

Roque Clovis Giacomassi Junior

**ESTUDO DA SOLDAGEM DISSIMILAR DE AÇOS INOXIDÁVEIS  
LEAN DUPLEX UNS S32304 COM SUPER DUPLEX UNS S32760  
COM E SEM PASSE DE REAQUECIMENTO, PELO PROCESSO  
GTAW.**

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

São Paulo

Maio/2014

Roque Clovis Giacomassi Junior

Engenheiro de Produção Mecânica

**ESTUDO DA SOLDAGEM DISSIMILAR DE AÇOS INOXIDÁVEIS  
LEAN DUPLEX UNS S32304 COM SUPER DUPLEX UNS S32760  
COM E SEM PASSE DE REAQUECIMENTO, PELO PROCESSO  
GTAW.**

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

Área de concentração:  
Engenharia de Soldagem

Orientador: Msc. André de Albuquerque Vicente

São Paulo

Maio/2014

*A educação é a arma mais poderosa  
que você pode usar para mudar o mundo.*

*Nelson Rolihlahla Mandela "Madiba"*

*Sonho que se sonha só.  
É só um sonho que se sonha só  
Mas sonho que se sonha junto é realidade.*

*Raul Santos Seixas.*

**DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho a meus pais,  
meu irmão, minha esposa e  
minhas filhas Luna e Nalu.*

### **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos Profs. Dr. Sergio D. Brandi, Andre de A. Vicente, Jaime Casanova, pela dedicação e empenho em transferir um pouco de seu conhecimento durante esses dois anos de curso e pela matéria prima fornecida para a realização desse trabalho, a empresa Soudage na pessoa do Prof. Manuel Saraiva Clara e Sr. Marcus Gimenes pelo espaço, equipamentos e mão de obra utilizada para a realização da soldagem dos corpos de prova, a empresa Air Liquide representadas pelos Srs. José A. Cunha e Rogério Veiga (Tiozão) pelo fornecimento do gás de proteção (Atal SD – Ar + N<sub>2</sub>) utilizados nesse trabalho, a empresa Sandvik pelo fornecimento das varetas para soldagem pelo processo TIG (R-25104L / AWS ER 2594) e a empresa Arctest pela realização das radiografias nos corpos de prova. Aos meus pais, Roque Clovis Giacomassi e Maria Elizabete Schiave que sem seu apoio e carinho dado a mim e minha família durante esses dois anos nada disso seria possível, meu irmão e meu orgulho o Piloto Fausto Giacomassi Neto que mesmo sendo caçula sempre foi um exemplo pra mim, minha esposa Ana Maria Ramos que tornou - se a essência da minha vida, dos meus sonhos e de toda minha força e empenho nos momentos difíceis, minhas filhas Luna e Nalu que são as principais responsáveis pela minha felicidade e força para continuar quando pensei em desistir e a Deus e Nossa Senhora que sem eles nada é possível.

### **CURRICULUM VITAE**

Roque Clovis Giacomassi Junior

30 anos

Casado / 2 filhas

Engenheiro de Produção Mecânica – (UNIP 2006 – 2011)

Inspetor de Soldagem Nível 1 (IS 4167) / Nível 2 ASME VIII Div I (em certificação)

Eng.º de Produção Mecânica, com qualificação SNQC – FBTS Inspetor de Soldagem N1 conforme norma de certificação NBR 14842. Experiência em inspeção de fabricação e reforma de válvulas, vasos de pressão, caldeiras e trocadores de calor conforme normas; NR-13, N268, N1704, N1706, ASME II, ASME V, ASME VIII Div I, ASME IX. Inspeção de fabricação e montagem de estruturas metálicas conforme N293 e AWS D1.1. Inspeção em Fundidos com critério MSS SP, inspeção de fabricação e reforma de bombas centrífugas e conjunto moto-bomba.

Elaboração de documentação de soldagem (IEIS/ EPS/ RQPS/ RQS), conforme Norma Petrobras, ASME IX e AWS, mapeamento de soldagem, controle de desempenho de soldadores, relatório de mapeamento de descontinuidades, acompanhamento de soldagem, seleção de consumíveis e inspeção de recebimento, conhecimento de ensaios destrutivos e não destrutivo em geral.

## **RESUMO**

Os aços inoxidáveis duplex são utilizados em diversos segmentos devido às suas propriedades mecânicas e à resistência à corrosão diferenciadas quando comparados aos aços inoxidáveis convencionais.

A soldagem dos aços inoxidáveis duplex é complexa pois a junta soldada deverá apresentar frações volumétricas de ferrita e austenita próximas a 50 %, garantindo assim as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão diferenciadas.

Neste trabalho estudou-se a soldagem dissimilar do aço inoxidável lean duplex UNS S32304 com o aço inoxidável super duplex UNS S32760, com a aplicação da técnica de passe de reaquecimento.

Foram soldados e analisados três corpos de prova de 6,3mm de espessura, soldados pelo processo GTAW. Como gás de proteção utilizou-se a mistura Argônio e Nitrogênio na proporção de 97,5% Argônio e 2,5% Nitrogênio. Utilizou-se o consumível ER2594 de Ø 1,6mm conforme AWS 5.9 e cobre junta cerâmico para proteção da raiz.

Para confecção das juntas soldadas utilizou-se a sequência de passes, como segue: 1 passe de raiz (1º passe/ 1ªcamada), 1 passe de reforço (2º passe/ 2ªcamada) e dois passes de enchimento (3º e 4º passe/ 3ªcamada).

No CP 01, aplicou-se a técnica de duplo passe de reaquecimento através de um passe do lado do aço inoxidável lean duplex UNS S32304 (5º passe/ 4ª camada) e um passe do lado do aço inoxidável super duplex UNS S32760 (6º passe/ 4ª camada). Já no CP 02 realizou-se o passe simples de reaquecimento

apenas do lado do aço inoxidável lean duplex UNS S32304 (5º passe/ 4º camada). No CP 03 não realizou-se passe de reaquecimento.

As juntas soldadas foram radiografadas e então estudadas utilizando-se microscopia óptica para análise microestrutural e contagem de ferrita (NORSOK M601 e ASTM E562) e ensaio de microdureza Vickers (ASTM E 384-09).

Analisou-se os dois metais base, as zonas afetadas pelo calor e a zona fundida das três juntas soldadas nas faces e nas raízes.

### **ABSTRACT**

Duplex stainless steels are used in several segments due to their excellent mechanical properties and corrosion resistance. They are characterized by presenting biphasic microstructure, ferrite - austenite.

Duplex stainless steels are basically Fe-Cr-Mo-Ni-C alloys that exhibit two phase microstructure composed of ferrite and austenite in roughly equal proportions of 50%, which gives them the term "duplex".

The welding of duplex stainless steels is complex because the welded joint must present volume fractions of ferrite and austenite close to 50%, thus ensuring the mechanical properties and corrosion resistance differentiated.

In this work it was studied the dissimilar welding of stainless steel UNS S32304 lean duplex with super duplex stainless steel UNS S32760, with the application of technique cross reheating.

For the welded joints confection were welded and analyzed three test specimens with 6.3mm thickness, welded by the GTAW process. We used shielding gas Argon (97.5%) + Nitrogen (2.5%  $\pm$  0.25), consumable ER2594  $\varnothing$  1,6 mm as AWS 5.9 and ceramic backing to protect the root.

For this thickness we did welding of 1 root pass (1<sup>st</sup> pass / 1<sup>st</sup> layer), 1 reinforcement pass (2<sup>nd</sup> pass / 2<sup>nd</sup> layer) and two filler passes (3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> pass / 3<sup>rd</sup> layer).

In CP 01, we applied the technique of double-pass reheating welding on both sides, lean duplex stainless steel UNS S32304 (5 ° cross / 4th layer) and a pass from the side of super duplex stainless steel UNS S32760 (6 No pass / 4th layer). In CP 02 was held the simple pass reheating only in lean duplex stainless

steel UNS S32304 (5 ° cross / 4th layer) side. In CP 03 was held not pass reheating.

The welded joints were radiographed and then studied using the Vickers hardness test (ASTM E 384-09) optical microscopy for microstructural analysis and counting of ferrite (NORSOK M601 and ASTM E562)

Have been analyzed the heat affected zone, the base metals and weld zone.

## **LISTA DE FIGURAS**

|                                                                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Gráfico taxa de corrosão dos aços em função do percentual de cromo presente na composição química. <sup>[7]</sup> .....                                                                            | 6  |
| Figura 2: Estrutura cristalina CCC e CFC de um aço duplex. ....                                                                                                                                              | 7  |
| Figura 3: Curva TTT típica de um aço super duplex destacando o efeito de alguns elementos de liga na formação de precipitados <sup>[3]</sup> .....                                                           | 13 |
| Figura 4: Representação das células unitárias CCC (a) e CFC (b) somente com átomos de ferro <sup>[16]</sup> .....                                                                                            | 15 |
| Figura 5: Representação esquemática de algumas substituições de átomos de Ferro (azul) por átomos de Cromo (vermelho), que podem ocorrer numa célula CCC <sup>[16]</sup> .....                               | 15 |
| Figura 6: Representação esquemática de algumas substituições de átomos de Ferro (azul) por átomos de Cromo (vermelho), e por átomos de Níquel (rosa) que podem ocorrer numa célula CFC <sup>[16]</sup> ..... | 16 |
| Figura 7: Seção Vertical de transformações microestruturais num diagrama pseudo-ternário 70%Fe-Cr-Ni <sup>[22]</sup> .....                                                                                   | 17 |
| Figura 8: Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni para um AID com teor de Cromo de 22% <sup>[32]</sup> .....                                                                                                        | 20 |
| Figura 9: Diagrama TTT esquemático de precipitação de segundas fases nos Aços Inoxidáveis Duplex <sup>[24]</sup> .....                                                                                       | 21 |
| Figura 10: Ciclos térmicos de soldagem experimentados por diferentes pontos da junta [46]. ....                                                                                                              | 28 |
| Figura 11: Repartição Térmica - Distribuição da temperatura em função da distância ao centro da solda <sup>[46]</sup> .....                                                                                  | 29 |
| Figura 12: Ciclos térmico experimentado por um ponto da ZAC próximo da raiz de uma junta de topo com solda multipasse <sup>[46]</sup> .....                                                                  | 30 |
| Figura 13: Ciclos térmico experimentado por um ponto da ZAC próximo do ultimo passe de uma junta de topo com solda multipasse <sup>[46]</sup> .....                                                          | 30 |
| Figura 14: Modelo de fluxo de calor para chapa fina (a), intermediária (b) e grossa (c) <sup>[46]</sup> .....                                                                                                | 32 |
| Figura 15: Princípio da soldagem manual pelo processo GTAW com metal de adição <sup>[50]</sup> .....                                                                                                         | 35 |
| Figura 16: (a) Soldagem GTAW CC- (b) Penetração da solda em CC- (c) Soldagem GTAW CC+ (d) Penetração da solda em CC+ <sup>[49 – 51]</sup> .....                                                              | 36 |
| Figura 17: Transformações microestruturais ocorridas na junta soldada de um AID <sup>[57]</sup> .....                                                                                                        | 41 |
| Figura 18: Cilindro de Ar + N <sub>2</sub> utilizado para estabilidade do arco elétrico e proteção da poça de fusão pelo processo GTAW. ....                                                                 | 47 |
| Figura 19: Backing cerâmico utilizado para proteção da raiz. ....                                                                                                                                            | 47 |
| Figura 20: Preparação do corpo de prova com backing cerâmico para proteção da raiz. ....                                                                                                                     | 48 |
| Figura 21: Dimensões da face do bisel, abertura da raiz e chanfro de acordo com o processo e espessura do material <sup>[58]</sup> .....                                                                     | 49 |
| Figura 22: Chapa apêndice e dispositivo para controle de deformação "cachorro" .....                                                                                                                         | 50 |

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 23: Vista frontal da Máquina de Soldagem GTAW Dynasty 300 DX .....                                                                | 51 |
| Figura 24: Vista Lateral da Máquina de Soldagem GTAW Dynasty 300 DX.....                                                                 | 51 |
| Figura 25: Fluxímetro .....                                                                                                              | 52 |
| Figura 26: Regulador de Pressão .....                                                                                                    | 53 |
| Figura 27: Termômetro infravermelho digital .....                                                                                        | 54 |
| Figura 28: Alicates Amperímetro .....                                                                                                    | 54 |
| Figura 29: Transferidor de Grau em aço .....                                                                                             | 54 |
| Figura 30: Croqui sequencial de Soldagem CP 01 .....                                                                                     | 56 |
| Figura 31: Croqui sequencial de Soldagem CP 02 .....                                                                                     | 57 |
| Figura 32: Croqui sequencial de Soldagem CP 03 .....                                                                                     | 58 |
| Figura 33: Região de análise da fração volumétrica de ferrita e austenita CP 01 .....                                                    | 65 |
| Figura 34: Região de análise da fração volumétrica de ferrita e austenita CP 02 .....                                                    | 65 |
| Figura 35: Região de análise da fração volumétrica de ferrita e austenita CP 03 .....                                                    | 65 |
| Figura 36: Metal Base super duplex (UNS S32760) CP 01.....                                                                               | 67 |
| Figura 37: Metal Base lean duplex (UNS S32204) CP 01.....                                                                                | 67 |
| Figura 38: ZAC 3º passe 3º camada super duplex (UNS S32760) CP 01 .....                                                                  | 68 |
| Figura 39: ZAC passe de reaquecimento 6º passe 4º camada x 3º passe 3º<br>camada - super duplex (UNS S32760) - CP 01.....                | 68 |
| Figura 40: Zona fundida - 5º passe 4º camada x 6º passe 4º camada - CP 01                                                                | 69 |
| Figura 41: ZAC passe de reaquecimento 5º passe 4º camada x 4º passe 3º<br>camada - lean duplex (UNS S32304) - CP 01.....                 | 69 |
| Figura 42: ZAC 4º passe 3º camada lean duplex (UNS S32304) CP 01 .....                                                                   | 70 |
| Figura 43: ZAC lean duplex (UNS S32304) – Raiz - CP 01 .....                                                                             | 70 |
| Figura 44: ZAC super duplex (UNS S32760) – Raiz - CP 01 .....                                                                            | 71 |
| Figura 45: Zona fundida - Raiz - 1º passe 1º camada - CP 01 .....                                                                        | 71 |
| Figura 46: Metal Base super duplex (UNS S32760) CP 01 - (ref. Figura 36).....                                                            | 72 |
| Figura 47: Metal Base lean duplex (UNS S32204) CP 01 (ref. Figura 37). ....                                                              | 72 |
| Figura 48: ZAC 3º passe 3º camada super duplex (UNS S32760) CP 01 (ref.<br>Figura 38).....                                               | 73 |
| Figura 49: ZAC passe de reaquecimento 6º passe 4º camada x 3º passe 3º<br>camada - super duplex UNS S32760 - CP 01 (ref. Figura 39)..... | 73 |
| Figura 50: Zona fundida - 5º passe 4º camada x 6º passe 4º camada - CP 01<br>(ref. Figura 40). ....                                      | 74 |
| Figura 51: ZAC passe de reaquecimento 5º passe 4º camada x 4º passe 3º<br>camada - lean duplex UNS S32304 - CP 01 (ref. Figura 41). .... | 74 |
| Figura 52: ZAC 4º passe 3º camada lean duplex (UNS S32304) CP 01 (ref.<br>Figura 42).....                                                | 75 |
| Figura 53: ZAC lean duplex (UNS S32304) – Raiz - CP 01 (ref. Figura 43).....                                                             | 75 |
| Figura 54: ZAC super duplex (UNS S32760) – Raiz - CP 01 (ref. Figura 44).....                                                            | 76 |
| Figura 55: Zona fundida - Raiz - 1º passe 1º camada - CP 01 (ref. Figura 45). ....                                                       | 76 |
| Figura 56: Metal Base super duplex (UNS S32760) CP 02.....                                                                               | 77 |
| Figura 57: Metal Base lean duplex (UNS S32204) CP 02.....                                                                                | 78 |
| Figura 58: ZAC 3º passe 3º camada super duplex (UNS S32760) CP 02.....                                                                   | 78 |

|                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 59: ZF passe de reaquecimento 5° passe 4° camada x 4° passe 3°<br>camada CP 02.....                                                                        | 79  |
| Figura 60: ZAC passe de reaquecimento 5° passe 4° camada x 4° passe 3°<br>camada – lean duplex (UNS S32304) - CP 02.....                                          | 79  |
| Figura 61: ZAC 4° passe 3° camada – lean duplex (UNS S32304) - CP 02.....                                                                                         | 80  |
| Figura 62: ZAC lean duplex (UNS S32304) – Raiz - CP 02 .....                                                                                                      | 80  |
| Figura 63: ZAC super duplex (UNS S32760) – Raiz - CP 02 .....                                                                                                     | 81  |
| Figura 64: Zona fundida - Raiz - 1° passe 1° camada - CP 02 .....                                                                                                 | 81  |
| Figura 65: Metal Base super duplex (UNS S32760) CP 02 (ref. Figura 56).....                                                                                       | 82  |
| Figura 66: Metal Base lean duplex (UNS S32204) CP 02 (ref. Figura 57).....                                                                                        | 82  |
| Figura 67: ZAC 3° passe 3° camada super duplex (UNS S32760) CP 02 (ref.<br>Figura 58).....                                                                        | 83  |
| Figura 68: ZF passe de reaquecimento 5° passe 4° camada x 4° passe 3°<br>camada CP 02 (ref. Figura 59) .....                                                      | 83  |
| Figura 69: ZAC passe de reaquecimento 5° passe 4° camada x 4° passe 3°<br>camada – lean duplex UNS S32304 - CP 02 (ref. Figura 60).....                           | 84  |
| Figura 70: ZAC 4° passe 3° camada – lean duplex (UNS S32304) - CP 02 (ref.<br>Figura 61).....                                                                     | 84  |
| Figura 71: ZAC lean duplex (UNS S32304) – Raiz - CP 02 (ref. Figura 62).....                                                                                      | 85  |
| Figura 72: ZAC super duplex (UNS S32760) – Raiz - CP 02 (ref. Figura 63).....                                                                                     | 85  |
| Figura 73: Zona fundida - Raiz - 1° passe 1° camada - CP 02 (ref. Figura 64).....                                                                                 | 86  |
| Figura 74: Metal Base super duplex (UNS S32760) CP 03.....                                                                                                        | 87  |
| Figura 75: Metal Base lean duplex (UNS S32204) CP 03.....                                                                                                         | 88  |
| Figura 76: ZAC 3° passe 3° camada super duplex (UNS S32760) CP 03.....                                                                                            | 88  |
| Figura 77: ZF 4° passe 3° camada x 3° passe 3° camada CP 03.....                                                                                                  | 89  |
| Figura 78: ZAC 4° passe 3° camada – lean duplex (UNS S32304) - CP 03.....                                                                                         | 89  |
| Figura 79: ZAC lean duplex (UNS S32304) – Raiz - CP 03 .....                                                                                                      | 90  |
| Figura 80: ZAC super duplex (UNS S32760) – Raiz - CP 03 .....                                                                                                     | 90  |
| Figura 81: Zona fundida - Raiz - 1° passe 1° camada - CP 03 .....                                                                                                 | 91  |
| Figura 82: Metal Base super duplex (UNS S32760) CP 03 (ref. Figura 74).....                                                                                       | 91  |
| Figura 83: Metal Base lean duplex (UNS S32204) CP 03 (ref. Figura 75).....                                                                                        | 92  |
| Figura 84: ZAC 3° passe 3° camada super duplex (UNS S32760) CP 03 (ref.<br>Figura 76).....                                                                        | 92  |
| Figura 85: ZF 4° passe 3° camada x 3° passe 3° camada CP 03 (ref. Figura 77).<br>.....                                                                            | 93  |
| Figura 86: ZAC 4° passe 3° camada – lean duplex (UNS S32304) - CP 03 (ref.<br>Figura 78).....                                                                     | 93  |
| Figura 87: ZAC lean duplex (UNS S32304) – Raiz - CP 03 (ref. Figura 79).....                                                                                      | 94  |
| Figura 88: ZAC super duplex (UNS S32760) – Raiz - CP 03 (ref. Figura 80).....                                                                                     | 94  |
| Figura 89: Zona fundida - Raiz - 1° passe 1° camada - CP 03 (ref. Figura 81).....                                                                                 | 95  |
| Figura 90: Localização das regiões onde foi medida a microdureza no CP 01.....                                                                                    | 101 |
| Figura 91: Localização das regiões onde foi medida a microdureza no CP 02.....                                                                                    | 102 |
| Figura 92: Localização das regiões onde foi medida a microdureza no CP 03.....                                                                                    | 103 |
| Figura 93: Comparativo de dureza nos metais de base sem passe de<br>reaquecimento, com passe simples de reaquecimento e com duplo passe de<br>reaquecimento. .... | 104 |
| Figura 94: Ciclos térmicos na soldagem multipasses <sup>[46]</sup> .....                                                                                          | 105 |

|                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 95: Comparativo de dureza nas zonas afetadas pelo calor sem passe de reaquecimento, com passe simples de reaquecimento e com duplo passe de reaquecimento. .... | 105 |
| Figura 96: Diagramas TTT (fase sigma) de diferentes Aços Inoxidáveis Duplex [6] .....                                                                                  | 108 |
| Figura 97: Comparativo de dureza nas zonas fundidas sem passe de reaquecimento, com passe simples de reaquecimento e com duplo passe de reaquecimento. ....            | 109 |
| Figura 98: Variação da fração volumétrica de % de ferrita - Face e Raiz - CP 01 .....                                                                                  | 111 |
| Figura 99: Variação da fração volumétrica de % de ferrita - Face e Raiz - CP 02 .....                                                                                  | 112 |
| Figura 100: Variação da fração volumétrica de % de ferrita - Face e Raiz - CP 03 .....                                                                                 | 113 |
| Figura 101: Comparativo % de Ferrita - CP 01 / CP 02 / CP 03 - Face .....                                                                                              | 114 |
| Figura 102: Comparativo % de Ferrita - CP 01 / CP 02 / CP 03 - Raiz .....                                                                                              | 114 |

**LISTA DE TABELAS**

|                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1: Composição química dos AID conforme norma Petrobras N-133 .....                                                                 | 13  |
| Tabela 2: Principais fases terciárias dos aços duplex com suas estruturas cristalinas e temperatura de precipitação <sup>[33]</sup> ..... | 22  |
| Tabela 3: Limite de Resistências de alguns AID <sup>[43]</sup> .....                                                                      | 26  |
| Tabela 4: Composição química aço inoxidável lean duplex UNS S32304 .....                                                                  | 43  |
| Tabela 5: Propriedades Mecânicas do aço inoxidável lean duplex UNS S32304 .....                                                           | 44  |
| Tabela 6: Composição química aço inoxidável super duplex UNS S32760 .....                                                                 | 45  |
| Tabela 7: Propriedades Mecânicas do aço inoxidável super duplex UNS S32760 .....                                                          | 45  |
| Tabela 8: Composição química vareta SFA 5.9 AWS ER 2594. ....                                                                             | 46  |
| Tabela 9: Dimensões e quantidades de corpos de prova. ....                                                                                | 48  |
| Tabela 10: Parâmetros de soldagem dos corpos de prova. ....                                                                               | 55  |
| Tabela 11: Parâmetros de soldagem utilizados para o CP 01 .....                                                                           | 56  |
| Tabela 12: Parâmetros de soldagem utilizados para o CP 02 .....                                                                           | 57  |
| Tabela 13: Parâmetros de soldagem utilizados para o CP 03 .....                                                                           | 58  |
| Tabela 14: Valores para base de cálculo do aporte de calor do CP 01 .....                                                                 | 60  |
| Tabela 15: Valores para base de cálculo do aporte de calor do CP 02 .....                                                                 | 61  |
| Tabela 16: Valores para base de cálculo do aporte de calor do CP 03 .....                                                                 | 62  |
| Tabela 17: Valores de % de ferrita / austenita para o CP 01 .....                                                                         | 76  |
| Tabela 18: Valores de % de ferrita / austenita para o CP 02. ....                                                                         | 87  |
| Tabela 19: Valores de % de ferrita / austenita para o CP 03 .....                                                                         | 95  |
| Tabela 20: Resultado da medição de microdureza no CP 01 - Face / Raiz .....                                                               | 101 |
| Tabela 21: Resultado da medição de microdureza no CP 02 - Face / Raiz .....                                                               | 102 |
| Tabela 22: Resultado da medição de microdureza no CP 03 - Face / Raiz .....                                                               | 103 |

**LISTA DE EQUAÇÕES**

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| Equação 1: Cr Eq .....                                  | 5  |
| Equação 2: Ni Eq.....                                   | 5  |
| Equação 3: PRENn.....                                   | 9  |
| Equação 4: PRENw .....                                  | 9  |
| Equação 5: Equação de aporte de calor (heat input)..... | 40 |

**LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS**

|                  |                                            |
|------------------|--------------------------------------------|
| Ar               | Argônio                                    |
| AID              | Aço inoxidável duplex                      |
| AISD             | Aço inoxidável supersuplex                 |
| ASME             | American society mechanical engineers      |
| ASTM             | American society for testing and materials |
| AWS              | American welding society                   |
| BPVC             | Boiler and Pressure Vessel Code            |
| C                | Carbono                                    |
| CA               | Corrente alternada                         |
| CC               | Corrente Contínua                          |
| CCC              | Cúbica de corpo centrado                   |
| CCEN             | Corrente contínua com eletrodo no negativo |
| CCEP             | Corrente contínua com eletrodo no positivo |
| CFC              | Cúbica de face centrada                    |
| CJ               | Cobre junta                                |
| Cr               | Cromo                                      |
| Cr <sub>eq</sub> | Cromo equivalente                          |
| Cu               | Cobre                                      |
| DAO              | Descarburização argônio-oxigênio           |
| ED               | Ensaio destrutivo                          |
| EVS              | Ensaio visual de Solda                     |
| END              | Ensaio não destrutivo                      |
| Ep               | Potencial de passivação                    |
| Epit             | Potencial crítico de pite                  |
| Fe               | Ferro                                      |
| GTAW             | Gas tungsten arc weld                      |
| HAZ              | Heat Affected Zone                         |
| Ianodo           | Corrente anódica                           |
| Icatodo          | Corrente catódica                          |
| Icorr            | Corrente de corrosão                       |
| LP               | Ensaio de liquido penetrante               |

|                  |                                                 |
|------------------|-------------------------------------------------|
| MA               | Metal de adição                                 |
| MB               | Metal base                                      |
| Mn               | Manganês                                        |
| Mo               | Molibdênio                                      |
| MP               | Matéria prima                                   |
| N                | Nitrogênio                                      |
| Nb               | Nióbio                                          |
| Ni               | Níquel                                          |
| Ni <sub>eq</sub> | Níquel equivalente                              |
| PH               | Potencial Hidrogeniônico                        |
| PRE              | Pitting resistance equivalent                   |
| PRE <sub>n</sub> | Pitting resistance equivalent number            |
| PRE <sub>w</sub> | Pitting resistance equivalent number (Tungsten) |
| RAD              | Ensaio de radiografia                           |
| Si               | Silício                                         |
| TC               | Test Coupon                                     |
| Ti               | Titânio                                         |
| TIG              | Tungsten inert gás                              |
| UNS              | Unifed numbering system                         |
| US               | Ensaio de ultrassom                             |
| W                | Tungstênio                                      |
| ZL               | Zona de ligação                                 |
| ZAC              | Zona afetada pelo calor                         |
| ZF               | Zona fundida                                    |
| ≈                | Aproximadamente                                 |
| α                | Ferrita                                         |
| α'               | Ferrita secundária                              |
| γ                | Austenita                                       |
| γ'               | Austenita secundária                            |
| σ                | Sigma                                           |
| χ                | Chi                                             |
| Π                | Pi                                              |

## **SUMÁRIO**

|                                                                                      |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------|
| DEDICATÓRIA.....                                                                     | ii   |
| AGRADECIMENTOS .....                                                                 | iii  |
| CURRICULUM VITAE.....                                                                | iv   |
| RESUMO.....                                                                          | v    |
| ABSTRACT.....                                                                        | vii  |
| LISTA DE FIGURAS.....                                                                | ix   |
| LISTA DE TABELAS.....                                                                | xiii |
| LISTA DE EQUAÇÕES .....                                                              | xiv  |
| LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS .....                                       | xv   |
| SUMÁRIO.....                                                                         | xvii |
| 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA .....                                                  | 1    |
| 2. Revisão Bibliográfica.....                                                        | 5    |
| 2.1 Aços inoxidáveis.....                                                            | 5    |
| 2.1.1 Aços Inoxidáveis Duplex.....                                                   | 7    |
| 2.1.2 Composição Química do Aço Inoxidáveis Duplex .....                             | 10   |
| 2.1.3 Principais Propriedades das Estruturas Cristalinas CCC e CFC.....              | 14   |
| 2.1.4 Microestruturas dos Aços Inoxidáveis Duplex .....                              | 14   |
| 2.2 Características Metalúrgicas .....                                               | 19   |
| 2.2.1 Fase Terciária dos Aços Inoxidáveis Duplex .....                               | 20   |
| 2.2.2 Precipitação Nitretos de Cromo ( $\text{Cr}_2\text{N}$ e $\text{CrN}$ ).....   | 22   |
| 2.2.3 Austenita Secundária.....                                                      | 23   |
| 2.2.4 Ferrita Secundária .....                                                       | 24   |
| 2.2.5 Fase Sigma.....                                                                | 24   |
| 2.2.6 Fase Chi ( $\chi$ ).....                                                       | 25   |
| 2.3 Propriedades Mecânicas dos Aços Inoxidáveis Duplex.....                          | 25   |
| 2.4 Resistência à corrosão nos AID .....                                             | 26   |
| 2.5 Microdureza nos AID .....                                                        | 27   |
| 2.6 Fluxo de calor durante a soldagem.....                                           | 27   |
| 2.6.1 História Térmica.....                                                          | 27   |
| 2.6.2 Ciclos Térmicos.....                                                           | 28   |
| 2.6.3 Fluxo de massa e transformações na poça de fusão durante a solidificação. .... | 31   |
| 2.6.4 Transformações na zona afetada pelo calor .....                                | 31   |
| 2.6.5 Espessura da chapa .....                                                       | 32   |
| 2.7 Processo de Soldagem dos AID .....                                               | 32   |
| 2.7.1 Processo de Soldagem GTAW .....                                                | 34   |
| 2.7.1.1 Comportamento do arco elétrico em corrente contínua.....                     | 36   |
| 2.7.1.2 Equipamentos.....                                                            | 36   |
| 2.7.1.3 Consumíveis .....                                                            | 38   |
| 2.7.1.4 Técnicas e parâmetros para soldagem de AID.....                              | 39   |

|         |                                                           |     |
|---------|-----------------------------------------------------------|-----|
| 2.7.1.5 | Efeitos da soldagem na transformação microestrutural..... | 40  |
| 3.      | Objetivos.....                                            | 42  |
| 4.      | Materiais e Métodos.....                                  | 43  |
| 4.1     | Materiais.....                                            | 43  |
| 4.1.1   | Metal Base lean duplex UNS S32304.....                    | 43  |
| 4.1.2   | Metal Base super duplex UNS S32760.....                   | 44  |
| 4.2     | Consumíveis.....                                          | 45  |
| 4.2.1   | Metal de Adição.....                                      | 45  |
| 4.2.2   | Gás de Proteção.....                                      | 46  |
| 4.3     | Corpos de Prova.....                                      | 48  |
| 4.3.1   | Preparação dos Corpos de Prova.....                       | 49  |
| 4.4     | Processo de Soldagem.....                                 | 50  |
| 4.4.1   | Equipamentos utilizados.....                              | 52  |
| 4.4.2   | Parâmetros de Soldagem.....                               | 55  |
| 4.4.3   | Sequencial de Soldagem.....                               | 56  |
| 4.4.4   | Aporte de Calor.....                                      | 59  |
| 4.5     | Análise Microestrutural.....                              | 63  |
| 4.5.1   | Análise da fração volumétrica de ferrita e austenita..... | 64  |
| 4.5.2   | Contagem de Ferrita x Austenita.....                      | 66  |
| 4.6     | Ensaio de Microdureza.....                                | 96  |
| 4.6.1   | Determinação das áreas.....                               | 96  |
| 5.      | Resultados e Discussões.....                              | 100 |
| 5.1     | Microdureza.....                                          | 100 |
| 5.1.1   | Comparativo dos Metais Base.....                          | 104 |
| 5.1.2   | Comparativo das Zonas Afetadas pelo Calor.....            | 105 |
| 5.1.3   | Comparativo das Zonas Fundidas.....                       | 109 |
| 5.2     | Análise Microestrutural.....                              | 110 |
| 6.      | Conclusões.....                                           | 115 |
| 7.      | Sugestões de Trabalhos Futuros.....                       | 116 |
| 8.      | Referências Bibliográficas.....                           | 117 |
| 9.      | Anexos.....                                               | 122 |
|         | Anexo A – Certificado Vareta ER 2594.....                 | 122 |
|         | Anexo B – Certificado Gás ATAL SD.....                    | 123 |

## **1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA**

Os aços inoxidáveis duplex são ligas Fe-Cr-Ni-Mo que possuem entre seus elementos de liga o nitrogênio substituindo parcialmente o níquel <sup>[1]</sup>, melhorando dessa forma a resistência mecânica e a resistência à corrosão. A origem desses aços se deu por acaso na França devido a um erro durante o processamento de um aço inox comum. As concentrações químicas do Cromo, Níquel e Molibdênio foram alteradas formando assim um novo composto. A descoberta da microestrutura duplex foi descrita pela primeira vez por Bain e Griffiths <sup>[2]</sup> em 1927, quando eles publicaram informações sobre um aço de estrutura ferrítica-austenítica, tratava-se de uma liga ferrosa com um teor de Cromo entre 23 e 30% e Níquel entre 1,2 e 9,7%.

