncias a partir da ZDL através da equação (4), entre o segundo passe e o passe de raiz, em que as temperaturas de pico de 700°C e 900°C atingiriam na ZF do passe de raiz, devido ao reaquecimento deste passe pela energia de soldagem do segundo passe.

A tabela 5.13 mostra as propriedades físicas do material de base e as tabelas 5.14 e 5.15 apresentam os valores encontrados após os cálculos realizados. Os valores apresentados para  $y$  foram calculados utilizando a energia de soldagem calculada desconsiderando a eficiência térmica do

processo de soldagem  $E$ , e os valores apresentados para  $y'$  foram calculados utilizando a energia de soldagem calculada considerando a eficiência térmica do processo de soldagem  $E'$ .

**Tabela 5.13** – Propriedades físicas do material de base UNS S32750.

|          |                               |
|----------|-------------------------------|
| $T_m$    | 1520 °C                       |
| $\rho$   | 7,8 g/cm <sup>3</sup>         |
| $C$      | 490 J/(kg°C)                  |
| $\rho C$ | 0,0038 J/(mm <sup>3</sup> °C) |

**Tabela 5.14** – Valores de distância encontrados para  $T_p = 700^\circ\text{C}$ .

| Número do CP                    | 01   | 02   | 03   | 04   |
|---------------------------------|------|------|------|------|
| $E$ [kJ/mm]                     | 1,26 | 1,01 | 1,03 | 0,86 |
| $y$ [mm]                        | 6,82 | 5,46 | 5,57 | 4,65 |
| $E'$ [kJ/mm]                    | 0,76 | 0,61 | 0,62 | 0,52 |
| $y'$ [mm]                       | 4,11 | 3,30 | 3,35 | 2,81 |
| Espessura do passe de raiz [mm] | 3,46 | 3,48 | 4,43 | 4,04 |

**Tabela 5.15** – Valores de distância encontrados para  $T_p = 900^\circ\text{C}$ .

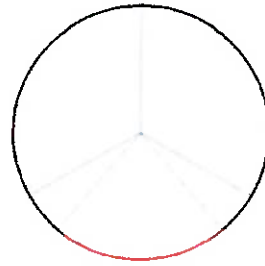
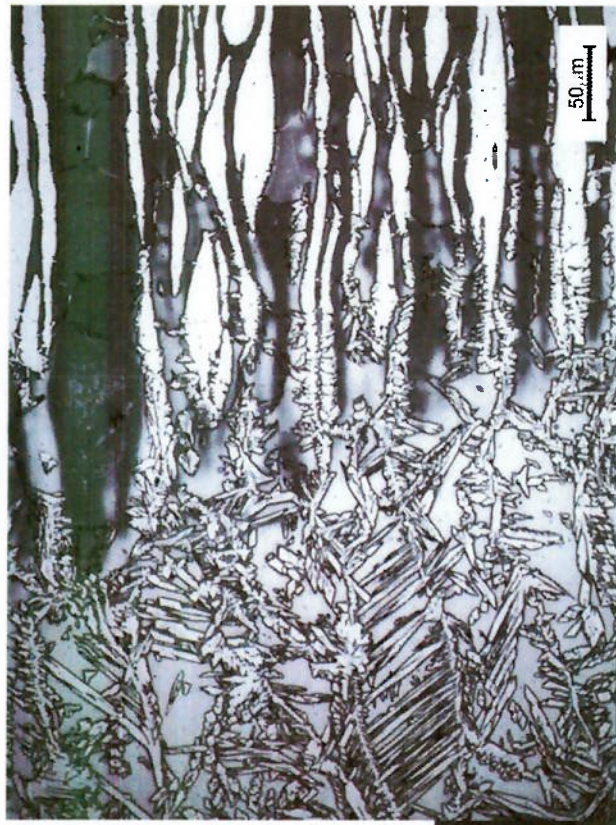
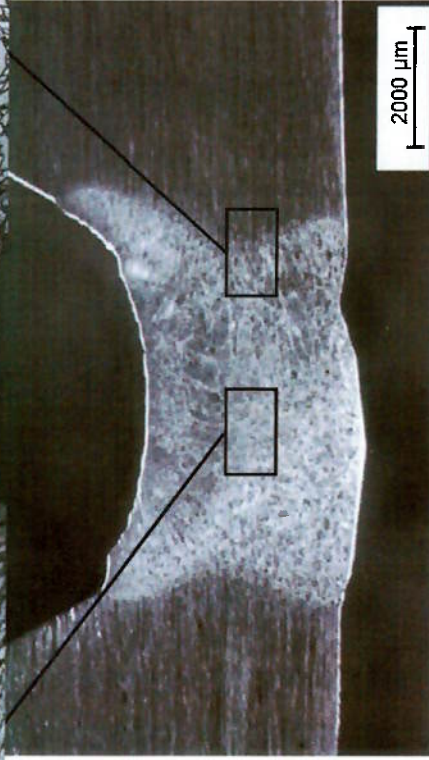
| Número do CP                    | 01   | 02   | 03   | 04   |
|---------------------------------|------|------|------|------|
| $E$ [kJ/mm]                     | 1,26 | 1,01 | 1,03 | 0,86 |
| $y$ [mm]                        | 3,88 | 3,11 | 3,17 | 2,65 |
| $E'$ [kJ/mm]                    | 0,76 | 0,61 | 0,62 | 0,52 |
| $y'$ [mm]                       | 2,34 | 1,88 | 1,91 | 1,60 |
| Espessura do passe de raiz [mm] | 3,46 | 3,48 | 4,43 | 4,04 |

Observa-se que, se considerarmos a energia de soldagem  $E'$ , o passe de raiz é suscetível a formação de nitretos de cromo e austenita secundária, pelo mecanismo descrito anteriormente. Portanto, a energia de soldagem do segundo passe foi suficiente para que o passe de raiz atingisse a faixa de temperatura entre  $700^\circ\text{C}$  e  $900^\circ\text{C}$  e promovesse o aumento da fração volumétrica de nitreto de cromo mais a precipitação de austenita secundária.