Essa informação chamou a atenção de metalurgistas, que enxergaram no desenvolvimento de uma liga ferrítica-austenítica a solução para minimizar o problema de corrosão das ligas austeníticas <sup>[3]</sup> <sup>[4]</sup>, porém esse liga ferrítica-austenítica só começou a ser produzida comercialmente após os anos 30 em pequena escala, nessa época os aços inoxidáveis utilizados comercialmente eram, os martensíticos os austeníticos e os ferríticos. Quando comparamos aços inoxidáveis duplex com os outros aços inoxidáveis, podemos destacar algumas vantagens dos AID<sub>ex</sub>:

- elevada resistência mecânica; reduzindo a espessura e o peso dos equipamentos.
- superior resistência a corrosão; aumentando o tempo de vida útil e menor necessidades de paradas para manutenção e/ou substituição

dos componentes dos equipamentos, além do menor custo de produção devido utilização de elementos com menor preço no mercado internacional.

Com essa descoberta percebeu-se que os AID e AISD eram uma excelente alternativa em relação aos outros aços inoxidáveis que eram mais suscetíveis a trinca por corrosão <sup>[5]</sup>. Uma das dificuldades em se trabalhar com aços inoxidáveis duplex é quando se faz necessário a realização da junção desses materiais através do processo de soldagem.

A soldagem pode alterar prejudicialmente a microestrutura do material principalmente na região da ZAC da última camada de solda (acabamento), camada essa que não sofrera alteração microestrutural do passe seguinte uma vez que a soldagem já está concluída, podendo ocasionar corrosão por pite na região que está em contato com o meio ou produto, com dificuldades ainda maiores na soldagem de juntas dissimilares entre lean duplex (PREN  $\approx$  23,0) e super duplex (PREN  $\approx$  40,0), esse último na maioria dos casos com adição do elemento W (tungstênio) em sua composição química.

Essas qualidades dos AID têm sido cada vez mais estudadas no Brasil devido às importantes descobertas do setor Petroquímico principalmente as relacionadas ao Pré Sal, por se tratar de ambientes com condições severas de serviço, tais como meio ambiente altamente agressivo, de alta pressão e de difícil acesso para montagem e manutenção dos equipamentos, com graves consequências financeiras e ambientais no caso de acidentes por falha mecânica ou de proteção corrosiva.

Dentre os métodos de soldagem conhecidos, o método denominado GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) se destaca por apresentar bom aspecto do cordão de solda (acabamento suave e liso), pela ausência de respingos e escórias (o que evita trabalhos posteriores de limpeza) e por sua aplicabilidade em espessuras mais finas (a partir de 0,3 mm). A soldagem GTAW pode ser utilizada com ou sem metal de adição, sendo necessária a utilização de gás de proteção e na maioria dos casos de soldagem dos AID e AISD faz-se necessária também a utilização de gás de purga para proteção da raiz que pode ou não ser o mesmo utilizado para a estabilização do arco elétrico e proteção da poça de fusão.

O gás de purga pode ser substituído por proteção com cobre junta cerâmico ou cobre junta de fibra de vidro.

Nesse estudo foi utilizado cobre junta cerâmico na raiz uma vez que a região de maior interesse para esse estudo é a região da face. Nesse trabalho realizou - se a soldagem de juntas dissimilares de lean duplex de UNS S32304 com super duplex de UNS S32760, através do processo GTAW com acabamento da última camada através da técnica de passe de reaquecimento na face da solda, realizando - se a comparação quando utilizamos o passe de reaquecimento em ambos os materiais, apenas no lean duplex de UNS S32304 e sem a utilização do reaquecimento.

Essa técnica consiste em realizar a soldagem de um novo passe em uma nova camada na ZF da solda já acabada, a fim de verificar a quantidade de transformação de ferrita da ZAC em austenita, o que ocasionaria uma maior

resistência à corrosão dessa região e como consequência menor probabilidade de corrosão por pite ou trincas por corrosão na ZAC.

Esse trabalho justifica-se com a proposta de compreender melhor as alterações microestruturais existentes entre as regiões da ZF, ZAC, ZL a fim de garantir que a região soldada não tenha uma microestrutura muito diferente do metal de base.

Caso a ZF e a ZAC tenham uma microestrutura muito diferente do metal de base, suas vantagens em relação a propriedade mecânicas e de corrosão podem ser perdidas <sup>[1]</sup>.

## **2. Revisão Bibliográfica**

### **2.1 Aços inoxidáveis**

Os aços inoxidáveis foram desenvolvidos no início do século XX no Reino Unido e na Alemanha. Até 1930 os três tipos de aços inoxidáveis conhecidos e utilizados pela indústria eram os martensíticos, ferríticos e austeníticos, sendo que o mais usual dos três era os austeníticos <sup>[3]</sup> <sup>[4]</sup>.

Os aços inoxidáveis são, basicamente, ligas FeCrNi com teores de Cr maiores que 12% em peso. Os aços inoxidáveis podem apresentar matrizes ferríticas, martensíticas, austeníticas ou duplex (austeníticas ferríticas) em função da composição química dos mesmos. Outros elementos de liga como: C, Mn, Mo, N, Nb, Ti, W, Cu e Si são comuns nos aços inoxidáveis sendo encontrados em diferentes percentuais nas composições químicas dos aços inoxidáveis comerciais. Para simplificar o entendimento da solidificação e das transformações de fase dos aços inoxidáveis, utiliza-se os conceitos de Cromo equivalente e Níquel equivalentes; <sup>[6]</sup> indicados nas equações 1 e 2 abaixo:

#### **Equação 1: Cr Eq**

$$\text{Cr}_{\text{Eq}} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1,5\% \text{Si} + 0,5\% \text{Nb}$$

#### **Equação 2: Ni Eq**

$$\text{Ni}_{\text{Eq}} = \% \text{Ni} + 0,5\% \text{Mn} + 30\% \text{C} + 30\% \text{N}$$

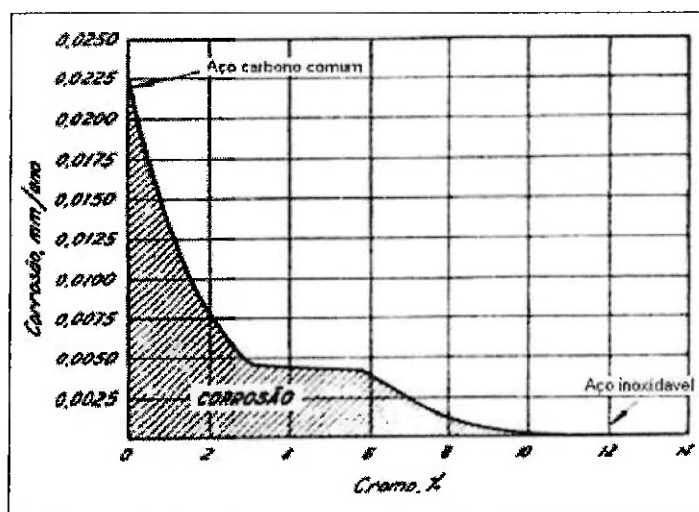
Os aços inoxidáveis são assim denominados por possuírem uma película superficial aderente, chamada de película ou filme passivo de óxido, composta em sua maioria de óxido de Cromo, que reduz a corrente de corrosão a níveis insignificantes, protegendo-os de ações de agentes

corrosivos, tais como: atmosfera, meios aquosos ou orgânicos, entre outros. A formação deste filme passivo deve-se principalmente ao cromo que ao entrar em contato com o oxigênio, presente no ar, forma uma fina película de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (Óxido de Cromo).

Todavia, dependendo do PH e temperatura existente no meio, a resistência à corrosão pode diminuir sujeitando o aço a corrosão.

A figura 1 mostra a taxa de corrosão dos aços em função do % de Cromo.

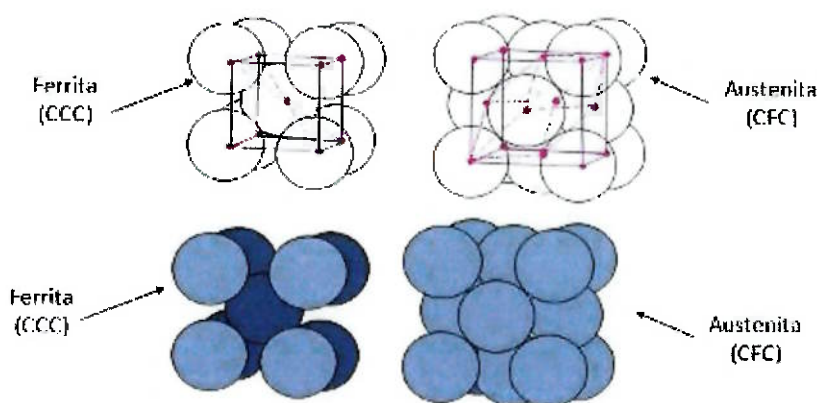
Na indústria, os aços inoxidáveis duplex são de extrema importância, uma vez que são utilizados na fabricação de equipamentos para o processamento de produtos em diversos setores (Químico, Petroquímico, Óleo e Gás, Papel e Celulose, Farmacêutico, Sucroetanol, Alimentício, entre outros). A opção por esses materiais diminui a espessura dos equipamentos uma vez que sua resistência mecânica é maior que a dos aços inoxidáveis comuns e garante uma melhor proteção à corrosão devido a suas características microestruturais e elementos químicos que compõem sua composição.



**Figura 1:** Gráfico taxa de corrosão dos aços em função do percentual de cromo presente na composição química. <sup>[7]</sup>

### 2.1.1 Aços Inoxidáveis Duplex

Os aços inoxidáveis duplex, geralmente tratados apenas por aços duplex, já existem a mais de 80 anos e são ligas baseadas no sistema FeCrNiMo, que apresentam uma microestrutura bifásica de ferrita (estrutura cristalina, cúbica de corpo centrado) e austenita (estrutura cristalina, cúbica de face centrada).



**Figura 2:** Estrutura cristalina CCC e CFC de um aço duplex.

Em 1937, o duplex contendo cobre como elemento de liga começou a ser utilizado e suas aplicações apresentavam melhor resistência à corrosão em relação às ligas usadas na época. Esses materiais foram denominados "Novas Ligas Inoxidáveis". Durante o mesmo período (1930 – 1940), as pesquisas e as produções industriais de aços inoxidáveis duplex foram realizadas paralelamente na Suécia, França e nos Estados Unidos.

Em 1940, a patente referente à fabricação dos AID com adição dos elementos de liga, cobre e molibdênio possibilitou o tratamento térmico da liga na faixa de 400 e 500°C, proporcionando o endurecimento do material, sem afetar a resistência à corrosão ou causar fragilidade [8] e [9]. Naquela

época, era difícil controlar os níveis de oxigênio, enxofre e carbono principalmente para valores muito baixos e também era desconhecido o efeito da adição do nitrogênio na estabilidade estrutural do aço. Os aços inoxidáveis duplex, principalmente na forma de produtos planos, apresentavam quantidades elevadas de trincas. Em sua primeira geração, o duplex apresentou limitações no seu uso. O aço inoxidável era empregado apenas operações onde não era necessário o processo de junção por soldagem, já que na região da zona afetada pelo calor (ZAC) a microestrutura apresentava-se desbalanceada com excessivo teor de ferrita (CCC). Como resultado obtinha-se uma dureza maior e uma redução da resistência à corrosão significativa em relação ao metal de base.

Com a adição de nitrogênio à liga, houve uma melhora das propriedades mecânicas e de corrosão do aço, dando origem à “Segunda geração do aço inoxidável duplex”.

A adição deste elemento de liga foi possível devido à invenção do processo de Descarburização a Argônio e Oxigênio (DAO) para o refino do aço. A zona afetada pelo calor obtida após a soldagem do aço duplex da segunda geração fornecia dureza e resistência à corrosão bem próximas a do metal de base. A “Terceira geração de aço inoxidável duplex” conhecido como hiperduplex é de patente relativamente nova (início do século XXI).

Uma maneira de se quantificar empiricamente a resistência à corrosão por pite, que é uma forma de ataque químico em ambientes contendo íons halogênio (íon cloreto  $\text{Cl}^-$ ), é através da fórmula PREN (*Pitting Resistance Equivalent*), ou  $\text{PREN}_N$  (equação 3) e  $\text{PREN}_W$  (equação 4) <sup>[3]</sup>, quando tratamos

de materiais que possuem o elemento Tungstênio (W) em sua composição. Segundo Gunn<sup>[3]</sup>, tanto a equação 3 quanto a equação 4 são corretas, essa última é mais utilizada para os aços mais modernos devido a utilização de W.

**Equação 3: PRENn**

$$PREN_N = \%Cr + 3,3 \times (\%Mo) + 16x(\%N)$$

**Equação 4: PRENw**

$$PREN_W = \%Cr + 3,3 \times (\%Mo + 0,5 \%W) + 16x(\%N)$$

No Brasil, especificamente no setor Petroquímico, devido principalmente a utilização de normas técnicas de referência para a fabricação e inspeção de equipamentos, elaboradas e fornecidas pela Petrobras, os diferentes tipos de aços inoxidáveis duplex são usualmente separados em três grupos, com relação à composição química e ao PREN:

- a) Aços inoxidáveis duplex ex: (UNS S32304): devido ao menor teor de elementos de liga são materiais econômicos, possuem baixo teor de Níquel na composição química (1,35 a 6,50 % em peso) com PREN variável de 23 até 35.
- b) Aços inoxidáveis super duplex ex: (UNS S32760): devido ao médio teor de elementos de liga e em alguns casos com adição de W (Tungstênio) são materiais pouco econômicos e de dificuldade de soldagem moderada, possuem médio teor de Níquel na composição química (4,5 a 8,0 % em peso) com PREN variável de 35 a 48.
- c) Aços inoxidáveis hiperduplex ex: (UNS S32707): devido ao alto teor de elementos de liga Cr (26,0 a 33,0 % em peso) e Ni (5,5 a 9,0 % em

peso) são materiais pouco econômicos e de dificuldade de soldagem moderada, possuem PREN com valor resultante maior ou igual a 48.

Os aços inoxidáveis duplex de forma geral apresentam boa soldabilidade, e são enquadrados com "*P number*" 10H, conforme tabela QW-422 da norma *ASME BPVC Seção IX*. A dificuldade maior em realizar a soldagem desses materiais ocorre quando necessitamos realizar soldagem dissimilar de aços duplex com PREN com valores muito distantes um do outro.

### 2.1.2 Composição Química do Aço Inoxidáveis Duplex

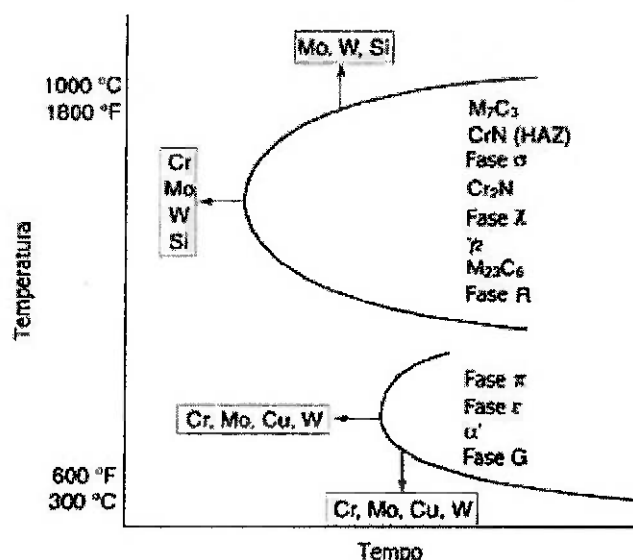
Os principais elementos de liga, além do ferro, formadores do aço inoxidável duplex são:

- Cromo (Cr): é o elemento responsável pela formação da película passiva, principal formador de óxido da camada protetora, sua concentração em peso nos duplex é de no mínimo 22%. O Cr estabiliza a estrutura cúbica de corpo centrado, ele é estabilizador da estrutura ferrítica. Deve-se controlar a concentração deste elemento de liga, pois, em altas concentrações, ele promove a formação de compostos intermetálicos <sup>[10]</sup>, quanto maior for o teor de Cr maior deverá ser o teor de Ni (formador de austenita) a fim de garantir um balanceamento entre as fases austenita e ferrita. Porém deve-se observar que um teor muito alto de Cr poderá ter um efeito negativo promovendo a precipitação de fases intermetálicas conforme apresentado na figura 3.

- Molibdênio (Mo): Aumenta a passividade e a resistência química dos aços inoxidáveis. Sua ação é especialmente importante no aumento da resistência à corrosão por pite e por frestas, atua conjuntamente com o Cr para formar a fase ferrítica. Em altas concentrações, assim como o Cr, contribui para geração de compostos intermetálicos prejudiciais à liga <sup>[10]</sup>.
- Níquel (Ni): atua na formação da estrutura austenítica por provocar a mudança da estrutura básica do aço para cúbica de face centrada, conferindo maior ductilidade, resistência mecânica e soldabilidade além de atrasar a formação de fases intermetálicas, tornando o aço não magnético. Associado ao Cromo favorece o aumento da resistência à corrosão <sup>[10]</sup>. O excesso de Ni pode levar ao desbalanceamento entre as fases ferrita e austenita. O percentual de austenita pode superar demasiadamente os 50%. A consequência disso é que a ferrita restante apresentará uma concentração excessiva de Cr e Mo, com isso haverá o risco da ferrita transformar-se facilmente em uma fase intermetálica quando exposta a uma temperatura entre 650 e 900° C.
- Nitrogênio (N): é um forte formador de austenita. O nitrogênio garante a elevada resistência mecânica (pela formação de uma solução sólida com a base metálica). Este elemento retarda a precipitação de carbonetos de cromo em temperaturas de tratamento entre 650 e 900°C, devido à formação preferencial de nitretos, evitando assim um empobrecimento acentuado de cromo

em regiões intergranulares nessas condições <sup>[11, 12]</sup>. É usado também para reduzir o preço do material uma vez que ao adicionarmos esse elemento podemos reduzir significativamente a adição de Ni. Pode ser adicionado também durante o processo de soldagem quando constituinte do gás de proteção e/ou purga.

- Manganês (Mn): Sua principal função é de anular o efeito de impurezas nos aços, como exemplo, o oxigênio e o enxofre. Pequenas quantidades deste elemento, associadas à presença de níquel, melhoram substancialmente a resistência mecânica, por outro lado, diminui sua ductibilidade.
- Cobre (Cu): Apresenta boa condutividade térmica, elétrica e boa usinabilidade. Sua presença aumenta a resistência à corrosão por via úmida; no entanto, provoca aumento na cinética de precipitação da fase sigma.
- Tungstênio (W): A adição de Tungstênio em teores de até 2% melhora a resistência a corrosão, por pite e por frestas principalmente em ambientes clorídricos devido à colaboração do W na estabilização da camada passiva de óxidos. Porém, o W facilita a formação de fases intermetálicas entre 700 e 1000° C e também facilita a formação de austenita secundária na poça de fusão no caso de juntas soldadas <sup>[3]</sup>.
- Carbono (C): causa endurecimento e aumento na resistência mecânica da liga. Porém, associado ao cromo prejudica a resistência à corrosão.



**Figura 3:** Curva TTT típica de um aço super duplex destacando o efeito de alguns elementos de liga na formação de precipitados [3].

Algumas composições químicas de aço inoxidável duplex podem ser encontradas na tabela 1.

**Tabela 1:** Composição química dos AID conforme norma Petrobras N-133

| Grade                          | UNS N° | EN N°  | C    | Cr        | Ni        | Mo        | N         | Mn      | Cu        | W       | PREN |
|--------------------------------|--------|--------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|---------|------|
| <b>Duplex - 22 Cr standard</b> |        |        |      |           |           |           |           |         |           |         |      |
| LDX2101                        | S32101 | 1,4162 | 0,04 | 21,0-22,0 | 1,35-1,7  | 0,1-0,8   | 0,2-0,25  | 4,0-6,0 | 0,1-0,8   | -       | 28,0 |
| 2205                           | S31803 | 1,4462 | 0,03 | 21,0-23,0 | 4,5-6,5   | 2,5-3,5   | 0,08-0,20 | 2,00    | -         | -       | 30,5 |
| 2205                           | S32205 | 1,4462 | 0,03 | 22,0-23,0 | 4,5-6,5   | 3,0-3,5   | 0,14-0,20 | 2,00    | -         | -       | 34,1 |
| 2304                           | S32304 | -      | 0,03 | 21,5-24,5 | 3,0-5,5   | 0,05-0,60 | 0,05-0,20 | 2,50    | 0,05-0,60 | -       | 23,0 |
| <b>Superduplex - 25Cr</b>      |        |        |      |           |           |           |           |         |           |         |      |
| 2520                           | S32520 | 1,4507 | 0,03 | 24,0-26,0 | 5,5-8,0   | 3,0-4,0   | 0,20-0,35 | 1,50    | 0,5-2,0   | -       | 37,1 |
| 2507                           | S32750 | 1,4410 | 0,03 | 24,0-26,0 | 6,0-8,0   | 3,0-5,0   | 0,24-0,32 | 1,20    | 0,50      | -       | 37,7 |
| Zeron100                       | S32760 | 1,4501 | 0,03 | 24,0-26,0 | 6,0-8,0   | 3,0-4,0   | 0,20-0,30 | 1,00    | 0,5-1,0   | 0,5-1,0 | 40,0 |
| <b>Hiperduplex</b>             |        |        |      |           |           |           |           |         |           |         |      |
| 2707                           | S32707 | -      | 0,03 | 26,0-29,0 | 5,50-9,50 | 4,0-5,0   | 0,30-0,50 | 1,50    | 1,00      | -       | ≥48  |
| 3207                           | S33207 | -      | 0,03 | 29,0-33,0 | 6,00-9,00 | 3,0-5,0   | 0,40-0,60 | 1,50    | 1,00      | -       | ≥48  |

### 2.1.3 Principais Propriedades das Estruturas Cristalinas CCC e CFC

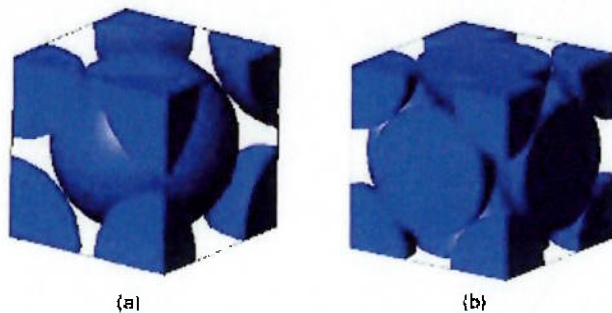
Dentre as principais características das estruturas cristalinas cúbica de corpo centrada (CCC) e cúbica de face centrada podemos destacar:

Cúbica de Corpo Centrada; elevada resistência mecânica, baixa ductilidade, média resistência a corrosão e média soldabilidade.

Cúbica de Face Centrada (CFC); média resistência mecânica, elevada ductilidade elevada resistência a corrosão e ótima soldabilidade.

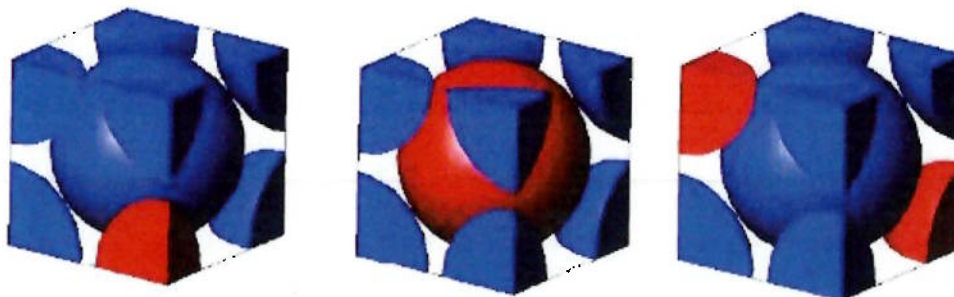
### 2.1.4 Microestruturas dos Aços Inoxidáveis Duplex

A microestrutura para os aços inoxidáveis duplex deve ser aquela contendo proporções 1:1 ou próximas de ferrita e austenita, (ferrita 50%  $\pm$  5%) e (austenita 50%  $\pm$  5%). A ferrita considerada como sendo matriz para aço inoxidável duplex e super duplex consiste de uma fase cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). A austenita que normalmente precipita no estado sólido, é uma fase cúbica de face centrada (CFC) conforme apresentado na figura 4.

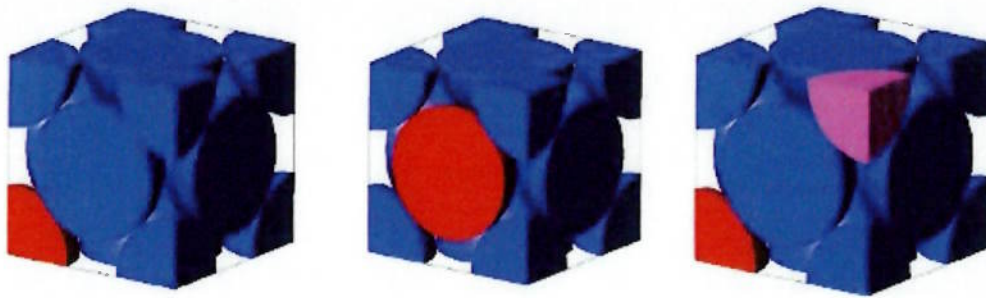


**Figura 4:** Representação das células unitárias CCC (a) e CFC (b) somente com átomos de ferro <sup>[16]</sup>.

Os átomos da figura 4 são representados pelo modelo de esferas rígidas. Nesse modelo são considerados apenas os átomos de ferro, que são predominantes nos aços inoxidáveis. Nos aços inoxidáveis duplex em geral, formam-se soluções sólidas substitucionais tanto na ferrita quanto na austenita, devido principalmente às concentrações de elementos de liga adicionados na composição química do material, entre os quais podemos destacar o Cromo, Níquel e Molibdênio, bem como soluções sólidas intersticiais devido às concentrações de Carbono e Nitrogênio. Alguns exemplos de substitucionais na ferrita podem ser visto na figura 5 e de austenita na figura 6.



**Figura 5:** Representação esquemática de algumas substituições de átomos de Ferro (azul) por átomos de Cromo (vermelho), que podem ocorrer numa célula CCC <sup>[16]</sup>.



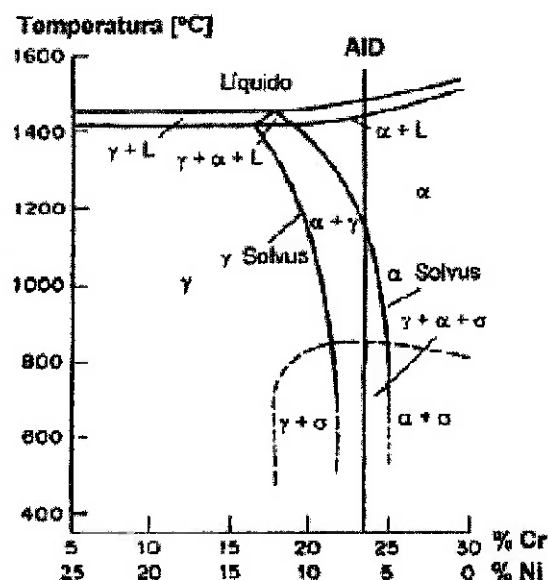
**Figura 6:** Representação esquemática de algumas substituições de átomos de Ferro (azul) por átomos de Cromo (vermelho), e por átomos de Níquel (rosa) que podem ocorrer numa célula CFC <sup>[16]</sup>.

Na prática, é feito um balanceamento dos elementos químicos estabilizadores da ferrita (cromo, molibdênio, titânio, nióbio, silício e alumínio) e dos elementos estabilizadores da austenita (níquel, manganês, carbono e nitrogênio), cada um desses elementos possui um fator de potência, que é proporcional ao efeito no balanço das respectivas fases. Desta forma são determinados o Cromo e Níquel equivalente (Equação 1 e 2).

Os duplex têm, em sua composição, teores maiores de cromo (18% e 28%) e menores de níquel (3,5% - 8%) do que os usualmente encontrados nos aços inoxidáveis austeníticos. Os elementos de liga cromo e níquel são, junto ao ferro, os elementos com maiores teores nos aços inoxidáveis <sup>[13]</sup>. O cromo, que tem a estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), a mesma da ferrita (Fe- $\alpha$ ), tende a estabilizar essa fase e junto ao molibdênio (CCC) auxilia na melhoria da resistência à corrosão uniforme e localizada. Já o níquel, tem estrutura cúbica de face centrada (CFC), a mesma da austenita (Fe- $\gamma$ ), e tende, por sua vez, a estabilizar esta fase <sup>[13, 14]</sup>. Já o nitrogênio favorece e acelera a formação da austenita e atua no endurecimento do material.

Desta forma, a efetividade relativa dos elementos estabilizadores de ferrita é comparada ao Cromo e expressa em termos de Cromo equivalente

( $Cr_{eq}$ ), enquanto elementos que estabilizam a austenita são expressos em termos de níquel equivalente ( $Ni_{eq}$ ). A microestrutura de um aço inoxidável duplex laminado é formada por lamelas alternadas de ferrita ( $\alpha$ ) e austenita ( $\gamma$ ), que são estruturas policristalinas, devido a grande quantidade de elementos de liga a previsão de transformação das fases do sistema binário Fe-Cr-Ni não é tão simples, e podem ser aproximadas utilizando um diagrama ternário de Fe-Cr-Ni. A figura 7 mostra as transformações microestruturais num diagrama pseudo-ternário 70%Fe-Cr-Ni, a solidificação de um AID nessas condições é completamente ferrítica. Na medida em que avança o resfriamento, parte dessa ferrita se transforma no estado sólido em austenita. Com isso na temperatura ambiente obtém-se adquirir a estrutura bifásica ( $\alpha$   $\gamma$ ). Para que isso ocorra as condições de resfriamento devem impedir a formação de outras fases (Sigma ( $\sigma$ ), Chi ( $\chi$ ), Pi ( $\pi$ )) e ausência de carbonetos e nitretos. A decomposição de ferrita em austenita depende da temperatura na qual ela se dá.



**Figura 7:** Seção Vertical de transformações microestruturais num diagrama pseudo-ternário 70%Fe-Cr-Ni <sup>[22]</sup>.

Quando o aço está na condição de estrutura bifásica ( $\alpha$   $\gamma$ ) por volta da temperatura de 1000° C a 1200°C, para % em peso de 20% a 25% Cr e 5% a 10% de Ni, ocorre à laminação a quente dos aços inoxidáveis duplex. No caso dos super duplex essa temperatura pode variar até 1300°C, onde ainda é encontrada a estrutura bifásica. Após todo esse processo é realizado o tratamento térmico de solubilização em temperatura variando de 1050°C a 1150°C, seguindo de um resfriamento rápido, geralmente utilizando um produto não contaminante, (água) até a temperatura ambiente <sup>[23, 24, 25]</sup>. Com esse processamento obtém-se uma microestrutura bifásica (duplex -  $\alpha$   $\gamma$ ), onde a fração de ferrita ( $\alpha$ ) nos aços inoxidáveis modernos é de 40 a 45%. Está fração é explicada pelo incremento dos teores dos elementos estabilizadores da austenita (Níquel, Manganês, Carbono, Nitrogênio, Cobre), visando um melhor controle da microestrutura da Zona Afetada pelo Calor, o teor de ferrita na zona fundida pode variar entre 35% e 65%.

No caso de estruturas brutas de fusão resfriadas rapidamente, como é o caso do metal de adição durante a soldagem, é necessário utilizar os diagramas de Schaeffer <sup>[26]</sup>, Delong <sup>[25, 27]</sup>, WRC-1992 <sup>[28]</sup> e Schoefer <sup>[29]</sup>. Estes diagramas não são adequados para serem utilizados com Aços Inoxidáveis Duplex laminados. Dessa maneira foi desenvolvida uma espécie de diagrama de Schaeffer para os aços inoxidáveis laminados a 1150°C, por Pryce; Andrew e Solomon; Devine <sup>[23]</sup>.

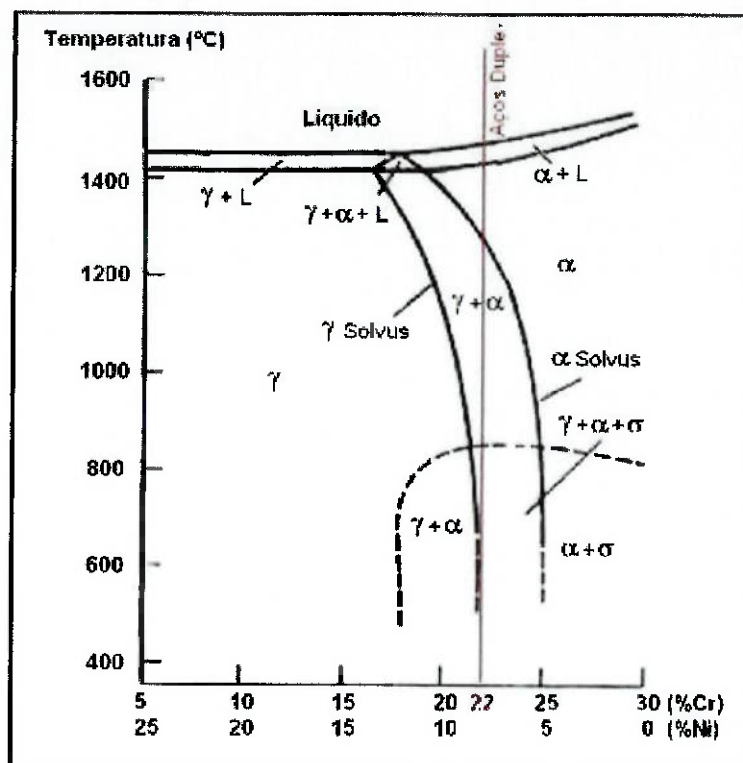
## **2.2 CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS**

Como já mencionado anteriormente, além da ferrita e da austenita outras fases podem precipitar nos duplex, que devido a sua característica bifásica são mais propensos à precipitação de fases do que nos aços inoxidáveis martensíticos, causando assim fragilização e redução da resistência à corrosão.

Os aços super duplex, por terem teores maiores de Cr e Mo, e em alguns casos terem W, são mais susceptíveis à precipitação de fases deletérias do que os duplex. Os duplex que possuem baixos teores de carbono solidificam-se com estrutura ferrítica e a austenita forma-se já no estado sólido, isto é, a fase austenita é formada a partir da fase ferrita inicial. Os que possuem maior teor de carbono, também solidificam a ferrita primeiramente e o carbono enriquece o líquido remanescente, o que condiciona a solidificação posterior da austenita e carbonetos de cromo. A austenita pode ainda, formar-se durante o resfriamento nos grãos de ferrita <sup>[30, 31]</sup>.

Mesmo apresentando um PREn elevado, se comparados aos aços austeníticos ou ferríticos, a resistência à corrosão por pites dos duplex pode se tornar extremamente baixa quando fases terciárias (fases além da ferrita e austenita) estiverem presentes na microestrutura. Assim, fases terciárias provocam efeitos deletérios em aços inoxidáveis duplex.

Segundo Padilha A.F <sup>[32]</sup>, conforme apresentado no diagrama da Figura 8, os aços duplex solidificam-se como ferrita, durante o resfriamento parte da ferrita se transforma em austenita, mas devido à baixa velocidade desta reação, um elevado teor de ferrita é mantido.

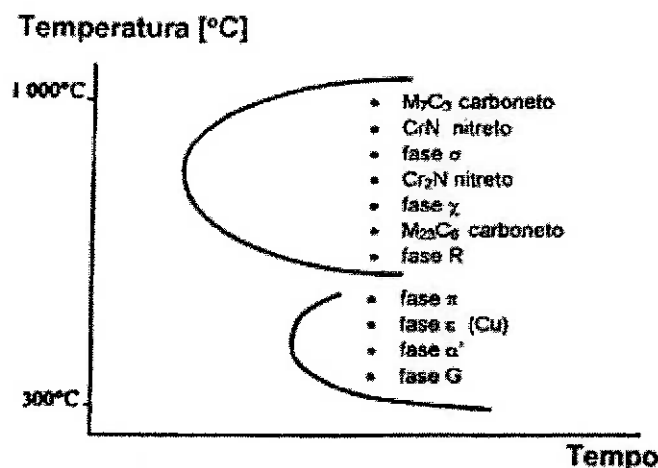


**Figura 8:** Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni para um AID com teor de Cromo de 22% <sup>[32]</sup>.

### 2.2.1 Fase Terciária dos Aços Inoxidáveis Duplex

Os aços inoxidáveis duplex, quando expostos à temperaturas entre 475°C e 1000°C por um período de tempo específico, podem alterar o seu equilíbrio termodinâmico levando o sistema a alcançar uma situação de menor energia, precipitando fases diferentes das originais do sistema duplex e indesejáveis por comprometer as propriedades mecânicas e de resistência a corrosão do material. A exposição do material nesta temperatura pode acontecer como resultado das condições de serviço e devido ao meio ao qual ele está exposto pode ocorrer também devido aos ciclos térmicos de soldagem ou tratamentos térmicos inadequados. Dentre estas fases terciárias, podemos

destacar a Austenita secundária ( $\gamma'$ ), Sigma ( $\sigma$ ), Chi ( $\chi$ ) e Pi ( $\pi$ ), além de nitretos, carbonetos e Ferrita secundária ( $\alpha'$ ) fragilização de 475°, também conhecida com fragilização de baixa temperatura, essa última responsável pela limitação de utilização em serviço dos aços inoxidáveis duplex em temperatura de no máximo 300°C. É importante ressaltar que tanto as propriedades mecânicas, principalmente a tenacidade, quanto às propriedades de resistência à corrosão podem ser prejudicadas de diversas formas, dependendo da fase precipitada. Na figura 9 do gráfico (TTT), tempo-temperatura-transformação, temos uma ideia da influência desses fatores na transformação dessas fases.



**Figura 9:** Diagrama TTT esquemático de precipitação de segundas fases nos Aços Inoxidáveis Duplex <sup>[24]</sup>

Dentre as fases apresentadas na figura 9 podemos destacar as seguintes:

- Nitretos de Cromo ( $\text{Cr}_2\text{N}$ /  $\text{CrN}$ ) - Normalmente encontrados na Zona fundida (Solda)
- Fase Sigma ( $\sigma$ ) – Associada à redução de tenacidade nos AID.

- Ferrita Secundaria ( $\alpha'$ ) – Principal fator limitante para utilização dos AID na máxima temperatura de 300°C.

A seguir na tabela 2, podemos identificar algumas dessas fases terciárias com suas respectivas estruturas cristalinas e sua temperatura de precipitação.

**Tabela 2:** Principais fases terciárias dos aços duplex com suas estruturas cristalinas e temperatura de precipitação <sup>[33]</sup>.

| Fase                                    | Estrutura Cristalina | Temp. de precipitação (°C) |
|-----------------------------------------|----------------------|----------------------------|
| Nitreto ( $\text{Cr}_2\text{N}$ )       | hexagonal            | 550-1000                   |
| Carboneto ( $\text{M}_{23}\text{C}_6$ ) | CFC                  | 550-900                    |
| Sigma ( $\text{FeCr}$ )                 | tetragonal           | 650-1000                   |
| $\alpha'$<br>( $\alpha$ rica em Cr)     | CCC                  | 350-750                    |
| Austenita Secundária                    | CFC                  | 600-1000                   |

### 2.2.2 Precipitação Nitretos de Cromo ( $\text{Cr}_2\text{N}$ e $\text{CrN}$ )

O nitreto de cromo pode surgir nos aços duplex principalmente quando não são adicionados elementos com uma elevada capacidade de formação de nitretos (Ti, Nb ou V), quando o teor de nitrogênio supera o limite de equilíbrio entre a matriz e o  $\text{Cr}_2\text{N}$  a liga se torna termodinamicamente instável e nitretos podem precipitar entre 600 e 1050° C <sup>[34]</sup>. Os  $\text{Cr}_2\text{N}$  precipitam-se na forma de bastonetes já os  $\text{CrN}$  precipitam-se na forma de plaquetas <sup>[35]</sup>, a formação de nitretos de cromo ocorre através da precipitação por nucleação e crescimento, podendo precipitar a partir da ferrita, da austenita ou da interface austenita/

ferrita, essa precipitação é altamente dependente de fatores como a temperatura, composição química do material e de seu histórico térmico. Durante a soldagem geralmente ocorre resfriamento rápido da poça de fusão, isso faz com que durante esse resfriamento ocorra a partir do campo ferrítico, uma disputa entre a precipitação de austenita e nitreto de cromo. Quando analisamos a quantidade de austenita formada e verificamos que essa quantidade está próxima do valor de equilíbrio, podemos afirmar que quase todo o nitrogênio está dissolvido nela, como consequência desse processo de formação de austenita podemos afirmar que a quantidade de precipitados na ferrita ficará praticamente nula. Com base nisso podemos afirmar que se a precipitação de austenita for retardada ou impedida, o nitrogênio irá ficar retido na ferrita e fará com que a ferrita fique supersaturada, precipitando nitretos de cromo na ferrita. Os principais fatores negativos do surgimento dos precipitados de nitretos de cromo na fase ferrita (CCC) são a diminuição das propriedades mecânicas (redução significativa da elasticidade), e diminuição da resistência à corrosão, podendo também ao redor desses precipitados iniciar-se corrosão localizada [36, 37], porém esses fatores não são os únicos responsáveis pela corrosão localizada. Outros fatores como a corrosão galvânica entre a zona empobrecida e a matriz, o desarranjo interfacial nitreto-matriz ou os esforços internos, podem contribuir para que a corrosão localizada aconteça [38].

### 2.2.3 Austenita Secundária

A austenita primária surge abaixo da temperatura solidus durante o processo de resfriamento da material, partindo do campo ferrítico, quando em

condições ideais de resfriamento, caso o resfriamento não seja controlado e ocorra um resfriamento muito rápido a formação da austenita primária terá um elevado teor de ferrita, durante o reaquecimento dessa região, seja por meio isotérmico ou por processo de soldagem essa austenita primária com elevado teor de ferrita se precipitara em austenita secundária <sup>[33]</sup>. A precipitação da fase austenita secundária leva a uma perda na qualidade de resistência a corrosão do material, por outro lado devido a fase austenita ter uma excelente tenacidade a precipitação em austenita secundária causa uma melhora na tenacidade do material <sup>[39-40]</sup>.

#### *2.2.4 Ferrita Secundária*

A ferrita secundária surge nos AID na faixa de 350° a 750°C, essa precipitação caracteriza-se pelo surgimento de ondulações da composição química tornando a ferrita secundária uma região rica em cromo, consequentemente tornando a ferrita em uma matriz pobre em cromo. Os principais efeitos dessa transformação são: o endurecimento, aumento no limite de escoamento, fragilização, aumento na temperatura de transição dúctil-frágil e perda da resistência à corrosão. Por ser mais rápida e intensa na temperatura de 475°C, este tipo de precipitação também é conhecido como fragilização ou endurecimento a 475° <sup>[14]</sup>.

#### *2.2.5 Fase Sigma*

A formação da fase sigma ocorre principalmente pela decomposição da ferrita e ocorre dependendo da composição química do material, é mais

facilmente observada quando temos na composição química dos AID maiores teores de cromo e molibdênio (que são elementos formadores de fase sigma) em temperaturas que variam entre 600° a 950°C. A formação da fase sigma confere dureza e fragilidade, provocando também a diminuição da tenacidade e do alongamento, aumentando a velocidade de corrosão dos AID em até 8 vezes, em contra partida ocorre um aumento da resistência mecânica (limite de escoamento e resistência a tração), que dependendo da aplicação pode ser considerado um efeito positivo <sup>[33-41]</sup>.

#### **2.2.6 Fase Chi ( $\chi$ )**

A formação da fase chi ocorre em temperatura média de 800° a 900° C e pode ser considerada uma percussora da fase sigma, ela se assemelha muito com a fase sigma, tanto nos efeitos que provoca nos AID (mecânicos e de proteção à corrosão), como no aspecto cristalográfico, é uma fase frágil e rica em cromo e molibdênio. A fase chi se distingue da fase sigma por ser mais rica em Mo e por ser metaestável. O aumento dos percentuais de Cr, Mo, W e Si tornam a precipitação de fase chi e sigma mais rápida, assim como o aumento do teor de Mo, Si e W também estende o intervalo de formação de fase sigma para temperaturas mais altas <sup>[42]</sup>.

### **2.3 Propriedades Mecânicas dos Aços Inoxidáveis Duplex**

Como resultado da combinação das composições química e do tratamento térmico realizado para obtenção da ferrita e austenita obtemos as

propriedades mecânicas dos AID <sup>[23]</sup>. A ferrita possui maior limite de escoamento do que a austenita, o que faz que sua quantidade esteja diretamente relacionada à resistência mecânica dos AID. Devido a esse fato o limite de escoamentos dos AID é quase o dobro do que dos aços inoxidáveis austeníticos podendo o alongamento chegar, em alguns casos a até 25%.

**Tabela 3:** Limite de Resistências de alguns AID <sup>[43]</sup>.

| Tipo (UNS) | Composição Química  | Limite de Resistência (Ksi) | Limite de Resistência (Mpa) |
|------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| UNS S31200 | 25Cr-6Ni-Mo-N       | 100                         | 690                         |
| UNS S31803 | 22Cr-5Ni-3Mo-N      | 90                          | 620                         |
| UNS S32205 | 22Cr-5Ni-3Mo-N      | 95                          | 655                         |
| UNS S32304 | 23Cr-4Ni-Mo-Cu-N    | 87                          | 600                         |
| UNS S32550 | 25Cr-5Ni-3Mo-2Cu    | 110                         | 760                         |
| UNS S32760 | 25Cr-8Ni-3Mo-W-Cu-N | 108                         | 745                         |

## **2.4 Resistência à corrosão nos AID**

Por possuir uma estrutura bifásica (ferrita/austenita) os aços inoxidáveis duplex possuem propriedades superiores de resistência mecânica e resistência a corrosão comparável às dos aços inoxidáveis austeníticos, o fato de possuir um teor de níquel menor torna os AID mais econômicos, uma vez que esse elemento é substituível por N como já dito anteriormente. Uma tendência mundial nos dias de hoje é cada vez mais termos aços ligados com nitrogênio na estabilização da austenita diminuindo assim a participação do cromo na ferrita. O resultado disso é uma melhora significativa na resistência a corrosão. A corrosão localizada é superior às dos aços austeníticos e é em

função da resistência a corrosão localizada das fases que compõem a austenita e ferrita uma vez que há influência tanto da razão austenita/ferrita quanto da composição química de cada uma das fases <sup>[44]</sup>.

## **2.5 Microdureza nos AID**

Para uma barra solubilizada os valores de microdureza Vickers das fases ferrita e austenita nos aços inoxidáveis duplex, não apresentam variações circunstanciais ou significativas, os valores da microdureza das fases dependem da composição química e do tratamento térmico realizado devido ao endurecimento por solução sólida substitucional ou intersticial, a ferrita é usualmente mais dura que a austenita, entretanto a participação de nitrogênio na formação da austenita eleva o valor da dureza nessa fase, tornando há mais próxima da dureza encontrada na ferrita <sup>[44]</sup>. Nesse trabalho estaremos apresentando mais adiante um comparativo de microdureza no MB, ZAC (com e sem passe de reaquecimento) e ZF a fim de verificar a relação da dureza com as fases ferrítica e austenítica.

## **2.6 Fluxo de calor durante a soldagem**

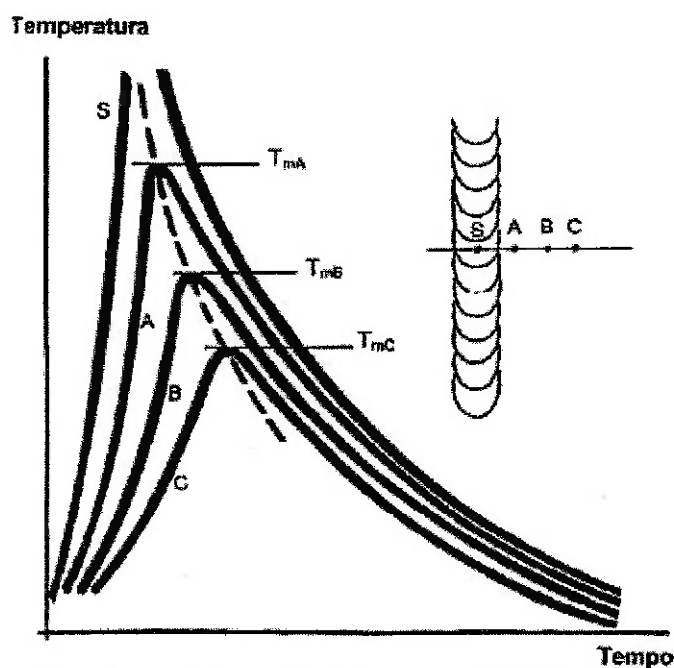
### ***2.6.1 História Térmica***

Os fatores que compõem uma história térmica de uma junta soldada levam em consideração: as propriedades físicas do material, temperatura inicial do metal de base, temperatura interpasse, geometria da junta, energia de

soldagem e formato da fonte de calor, ela é constituída por uma repartição térmica e infinitos ciclos de soldagem.

### 2.6.2 Ciclos Térmicos

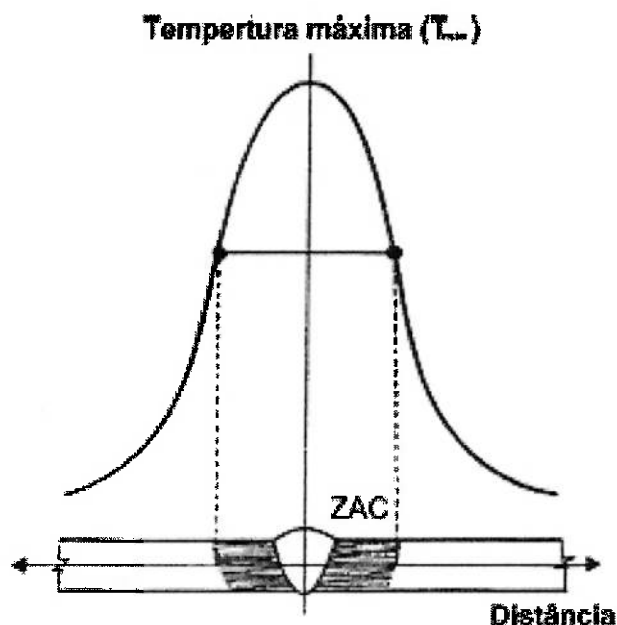
Os ciclos térmicos de soldagem são a representação do tempo e da temperatura em um determinado ponto da junta e está relacionado as diferentes microestruturas nas diferentes regiões da junta soldada. Na figura 10 temos a representação dos diferentes ciclos térmicos, que são afetados entre outras coisas, pela localização da fonte de calor a partir do centro da solda.



**Figura 10:** Ciclos térmicos de soldagem experimentados por diferentes pontos da junta [46].

Podemos definir a repartição térmica como sendo a distribuição da temperatura em função da distância desde o centro da solda, podemos utilizar um gráfico de repartição térmica, figura 11, de uma junta soldada para determinarmos a região afetada pelo calor, região essa que é de extrema

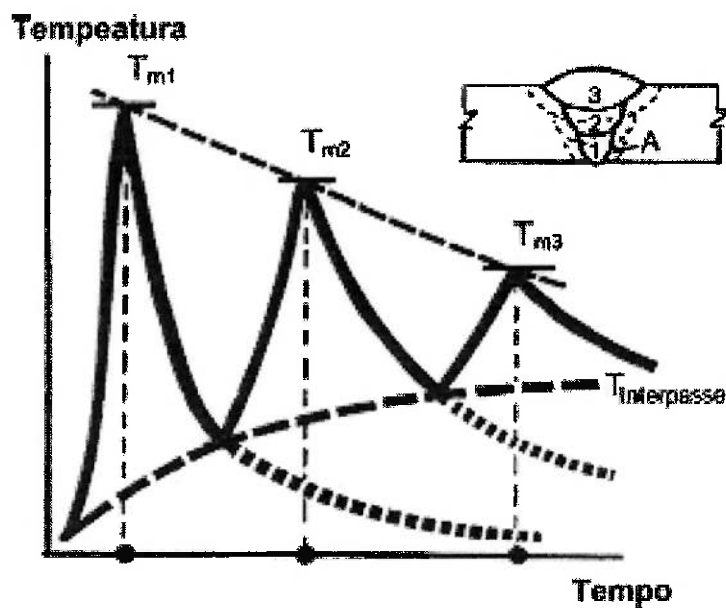
importância, pois ocorrem fenômenos metalúrgicos dependentes, no caso de soldagem manual e semi-automática com arco elétrico, depende também da habilidade do soldador.



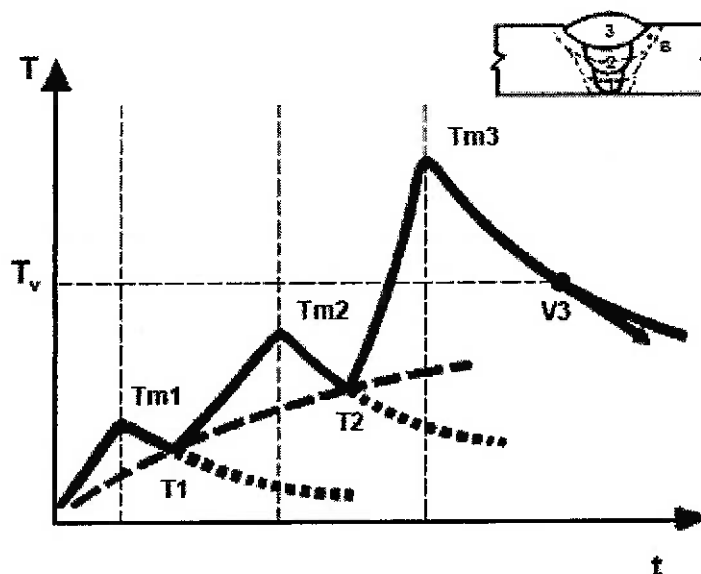
**Figura 11:** Repartição Térmica - Distribuição da temperatura em função da distância ao centro da solda <sup>[46]</sup>.

Baseado nessas informações, podemos prever que quando soldamos uma junta de topo com multipasses, a região da raiz (1º passe / 1ª camada) será submetida ao ciclo térmico da passe seguinte (2º passe / 2ª camada). Conforme mostrado na figura 12, podemos verificar a diminuição na temperatura máxima do 1º passe da 1ª camada, para o 2º passe da 2ª camada, e do 2º passe da 2ª camada para o 3º passe da 3ª camada e assim sequencialmente, fazendo com que cada passe ou camada influencie diretamente na constituição da microestrutura do passe anterior por consequência disso os últimos passes da última camada terão uma microestrutura e uma ZAC diferente da dos passes

anteriores, conforme apresentado na figura 13, para minimizar esse efeito podemos realizar o passe de revenimento "temper bead" ou passe de reaquecimento na última camada, a fim de garantir que a junta soldada, pelo menos na espessura do material, estará com a ZAC e a ZF com características e dureza bem próximas dos passes e camadas anteriores.



**Figura 12:** Ciclos térmico experimentado por um ponto da ZAC próximo da raiz de uma junta de topo com solda multipasse <sup>[46]</sup>.



**Figura 13:** Ciclos térmico experimentado por um ponto da ZAC próximo do último passe de uma junta de topo com solda multipasse <sup>[46]</sup>.

### *2.6.3 Fluxo de massa e transformações na poça de fusão durante a solidificação.*

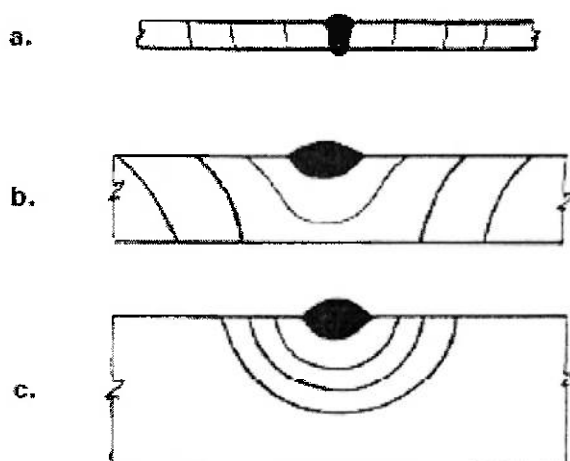
O metal líquido se movimenta na poça de fusão devido principalmente as forças tangenciais ocasionadas pelo gradiente de tensão superficial (efeito Marangoni) e as forças eletromagnéticas existentes, o sentido do fluxo e a transformação das fases austenita-ferrita dependem da composição química do material, do metal de adição, dos gases utilizados para a proteção da poça de fusão e purga durante a soldagem e pelo ciclo térmico que a junta soldada passa.

### *2.6.4 Transformações na zona afetada pelo calor*

As transformações austenita ferrita na zona afetada pelo calor é determinada pelas condições de aquecimento e resfriamento, pela temperatura máxima atingida e pelo tempo que essa temperatura é mantida durante a soldagem, elas são consequência da espessura do material, da energia de soldagem, da temperatura de aquecimento e da temperatura inicial, a soma desses fatores irão definir se a zona afetada pelo calor irá se comportar de maneira igual ou próxima as do metal de base, condição essa que sempre é buscada quando realizamos a junção por soldagem dos materiais.

### 2.6.5 Espessura da chapa

Quando falamos em chapa grossa e chapa fina estamos se referindo principalmente em razão do fluxo de calor, se ele é bidimensional ou tridimensional, no caso de soldagem para de aços com até 12mm a fonte de calor deve ser considerada linear, para espessuras maiores que 25mm deve ser tratado pontualmente, nas espessuras intermediárias  $> 12\text{mm}$  e  $< 25\text{mm}$ , deve se considerar os dois regimes, bidimensional (2D – linear) e tridimensional (3D – pontual) <sup>[47]</sup> conforme apresentado na figura 14.



**Figura 14:** Modelo de fluxo de calor para chapa fina (a), intermediária (b) e grossa (c) <sup>[46]</sup>.

## 2.7 Processo de Soldagem dos AID

Os aços inoxidáveis duplex podem ser soldados pela maioria dos processos de soldagem, tais como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), plasma, eletrodo revestido, arco submerso, resistência elétrica, feixe de elétrons entre outros, ficando limitada sua utilização de acordo com o tipo de

equipamento que está sendo fabricado e a norma de referência que esta sendo utilizada para a sua fabricação. Os AID possuem soldabilidade relativamente boa e muito parecida à dos aços austeníticos, porém, devem-se tomar alguns cuidados especiais com as fragilizações que podem ocorrer durante a soldagem. Estas precipitações estão diretamente relacionadas à história térmica do material soldado e à energia de soldagem utilizada<sup>[48]</sup>.

A energia de soldagem está associada às transformações microestruturais nos AID e ao desempenho da junta soldada, uma energia de soldagem elevada, geralmente, leva a um tempo maior para o resfriamento, favorecendo assim a precipitação de austenita e o equilíbrio microestrutural desejado, todavia uma vez que a energia de soldagem é menor a tendência do resfriamento tende a ser menor favorecendo assim a maior formação de ferrita e causando o desequilíbrio entre as fases.