Zona Fundida



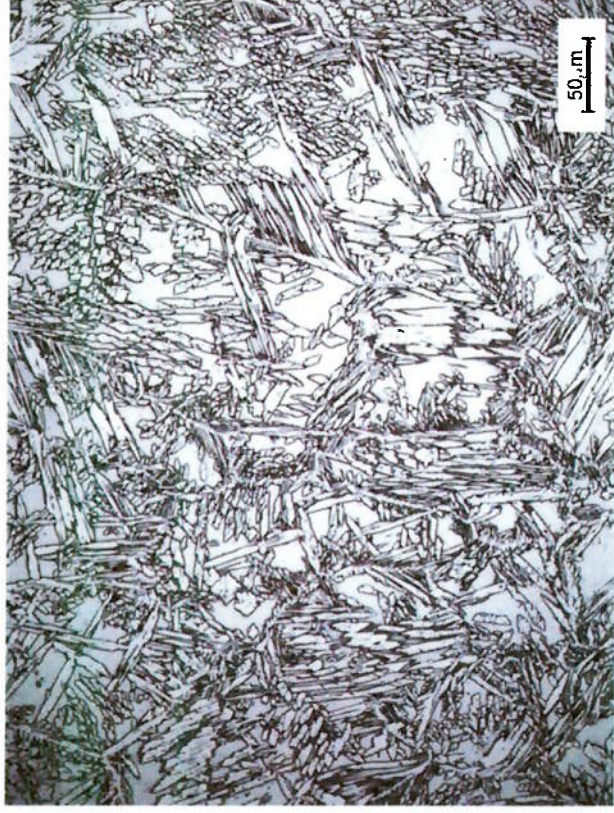
Zona Afetada pelo Calor

Localização de Retirada  
do Corpo de Prova

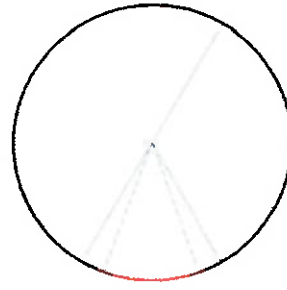
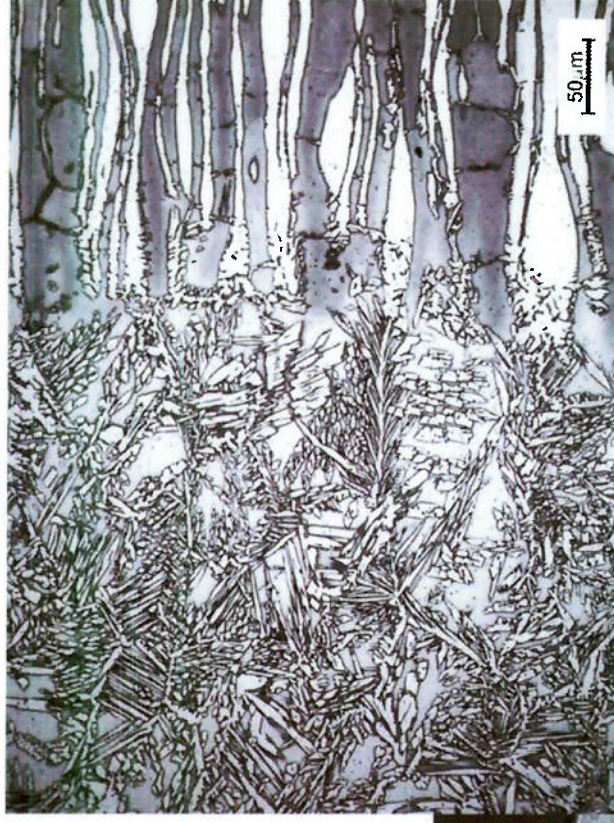
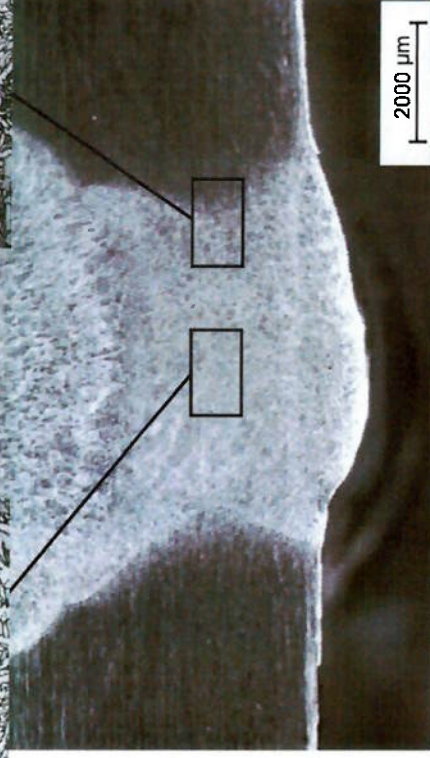
Aspecto visual do Passe de Raiz

**Figura 5.24** – Resultado da análise microestrutural do CP1 para o passe de raiz.

Zona Fundida



Zona Afetada pelo Calor

Localização de Retirada  
do Corpo de Prova

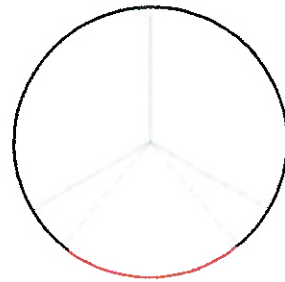
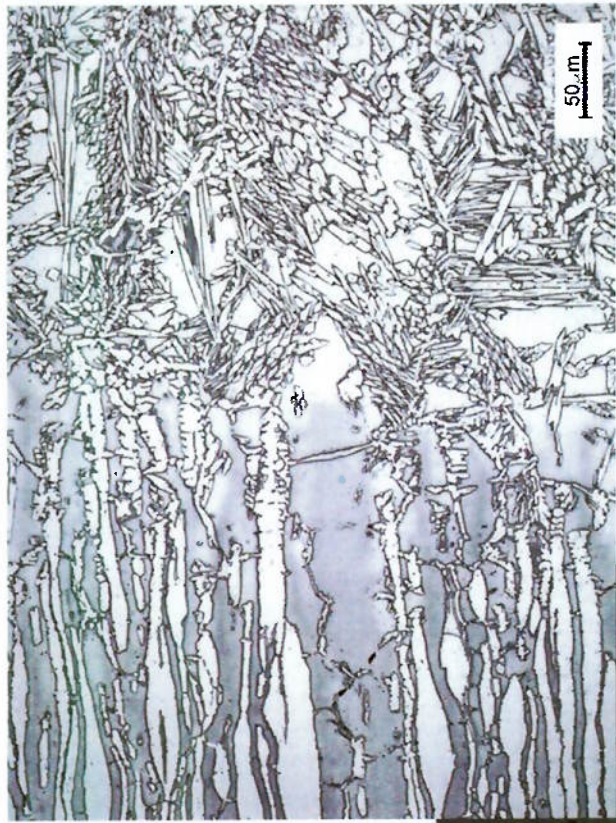
Aspecto visual do Passe de Raiz

**Figura 5.25** – Resultado da análise microestrutural do CP1 com o efeito do segundo passe.

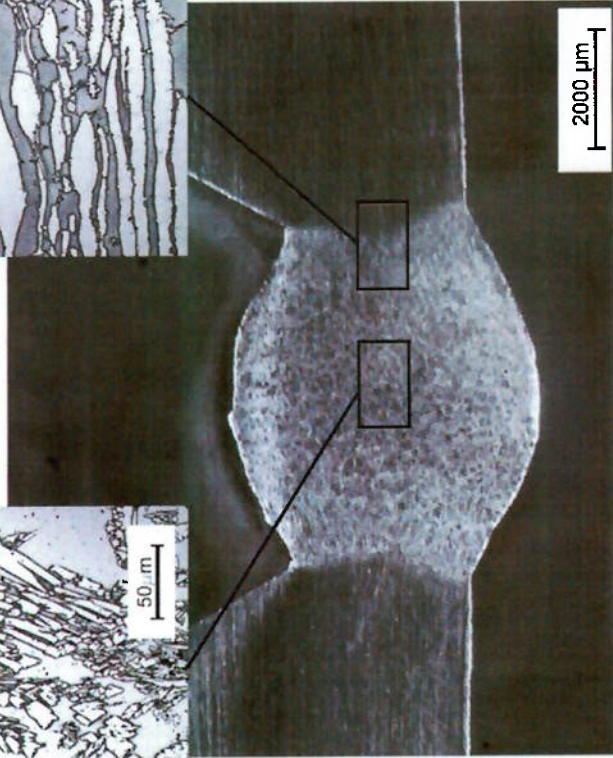
Zona Fundida



Zona Afetada pelo Calor



Localização de Retirada  
do Corpo de Prova



Aspecto visual do Passe de Raiz

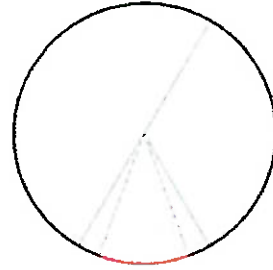
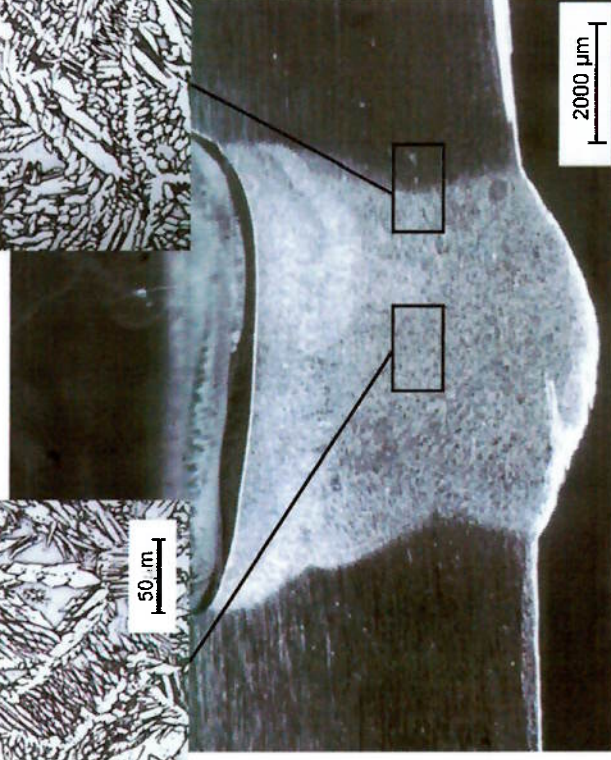