Durante a soldagem sempre deve se buscar uma condição de energia de soldagem ótima deve-se considerar o fato de que, na soldagem multipasse dos AID, a junta é submetida a vários ciclos térmicos, ocasionados pelos passes seguintes, isto significa que a região soldada passa por aquecimentos e resfriamentos consecutivos, que são facilmente controlados em condições ideais de laboratório, porém de difícil controle no dia a dia, tais variações de temperatura podem modificar a microestrutura original e fazer com que a junta perca suas propriedades de resistência mecânica e resistência a corrosão, afetando o desempenho da junta. Outros fatores importantes que devem ser considerado para a soldagem dos aços inoxidáveis duplex referem-se aos metais de adição, gás de proteção (quando aplicável) e revestimentos no

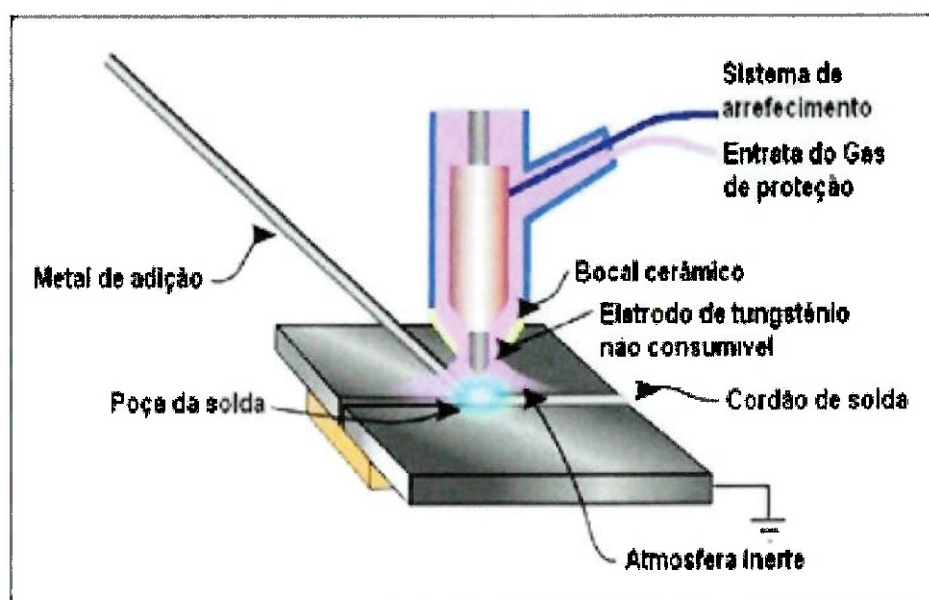
caso de soldagem pelo processo de Eletrodo Revestido. Os consumíveis de soldagem utilizados atualmente são de dois tipos: as ligas de níquel e os de mesma composição do metal de base. A utilização dos consumíveis à base de ligas de níquel, evita a preocupação referente ao balanço de fases e controle microestrutural da zona fundida, pois o níquel atua como estabilizador da fase austenita e retarda a formação de fases intermetálicas. A presença frequente de nióbio e falta de nitrogênio nestas ligas contribuem para a ocorrência de reações metalúrgicas desfavoráveis como a formação de precipitados e regiões com elevado teor de ferrita na zona afetada pelo calor <sup>[48]</sup>.

### *2.7.1 Processo de Soldagem GTAW*

O processo de soldagem GTAW (Gas Tungsten Arc Inert), mais conhecido no Brasil com processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas), foi patenteado no final da década de 20 do século XX, porém só foi começar a ser utilizado comercialmente em 1942, nos Estados Unidos, sua utilização era restrita a soldagem de ligas de magnésio de assentos de aviões. Devido às dificuldades iniciais encontradas para a estabilização do arco, o gás utilizado para a proteção do arco elétrico era o Hélio e a corrente utilizada era a corrente contínua <sup>[49]</sup>.

Hoje em dia quando se faz necessário uma soldagem de precisão e de boa qualidade para ligas de alumínio, magnésio, titânio, aços inoxidáveis e outros o processo de soldagem GTAW tem grande destaque e relevância. No processo de soldagem GTAW um arco elétrico é formado entre um eletrodo de tungstênio não consumível (alojado na tocha) e o metal de base, com a

proteção de um gás ionizado. O calor gerado neste processo funde o MB (no caso de soldagem autógena) ou o metal de adição com o metal base (no caso de soldagem com metal de adição) gerando a chamada poça de fusão, com a movimentação da tocha o arco funde progressivamente a superfície da junta. A adição do material pode ser utilizada por intermédio de vareta ou bobina. A figura 15 esquematiza de forma simplificada o aparato usado no processo de soldagem GTAW.

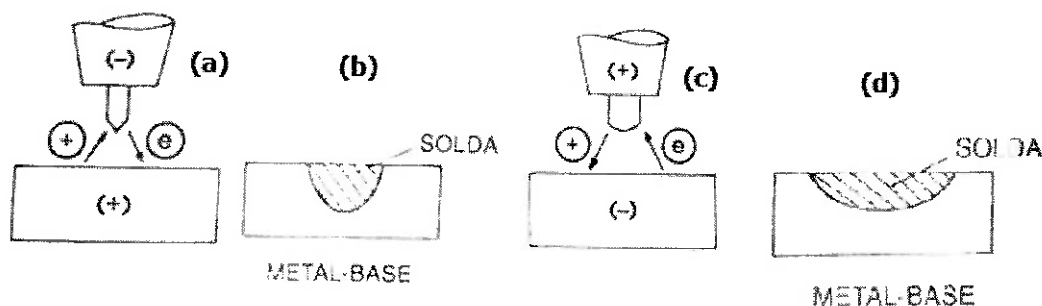


**Figura 15:** Princípio da soldagem manual pelo processo GTAW com metal de adição <sup>[50]</sup>.

Durante o processo de soldagem o arco elétrico atinge elevadas temperaturas, a poça de fusão necessita de uma proteção para evitar a oxidação e a contaminação, os gases mais utilizados para essa proteção são: argônio, hélio ou suas misturas, também podem ser utilizados em casos específicos como mistura de  $H_2$ ,  $N_2$  e  $CO_2$ . Independente de qual gás que está sendo utilizado sua pureza deve ser 99,99% e a presença de vapor d'água deve ser mantida no valor máximo de 11ppm por volume <sup>[49]</sup>.

### 2.7.1.1 Comportamento do arco elétrico em corrente contínua

A soldagem em corrente contínua de polaridade direta (CC-) é utilizada com maior frequência pois, devido ao fato do eletrodo estar na polaridade negativa há um fluxo de íons positivos na direção do eletrodo, com a incidência dos elétrons no metal base, este se torna mais aquecido que o eletrodo conforme apresentado na figura 16 (a), facilitando assim uma penetração grande e estreita conforme apresentado na figura 16 (b). Na soldagem em corrente contínua de polaridade reversa (CC+) o fluxo de íons positivos vão em direção do metal base e o fluxo de elétrons vão em direção do eletrodo conforme apresentado na figura 16 (c), resultando numa penetração pequena e larga conforme apresentado na figura 16 (d).



**Figura 16:** (a) Soldagem GTAW CC- (b) Penetração da solda em CC- (c) Soldagem GTAW CC+ (d) Penetração da solda em CC+ <sup>[49-51]</sup>.

### 2.7.1.2 Equipamentos

Os itens básicos utilizados para soldagem manual pelo processo GTAW são:

- (a) Fonte de Energia Elétrica – Deve ser do tipo tombante, podendo ser operada em corrente contínua ou alternada.

- (b) Tocha (seca ou úmida) - As tochas são as ferramentas que comportam o eletrodo, o sistema de inserção de gás, o bocal e o sistema arrefecedor. São classificadas de acordo com o tipo de refrigeração usado, podendo ser refrigeradas pelo próprio gás utilizado no processo, ou resfriadas com água, quando utilizadas com correntes acima deste valor. Para soldagens que utilizam bobinas com alimentador de arame, com execução de soldagens mais longas e de forma contínua, onde ocorre a permanência de arco aberto por maior tempo, é preferível o uso de tochas com refrigeração a água.
- (c) Bocal cerâmico - Acoplado a tocha tem a função de direcionar o fluxo de gás
- (d) Fonte de Gás de Proteção e/ou purga - Cilindros de gás com reguladores de pressão e fluxo de gás
- (e) Dispositivo para ignição do arco - Permite a abertura de arco de forma suave e no local correto, evitando a abertura por riscamento em local incorreto.
- (f) Cabos e mangueiras - Os cabos são necessários para conduzir a corrente elétrica da fonte ao eletrodo, as mangueiras conduzem os gases de proteção e purga a tocha e/ou os dispositivos de purga.
- (g) Eletrodo não consumível - Pode ser de tungstênio puro (99,5%) ou com adição de óxidos (Tório 1,7 a 2,2%, Cério 1,8 a 2,2%, Lantânio 1,3 a 1,7% e Zircônio 0,15 a 0,40%) [52].

### *2.7.1.3 Consumíveis*

A soldagem GTAW pode ser utilizada para realizar soldas com metal de adição ou autógena (sem metal de adição), quando se utiliza metal de adição, este é chamado de arame e pode ser na forma de bobina ou vareta, o metal de adição é fornecido em arames sólidos de comprimento normalizado para soldas manuais ou em bobinas para soldas automáticas ou semi-automáticas. Eles devem estar secos e limpos, além de armazenados em local fechado até momento de seu uso <sup>[53]</sup>.

As varetas de adição devem ser escolhidas de acordo com a composição química e os limites de resistência mecânica mínima exigida pelo metal base, as especificações dos consumíveis de soldagem são fornecida pelo código ASME Seção II parte C e as classificações (agrupamento) quanto à composição química e propriedades mecânicas são fornecidas pela AWS um exemplo de especificação ASME e classificação AWS é a especificação SFA-5.9/SFA-5.9m e classificação ER 2594, para soldagem de aço inoxidável duplex de UNS S32760.

O gás inerte também é considerado um consumível sua principal função é proteger a poça de fusão, sua escolha influência diretamente na qualidade, resistência à corrosão, eficiência da proteção, propriedades metalúrgicas, propriedades mecânicas, penetração da junta, ignição, estabilidade do arco e aspecto visual da solda, sendo de extrema importância escolher o gás certo e com qualidade comprovada <sup>[49]</sup>.

#### *2.7.1.4 Técnicas e parâmetros para soldagem de AID*

Na soldagem dos aços inoxidáveis duplex é importante estabelecer e respeitar os parâmetros de soldagem, principalmente durante a preparação e alinhamento da região a ser soldada enquanto que nos aços inoxidáveis austeníticos a habilidade do soldador pode superar eventuais deficiências de preparação, no caso dos aços inoxidáveis duplex é muito arriscado contar com esse fator humano uma vez que se a junta for exposta por um tempo prolongado ao calor isso pode levar ao desbalanceamento das fases originais e a formação de fases deletérias <sup>[54]</sup>. Podemos destacar como principais fatores que devem ser controlados no processo de soldagem dos AID os seguintes:

- Posição de Soldagem – No caso de juntas de topo podemos destacar a soldagem na posição plana (1G) <sup>[55]</sup>, a tocha deve ser mantida o mais próximo da posição vertical possível a fim de garantir um melhor controle da poça de fusão através do gás inerte.
- Temperatura de Aquecimento/ Interpasse e Resfriamento – Deve ser tratado caso a caso, levando em consideração as transformações de fases do material principalmente na região da ZAC.
- Aporte de Calor (heat input) – Consiste na quantidade de calor absorvido pela peça em *Joules* por unidade linear de comprimento de solda utiliza-se a equação 5 para calcular seu valor, para soldagem pelo processo GTAW de aços inox (martensítico, austenítico e ferrítico) deve-se limitar a máximo 2,2 kJ/mm, no caso de aços inoxidáveis duplex deve-se limitar o aporte térmico na região da raiz em máximo

1,4kJ/mm e para os demais passes 1,2kJ/mm (aproximadamente 85%).<sup>[56]</sup>

- Tensão do Arco – A tensão do arco é a medida da tensão (V) entre o eletrodo de tungstênio e a peça geralmente é proporcional ao comprimento do arco e depende da corrente ajustada para a soldagem.
- Corrente – A penetração da solda está diretamente relacionada com a corrente e polaridade, tem influência direta na tensão do arco pode ser utilizada com corrente contínua polaridade direta ou polaridade reversa ou corrente alternada, dependendo do material que está sendo soldado.
- Velocidade de Soldagem – Tem influência na penetração e na largura do cordão, seu controle é de extrema importância para garantir o controle do aporte de calor.

**Equação 5:** Equação de aporte de calor (heat input)

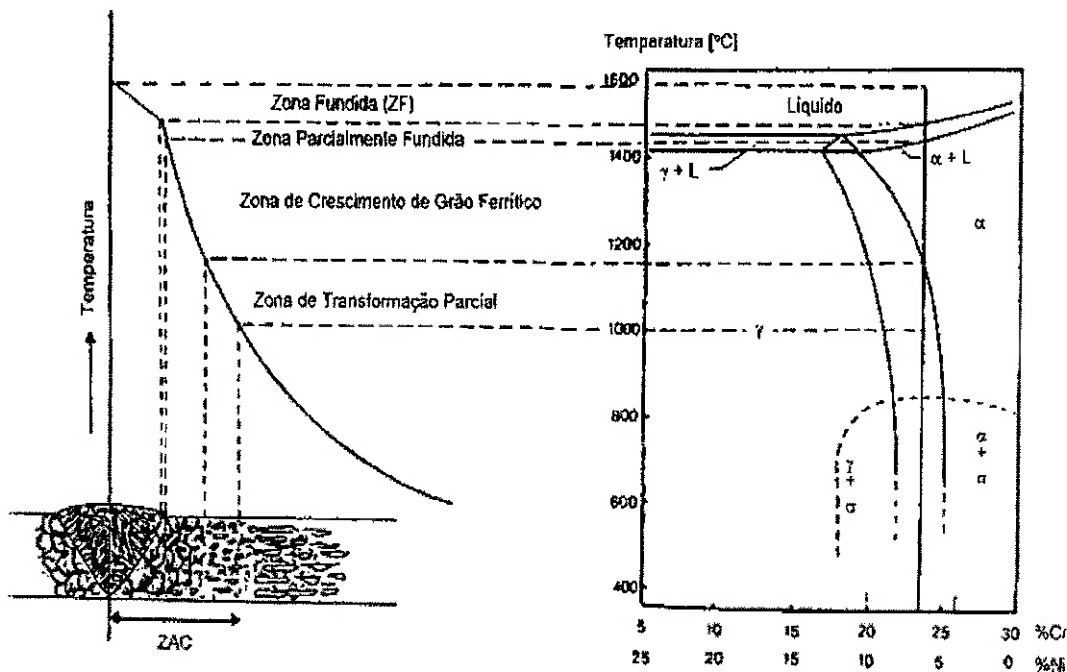
$$\text{Aporte de Calor} = \frac{\text{Tensão} \times \text{Corrente} \times 60}{\text{Velocidade de Soldagem} \times 1000} \times \text{eficiência do processo}$$

[J/in (kJ/mm)] [in/min(mm/min)]

#### *2.7.1.5 Efeitos da soldagem na transformação microestrutural*

Entre outros fatores a história térmica é o que irá determinar a microestrutura obtida na zona fundida e na zona afetada pelo calor, as mudanças de temperatura que ocorrem durante a soldagem dos AID, devem ser controladas da melhor maneira possível, a fim de garantir que as propriedades da junta sejam as melhores e mais próximas do metal de base

possível. A composição química da zona fundida é alterada através do metal de adição e/ou do gás de proteção utilizado, já a microestrutura da ZAC e eventualmente da ZF sofrem influência da história térmica. A figura 17 mostra as transformações microestruturais ocorridas na junta soldada de um AID.



**Figura 17:** Transformações microestruturais ocorridas na junta soldada de um AID [57].

### **3. Objetivos**

Esse trabalho tem como objetivos:

1. Comparar os resultados obtidos através da soldagem dissimilar de lean duplex UNS S32394 com super duplex UNS S32760 pelo processo GTAW com e sem a utilização da técnica de reaquecimento na última camada de solda.
2. Analisar e comparar a microestrutura nas zonas afetadas pelo calor.
3. Realizar a contagem de ferrita x austenita e realizar a comparação entre os resultados obtidos.
4. Realizar ensaio de microdureza para determinação das zonas mais críticas com e sem o passe de reaquecimento.
5. Determinar qual a melhor técnica a ser utilizada a fim de garantir uma ZAC com características microestruturais mais próximas da do metal de base.

## **4. Materiais e Métodos**

### **4.1 Materiais**

A matéria prima utilizada nesse trabalho foi o metal de base lean duplex UNS S32304 e o metal de base super duplex UNS S32760, ambos com espessura de 6,3mm. O material foi fornecida pela Escola Politécnica da USP, foram cortados 2 corpos de prova nas medidas de 350 x 350 x 6,3mm e um corpo de prova na medida de 500 x 350 x 6,3mm de uma chapa de 1000 x 1000 x 6,3mm, o corte foi realizado nas dependências da empresa Alufer em Itu-SP, foi utilizada uma guilhotina de grande porte para evitar o corte térmico evitando assim posterior trabalho de limpeza e eliminação da região afetada pelo calor.

#### **4.1.1 Metal Base lean duplex UNS S32304**

A composição química e o limite de resistência do material lean duplex UNS S32304 utilizado nesse experimento foram fornecidos pelo fabricante e encontram-se nas tabelas 4 e 5, essa mesma corrida foi utilizada em outros trabalhos como a Monografia do Sr. Marcus Xixa Treiber sobre *A Influência da Composição do Gás de Proteção na Soldagem Autógena pelo Processo TIG do Aço Inoxidável Duplex Baixa Liga UNS S32304 - 2012* e na Tese de Mestrado do Sr. Erick Renato Vargas Garcia sobre *Efeito da Corrente de Soldagem do Processo TIG Pulsado Autógeno na Microestrutura da Zona Fundida dos Aços Inoxidáveis Duplex UNS S322304 e UNS S32101 - 2011*.

**Tabela 4:** Composição química aço inoxidável lean duplex UNS S32304

| Material   | Composição Química |      |      |       |       |       |      |      |      |      |
|------------|--------------------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| UNS S32304 | C                  | Si   | Mn   | P     | S     | Cr    | Ni   | Mo   | N    | Cu   |
|            | 0,018              | 0,38 | 1,41 | 0,025 | 0,002 | 23,39 | 4,84 | 0,42 | 0,12 | 0,32 |

**Tabela 5:** Propriedades Mecânicas do aço inoxidável lean duplex UNS S32304

| Material   | Limite de escoamento (N/mm <sup>2</sup> ) | Resistência à tração (N/mm <sup>2</sup> ) | Alongamento (%) |
|------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------|
| UNS S32304 | 597                                       | 747                                       | 27              |

#### 4.1.2 Metal Base super duplex UNS S32760

A composição química e o limite de resistência do material super duplex UNS S32760 utilizado nesse experimento foram fornecidos pelo fabricante e encontram-se nas tabelas 6 e 7, essa mesma corrida foi utilizada em outros trabalhos como a Tese de Mestrado da Sra. Claudia Patricia Serra Giraldo, *Precipitação de Fases Intermetálicas na Zona Afetada pelo Calor de Temperatura Baixa (ZACTB) na Soldagem Multipasse de Aço Inoxidável Duplex - 2001*.

**Tabela 6:** Composição química aço inoxidável super duplex UNS S32760

| Material   | Composição Química |     |      |       |       |       |      |      |      |      |      |
|------------|--------------------|-----|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| UNS S32760 | C                  | Si  | Mn   | P     | S     | Cr    | Ni   | Mo   | N    | W    | Cu   |
|            | 0,017              | 0,3 | 0,48 | 0,022 | 0,001 | 25,42 | 6,79 | 3,83 | 0,26 | 0,77 | 0,59 |

**Tabela 7:** Propriedades Mecânicas do aço inoxidável super duplex UNS S32760

| Material   | Limite de escoamento (N/mm <sup>2</sup> ) | Resistência à tração (N/mm <sup>2</sup> ) | Alongamento (%) |
|------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------|
| UNS S32760 | 550                                       | 750                                       | 25              |

## 4.2 Consumíveis

A seleção dos consumíveis de soldagem para junta dissimilar de aço inoxidável duplex foi realizada conforme orientado pela Seção 5.7.5 e 5.13.4 da Norma Petrobras N-133 Rev. L 07/2013.

### 4.2.1 Metal de Adição

O metal de adição utilizado para a realização da soldagem dos 3 corpos de prova, soldados pelo processo GTAW, da junta dissimilar, foi a vareta

ER 2594 SFA-5.9/5.9m com composição química conforme informados na tabela 8 com certificado de qualidade fornecido pelo fabricante no Anexo A.

**Tabela 8:** Composição química vareta SFA 5.9 AWS ER 2594.

| Material   | Composição Química (% Peso) |      |    |       |
|------------|-----------------------------|------|----|-------|
| ER<br>2594 | C                           | 0,01 | N  | 0,24  |
|            | P                           | 0,02 | Nb | 0,01  |
|            | Ni                          | 9,5  | V  | 0,085 |
|            | Co                          | 0,13 | Mn | 0,48  |
|            | Ti                          | 0    | Cr | 25,14 |
|            | W                           | 0,01 | Cu | 0,091 |
|            | Si                          | 0,38 | Al | 0,009 |
|            | S                           | 0    | B  | 0,002 |
|            | Mo                          | 3,92 | Ca | 0,003 |

#### 4.2.2 Gás de Proteção

O gás de proteção utilizado nesse trabalho foi utilizado apenas para a proteção do arco elétrico e da poça de fusão do processo de soldagem GTAW (figura 18), na proteção da raiz foi utilizado cobre junta cerâmico (figura 19 e 20), a mistura utilizada continha 97,5% Ar + 2,5% N<sub>2</sub>. O certificado de qualidade e pureza encontra-se no Anexo B desse trabalho.



**Figura 18:** Cilindro de Ar + N<sub>2</sub> utilizado para estabilidade do arco elétrico e proteção da poça de fusão pelo processo GTAW.



**Figura 19:** Backing cerâmico utilizado para proteção da raiz.



**Figura 20:** Preparação do corpo de prova com backing cerâmico para proteção da raiz.

### **4.3 Corpos de Prova**

Para a realização desse experimento foram soldados três corpos de prova com medidas informadas na tabela 9.

**Tabela 9:** Dimensões e quantidades de corpos de prova.

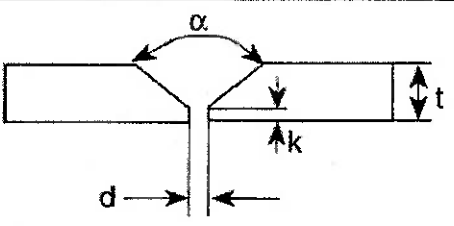
| Corpo de Prova | Largura<br>(mm) | Comprimento<br>(mm) | Espessura<br>(mm) |
|----------------|-----------------|---------------------|-------------------|
| CP 01          | 150             | 500                 | 6,3               |
| CP 02          | 150             | 350                 | 6,3               |
| CP 03          | 150             | 350                 | 6,3               |

### 4.3.1 Preparação dos Corpos de Prova

Os chanfros foram preparados conforme referência práticas e AWS Welding Handbook. A figura 21 ilustra a preparação dos chanfros, face do bisel e abertura da raiz dos três corpos de prova.

#### V-groove

|      | t<br>mm | d<br>mm | k<br>mm | $\alpha$ |
|------|---------|---------|---------|----------|
| MMA  | 3–15    | 2–3     | 1–2     | 60–70°   |
| TIG  | 2.5–8   | 2–3     | 1–2     | 60–70°   |
| MIG  | 3–12    | 2–3     | 1–2     | 60–70°   |
| SAW* | 4–12    | 2–3     | 1–2     | 70–90°   |



**Figura 21:** Dimensões da face do bisel, abertura da raiz e chanfro de acordo com o processo e espessura do material [58].

Na preparação do corpo de prova foram utilizados dispositivos do tipo “Cachorro” a fim de evitar a deformação do material conforme mostrado na figura 22. As chapas utilizadas foram cortadas da sobra do material super duplex de UNS S32760 utilizadas nesse estudo e foram soldadas com cordões de solda de aproximadamente 100mm de comprimentos pelo processo GTAW com consumível de soldagem ER 2594 (o mesmo utilizado na soldagem do corpo de prova). Foram soldadas também chapas apêndices em ambas as extremidades, a fim de garantir que o comprimento total da chapa seria soldado reduzindo a área de descarte nas extremidades, o material utilizada para confecção das chapas apêndices e o consumível utilizado foram os mesmos dos dispositivos de controle de deformação.



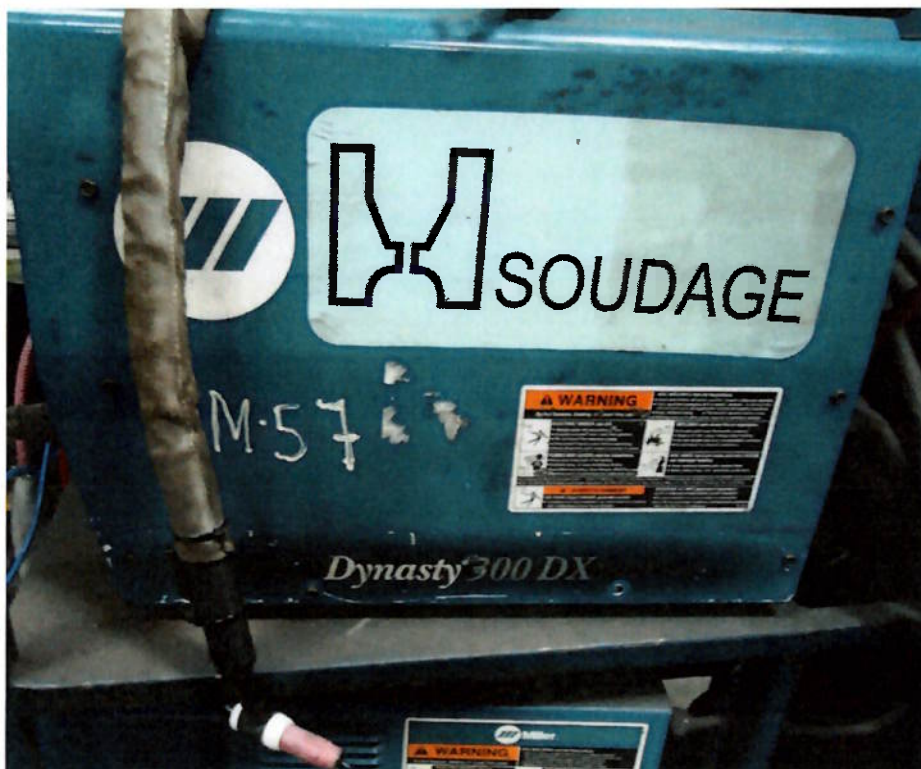
**Figura 22:** Chapa apêndice e dispositivo para controle de deformação "cachorro"

#### ***4.4 Processo de Soldagem***

Para esse experimento foi escolhido o processo de soldagem GTAW convencional. A máquina de soldagem utilizada foi a Dynasty 300 DX da fabricante Miller Electric.



**Figura 23:** Vista frontal da Máquina de Soldagem GTAW Dynasty 300 DX



**Figura 24:** Vista Lateral da Máquina de Soldagem GTAW Dynasty 300 DX

#### 4.4.1 Equipamentos utilizados

Para realização da soldagem dos corpos de prova e para o controle das variáveis e do processo de soldagem foram utilizados, um Fluxímetro da marca Carbogرافite para conferência da vazão do gás de proteção (figura 25), um regulador de pressão Modelo 300FL (figura 26), um Termômetro infravermelho modelo Fluke 62 mini digital para controle de temperatura inicial e interpasse (figura 27), um Alicate Amperímetro Minipa ET 3388 para conferência de corrente e tensão (figura 28), um Transferidor de grau em aço modelo Protractor NO- 5001 para conferência do ângulo do bisel (figura 29) e um cronômetro para registro do tempo de soldagem.



**Figura 25:** Fluxímetro



**Figura 26:** Regulador de Pressão



**Figura 27:** Termômetro infravermelho digital



**Figura 28:** Alicate Amperímetro



**Figura 29:** Transferidor de Grau em aço

#### 4.4.2 *Parâmetros de Soldagem*

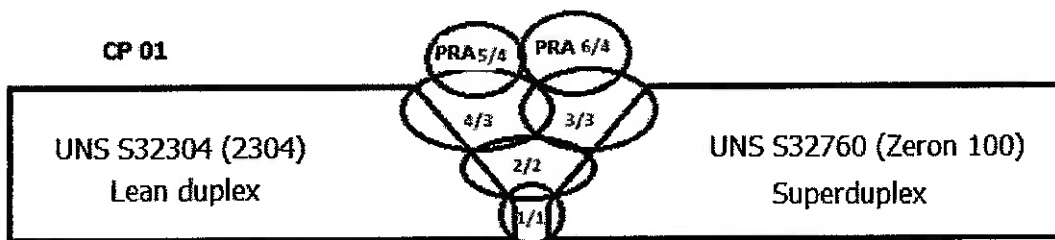
Durante a soldagem dos três corpos de prova os parâmetros de soldagem utilizados foram praticamente os mesmos, pequenas variações podem ter ocorrido devido a oscilações da rede de energia e cansaço do soldador. Essas pequenas variações não serão consideradas para efeito desse estudo. Os parâmetros de soldagem utilizados como padrão de referência estão descritos na tabela 10 abaixo:

**Tabela 10:** Parâmetros de soldagem dos corpos de prova.

| Parâmetro de Soldagem utilizados como referência para soldagem dos corpos de prova |              |            |                      |                          |                             |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Corpo de Prova                                                                     | Corrente (A) | Tensão (V) | Vazão do Gás (l/min) | Temperatura Inicial (C°) | Temperatura Interpasse (C°) |
| CP 01                                                                              | 98 a 102     | 8 a 11     | 10 a 12              | 28 a 33                  | 55 a 80                     |
| CP 02                                                                              | 98 a 102     | 8 a 11     | 10 a 12              | 28 a 33                  | 55 a 80                     |
| CP 03                                                                              | 98 a 102     | 8 a 11     | 10 a 12              | 28 a 33                  | 55 a 80                     |

#### 4.4.3 Sequencial de Soldagem

Para a soldagem do CP 01 foi realizada o sequencial conforme descrito na figura 30 e na tabela 11 temos os parâmetros de soldagem utilizados. Nesse CP foi realizado o passe de reaquecimento em ambos os materiais.

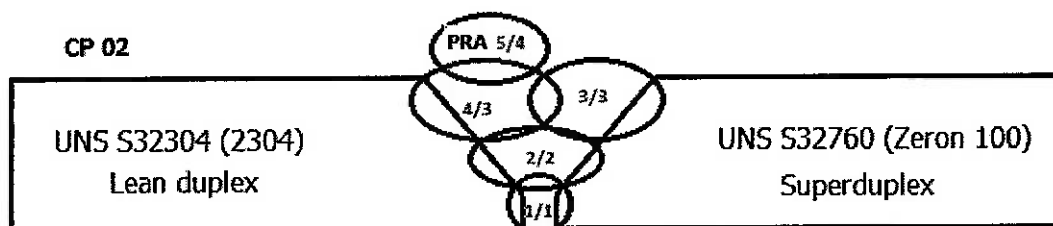


**Figura 30:** Croqui sequencial de Soldagem CP 01

**Tabela 11:** Parâmetros de soldagem utilizados para o CP 01

| Passe | Camada | Consumível | Diametro do Consumível (mm) | Corrente (A) | Tensão (V) | Processo | Vazão do Gás de Proteção (na tocha) | Comprimento do cordão de solda |
|-------|--------|------------|-----------------------------|--------------|------------|----------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 1     | 1      | ER 2594    | 1,6                         | 100          | 11         | GTAW     | 11                                  | 500                            |
| 2     | 2      | ER 2594    | 1,6                         | 100          | 11         | GTAW     | 11                                  | 500                            |
| 3     | 3      | ER 2594    | 1,6                         | 100          | 11         | GTAW     | 11                                  | 500                            |
| 4     | 3      | ER 2594    | 1,6                         | 100          | 11         | GTAW     | 11                                  | 500                            |
| 5     | 4      | ER 2594    | 1,6                         | 100          | 11         | GTAW     | 11                                  | 500                            |
| 6     | 4      | ER 2594    | 1,6                         | 100          | 11         | GTAW     | 11                                  | 500                            |

Para a soldagem do CP 02 foi realizada o sequencial conforme descrito na figura 31 e na tabela 12 temos os parâmetros de soldagem utilizados. Nesse CP foi realizado o passe de reaquecimento apenas no lean duplex de UNS S32304.

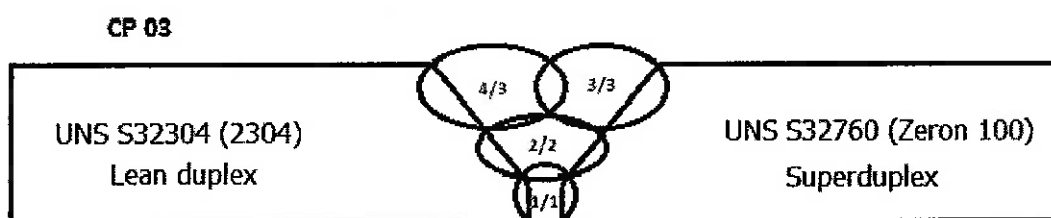


**Figura 31:** Croqui sequencial de Soldagem CP 02

**Tabela 12:** Parâmetros de soldagem utilizados para o CP 02

| Passe | Camada | Consumível | Diametro do Consumível (mm) | Corrente (A) | Tensão (V) | Processo | Vazão do Gás de Proteção (na tocha) | Comprimento do cordão de solda |
|-------|--------|------------|-----------------------------|--------------|------------|----------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 1     | 1      | ER 2594    | 1,6                         | 100          | 11         | GTAW     | 11                                  | 350                            |
| 2     | 2      | ER 2594    | 1,6                         | 100          | 11         | GTAW     | 11                                  | 350                            |
| 3     | 3      | ER 2594    | 1,6                         | 100          | 11         | GTAW     | 11                                  | 350                            |
| 4     | 3      | ER 2594    | 1,6                         | 100          | 11         | GTAW     | 11                                  | 350                            |
| 5     | 4      | ER 2594    | 1,6                         | 100          | 11         | GTAW     | 11                                  | 350                            |
| 6     | 4      | N/A        | N/A                         | 0            | 0          | N/A      | N/A                                 | 0                              |

Para a soldagem do CP 03 foi realizada o sequencial conforme descrito na figura 32 e na tabela 13 temos os parâmetros de soldagem utilizados. Nesse CP não foi realizado o passe de reaquecimento.



**Figura 32:** Croqui sequencial de Soldagem CP 03

**Tabela 13:** Parâmetros de soldagem utilizados para o CP 03

| Passe | Camada | Consumível | Diametro (mm) | Corrente (A) | Tensão (V) | Processo | Vazão do Gás de Proteção (na tocha) | Comprimento do cordão de solda |
|-------|--------|------------|---------------|--------------|------------|----------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 1     | 1      | ER 2594    | 1,6           | 100          | 11         | GTAW     | 11                                  | 350                            |
| 2     | 2      | ER 2594    | 1,6           | 100          | 11         | GTAW     | 11                                  | 350                            |
| 3     | 3      | ER 2594    | 1,6           | 100          | 11         | GTAW     | 11                                  | 350                            |
| 4     | 3      | ER 2594    | 1,6           | 100          | 11         | GTAW     | 11                                  | 350                            |
| N/A   | N/A    | N/A        | N/A           | 0            | 0          | N/A      | N/A                                 | 0                              |
| N/A   | N/A    | N/A        | N/A           | 0            | 0          | N/A      | N/A                                 | 0                              |

#### *4.4.4 Aporte de Calor*

Como já mencionado anteriormente um dos objetivos desse trabalho é analisar as diferenças microestruturais e de dureza na região da face de uma soldagem multipasse de uma junta dissimilar. Diferença essa que ocorre devido principalmente ao calor que é gerado nessa região durante a soldagem, o passe anterior é sempre reaquecido com o passe subsequente alterando sua dureza e sua microestrutura. No CP 01 foi realizado dois passes de reaquecimento (passe 5 da camada 4 reaquecendo o passe 4 da camada 3 e passe 6 da camada 4 reaquecendo passe 3 da camada 3). No CP 02 apenas 1 passe de reaquecimento (passe 5 da camada 4 reaquecendo o passe 4 da camada 3). No CP 03 não foi realizado passe de reaquecimento (concluindo a soldagem nos passes 4 e 3 da camada 3). O aporte de calor para os três CP foi calculado para todos os passes e estão informados nas tabelas 14, 15 e 16 abaixo:

**Tabela 14:** Valores para base de cálculo do aporte de calor do CP 01

| Passe | Camada | Tempo (min) | Tempo (seg) | Temperatura de Pré Aquecimento °C | Temperatura de Interpasse °C | Velocidade de Soldagem (mm/min) | Aporte de calor (kJ/mm) | Aporte de calor (kJ/mm) x Efic. do Proces. |
|-------|--------|-------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|
|-------|--------|-------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|

|   |   |   |    |     |     |             |        |         |
|---|---|---|----|-----|-----|-------------|--------|---------|
| 1 | 1 | 7 | 40 | 28  | N/A | 65,2173913  | 1,012  | 0,8096  |
| 2 | 2 | 8 | 22 | N/A | 58  | 59,76095618 | 1,1044 | 0,88352 |
| 3 | 3 | 5 | 57 | N/A | 62  | 84,03361345 | 0,7854 | 0,62832 |
| 4 | 3 | 5 | 41 | N/A | 73  | 87,97653959 | 0,7502 | 0,60016 |
| 5 | 4 | 3 | 13 | N/A | 55  | 155,4404145 | 0,4246 | 0,33968 |
| 6 | 4 | 2 | 31 | N/A | 60  | 198,6754967 | 0,3322 | 0,26576 |

| Diametro do consumível (mm) | Corrente (A) | Tensão (V) | Processo | Valor de Eficiência (GTAW) | Comprimento do cordão de solda |
|-----------------------------|--------------|------------|----------|----------------------------|--------------------------------|
|-----------------------------|--------------|------------|----------|----------------------------|--------------------------------|

|     |     |    |      |     |     |
|-----|-----|----|------|-----|-----|
| 1,6 | 100 | 11 | GTAW | 0,8 | 500 |
| 1,6 | 100 | 11 | GTAW | 0,8 | 500 |
| 1,6 | 100 | 11 | GTAW | 0,8 | 500 |
| 1,6 | 100 | 11 | GTAW | 0,8 | 500 |
| 1,6 | 100 | 11 | GTAW | 0,8 | 500 |
| 1,6 | 100 | 11 | GTAW | 0,8 | 500 |

\*\* Valor de eficiência do processo GTAW para Soldagem em Aços Inoxidáveis 0,4 a 0,8 <sup>[14]</sup>

**Tabela 15:** Valores para base de cálculo do aporte de calor do CP 02

| Passe | Camada | Tempo (min) | Tempo (seg) | Temperatura de Pré Aquecimento °C | Temperatura de Interpasse °C | Velocidade de Soldagem (mm/min) | Aporte de calor (kJ/mm) | Aporte de calor (kJ/mm) x Efic. do Proces. |
|-------|--------|-------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|
|-------|--------|-------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|

|   |   |   |    |     |     |         |       |       |
|---|---|---|----|-----|-----|---------|-------|-------|
| 1 | 1 | 8 | 18 | 32  | N/A | 42,169  | 1,565 | 1,252 |
| 2 | 2 | 5 | 48 | N/A | 57  | 60,345  | 1,094 | 0,875 |
| 3 | 3 | 3 | 43 | N/A | 66  | 94,170  | 0,701 | 0,561 |
| 4 | 3 | 4 | 6  | N/A | 70  | 85,366  | 0,773 | 0,619 |
| 5 | 4 | 2 | 33 | N/A | 60  | 137,255 | 0,481 | 0,385 |

| Diametro (mm) | Corrente (A) | Tensão (V) | Processo | Valor de Eficiência (GTAW) | Comprimento do cordão de solda |
|---------------|--------------|------------|----------|----------------------------|--------------------------------|
|---------------|--------------|------------|----------|----------------------------|--------------------------------|

|     |     |    |      |     |     |
|-----|-----|----|------|-----|-----|
| 1,6 | 100 | 11 | GTAW | 0,8 | 350 |
| 1,6 | 100 | 11 | GTAW | 0,8 | 350 |
| 1,6 | 100 | 11 | GTAW | 0,8 | 350 |
| 1,6 | 100 | 11 | GTAW | 0,8 | 350 |
| 1,6 | 100 | 11 | GTAW | 0,8 | 350 |

\*\* Valor de eficiência do processo GTAW para Soldagem em Aços Inoxidáveis 0,4 a 0,8 <sup>[14]</sup>

**Tabela 16:** Valores para base de cálculo do aporte de calor do CP 03

| Passe | Camada | Tempo (min) | Tempo (seg) | Temperatura de Pré Aquecimento °C | Temperatura de Interpasse °C | Velocidade de Soldagem (mm/min) | Aporte de calor (kJ/mm) | Aporte de calor (kJ/mm) x Efic. do Proces. |
|-------|--------|-------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|
|-------|--------|-------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|

|   |   |    |    |     |     |         |       |       |
|---|---|----|----|-----|-----|---------|-------|-------|
| 1 | 1 | 11 | 3  | 30  | N/A | 31,674  | 2,084 | 1,667 |
| 2 | 2 | 5  | 58 | N/A | 55  | 58,659  | 1,125 | 0,900 |
| 3 | 3 | 3  | 6  | N/A | 72  | 112,903 | 0,585 | 0,468 |
| 4 | 3 | 3  | 27 | N/A | 78  | 101,449 | 0,651 | 0,520 |

| Diametro do consumível (mm) | Corrente (A) | Tensão (V) | Processo | Valor de Eficiência (GTAW) | Comprimento do cordão de solda |
|-----------------------------|--------------|------------|----------|----------------------------|--------------------------------|
|-----------------------------|--------------|------------|----------|----------------------------|--------------------------------|

|     |     |    |      |     |     |
|-----|-----|----|------|-----|-----|
| 1,6 | 100 | 11 | GTAW | 0,8 | 350 |
| 1,6 | 100 | 11 | GTAW | 0,8 | 350 |
| 1,6 | 100 | 11 | GTAW | 0,8 | 350 |
| 1,6 | 100 | 11 | GTAW | 0,8 | 350 |

\*\* Valor de eficiência do processo GTAW para Soldagem em Aços Inoxidáveis 0,4 a 0,8 <sup>[14]</sup>

#### **4.5 *Análise Microestrutural***

Para a avaliação microestrutural das juntas, foram realizadas micrografias do corpo de prova no CP 01 nas regiões: metais de base / zonas de ligação / regiões de reaquecimento da face no lean duplex de UNS 32304 e no super duplex de UNS S32760 / zona fundida / nas ZAC e na raiz; no CP 02 nas regiões: metais de base / zonas de ligação / região de reaquecimento da face no lean duplex de UNS S32304 / zona fundida / nas ZAC e na raiz; no CP 03 nas regiões: metais de base / zonas de ligação / zona fundida / nas ZAC e na raiz.

O método de preparação seguiu as orientações das normas NORSOK M-601, parágrafo 5.3.6 / ASME IX, QW 470 / ASTM E 562 -08.

Não foi definido um critério de aceitação específico para esse ensaio uma vez que o objetivo desse estudo é avaliar as transformações microestruturais ocasionadas pelo passe de reaquecimento na última camada comparando as três situações distintas como já informado anteriormente.

Os corpos de provas foram retirados no sentido transversal ao cordão de solda nas medidas de 80mm x 15mm na preparação das regiões onde foi realizado as análises a preparação ocorreu da seguinte maneira: um passe de desbaste com lixa de granulometria 50 e depois 150  $\mu\text{m}$ . Posteriormente foi realizado o polimento utilizando lubrificação com água e a sequência de lixas com as seguintes granulometrias: 240, 360, 600 e 1200  $\mu\text{m}$ . Em seguida foi realizado um polimento final com pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$  de granulometria. Foi aplicado um ataque eletrolítico com a utilização de um reagente para a revelação das regiões, o reagente utilizado foi uma solução de hidróxido de

sódio (NaOH) na concentração de 20%, dissolvida em água destilada. Foi aplicada uma corrente de 3 A, por aproximadamente 60s. Para a visualização das regiões reveladas foi utilizado um microscópio óptico fabricante Olympus modelo Gx-41 com um aumento de 500 vezes.

#### *4.5.1 Análise da fração volumétrica de ferrita e austenita.*

Para a análise da fração volumétrica de ferrita foram utilizados os mesmos corpos de prova preparados para as análises das microestruturas dos cordões de solda e do metal base. Para revelar a microestrutura do lean duplex de UNS S32304 e do super duplex UNS S32760 foi utilizado um ataque eletrolítico com uma solução de hidróxido de sódio NaOH na concentração de 20% em água destilada com uma corrente de 3A durante um intervalo de tempo de aproximadamente 60s, para melhor caracterização das fases ferrita e austenita.

Após a realização do ataque eletrolítico foram feitas as imagens das regiões de interesse, foi utilizado o programa "AnalySIS" para a realização da contagem de ferrita e austenita, nesse programa houve a conversão das cores registradas nas fotos (tons claros e tons escuros) para as cores azul e amarela, onde a cor azul ficou caracterizado como ferrita e a com amarela como austenita.

Abaixo nas figuras 33, 34 e 35 temos um croqui esquemático com os pontos de análise da fração volumétrica de ferrita e austenita.

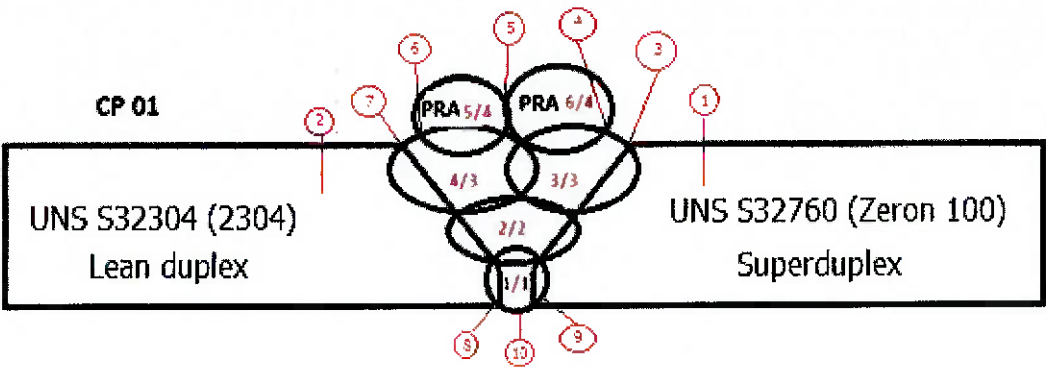


Figura 33: Região de análise da fração volumétrica de ferrita e austenita CP 01

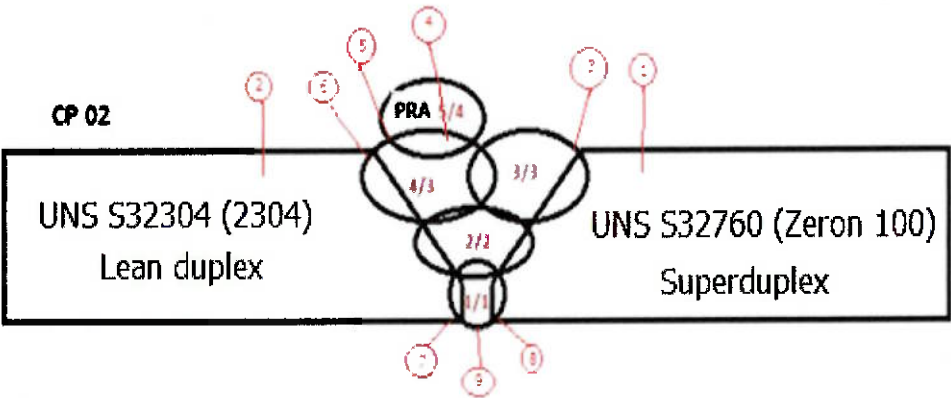


Figura 34: Região de análise da fração volumétrica de ferrita e austenita CP 02

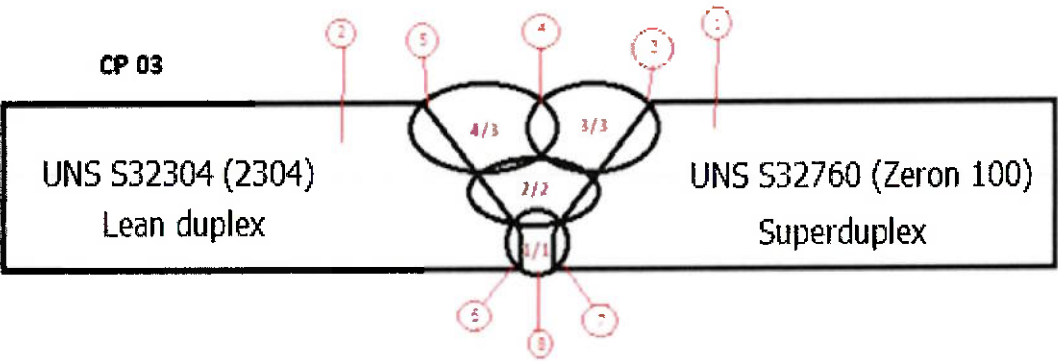
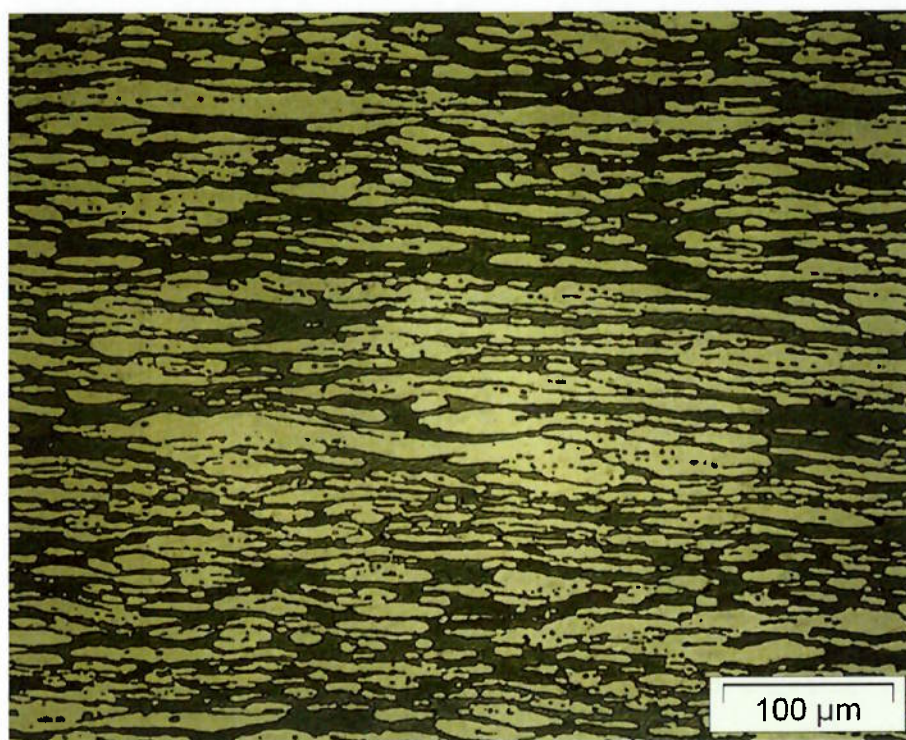


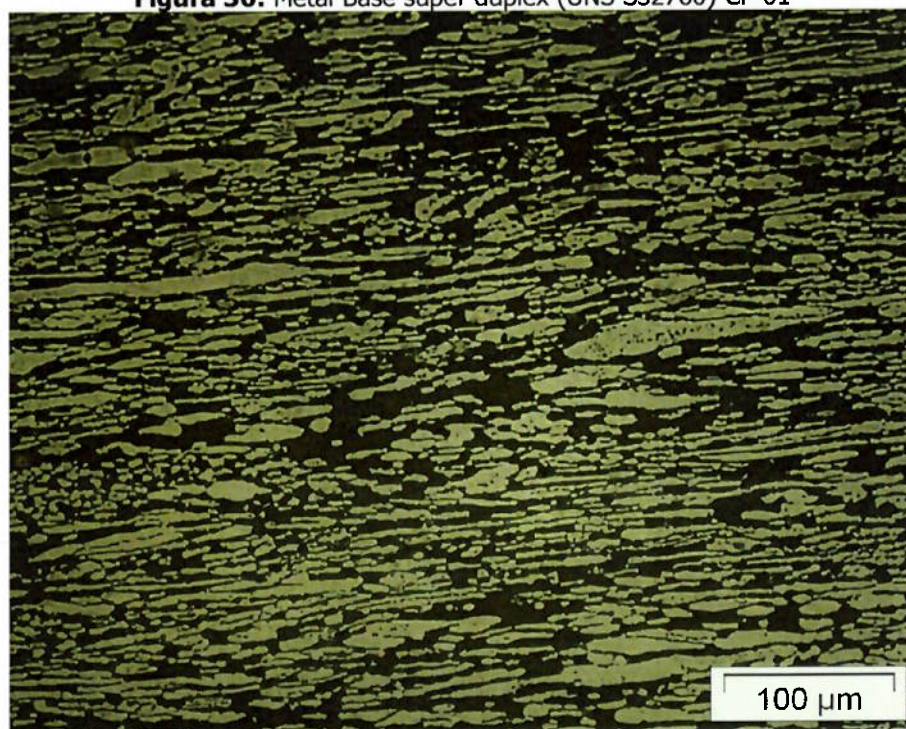
Figura 35: Região de análise da fração volumétrica de ferrita e austenita CP 03

#### 4.5.2 *Contagem de Ferrita x Austenita*

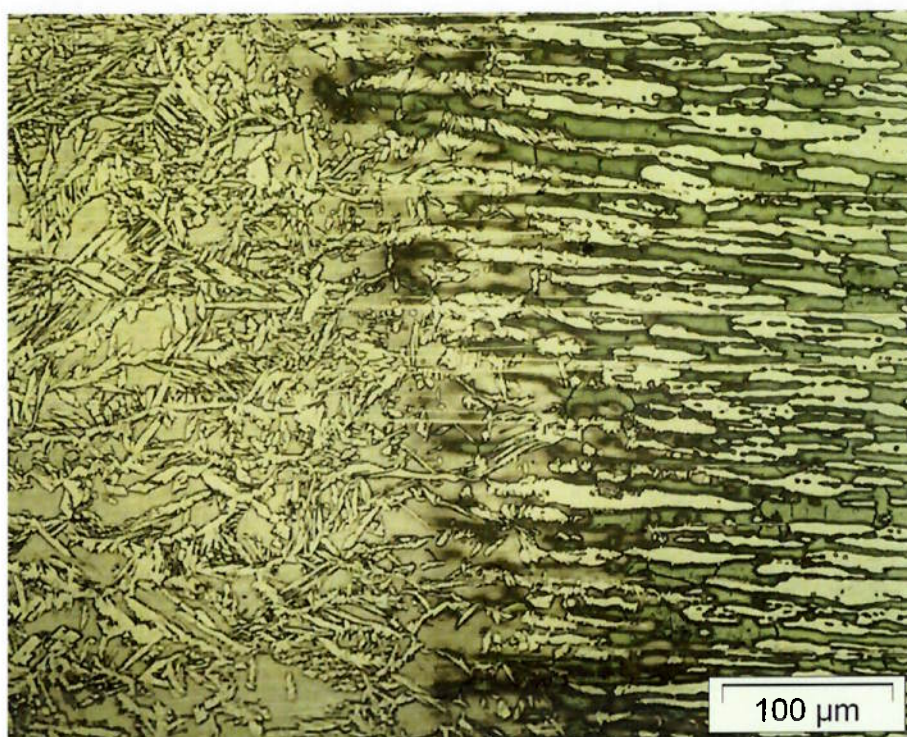
Após a preparação dos corpos de provas e o ataque eletrolítico, cada um dos corpos de prova foi analisado através do microscópio óptico com aumento de 500 vezes, nas imagens é possível observar formações similares a ilhas com coloração em tons de bege essas regiões são identificadas como austenita, as demais regiões fazem parte da matriz composta de ferrita. Os imagens estão apresentadas abaixo, para o CP 01 nas figuras 36 a 45 (imagem original) e nas figuras 46 a 55 (imagens coloridas pelo programa "AnalySIS") os resultados são apresentados na tabela 17, para o CP 02 nas figuras 56 a 64 (imagem original) e nas figuras 65 a 73 (imagens coloridas pelo programa "AnalySIS") os resultados são apresentados na tabela 18 e para o CP 03 nas figuras 74 a 81 (imagem original) e nas figuras 82 a 89 (imagens coloridas pelo programa "AnalySIS") os resultados são apresentados na tabela 19.



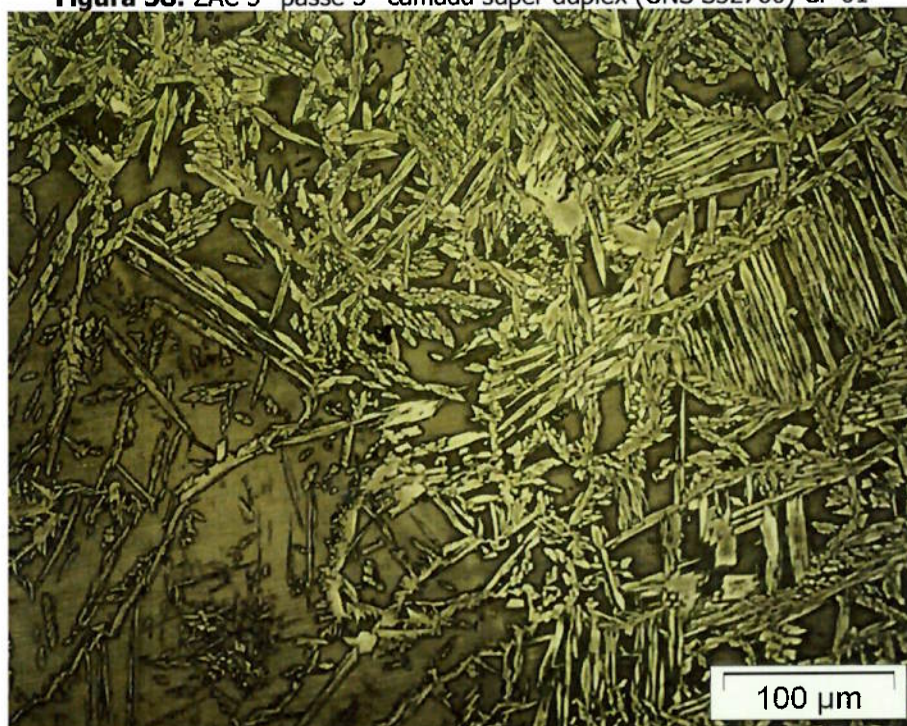
**Figura 36:** Metal Base super duplex (UNS S32760) CP 01



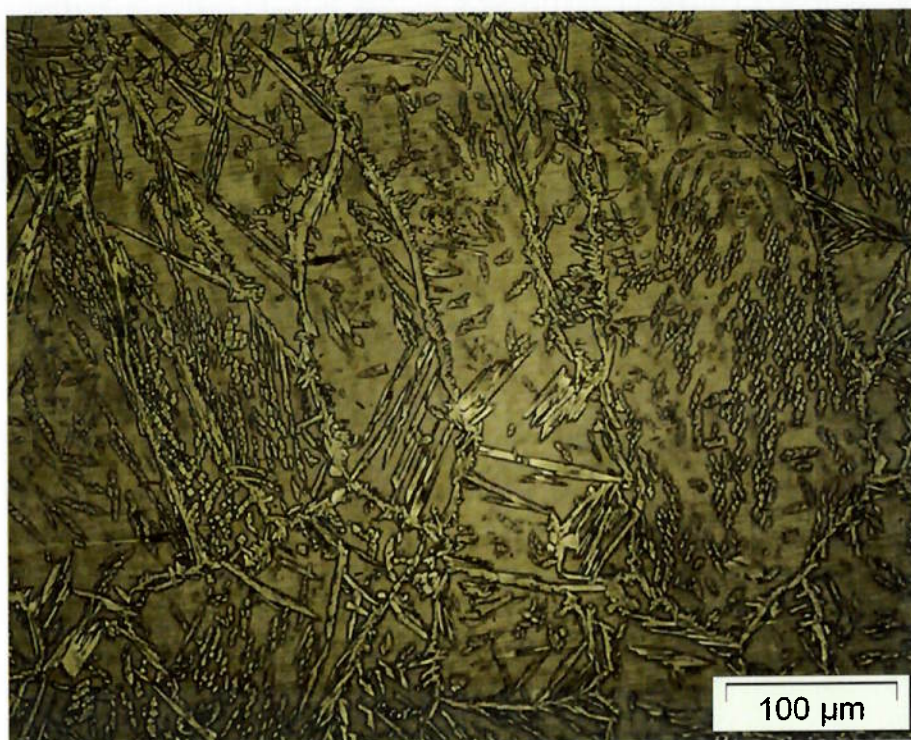
**Figura 37:** Metal Base lean duplex (UNS S32204) CP 01



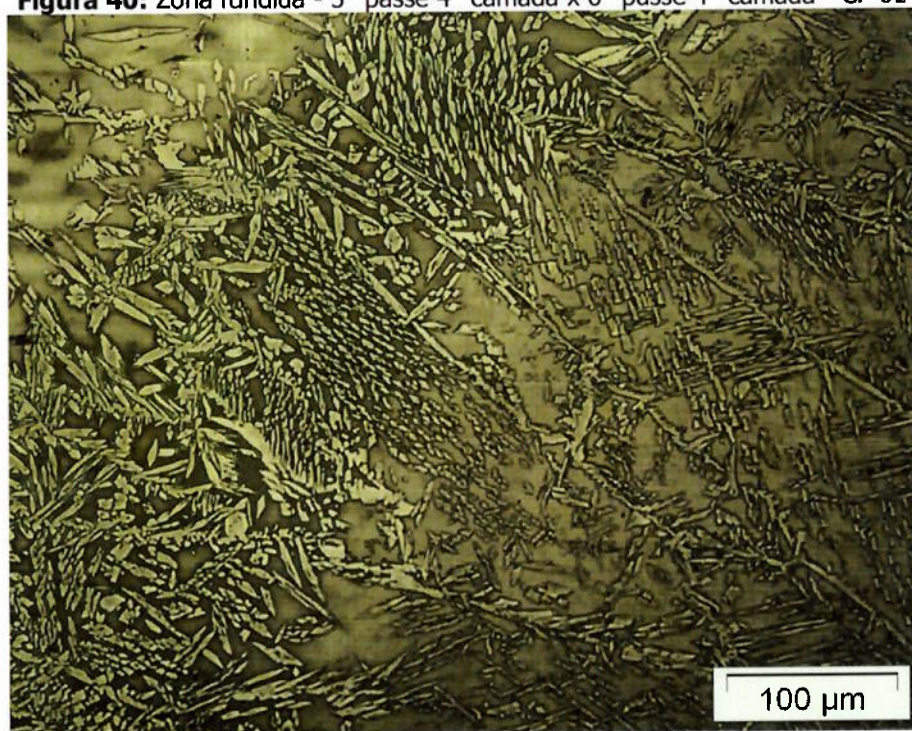
**Figura 38:** ZAC 3° passe 3° camada super duplex (UNS S32760) CP 01