**Figura 5.26** – Resultado da análise microestrutural do CP2 para o passe de raiz.

Zona Fundida

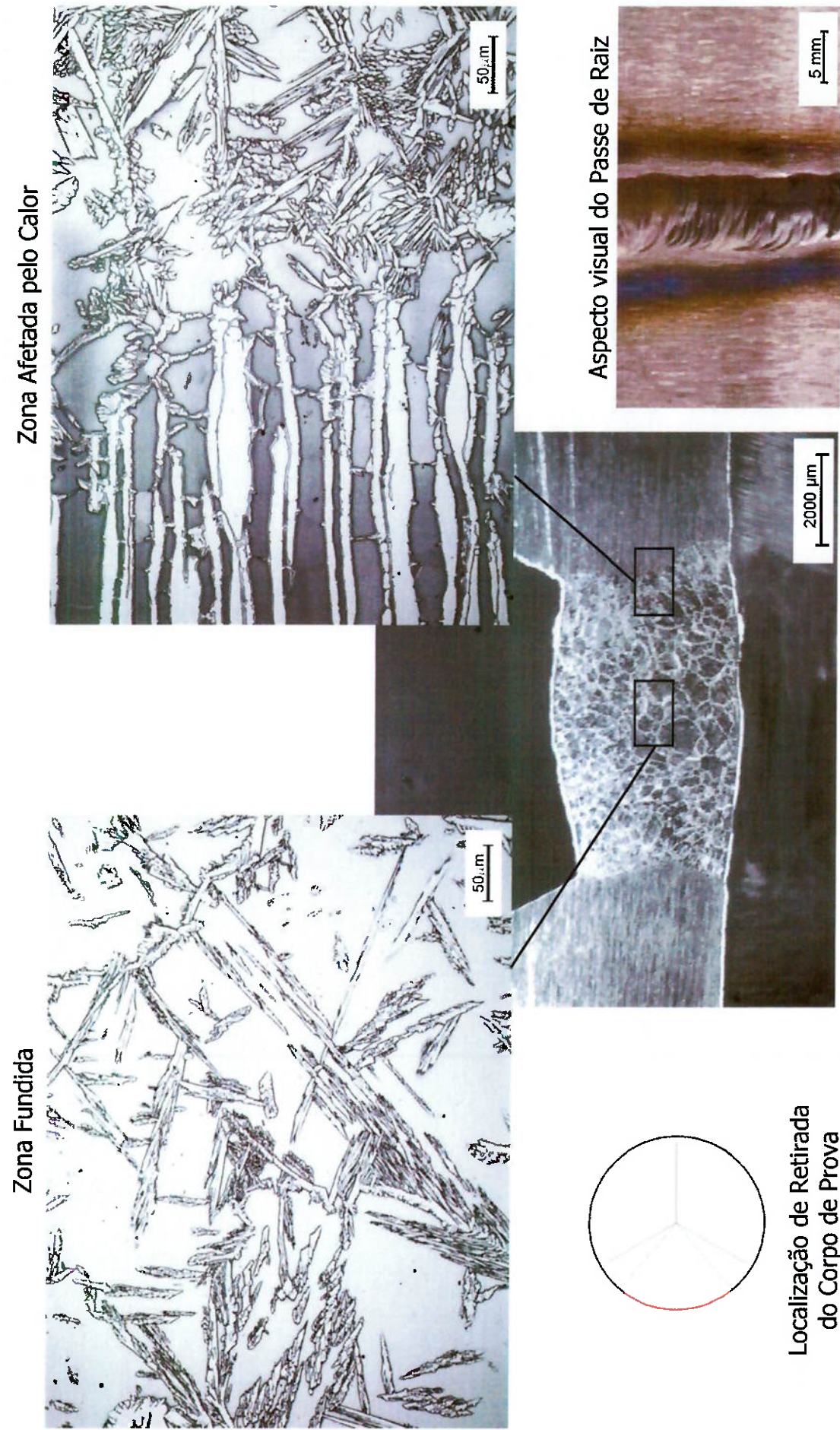


Zona Afetada pelo Calor

Localização de Retirada  
do Corpo de Prova

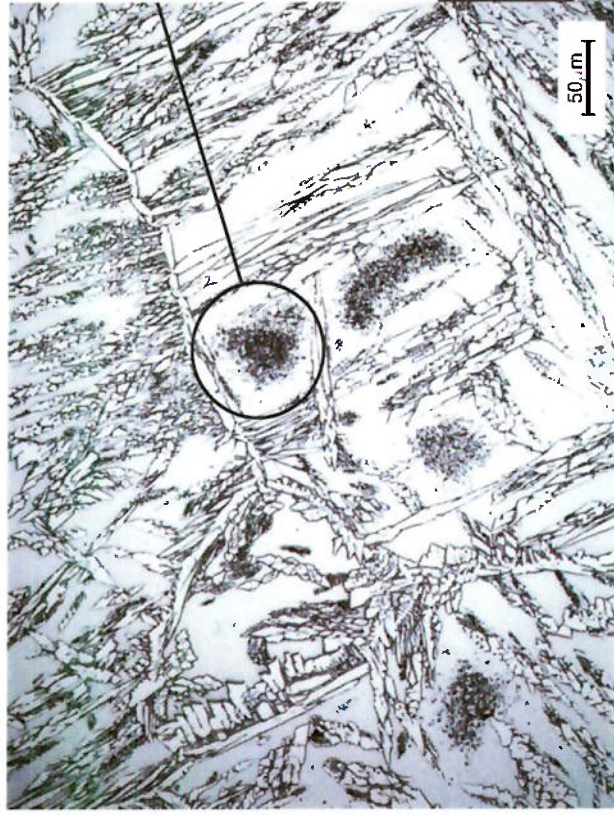
Aspecto visual do Passe de Raiz

**Figura 5.27** – Resultado da análise microestrutural do CP2 com o efeito do segundo passe.



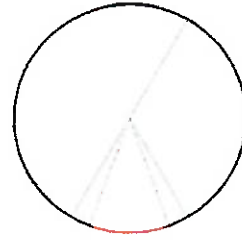
**Figura 5.28** – Resultado da análise microestrutural do CP3 para o passe de raiz.