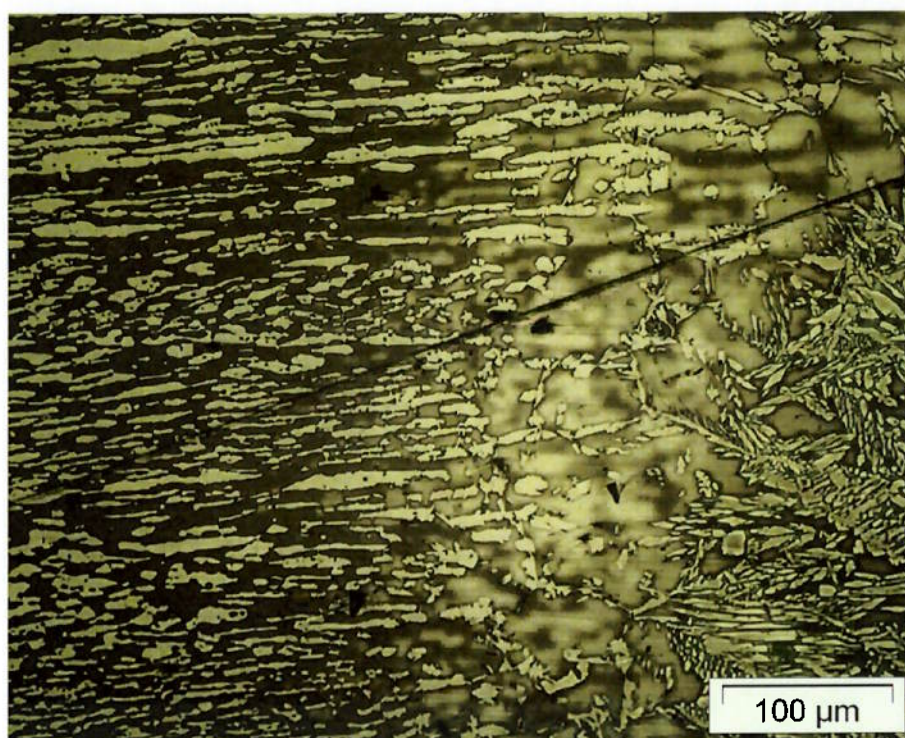
**Figura 39:** ZAC passe de reaquecimento 6° passe 4° camada x 3° passe 3° camada - super duplex (UNS S32760) - CP 01



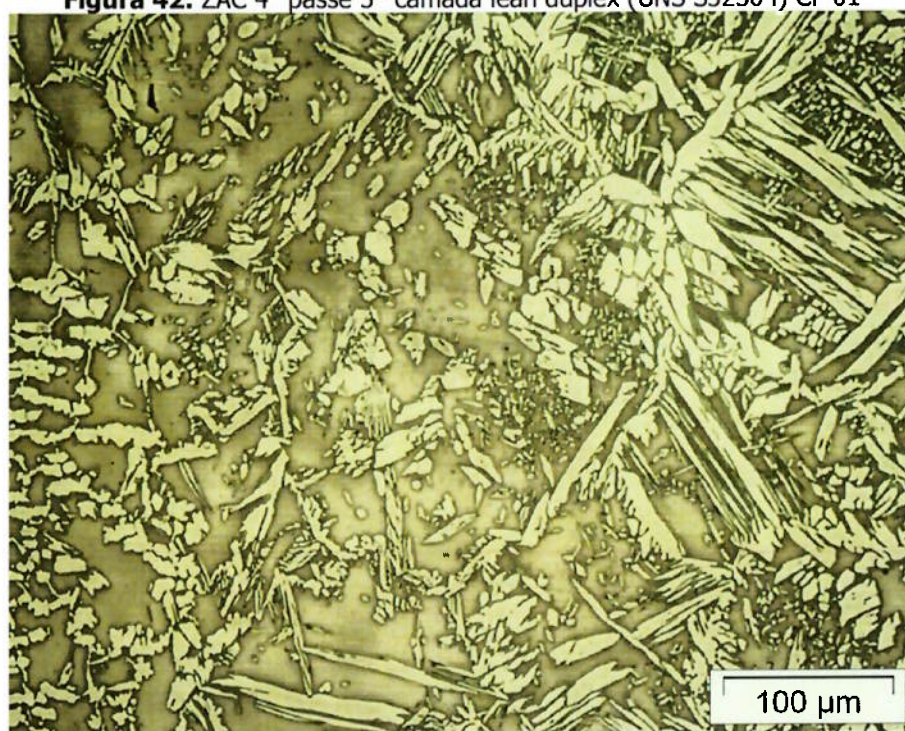
**Figura 40:** Zona fundida - 5º passe 4º camada x 6º passe 4º camada - CP 01



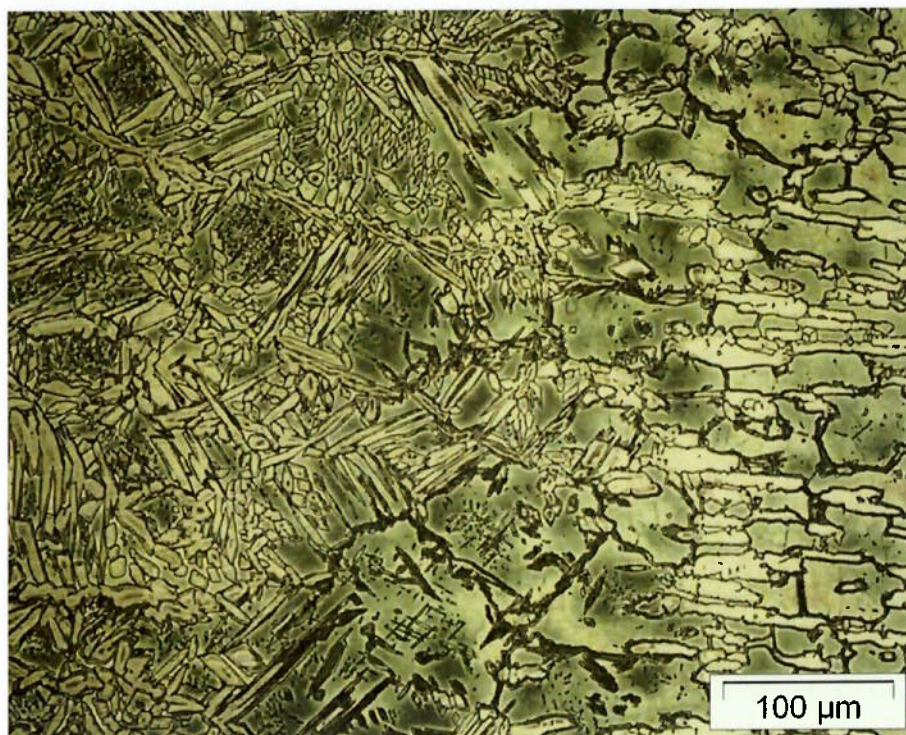
**Figura 41:** ZAC passe de reaquecimento 5º passe 4º camada x 4º passe 3º camada – lean duplex (UNS S32304) - CP 01



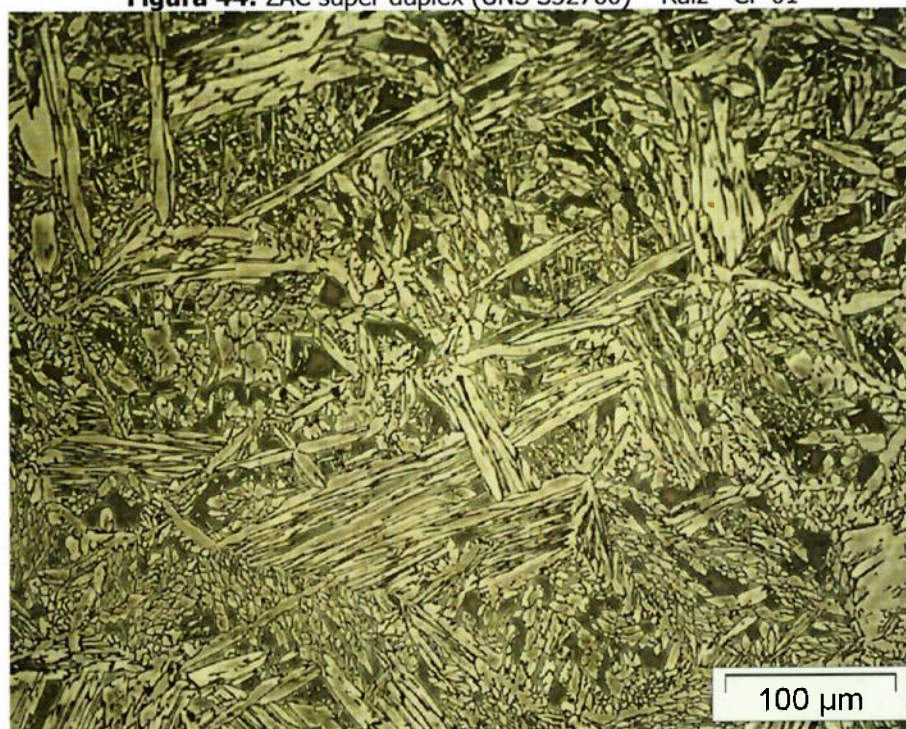
**Figura 42:** ZAC 4° passe 3° camada lean duplex (UNS S32304) CP 01



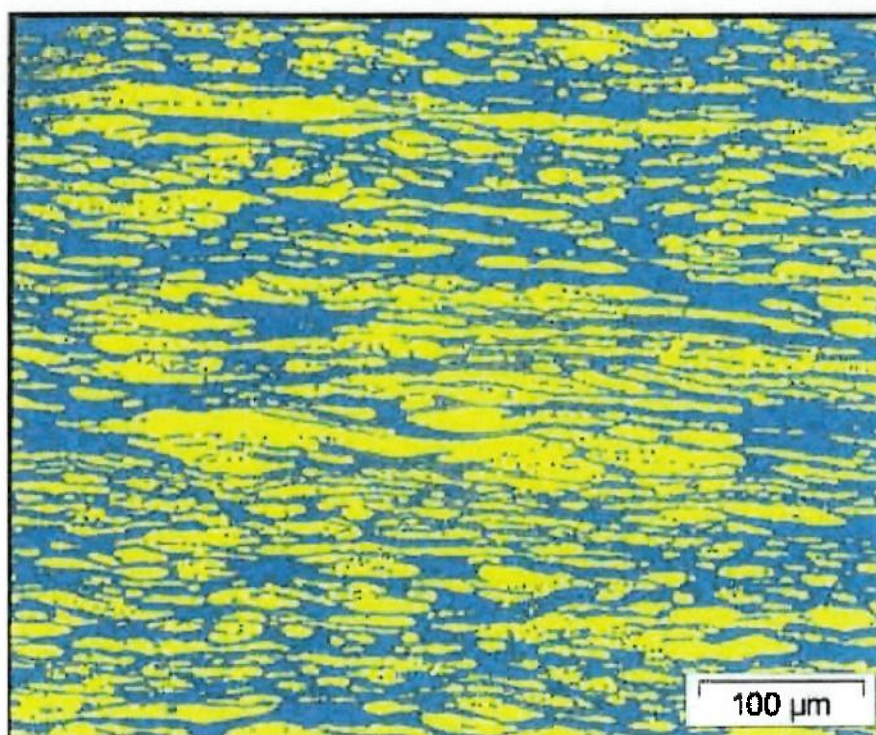
**Figura 43:** ZAC lean duplex (UNS S32304) – Raiz - CP 01



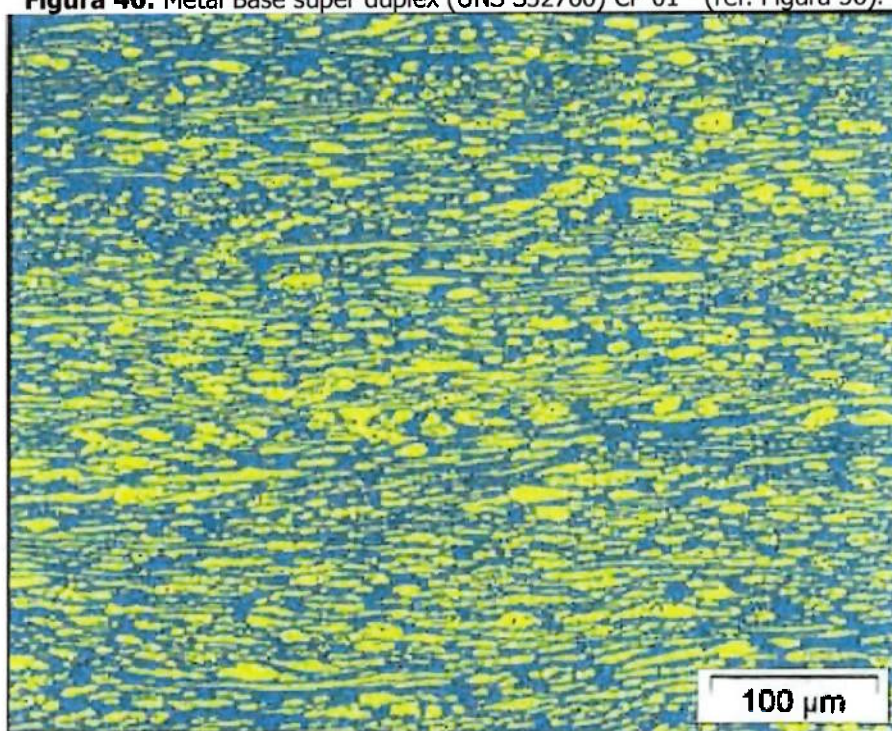
**Figura 44:** ZAC super duplex (UNS S32760) – Raiz - CP 01



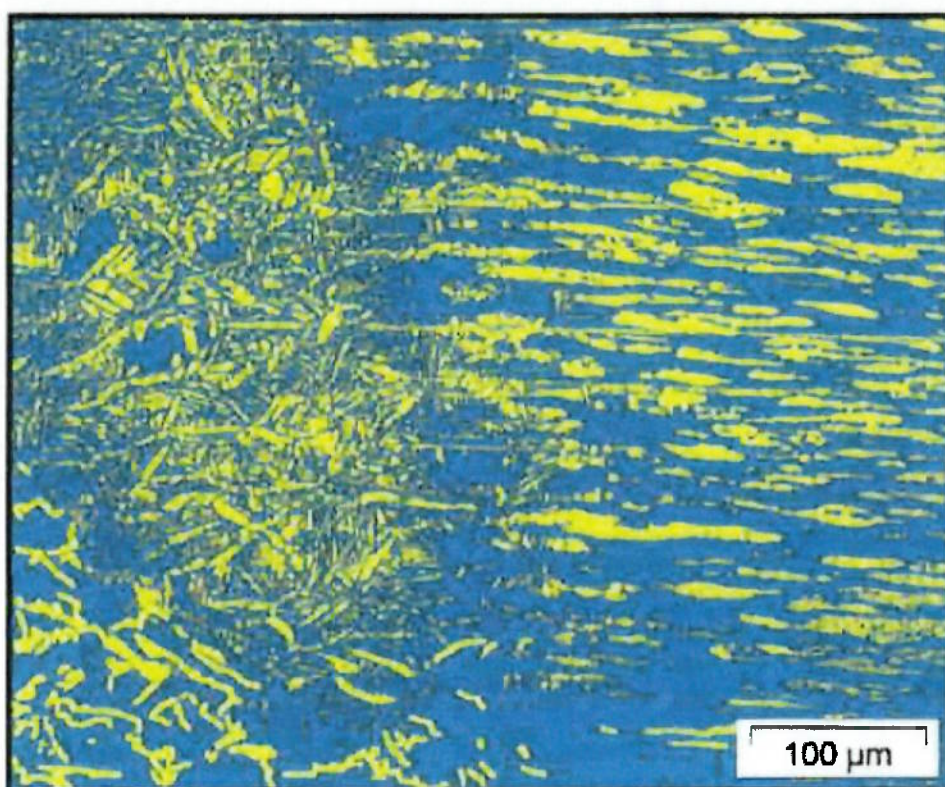
**Figura 45:** Zona fundida - Raiz - 1º passe 1º camada - CP 01



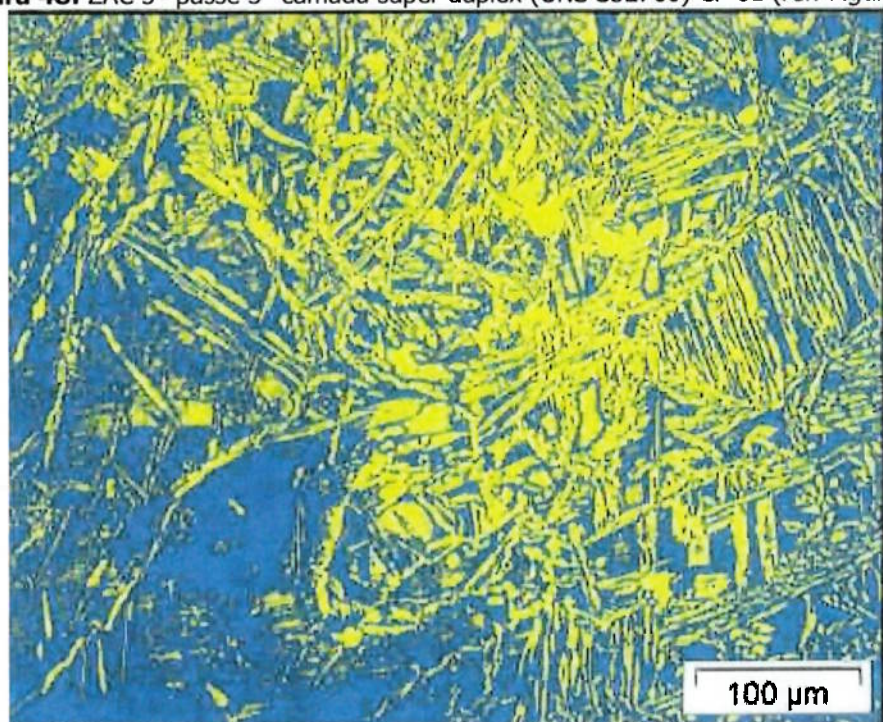
**Figura 46:** Metal Base super duplex (UNS S32760) CP 01 - (ref. Figura 36).



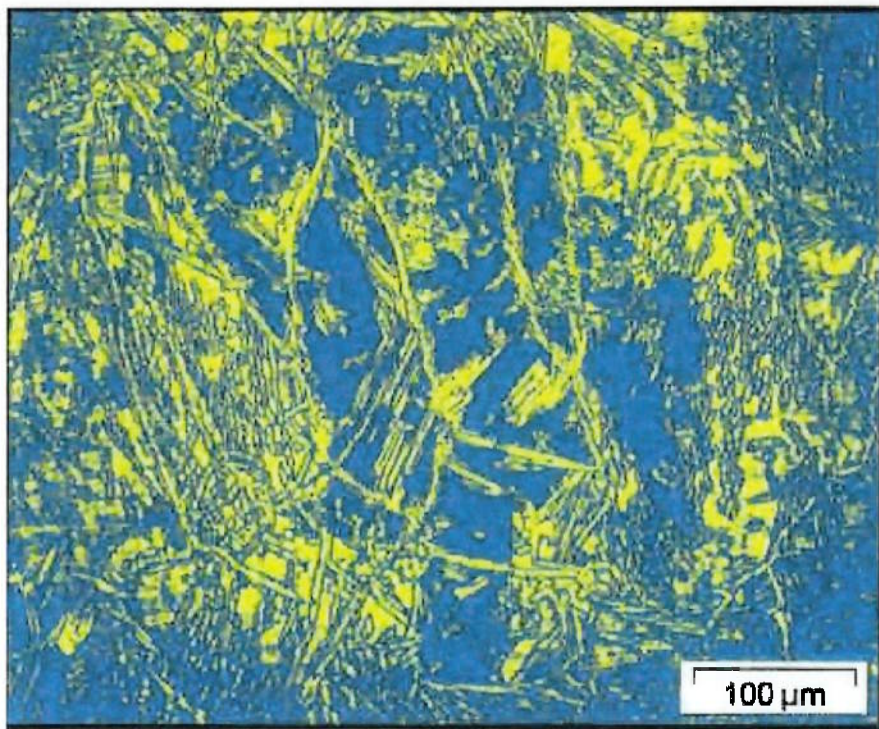
**Figura 47:** Metal Base lean duplex (UNS S32204) CP 01 (ref. Figura 37).



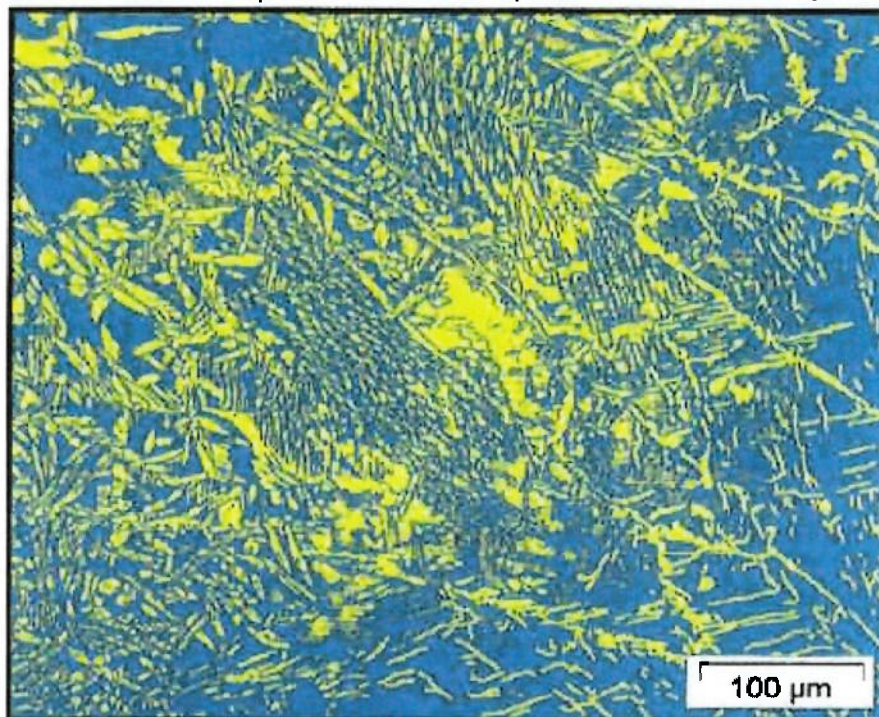
**Figura 48:** ZAC 3° passe 3° camada super duplex (UNS S32760) CP 01 (ref. Figura 38).



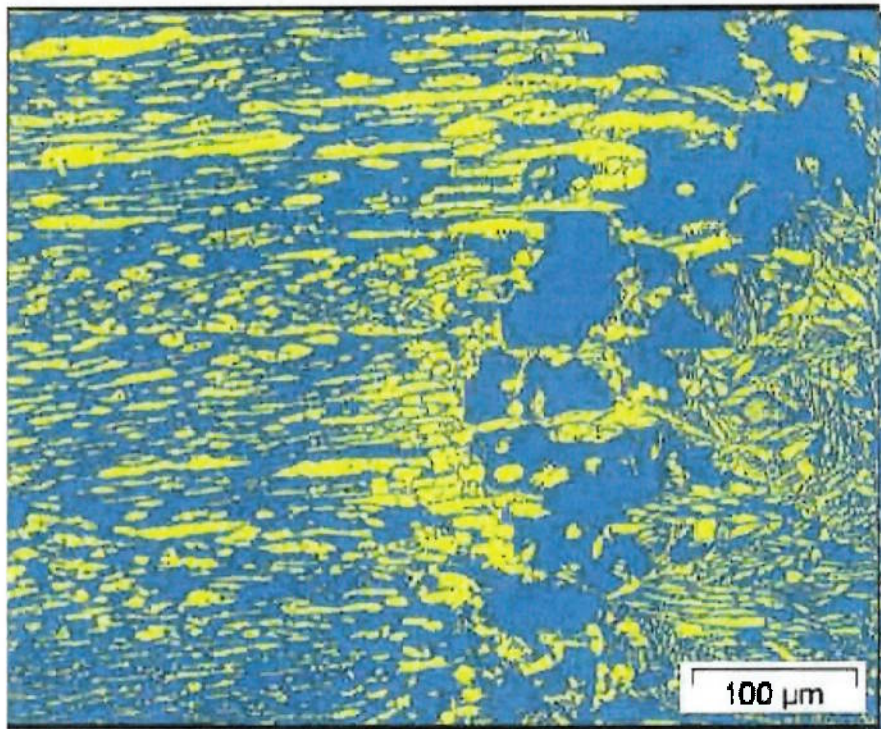
**Figura 49:** ZAC passe de reaquecimento 6° passe 4° camada x 3° passe 3° camada - super duplex UNS S32760 - CP 01 (ref. Figura 39).



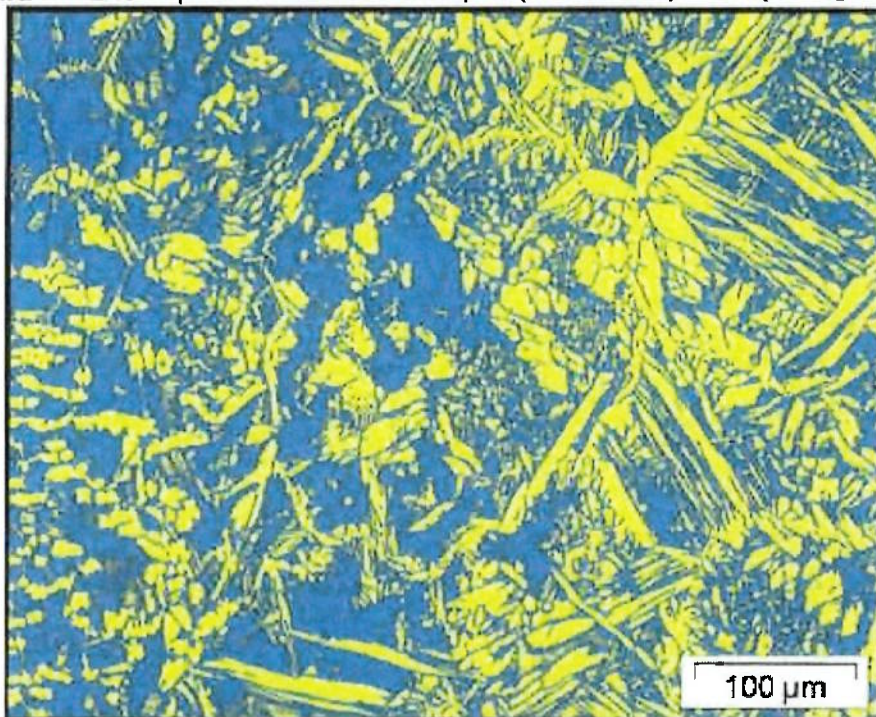
**Figura 50:** Zona fundida - 5º passe 4º camada x 6º passe 4º camada - CP 01 (ref. Figura 40).



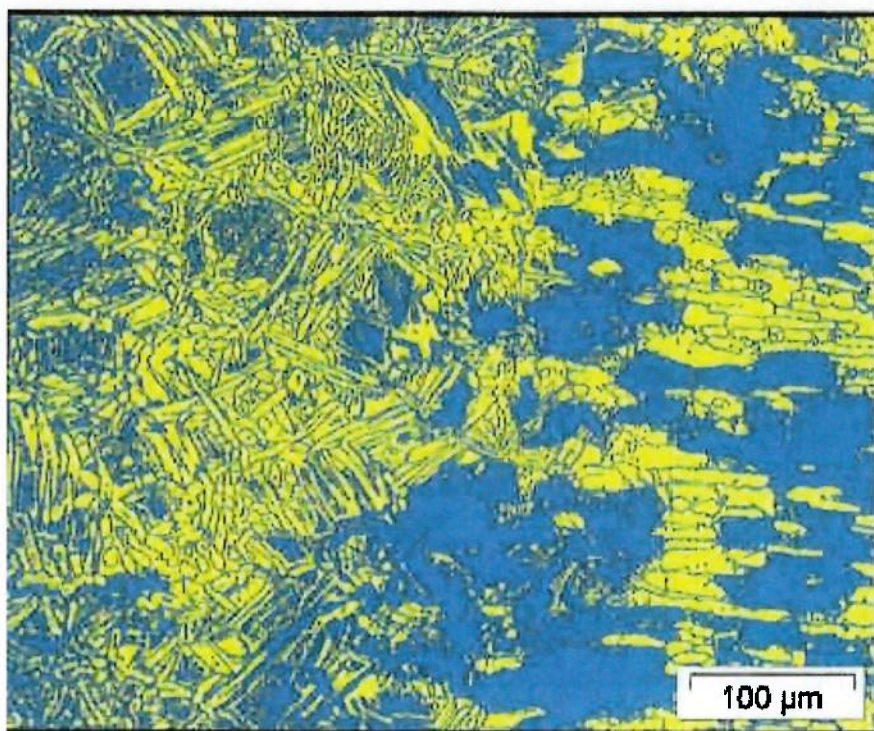
**Figura 51:** ZAC passe de reaquecimento 5º passe 4º camada x 4º passe 3º camada - lean duplex UNS S32304 - CP 01 (ref. Figura 41).



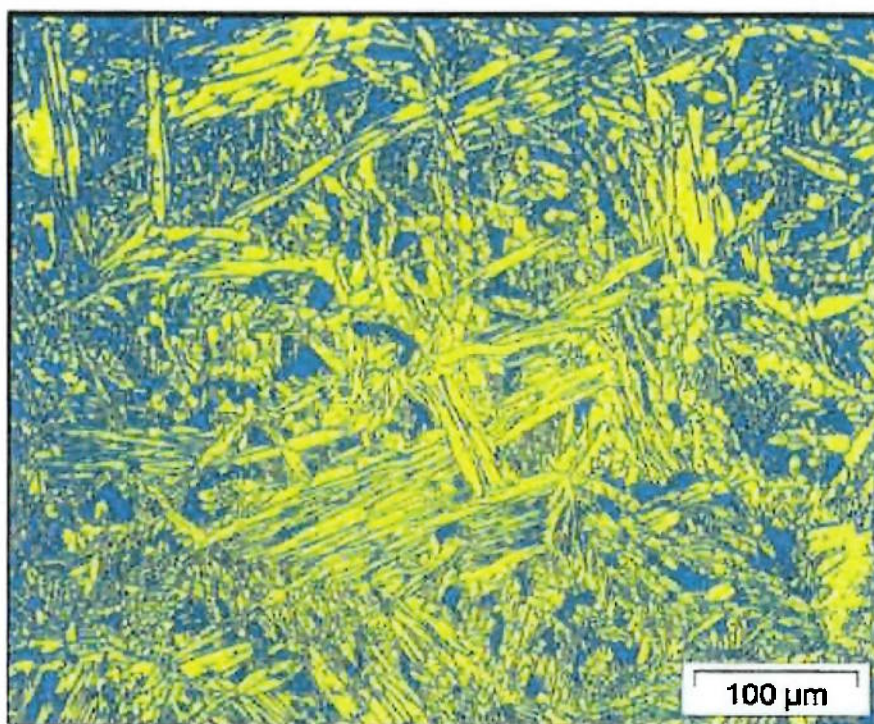
**Figura 52:** ZAC 4° passe 3° camada lean duplex (UNS S32304) CP 01 (ref. Figura 42).



**Figura 53:** ZAC lean duplex (UNS S32304) – Raiz - CP 01 (ref. Figura 43).

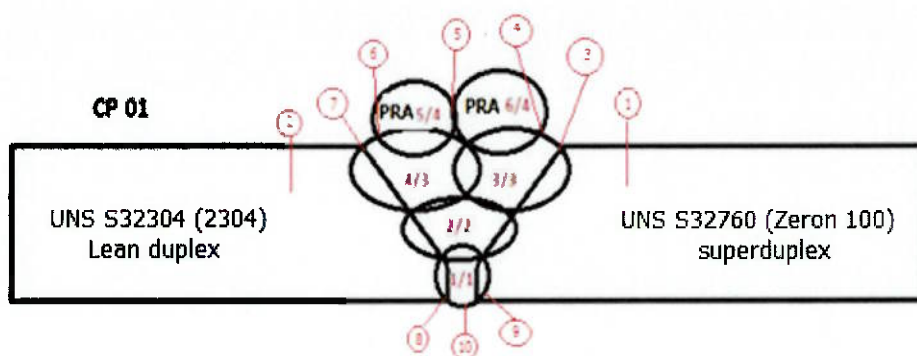


**Figura 54:** ZAC super duplex (UNS S32760) – Raiz - CP 01 (ref. Figura 44).

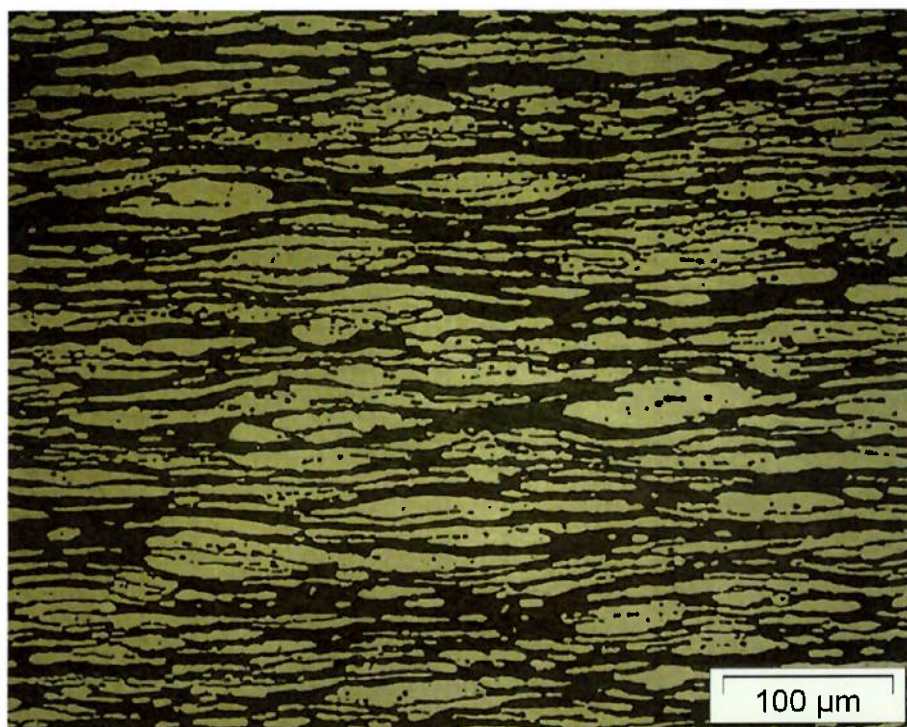


**Figura 55:** Zona fundida - Raiz - 1º passe 1º camada - CP 01 (ref. Figura 45).

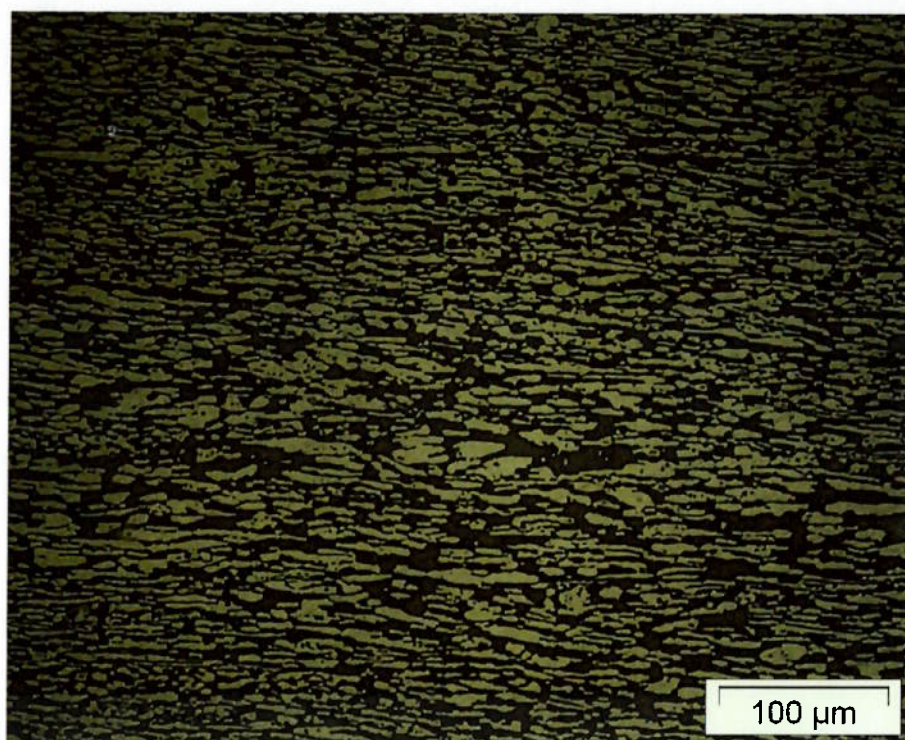
**Tabela 17:** Valores de % de ferrita / austenita para o CP 01



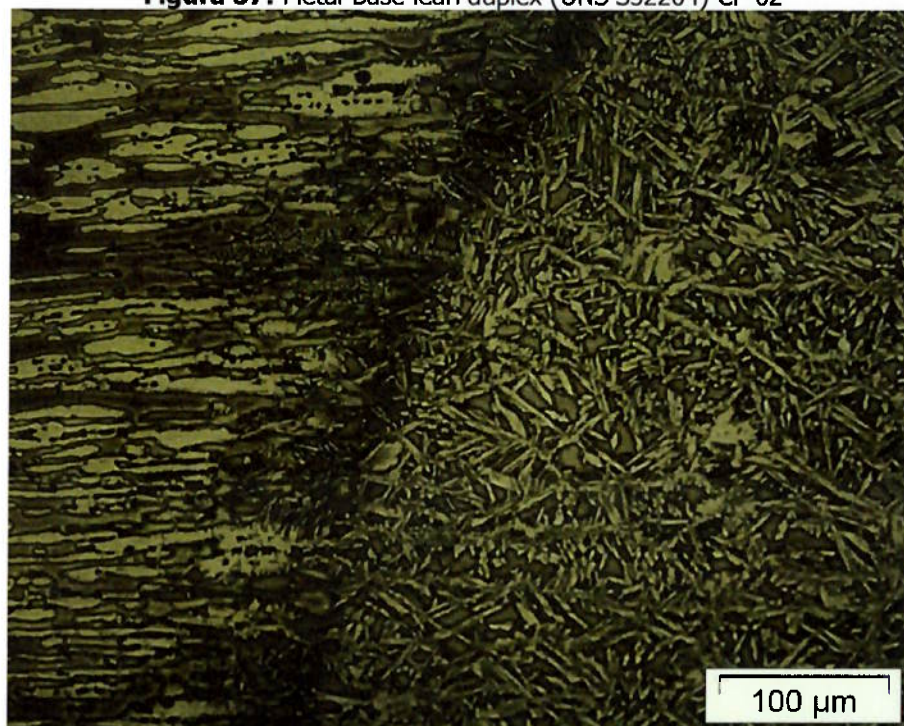
| Ponto | % de ferrita | % de austenita | fig.    | Região                             |
|-------|--------------|----------------|---------|------------------------------------|
| 1     | 54           | 46             | 36 e 46 | MB - SD                            |
| 2     | 55           | 45             | 37 e 47 | MB - D                             |
| 3     | 57           | 43             | 38 e 48 | ZAC 3°p 3°c - SD                   |
| 4     | 56           | 44             | 39 e 49 | ZAC - PRA - 6°p 4°c x 3°p 3°c - SD |
| 5     | 63           | 37             | 40 e 50 | ZF - 5°p 4°c x 6°p 4°c             |
| 6     | 60           | 40             | 41 e 51 | ZAC - PRA - 5°p 4°c x 4°p 3°c - D  |
| 7     | 58           | 42             | 42 e 52 | ZAC 4°p 3°c - D                    |
| 8     | 58           | 42             | 43 e 53 | ZAC - D - Raiz                     |
| 9     | 59           | 41             | 44 e 54 | ZAC - SD - Raiz                    |
| 10    | 52           | 48             | 45 e 55 | ZF - Raiz - 1°p 1°c                |



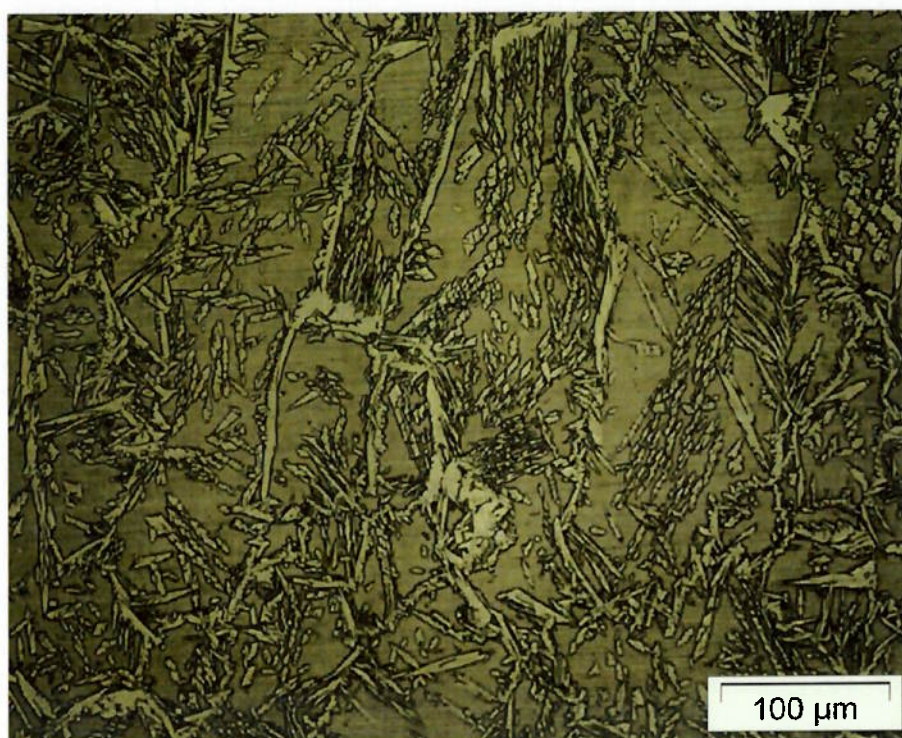
**Figura 56:** Metal Base super duplex (UNS S32760) CP 02



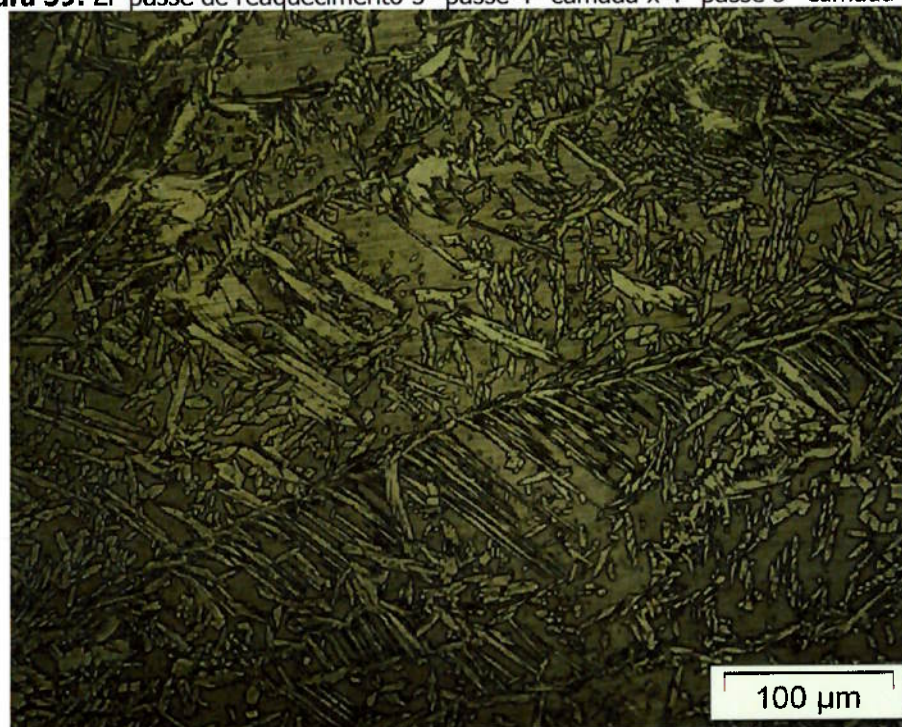
**Figura 57:** Metal Base lean duplex (UNS S32204) CP 02



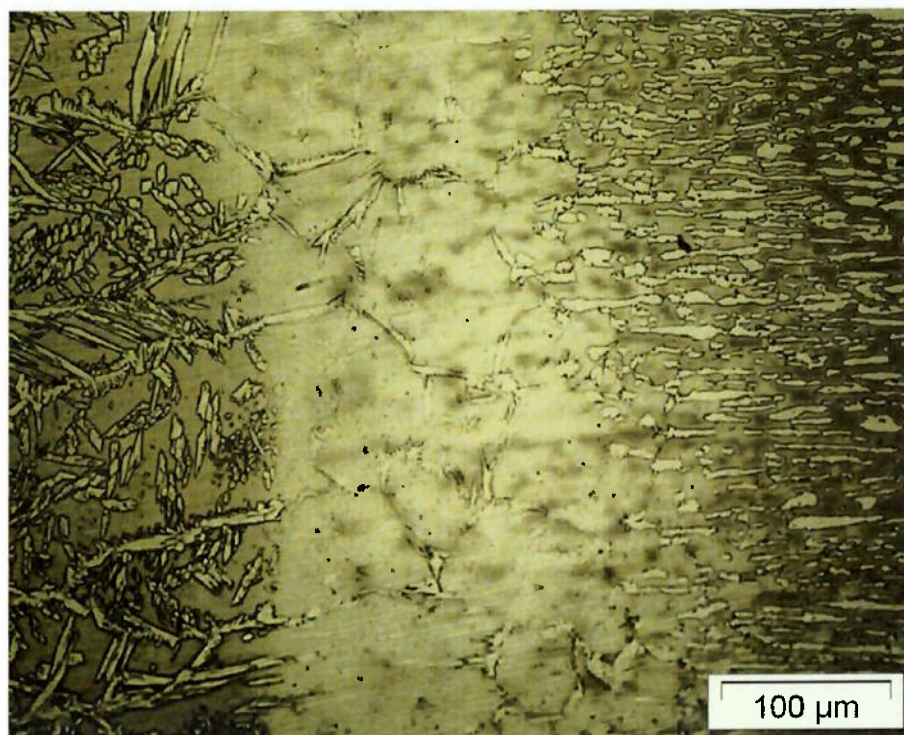
**Figura 58:** ZAC 3° passe 3° camada super duplex (UNS S32760) CP 02



**Figura 59:** ZF passe de reauecimento 5° passe 4° camada x 4° passe 3° camada CP 02



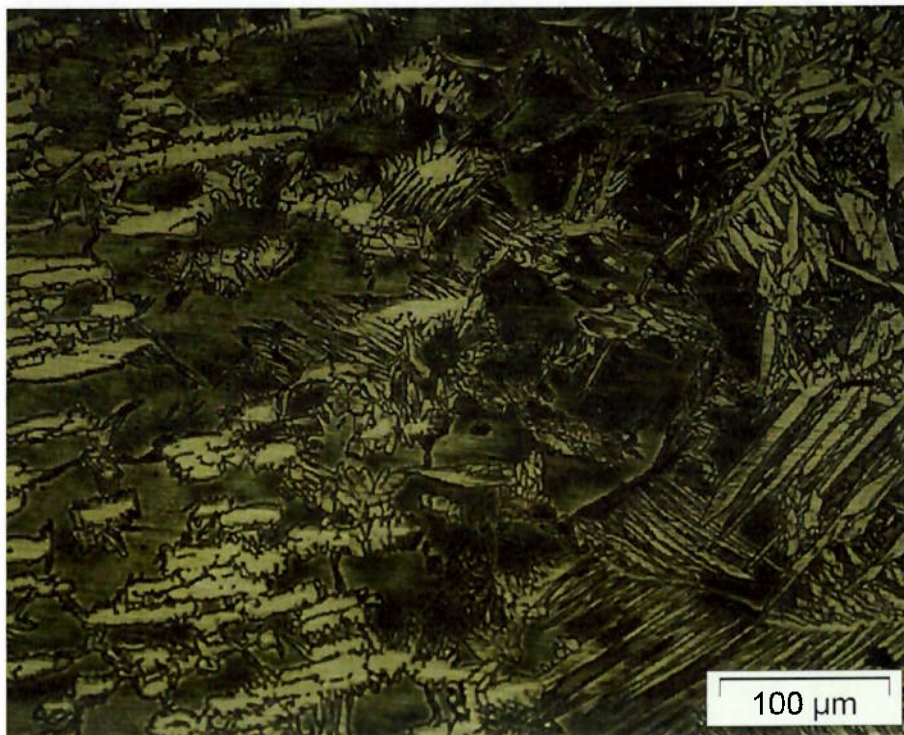
**Figura 60:** ZAC passe de reauecimento 5° passe 4° camada x 4° passe 3° camada – lean duplex (UNS S32304) - CP 02



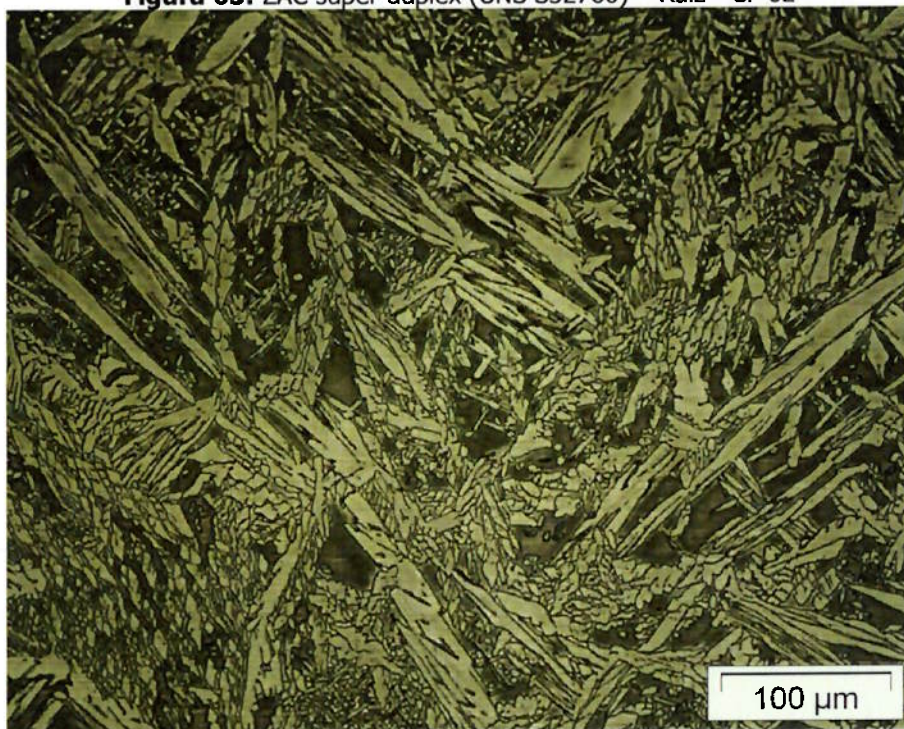
**Figura 61:** ZAC 4° passe 3° camada – lean duplex (UNS S32304) - CP 02



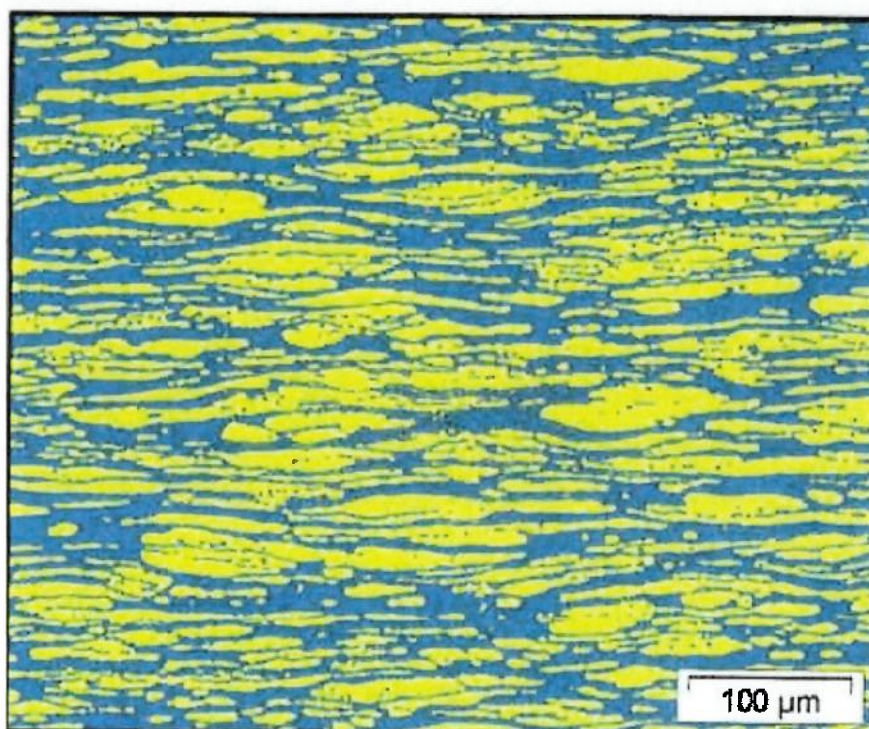
**Figura 62:** ZAC lean duplex (UNS S32304) – Raiz - CP 02



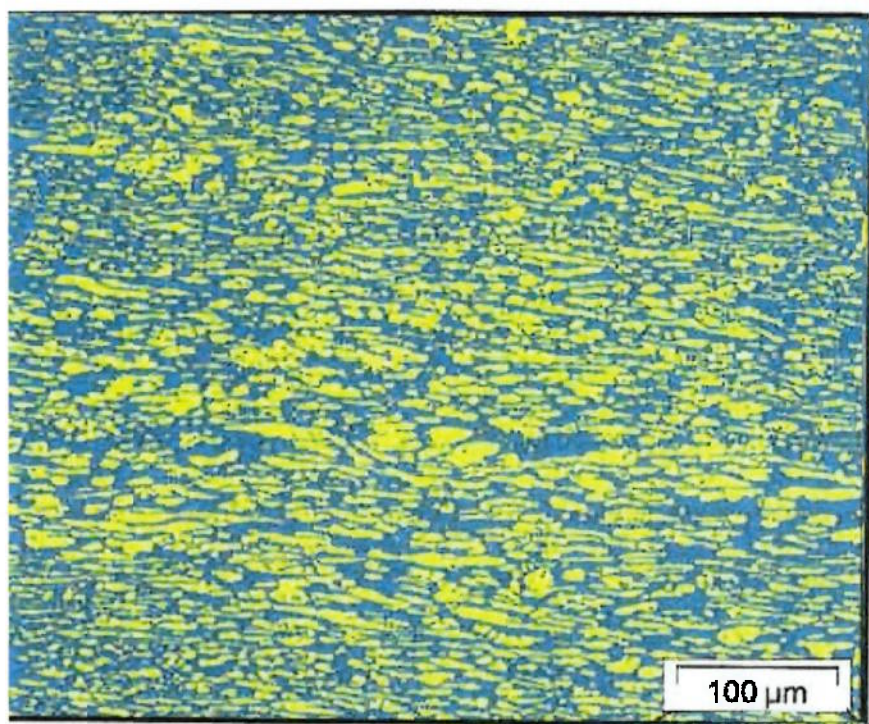
**Figura 63:** ZAC super duplex (UNS S32760) – Raiz - CP 02



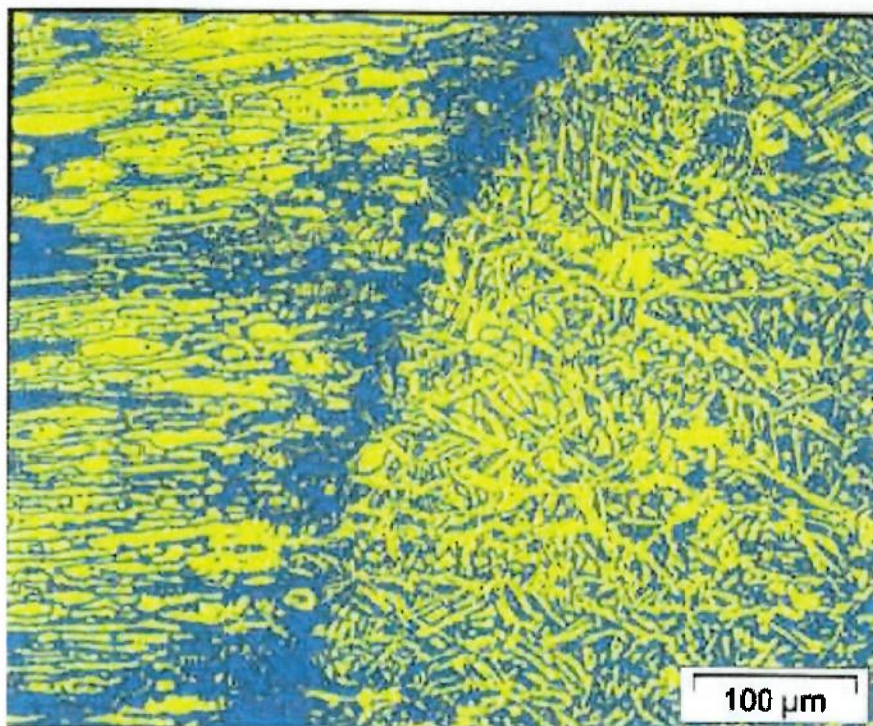
**Figura 64:** Zona fundida - Raiz - 1º passe 1º camada - CP 02



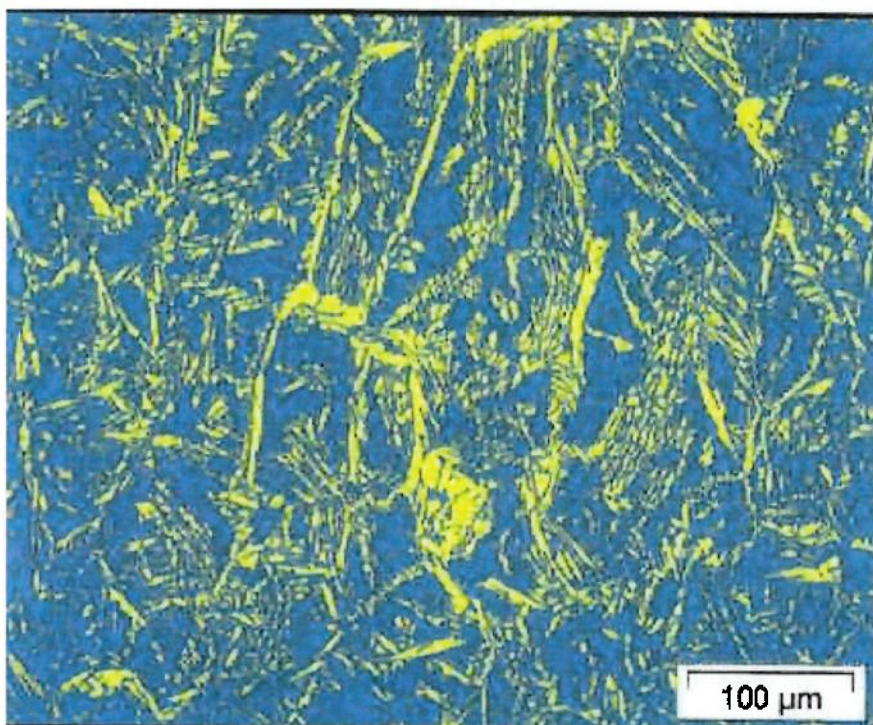
**Figura 65:** Metal Base super duplex (UNS S32760) CP 02 (ref. Figura 56).



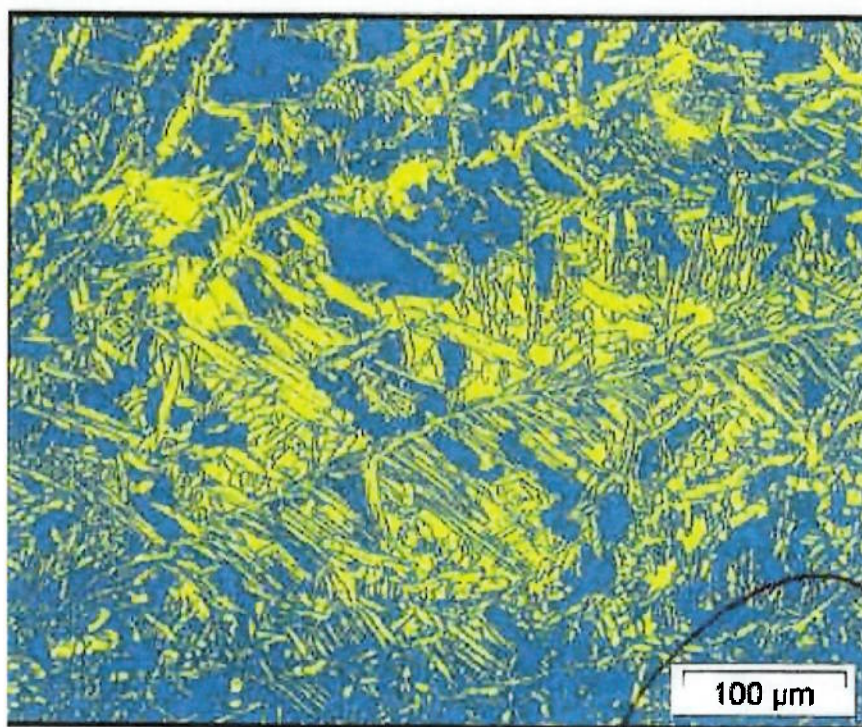
**Figura 66:** Metal Base lean duplex (UNS S32204) CP 02 (ref. Figura 57).