Zona Fundida

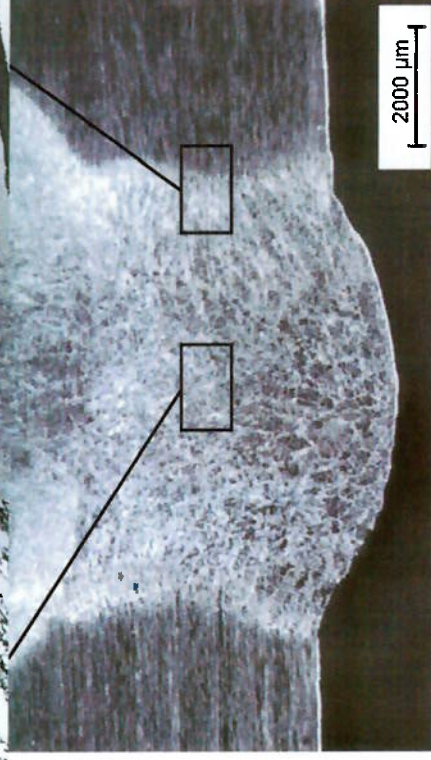


nitreto de  
cromo mais  
austenita  
secundária

Zona Afetada pelo Calor



Localização de Retirada  
do Corpo de Prova



Aspecto visual do Passe de Raiz

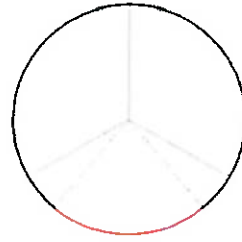


**Figura 5.29** – Resultado da análise microestrutural do CP3 com o efeito do segundo passe.

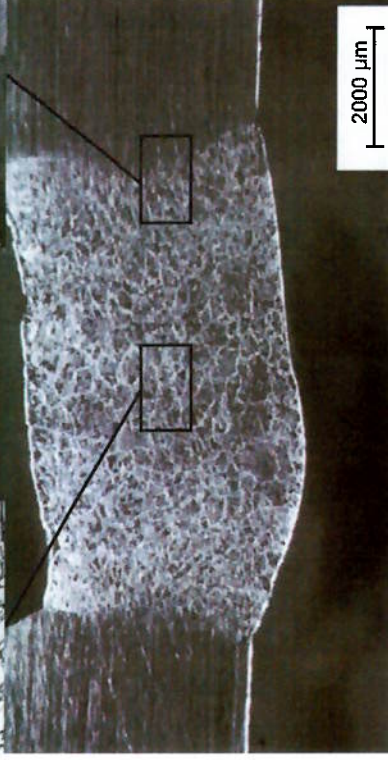
Zona Fundida



Zona Afetada pelo Calor



Localização de Retirada  
do Corpo de Prova

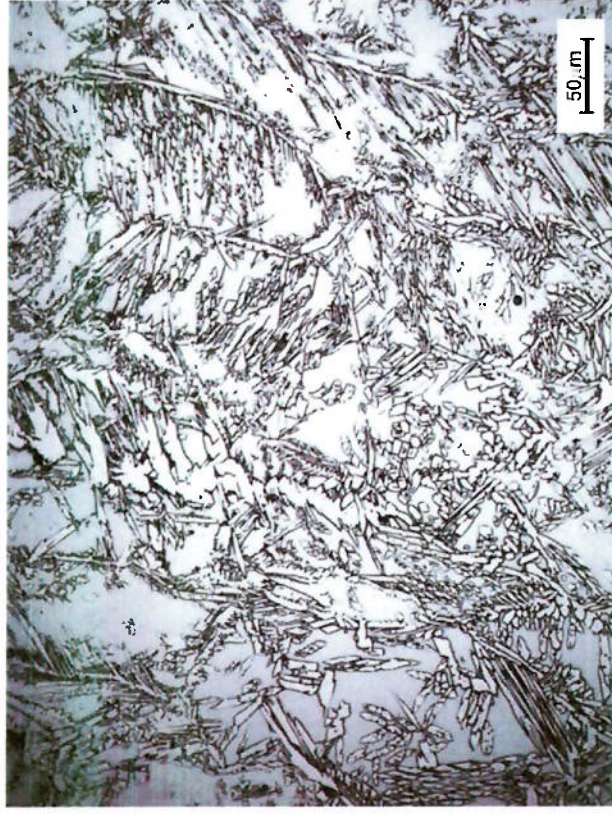


Aspecto Visual do Passe de Raiz

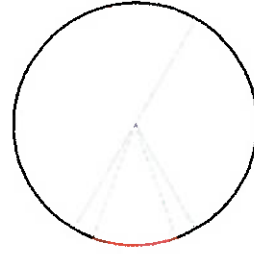
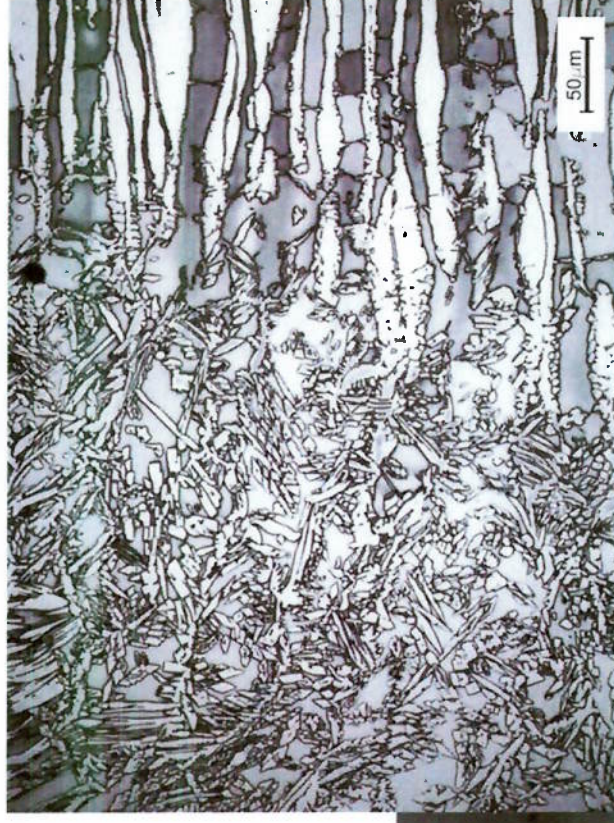


**Figura 5.30** – Resultado da análise microestrutural do CP4 para o passe de raiz.

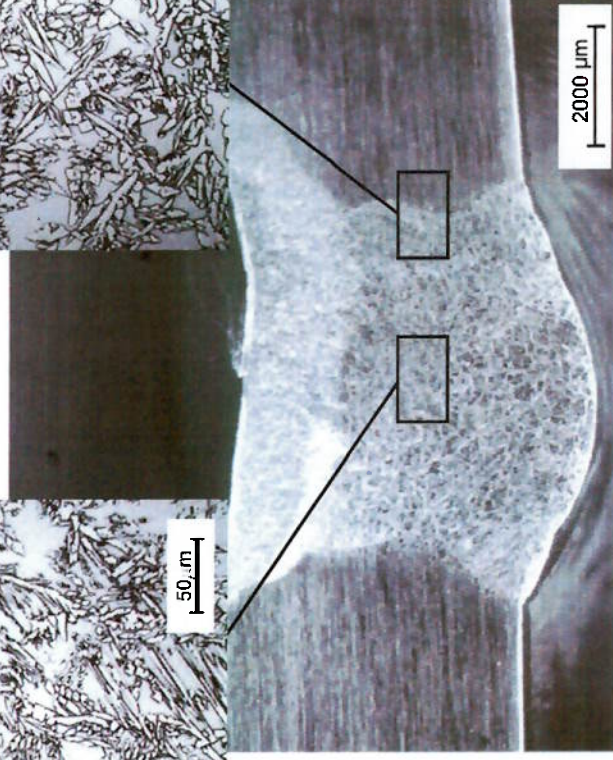
Zona Fundida



Zona Afetada pelo Calor



Localização de Retirada  
do Corpo de Prova



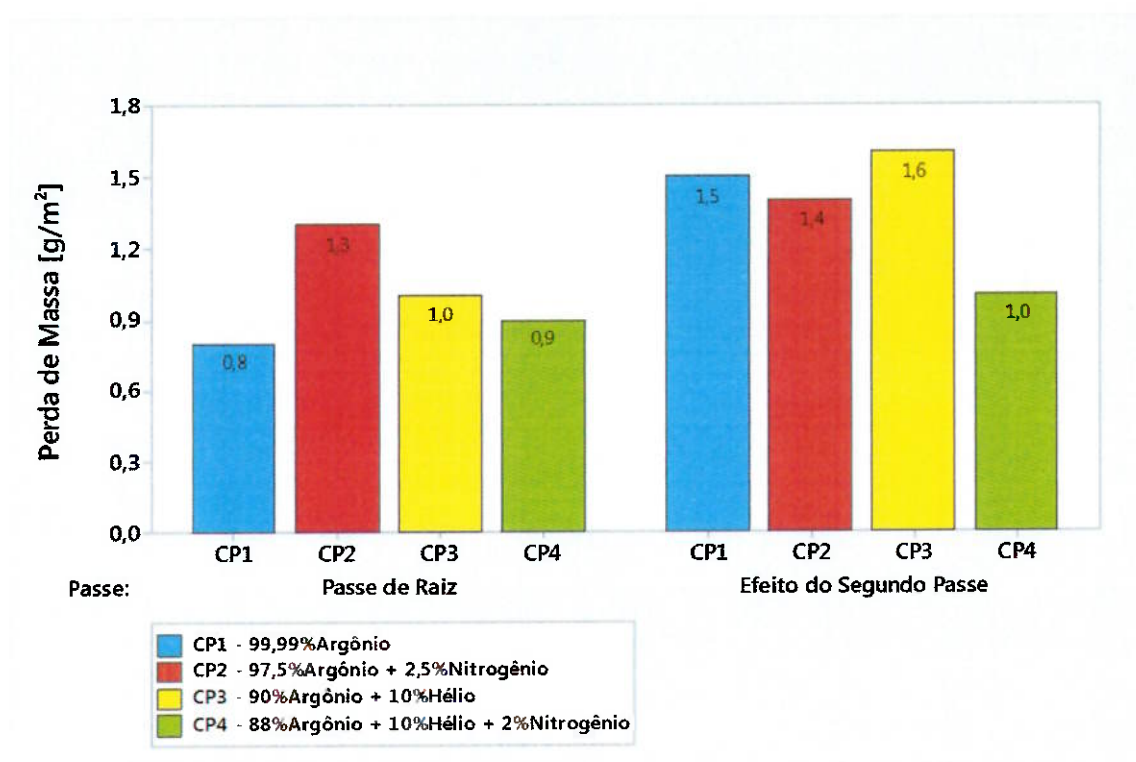
Aspecto visual do Passe de Raiz



**Figura 5.31** – Resultado da análise microestrutural do CP4 com o efeito do segundo passe. Ataque eletrolítico: ácido oxálico 10%.

## 5.8 ENSAIO DE CORROSÃO.

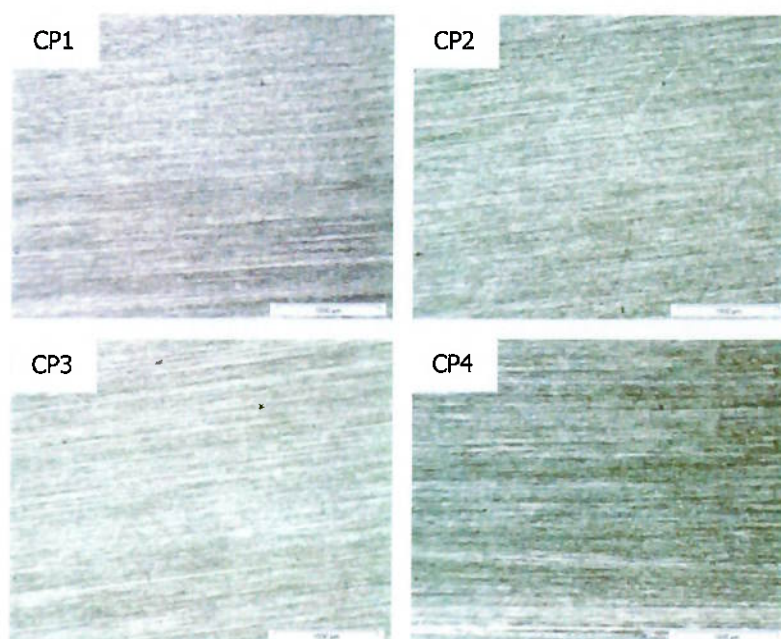
Conforme norma Norsok M-601 e especificação da Petrobras N-133, a perda de massa não deve exceder  $4,0 \text{ g/m}^2$  e não deverá ocorrer presença de pites em aumento de 20x. A Figura 5.32 apresenta os valores obtidos de perda de massa e as figuras 5.33 e 5.34 apresentam as imagens de cada corpo de prova com aumento de 20x.



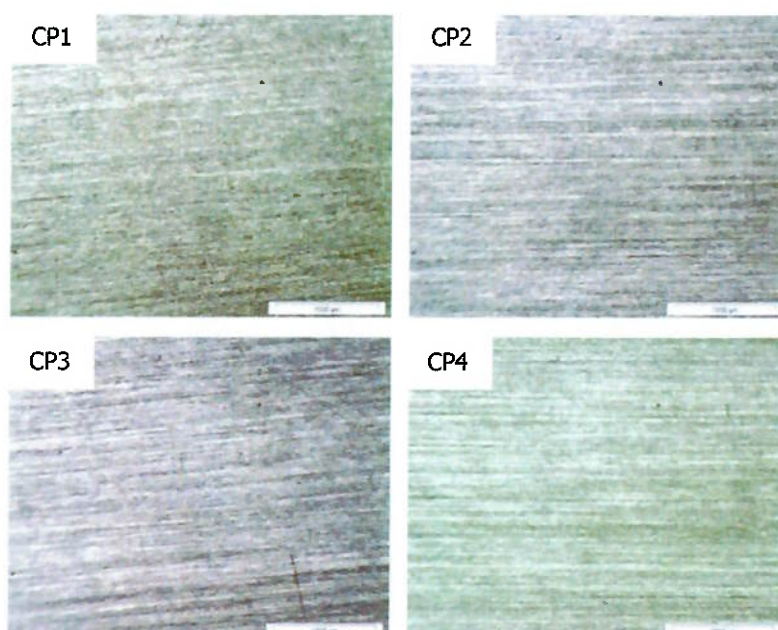
**Figura 5.32** – Resultado do ensaio de corrosão para todas as condições.

Analisando a figura 5.32 é possível observar que todos os corpos de provas apresentaram resultados satisfatórios. No passe de raiz o CP2 apresenta a maior perda de massa e o CP1 apresenta a menor perda de massa, com o efeito do segundo passe o CP3 apresenta a maior perda de massa e o CP4 apresenta a menor perda de massa.

Após análise das figuras 5.33 e 5.34 observa-se que não existem formações de pites, portanto todos os corpos de prova estão aprovados segundo o critério das duas normas.



**Figura 5.33** – Imagens com 20x de aumento do ensaio de corrosão para o passe de raiz.



**Figura 5.34** – Imagens com 20x de aumento do ensaio de corrosão com o efeito do segundo passe.

Deve-se sempre controlar a energia de soldagem do passe de raiz e do segundo passe, independente da composição química do gás de proteção, conforme requisitos de normas, especificações e recomendações dos fabricantes de consumíveis, com o objetivo de controlar as mudanças microestruturais e obter a melhores propriedades mecânicas e resistência à corrosão da junta soldada.

## **6. CONCLUSÕES.**

Diante dos resultados expostos neste trabalho, pode-se concluir que:

1. Ocorreu incremento da energia absorvida no ensaio de impacto com o efeito do segundo passe na ZF, dentre as misturas gasosas. Isto pode ser explicado devido à precipitação de austenita secundária. A mistura ternária 88%Argônio, 10%Hélio e 2%Nitrogênio apresentou a energia absorvida mais elevada na ZF com o efeito do segundo passe.
2. A mistura gasosa 90%Argônio mais 10%Hélio, apresentou quantidade de ferrita na ZF do passe de raiz, acima do critério de aceitação estabelecido pela norma Norsok M-601 e especificação da Petrobras N-133 Rev.L. A energia de soldagem do passe subsequente foi suficiente para que o passe de raiz atingisse temperaturas suficientes para reduzir a fração volumétrica de ferrita, satisfazendo o critério de aceitação estabelecido pelas normas em referência. Provavelmente ocorreu um aumento na fração volumétrica de nitreto de cromo e a precipitação da austenita secundária, no interior da ferrita, que pode ter reduzido a resistência à corrosão por pites deste passe.
3. Na soldagem multipasse, a mistura ternária 88%Argônio, 10%Hélio e 2%Nitrogênio apresentou o balanço entre o teor de ferrita e o teor de austenita mais próximo do metal de base.
4. Dentre as composições químicas gasosas, na soldagem multipasse, a mistura ternária 88%Argônio, 10%Hélio e 2%Nitrogênio apresentou a menor perda de massa no ensaio de corrosão, devido a maior quantidade de austenita presente na ZF.

### **SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.**

1. Realizar experimentos com diferentes energias de soldagem para cada composição química do gás de proteção, baseando-se em normas, especificações e recomendações dos fabricantes de consumíveis, com o objetivo de verificar as mudanças microestruturais e obter as melhores propriedades mecânicas e resistência à corrosão da junta soldada.
2. Realizar análise metalográfica, através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), do CP3 com o efeito do segundo com o objetivo de confirmar as fases precipitadas no interior da ferrita.
3. Realizar ensaio para medir o teor de N no cordão de solda de cada corpo de prova e relacionar com o teor de ferrita presente em cada passe.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

1. WASHKO, S. D.; AGGEN, G. **Wrought Stainless Steels ASM Handbook: Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys.** 10 ed. 1993. v. 1.
2. PETTERSSON, C. O.; FAGER, S. A. **Welding practice for the Sandvik duplex stainless steels SAF 2304, SAF 2205 and SAF 2507.** Suíça: Sandvik Steel, 1994.
3. AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS Welding Handbook: Materials and Applications.** 9. ed. Miami: R. L. O'Brien, 1997. v. 4.
4. NOBLE, D. N. **Selection of Wrought Duplex Stainless Steels ASM Handbook: Welding Brazing and Soldering.** 10 ed. 1993. v. 6.
5. LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D.J. **Welding Metallurgy and Weldability of stainless Steels.** New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
6. BRANDI, S. D.; LIPPOLD, J. C. **Considerações sobre a metalurgia da soldagem de aços inoxidáveis duplex e superduplex.** Metalurgia & Materiais, 1997.
7. BRANDI, S. D. **Estudo da Soldabilidade do Aço Inoxidável Duplex DIN W. Nr. 1.4462 (UNS S31803).** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1992.
8. LONDOÑO, A. J. R. **Precipitação de Fases Intermetálicas e Austenita Secundária na ZAC de Soldagens Multipasse de Aços Inoxidáveis Duplex.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.
9. AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS Welding Handbook: Welding Processes.** 8. ed. Miami: R. L. O'Brien, 1997. v. 2.

10. WAINER, E; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem Processos e Metalurgia**. São Paulo: Blucher, 1992.
11. KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
12. AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS Welding Handbook: Welding Science and Technology**. 9. ed. Miami: R. L. O'Brien, 2001. v. 1.
13. METRODE PRODUCTS LIMITED. **Welding Guidelines for Duplex & Superduplex Stainless Steels**. Surrey, 2005.
14. METRODE PRODUCTS LIMITED. **Duplex & Superduplex Properties & Test Requirements**. Surrey, 2005.
15. STANDARD NORWAY. **NORSOK STANDARD M-601 Welding and inspection of piping**. Norway, 2008.
16. PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. – PETROBRAS. **N-133 Revisão J Soldagem**. Brasil, 2013.

Rev. 1000 000.3  
18/05/2013  
Jared.  
IF-AT 2013

|                                                                                     |                                                                                                                                            |            |                                                                            |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------|--|
|  | <b>CERTIFIED MATERIAL TEST REPORT</b><br>Inspection Certificate 3.1 / Abschreibungszeugnis 3.1<br>acc. to / nach DIN EN 10 204 / ISO 10474 |            | WSK Schütz GmbH<br>Werk Krefeld<br>Quality Assurance<br>Qualitätssicherung |  |
|                                                                                     | Page:                                                                                                                                      | Seite:     | 2 of 3                                                                     |  |
| Date:                                                                               | Datum:                                                                                                                                     | 04.06.2010 |                                                                            |  |
| Certificate No. / Zeugnis-Nr.:                                                      | 50026                                                                                                                                      |            |                                                                            |  |
| Revision:                                                                           | 0                                                                                                                                          |            |                                                                            |  |

### Mechanical Properties / mechanische Eigenschaften

#### Tensile Test / Zugversuch

| Test No.     | Charge | Specimen / Probe                          | Test Temp. | Yield Strength Rp1.0 % | Tensile Strength Rm | Elongation |
|--------------|--------|-------------------------------------------|------------|------------------------|---------------------|------------|
| BRX107409-14 | 21530  | Location: Q1, Size (mm): 12.5 x 11.1 x 20 | °C: 20     | (N/mm²) 91.06          | (N/mm²) 126.04      | 30.6       |
|              |        |                                           | °F: 68     | (ksi) 652.00           | (ksi) 90.45         | 73.0       |

#### Hardness Test / Härte Test

Rockwell C < 20

#### Impact Test / Kerschlag Probe

| Test No.     | Charge | Specimen / Probe                     | Temp.   | Value 1 | Value 2 | Average | Latent Expansion test |
|--------------|--------|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|-----------------------|
| BRX107409-14 | 21530  | Location: Q1, Size (mm): 10.0 x 10.0 | °C: -46 | 278     | 284     | 281     | LatE 1 LatE 2 LatE 3  |
|              |        |                                      | °F: -51 |         |         |         | 2.98 2.62 2.61        |

#### Mandatory Tests / Standard Prüfungen

Positive Material Identification / Verbleichungsprüfung

Visual and Dimensional Control / Visuelle Kontrolle / Dimensionen

State and Material ID applicable satisfactory

Countersink and Screw-in (pilot) satisfactory

drone identification

satisfactory after heat treatment

At 500x magnification. The material is free from intermediate phases and precipitates

At 500x magnification. Perils Corrosion determination a.s. to ASTM E 562

Crack Surface: 44.18 %

Mid Thickness: 43.78 %

Root Surface: 42.95 %

ASTM G-49 Method A, at 40°C/24h, no pitting at 20x weight loss, 0.3421 g/m² satisfactory after heat treatment

Corrosion Resistance / Korrosionsbeständigkeit

Additional Mechanical Properties

Flattening Test / Flapprobe

Pressure Test Requirements

Hydraulic Test / Wasserdurchspritztest

10 sec with actual test pressure/ Druck 10 Sek. satisfactory after heat treatment

Remarks / Bemerkungen

No weld repair / Keine Reparatur notwendig

ISO 9001:2008, PED 87/273/EC, ASME CERTIFICATE OF AUTHORIZATION NPT 6-28-03, THE NATIONAL BOARD Certificate of Authorization, NUCLEAR RULES KTA 5401, AWS D 10.920 and KTA 309A.1

Germanischer Lloyd Approval of Material Manufacturers, BUREAU VERITAS Certificate to NR 306 INSPECTA TYPE INSPECTION CERTIFICATE / ASPROVAL OF MANUFACTURER CERTIFICATE

AWA CERTIFICATE, Qualification acc. to NORMEN M-050, DIN-Certification, AD 199 / TSD 100, AD 2000 H40, TSD 200, HP 711, DIN EN 1220-2 / DIN 18807:2002-08 / design and construction rules

for nuclear power generating stations, KOC-M

WSK Schütz GmbH, Krefelderstr. 111 D-47809, Paffhof 13 00 54 D-47756 Krefeld, Germany.

Phone +49 2151 917-0, Fax +49 2151 917-101 E-Mail: Mail@wskschuetz.com Http://www.wskschuetz.com

Revised 06/10

18/10/2013

Revised

IP-AT FOTS

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

Revised

|                                                                                     |                                                                                                                                  |                    |                                                                                                      |              |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
|  | <b>CERTIFIED MATERIAL TEST REPORT</b><br>Inspection Certificate 3.1 / Abnahmeschein 3.1<br>acc. to / nach DIN EN 10204 ISO 10214 |                    | <b>WILH. SCHULZ GRSCH.</b><br><b>Wert Kriegsl.</b><br><b>Quality Assurance</b><br>Qualitätssicherung |              |
|                                                                                     | Page: 3 of 3                                                                                                                     |                    | Date: 04.06.2010                                                                                     |              |
| Certificate No.: 50558                                                              |                                                                                                                                  | Zeugnis-Nr.: 50558 |                                                                                                      | Revisions: 0 |

This material is free from low melting-point material and radioactive contamination.  
 Das Material ist frei von Verunreinigungen mit Material mit niedrigem Schmelzpunkt und Radioaktivität.

This inspection and certification is restricted by computer system and is valid without signature. Alteration or use for other products are regarded as falsification of documents and will be subject to criminal jurisdiction.  
 Dieses Zeugnis bzw. diese Bescheinigung wurde mit Hilfe der EDV erstellt und ist ohne Unterschrift gültig. Veränderungen sowie Verwendung für andere Erzeugnisse werden als Fälschung von Dokumenten angesehen und werden strafrechtlich verfolgt.

THIS IS TO CERTIFY THAT THE CONTENT OF THE REPORT IS CORRECT AND ACCURATE AND THAT ALL TEST RESULTS AND OPERATIONS PERFORMED BY SCHULZ OR ITS SUBCONTRACTORS ARE IN COMPLIANCE WITH THE MATERIAL SPECIFICATIONS LISTED IF SO STATED ELSEWHERE IN THIS CMTR AND WAS FOUND TO MEET THE REQUIREMENTS. WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL USED FOR PRODUCT FORM CONVERSION CONFORMS TO THE APPLICABLE DIMENSIONAL REQUIREMENTS.

**Peter Mondorf**

Date: \_\_\_\_\_  
 Authorized Inspection Representative

DeLum

Romanus Leino

19/10/2013

pure

IF-AT 1875

Eng. Mario Gordo Novon  
 President of SUT, S. well  
 FERNANDO CHAVEZ

Signature of SUT, S. well  
 FERNANDO CHAVEZ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ISO 9001:2008 PED 97/23/EC, ASME CERTIFICATE OF AUTHORIZATION NOT NOTED, THE NATIONAL BOARD Certificate of Authorization, NUCLEAR RULES KIA 1401, ASME D 10250 and KIA 3201.1<br>Germanischer Lloyd Approval of Material Manufacturers, BUREAU VERITAS Certificate to NR 330 INSPEC TA TYPE INSPECTION CERTIFICATE / APPROVAL OF MANUFACTURER CERTIFICATE<br>ABS CERTIFICATE. Qualifikation acc. to NON-SOK M-001, CEN-Canadian Registrations, AQ-WO / TRD 190, AD 2000 HWS, TRB 200 TRD 201 NP 11, DIN EN 729-2 / DIN 18017-2002-09 / design and construction rules for nuclear power generating stations, RCC-M | WILH. SCHULZ GRSCH., Rulshilde 111 D-47309, Postfach 13 DE 94 D-47788 Krefeld, Germany.<br>Phone +49 2131 511-0 Fax +49 2131 917-101 E-Mail: Mail@wsgschulz.com http://www.wsgschulz.com |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## ANEXO II – Certificado do consumível de soldagem



voestalpine Böhler Welding

voestalpine Böhler Welding Soldas do Brasil Ltda

Rua Arnaldo Magalhães nº 371  
04895-000 - São Paulo - SP  
Tel: (11) 8894-8277 - Fax: (11) 8894-8882

E-mail: info.welding@voestalpine.com  
Site: www.voestalpine.com/welding

SAIPEM DO BRASIL SERVIÇOS DE  
PETROLEO  
AVENIDA MARIA DE OLIVEIRA CHERE 02  
11410-871 GUARUJÁ  
Brasil

### CERTIFICADO DA QUALIDADE

Certificate Schedule F

conforme / as per : ASME/AWS A5.01

No. : No. : 2014-000100773-1-900009-004

Rev. 0

Página / Page : 1 / 1

|                     |                          |                              |         |            |
|---------------------|--------------------------|------------------------------|---------|------------|
| Pedido No           | PO no.                   | CART.CONC.LOA 033 2014       | de / of | 10.03.2014 |
| Ordem de Produção   | Order no.                | 1005233557                   |         |            |
| Fatura              | Delivery note/pos./split | 2005262540/000040/900009     | de / of | 10.03.2014 |
| Produto             | Product                  | Vareta (TIG) / GTAW rod/wire |         |            |
| Designação da Marca | Trade name               | THERMANIT 25/09 CuT          |         |            |
| Classificação       | Standard designation     | AWS A5.9/5.9M ER 2594        |         |            |
| Dimensão            | Dimension                | 2,4 X 1000 mm                |         |            |
| Comida              | Heat no.                 | 1402516                      |         |            |
| Quantidade          | Quantity                 | 20,0 KG                      |         |            |

Análise Química % do produto

Chemical composition in % of the product

| C     | Si    | Mn    | P     | S     | Cr     | Mo    | Ni    | W     | Cu    | N     |  |  |  |  |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|--|--|
| 0,009 | 0,470 | 0,600 | 0,018 | 0,005 | 25,070 | 3,900 | 9,270 | 0,009 | 0,090 | 0,260 |  |  |  |  |

RADIOGRAFIA E FILETES ATENDEM OS REQUISITOS DA NORMA.

Lugar / Town  
São Paulo

Data / Date  
08.05.2014

Representante da Qualidade Autorizado / Authorized representative

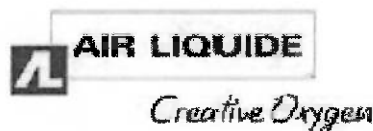
Impresso por computador, válido sem assinatura

This certificate was issued by DP-equipment and does not require signature.

voestalpine

ONE STEP AHEAD.

## **ANEXO III – Certificado do argônio puro – 99,99%**



### **CERTIFICADO DE CONFORMIDADE**

**PRODUTO:** ARCAL 1

**ESPECIFICAÇÃO :**

Embalagem de Transporte: O produto comprimido a alta pressão é acondicionado e transportado em cilindros de aço ou alumínio, sem costura.

Tipo de cilindro : B-50

Pressão: 192,0 Kgf/cm<sup>2</sup>, a 21°C

Volume: 10 m<sup>3</sup>

Lote: 2848 (22497725 à 22497756)

Data Fab: 11/07/2014

Componente: ARGÔNIO ( $\geq 99,99\%$ ) - GÁS INERTE

**VALIDADE:** As características deste produto não se alteram em função do tempo.

**CARACTERÍSTICAS :**

Incolor, inodoro, insípido, não inflamável, não tóxico, asfixiante, inerte não corrosivo, gás comprimido.

**ATENÇÃO :** Fache a válvula do cilindro quando a pressão atingir 2,0 Kgf/cm<sup>2</sup>

**RECOMENDAÇÕES DE SEGURANÇA E MANUSEIO :**

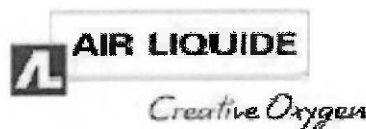
- Cilindros de gases comprimidos devem ser estocados longe de risco de fogo , em área ventilada.
- A mistura pode ser asfixiante porque desloca o O<sub>2</sub> do recinto causando a redução da concentração de O<sub>2</sub>.
- A temperatura do cilindro nunca deve exceder 45°C . Não use chama ou calor para elevar a pressão do cilindro.
- O cilindro não deve ser submetido a impactos violentos
- Use luvas de segurança para manusear o cilindro.
- Remova o lacre do cilindro apenas quando for usá-lo.

**PRIMEIROS SOCORROS :** Em caso de exposição à atmosferas ricas em argônio, remover a vítima para lugares bem ventilados.

(Cntp - Condições Normais de Temperatura e Pressão, 21°C e 1 atm)

São Paulo, 22 de agosto de 2014

## **ANEXO IV – Certificado da mistura 97,5%Ar + 2,5%N<sub>2</sub>**



### **CERTIFICADO DE CONFORMIDADE**

**PRODUTO: ATAL SD**

**ONU 1979 MISTURAS DE GASES RAROS, COMPRIMIDA 2.2**

**PRODUTO N<sub>2</sub> DE ACORDO COM A ISO 14175 : 2008**

**ESPECIFICAÇÃO :**

Embalagem de Transporte: O produto comprimido a alta pressão é acondicionado e transportado em cilindros de aço ou alumínio, sem costura.

Tipo de cilindro: B-50

Pressão: 192 Kgf/cm<sup>2</sup>, a 21° C

Volume: 10 m<sup>3</sup>

Lote : 3133 (22099353 a 22099368)

Data Fab: 29/07/2014

Componentes:

N<sub>2</sub> (2.5%)

ARGÔNIO (97.5%)

**VALIDADE:** As características deste produto não se alteram em função do tempo.

**CARACTERÍSTICAS :**

Incolor, inodoro, insípido, não inflamável, não tóxico, asfixiante, inerte não corrosivo, gás comprimido.

**ATENÇÃO :** Feche a válvula do cilindro quando a pressão atingir 2 Kgf/cm<sup>2</sup>.

**RECOMENDAÇÕES DE SEGURANÇA E MANUSEIO :**

- Cilindros de gases comprimidos devem ser estocados longe de risco de fogo, em área ventilada.
- A mistura pode ser asfixiante porque desloca o O<sub>2</sub> do recinto causando a redução da concentração de O<sub>2</sub>.
- A temperatura do cilindro nunca deve exceder 45 °C. Não use chama ou calor para elevar a pressão do cilindro.
- O cilindro não deve ser submetido a impactos violentos.
- Use luvas de segurança para manusear o cilindro.
- Remova o lacre do cilindro apenas quando for usá-lo.
- Identificação conforme norma brasileira ABNT - NB-12176
- Evitar posicionar-se em frente à válvula do cilindro na saída do gás.

**PRIMEIROS SOCORROS :** Em caso de exposição à atmosferas ricas em argônio, remover a vítima para lugares bem ventilados.

(CNP - Condições Normais de Temperatura e Pressão, 21°C e 1 atm)

São Paulo, 19 de agosto de 2014

## ANEXO V – Certificado da mistura 90%Ar + 10%He


**AIR LIQUIDE**


### RELATÓRIO TÉCNICO DE GARANTIA DA QUALIDADE

Certificado : 15 240

 Cliente: SAIPEM  
 Endereço: Av. Maria da Oliveira Chioro, 02 - Guarujá - SP

|                     |                            |                    |                       |
|---------------------|----------------------------|--------------------|-----------------------|
| Produto             | Padrão Primário            | Conexão da Válvula | ABNT 245-1 / CGA 580  |
| Pedido              | 0134/14                    | Cilindro nº        | 777 434               |
| Centro Vendas       | 101                        | Pressão            | 150 bar ou 15 000 Kpa |
| Tipo cilindro       | B-50/ 50 l                 | Data Validade      | 16/05/2019            |
| Volume              | 7,80 m3 a 21°C a 101,3 kPa | Data confecção     | 16/05/2014            |
| Método de Confecção | Gravimétrico               |                    |                       |

#### Composição:

| Componentes | Requisitado   | Reportado     | Incerteza de medição | Método de verificação  | Data       |
|-------------|---------------|---------------|----------------------|------------------------|------------|
| Hélio       | 10,0 %mol/mol | 10,0 %mol/mol | +/- 0,1 %mol/mol     | Cromatografia CG / TCD | 27/05/2014 |
| Argônio     | Q S           |               |                      |                        |            |

#### Rastreabilidade

Rastreável a RBC-Inmetro conforme certificados LAB14214115/14, B-33898/14, B-33899/14, B-33901/14 e M 47767/14, os quais atendem os requisitos da ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005.

#### Incerteza

 A incerteza expandida declarada está baseada na incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência  $k=2$  que representa um nível de confiança de 95%.

#### Temperatura de armazenagem/uso

A estabilidade estará garantida, desde que o cilindro seja armazenado em local ventilado, ao abrigo de intempéries e entre as temperaturas de 0 °C a 45 °C.

Pressão residual recomendada: 150 Kpa

 Equivalência unidades:  
 % - %mol/mol  
 ppm - micromol/mol  
 ppb - nanomol/mol

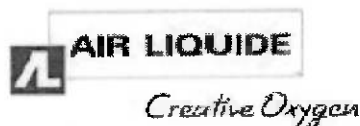
Data: 28/05/14

 Mauro Tadeu D. Faria  
 Responsável Técnico  
 CRQ 02300518 - 4ª Região

Os resultados apresentados neste documento referem-se exclusivamente à amostra analisada. A reprodução deste documento só poderá ser feita e depende da aprovação escrita do laboratório.

Pág. 1/1

## **ANEXO VI – Certificado da mistura 88%Ar + 2%N<sub>2</sub> + 10%He**



### **CERTIFICADO DE CONFORMIDADE**

**PRODUTO:** ARCAL 39

**ONU 1979 MISTURAS DE GASES RAROS, COMPRIMIDA 2.2**

**ESPECIFICAÇÃO :**

Embalagem de Transporte: O produto comprimido a alta pressão é acondicionado e transportado em cilindros de aço ou alumínio, sem costura.

Tipo de cilindro: B-50

Pressão: 192 Kgf/cm<sup>2</sup>, a 21° C

Volume: 10 m<sup>3</sup>

Lote : 6739 (18024709 à 18024720)

Data Fab: 13/12/2012

Componentes:

N<sub>2</sub> (2%)

He (10%)

ARGÔNIO (Q.S)

**VALIDADE:** As características deste produto não se alteram em função do tempo.

**CARACTERÍSTICAS :**

Incolor, inodoro, insípido, não inflamável, não tóxico, asfixiante, inerte não corrosivo, gás comprimido.

**ATENÇÃO :** Feche a válvula do cilindro quando a pressão atingir 2 kgf/cm<sup>2</sup>.

**RECOMENDAÇÕES DE SEGURANÇA E MANUSEIO :**

- Cilindros de gases comprimidos devem ser estocados longe de risco de fogo , em área ventilada.
- A mistura pode ser asfixiante porque desloca o O<sub>2</sub> do recinto causando a redução da concentração de O<sub>2</sub>.
- A temperatura do cilindro nunca deve exceder 45 °C . Não use chama ou calor para elevar a pressão do cilindro
- O cilindro não deve ser submetido a impactos violentos.
- Use luvas de segurança para manusear o cilindro
- Remova o tacre do cilindro apenas quando for usá-lo.
- Identificação conforme norma brasileira ABNT - NB-12176
- Evitar posicionar-se em frente à válvula do cilindro na saída do gás.

**PRIMEIROS SOCORROS :** Em caso de exposição a atmosferas ricas em argônio, remover a vítima para lugares bem ventilados.

(CNTP - Condições Normais de Temperatura e Pressão, 21°C e 1 atm)

São Paulo, 19 de agosto de 2014

# ANEXO VII – Certificado do analisador de oxigênio

Advanced Instruments Inc.

## Quality Control & Calibration Certification

|                 |                                                                                                                                                                                                        |               |                     |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------|
| Customer:       | TECH QUIP                                                                                                                                                                                              | Date:         | 5/12/2014           |
| Order No.:      | 541779/00011126                                                                                                                                                                                        | S/N:          | 405244695 <i>AV</i> |
| Model No.:      | GPR-1000 ATEX Portable PPM Oxygen Analyzer                                                                                                                                                             | Batch:        | 31126018 <i>AV</i>  |
| Configurations: | A-1161-B-ATEX-11 Rev C3 PCB Assembly, Main<br>Ranges: 0-1000 PPM, 0-1%, 0-5%, 0-25% (CAL only)                                                                                                         | Software Ver: | 1.15A <i>AV</i>     |
|                 | ( ) A-1163 Battery Assembly (no pump)                                                                                                                                                                  |               |                     |
|                 | (X) A-3666 Battery Assembly with A-3166-1 Pump Assembly, Integral <i>OK</i><br>Barometric pressure and temperature compensation<br>Stainless steel sensor flow housing, HDPE tubing, brass connections |               |                     |
| Sensor:         | (X) GPR-12-100-M PPM Oxygen Sensor                                                                                                                                                                     | S/N:          | 402218905 <i>AV</i> |
|                 | ( ) KLT-12-100-M PPM Oxygen Sensor                                                                                                                                                                     |               |                     |
| Accessories:    | Owner's Manual                                                                                                                                                                                         |               |                     |
|                 | CONN-1034 Plug Mini Phone .141 dia. Black Handle                                                                                                                                                       |               |                     |
|                 | FTTN-1153 Quick Disconnect Brass Male 1/8" Fittings - Qty. 2x w/o Pump, 3x with Pump                                                                                                                   |               |                     |
|                 | (X) PWRS-1002 9VDC Battery Charger/Adapter 110 VAC (US Plug)                                                                                                                                           |               |                     |
|                 | PWRS-1003 9VDC Battery Charger/Adapter 100-240 VAC - Asia (US plug)                                                                                                                                    |               |                     |
|                 | ( ) PWRS-1003-1 Kit 9VDC Battery Charger/Adapter 100-240 VAC - Europe (non-UK)                                                                                                                         |               |                     |
|                 | ( ) PWRS-1003-2 Kit 9VDC Battery Charger/Adapter 100-240 VAC - UK                                                                                                                                      |               |                     |
|                 | ( ) PWRS-1003-3 Kit 9VDC Battery Charger/Adapter 100-240 VAC - Australia                                                                                                                               |               |                     |
|                 | ( ) PWRS-1008 9VDC Battery Charger/Adapter 12VDC Auto Cigarette Lighter                                                                                                                                |               |                     |

| Test & Verify:                                                      | Expected Value      | Observed Value | Pass |           |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|------|-----------|
| Default zero                                                        | .00 ± .05 low range | 0 PPM          | ✓    | <i>AV</i> |
| Default span in air @ 300 µA                                        | 19.0% to 23.0%      | 21.1%          | ✓    | <i>AV</i> |
| Span calibration upper limit in air @ 350 µA                        | 20.5% to 21.3%      | 20.9%          | ✓    | <i>AV</i> |
| Span calibration lower limit in air @ 250 µA                        | 20.5% to 21.3%      | 20.9%          | ✓    | <i>AV</i> |
| Reading after air (20.9%) calibration                               | 20.5% to 21.3%      | 20.9%          | ✓    | <i>AV</i> |
| Reading after exposure to air and zero gas purge is < 100 PPM after | < 15 minutes        | 12 min         | ✓    | <i>AV</i> |
| Reading after exposure to 4.2% ± 5% PPM Oxygen span gas             | ± 7% of 3.1 PPM     | 43.1 PPM       | ✓    | <i>AV</i> |
| Baseline drift on zero gas over 24 hour period (± 5% FS)            | ± 5 PPM of reading  | 0.4 PPM        | ✓    | <i>AV</i> |
| Noise level (± 1% FS)                                               | ± 1 PPM of reading  | 0.1 PPM        | ✓    | <i>AV</i> |
| Reading after 24 hours in static (no flow to sensor) condition      | < 500 PPM           | 2.64 PPM       | ✓    | <i>AV</i> |
| Battery charged fully                                               |                     |                | ✓    | <i>AV</i> |
| LED indicators: low battery, charge function                        |                     |                | ✓    | <i>AV</i> |
| Analog signal output 0-1 VDC full scale                             |                     |                | ✓    | <i>AV</i> |
| Overall inspection for physical defects                             |                     |                | ✓    | <i>AV</i> |

Options:

NA

Other:

NA

Delivery: 1 of 6

*Handwritten:*  
05/19/14

## ANEXO VIII – Relatório de ensaio por líquido penetrante

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                      |                      |                                                                                |                                                                           |                                       |           |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------|-------|
| <br><b>saipem do brasil</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>Saipem do Brasil FORM</b><br><b>RELATÓRIO DE ENSAIO POR</b><br><b>LÍQUIDO PENETRANTE</b>                                                                                                                          |                      | Doc. No. FORM-SDB-QUAL-012-E<br>Rev. 01      Data: 09/04/2013<br>Página 1 of 1 |                                                                           |                                       |           |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | No. Relatório: LP-PSAL-QUAL-001                                                                                                                                                                                      |                      | Data de Emissão: 29/08/2014                                                    |                                                                           |                                       |           |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                      |                      |                                                                                |                                                                           |                                       |           |       |
| Procedimento                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | MA-3A00 00-1500-972-IPG-8285_B                                                                                                                                                                                       | Norma de Referência  | ASME B31.1                                                                     |                                                                           |                                       |           |       |
| Desenho do Projeto and Rev.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                      | Crítico de Aceitação | ASME VIII DIV.1 App 6                                                          |                                                                           |                                       |           |       |
| Condições da Superfície                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <input type="checkbox"/> Como soldada <input type="checkbox"/> Lixada <input checked="" type="checkbox"/> Escovada <input type="checkbox"/> Jateada <input type="checkbox"/> Usinada <input type="checkbox"/> Outras |                      |                                                                                |                                                                           |                                       |           |       |
| Superfície                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa                                                                                                                                         |                      | Temperatura da Superfície (°C)                                                 | 21°                                                                       |                                       |           |       |
| Tipo de Penetrante                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <input checked="" type="checkbox"/> Visível <input type="checkbox"/> Fluorescente                                                                                                                                    |                      | Tipo de Revelador                                                              | <input type="checkbox"/> Seco <input checked="" type="checkbox"/> Líquido |                                       |           |       |
| Tipo de Removedor                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <input checked="" type="checkbox"/> Lavável em Água <input type="checkbox"/> Lavável em Solvente                                                                                                                     |                      |                                                                                |                                                                           |                                       |           |       |
| Limpador: <u>MAGNAFLUX SKC-S / Lote: F069772 / Val.: 06/2018</u><br>Penetrante: <u>MAGNAFLUX SKL-WP / Lote: F064402 / Val.: 12/2017</u><br>Revelador: <u>MAGNAFLUX SKD-S / Lote: F070684 / Val.: 07/2018</u><br>Tempo de Penetração: Min. <u>15</u> [min]<br>Tempo de Revelação: Min. <u>20</u> [min]<br>Tempo de Exatinação: Max. <u>—</u> [min]<br>Iluminação [lx]: <u>1200</u><br>Limpeza: _____<br>Aplicação do Penetrante: _____<br>Remoção do Penetrante: _____<br>Processo de Secagem: _____<br>Aplicação do Revelador: _____<br>Limpeza Pós-Inspeção: _____<br>Tipo e Eqm. de Medição de Iluminação e NS: <u>Luxmetry</u> |                                                                                                                                                                                                                      |                      |                                                                                |                                                                           |                                       |           |       |
| No. Solda                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Material                                                                                                                                                                                                             | Espec.               | Classe de Insp.                                                                | Indicação                                                                 | Comp. da Indic. De Até                | Avaliação | Notas |
| CP-01                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | A.C.                                                                                                                                                                                                                 | 11mm                 | I                                                                              | —                                                                         | — —                                   | Aprovado  | —     |
| CP-02                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | A.C.                                                                                                                                                                                                                 | 11mm                 | I                                                                              | —                                                                         | — —                                   | Aprovado  | —     |
| CP-03                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | A.C.                                                                                                                                                                                                                 | 11mm                 | I                                                                              | —                                                                         | — —                                   | Aprovado  | —     |
| CP-04                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | A.C.                                                                                                                                                                                                                 | 11mm                 | I                                                                              | —                                                                         | — —                                   | Aprovado  | —     |
| CP-05                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | A.C.                                                                                                                                                                                                                 | 11mm                 | I                                                                              | —                                                                         | — —                                   | Aprovado  | —     |
| CROQUI DE ANEXO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                      |                      |                                                                                |                                                                           | NOTIFICAÇÃO DA REFERÊNCIA DA INSPEÇÃO |           |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                      |                      |                                                                                |                                                                           | RPI No.                               |           |       |
| INSPECTOR DE END                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                      | COORDENADOR          |                                                                                |                                                                           |                                       |           |       |
| NOME: Renato Bulhões da Silva                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                      | NOME                 |                                                                                | NOME                                                                      |                                       | NOME      |       |
| ASS.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                      | ASS.                 |                                                                                | ASS.                                                                      |                                       | ASS.      |       |
| Data: 29/08/2014                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                      | Data                 |                                                                                | Data                                                                      |                                       | Data      |       |

## **ANEXO IX – Relatório de ensaio radiográfico**

[illegible]