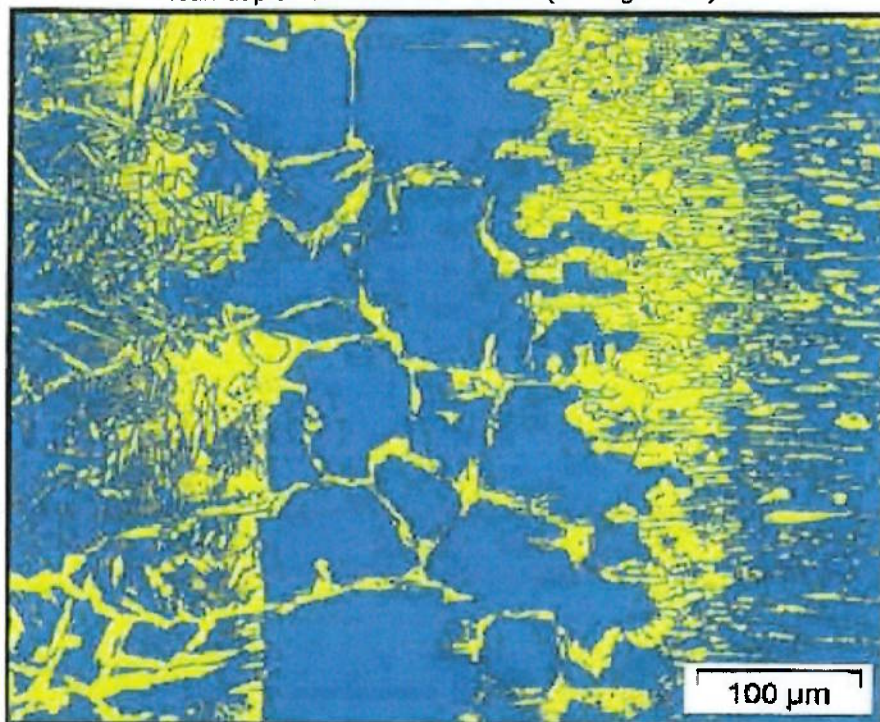
**Figura 67:** ZAC 3° passe 3° camada super duplex (UNS S32760) CP 02 (ref. Figura 58)



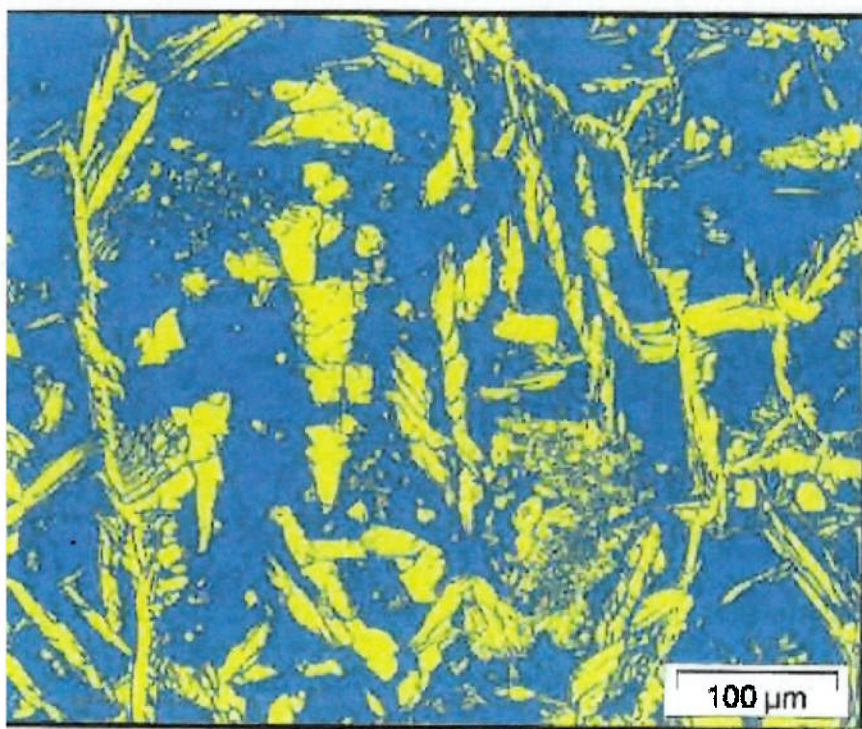
**Figura 68:** ZF passe de reaquecimento 5° passe 4° camada x 4° passe 3° camada CP 02 (ref. Figura 59)



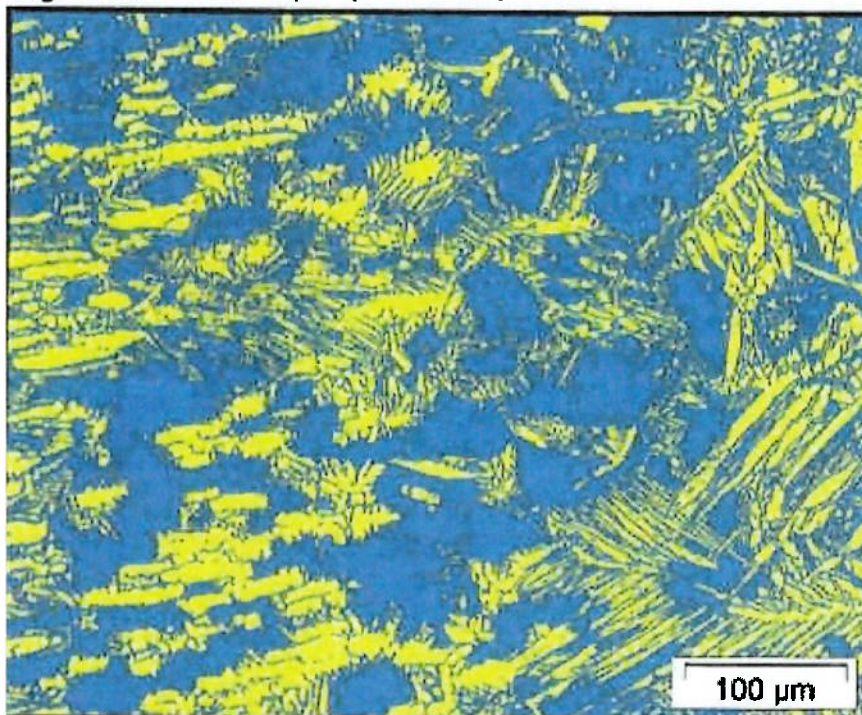
**Figura 69:** ZAC passe de reaquecimento 5° passe 4° camada x 4° passe 3° camada – lean duplex UNS S32304 - CP 02 (ref. Figura 60).



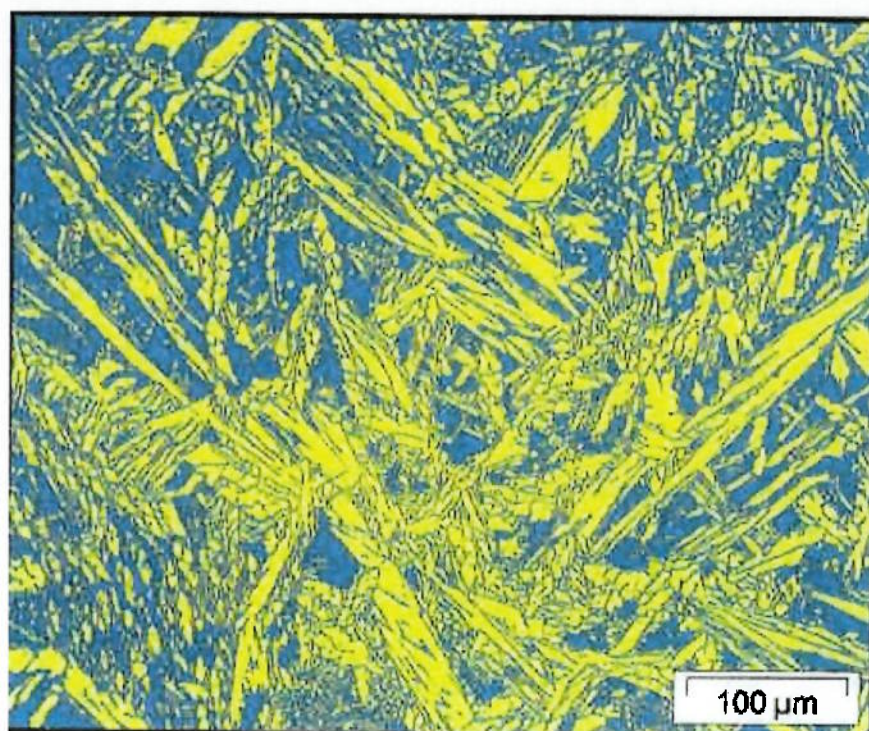
**Figura 70:** ZAC 4° passe 3° camada – lean duplex (UNS S32304) - CP 02 (ref. Figura 61).



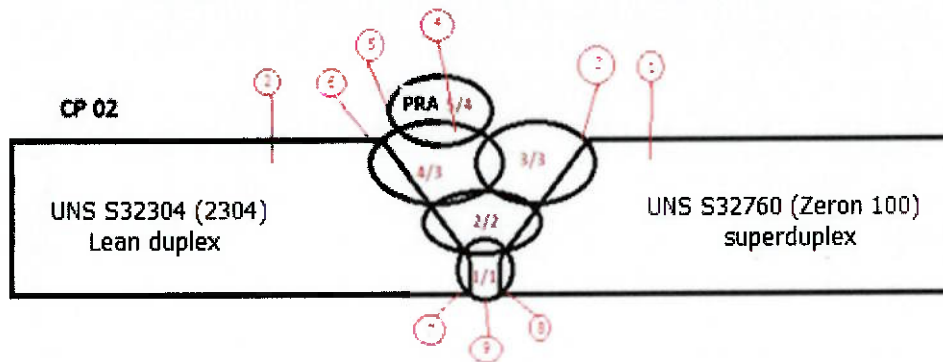
**Figura 71:** ZAC lean duplex (UNS S32304) – Raiz - CP 02 (ref. Figura 62).



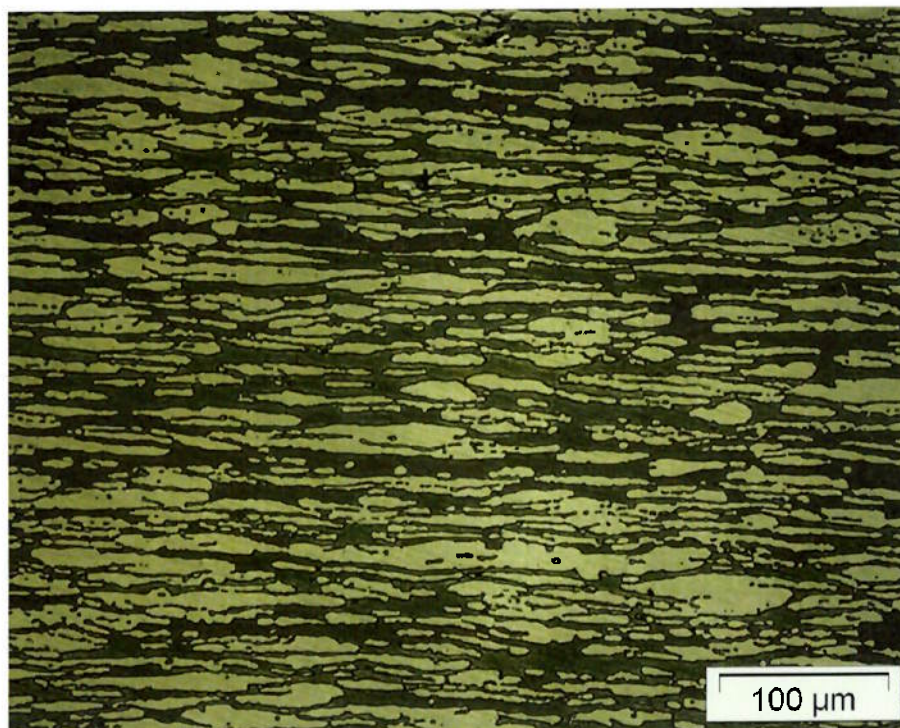
**Figura 72:** ZAC super duplex (UNS S32760) – Raiz - CP 02 (ref. Figura 63).

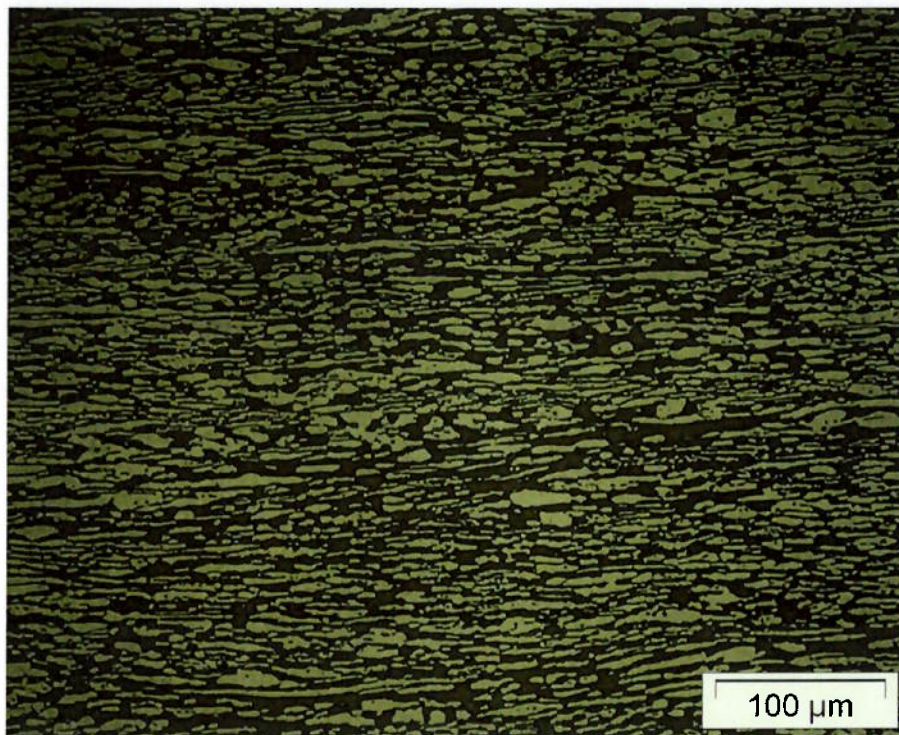


**Figura 73:** Zona fundida - Raiz - 1º passe 1º camada - CP 02 (ref. Figura 64).

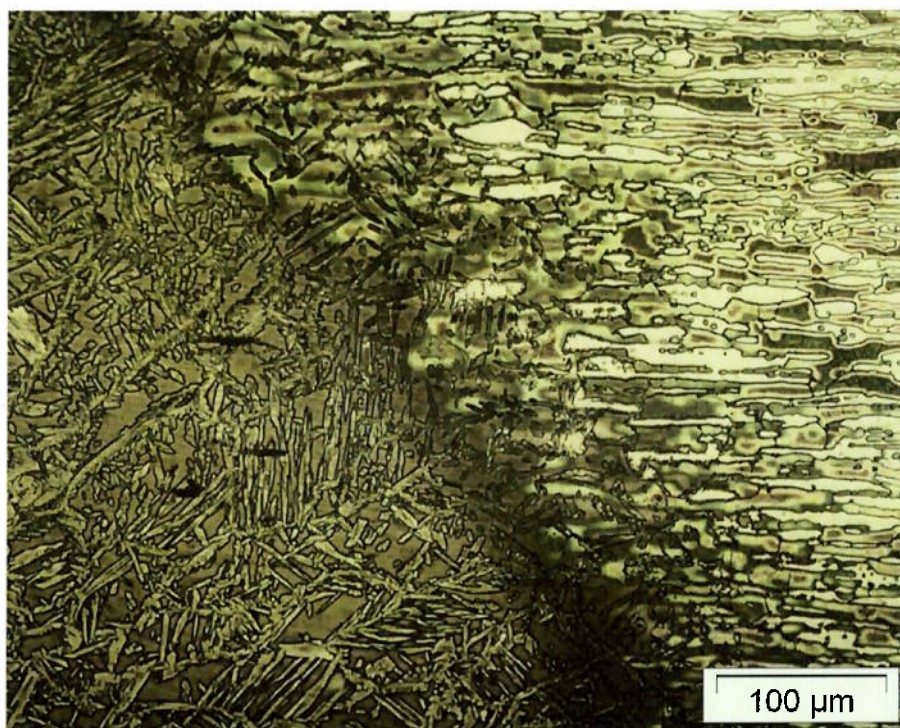
**Tabela 18:** Valores de % de ferrita / austenita para o CP 02.

| Ponto | % de ferrita | % de austenita | fig.    | Região                            |
|-------|--------------|----------------|---------|-----------------------------------|
| 1     | 54           | 46             | 56 e 65 | MB - SD                           |
| 2     | 56           | 44             | 57 e 66 | MB - D                            |
| 3     | 50           | 50             | 58 e 67 | ZAC 3°p 3°c - SD                  |
| 4     | 70           | 30             | 59 e 68 | ZF - PRA - 5°p 4°c x 4°p 3°c      |
| 5     | 61           | 39             | 60 e 69 | ZAC - PRA - 5°p 4°c x 4°p 3°c - D |
| 6     | 69           | 31             | 61 e 70 | ZAC 4°p 3°c - D                   |
| 7     | 69           | 31             | 62 e 71 | ZAC - D - Raiz                    |
| 8     | 62           | 38             | 63 e 72 | ZAC - SD - Raiz                   |
| 9     | 52           | 48             | 64 e 73 | ZF - Raiz - 1°p 1°c               |

**Figura 74:** Metal Base super duplex (UNS S32760) CP 03



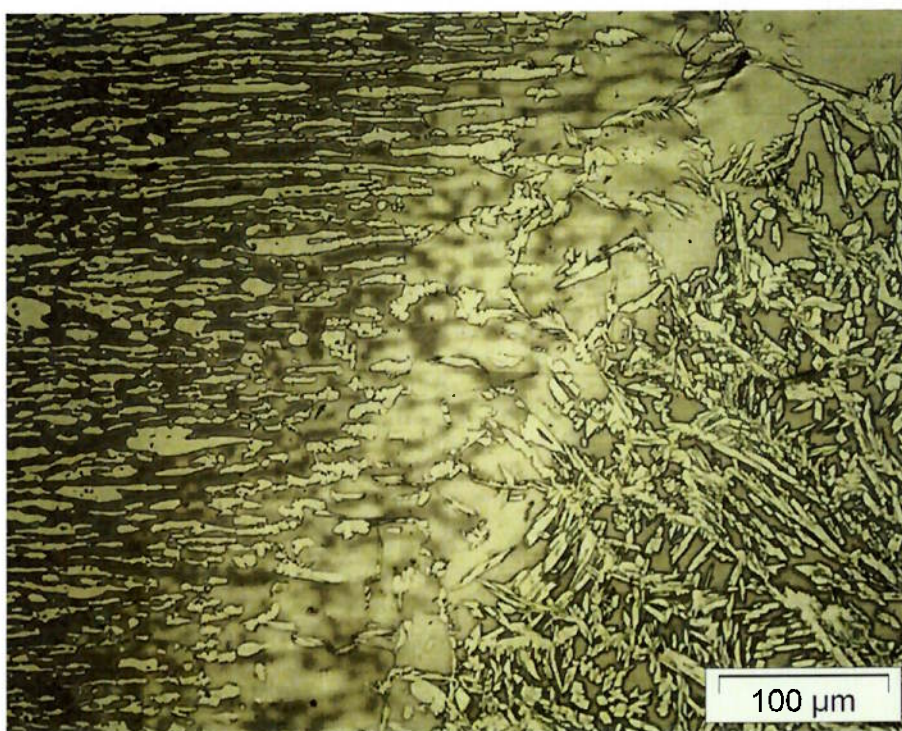
**Figura 75:** Metal Base lean duplex (UNS S32204) CP 03



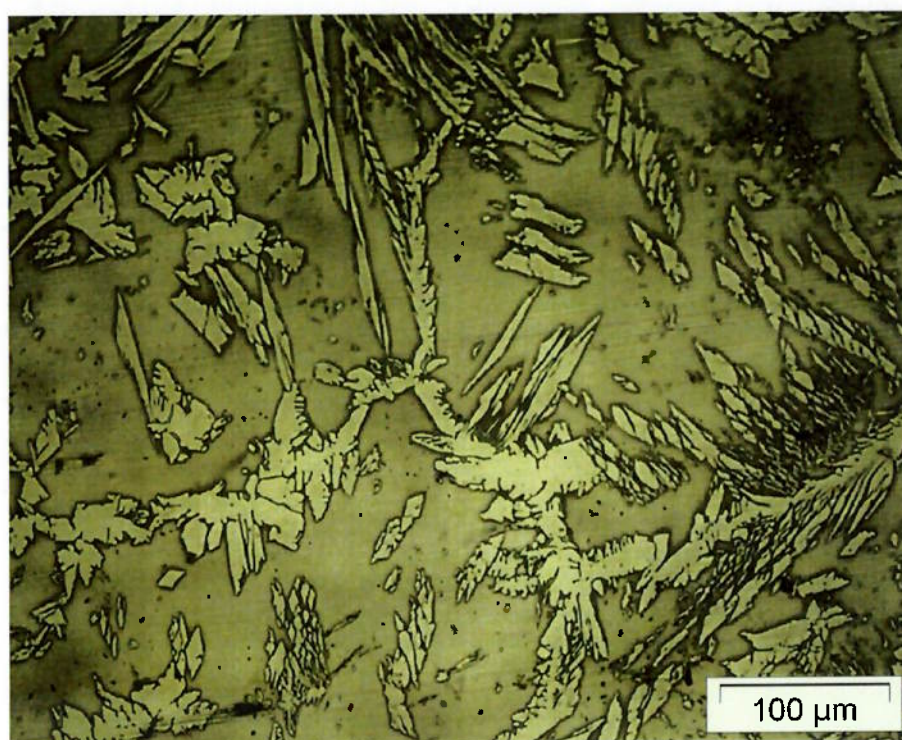
**Figura 76:** ZAC 3° passe 3° camada super duplex (UNS S32760) CP 03



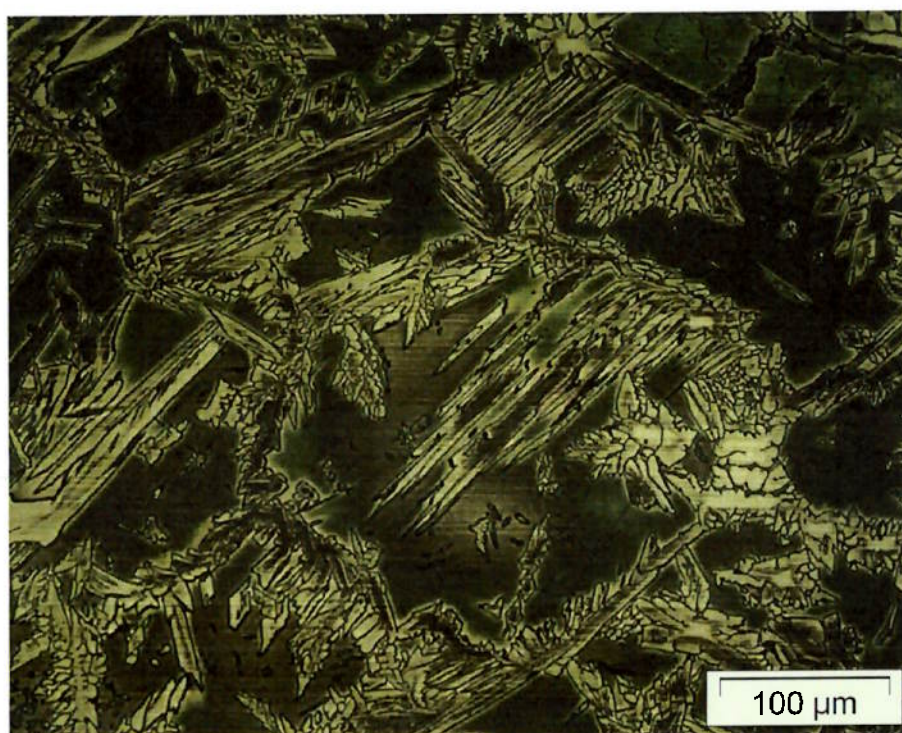
**Figura 77:** ZF 4° passe 3° camada x 3° passe 3° camada CP 03



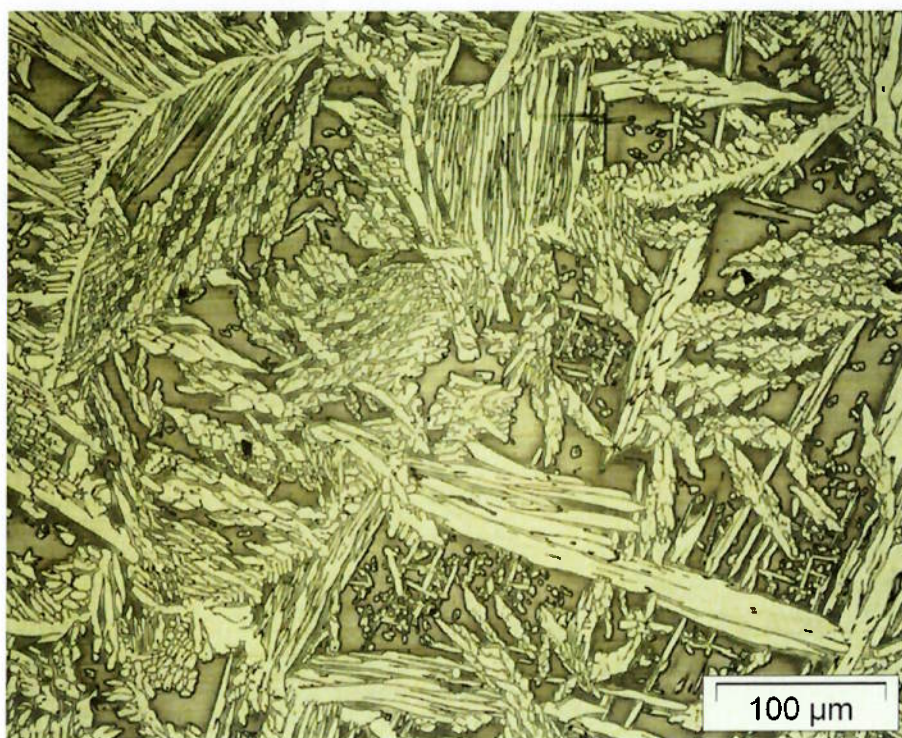
**Figura 78:** ZAC 4° passe 3° camada – lean duplex (UNS S32304) - CP 03



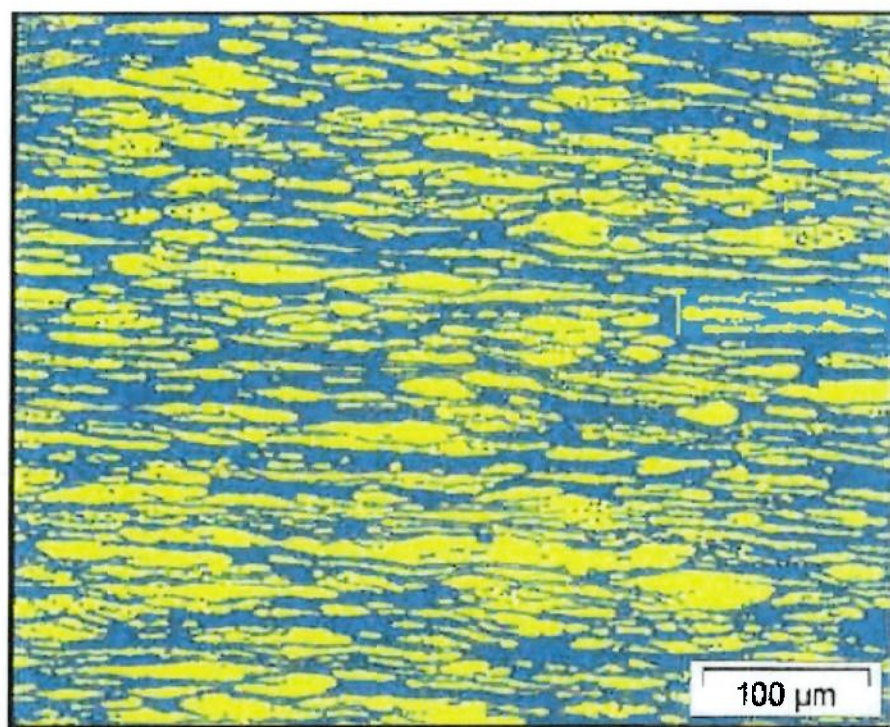
**Figura 79:** ZAC lean duplex (UNS S32304) – Raiz - CP 03



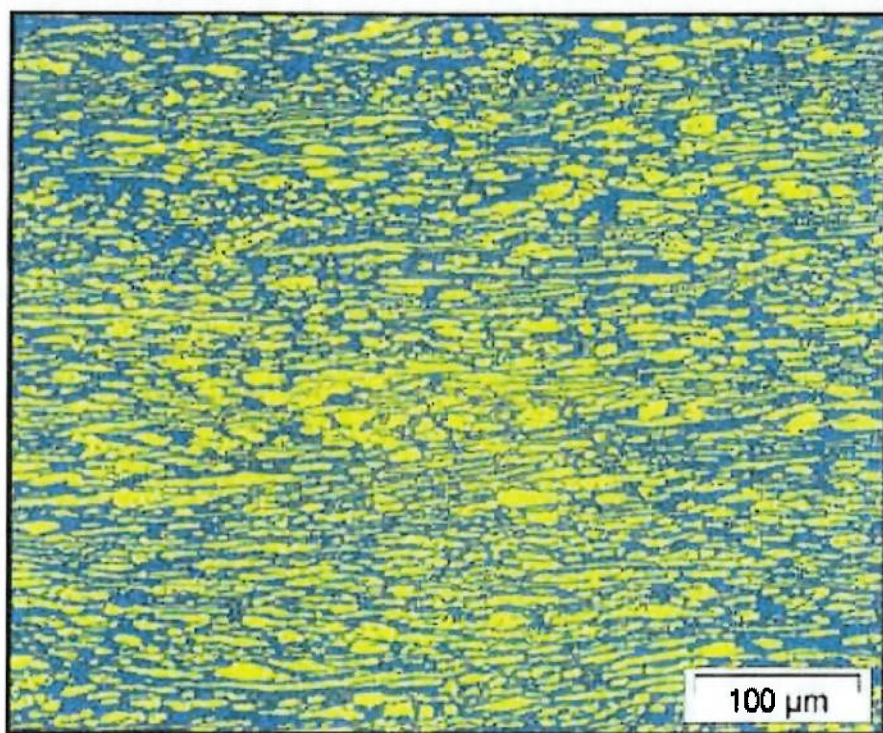
**Figura 80:** ZAC super duplex (UNS S32760) – Raiz - CP 03



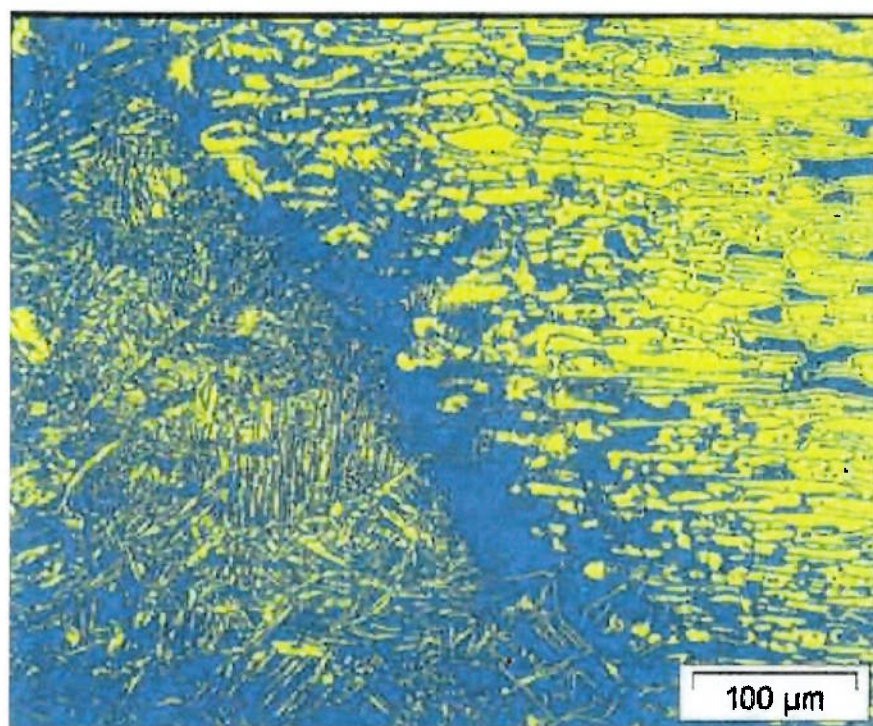
**Figura 81:** Zona fundida - Raiz - 1º passe 1º camada - CP 03



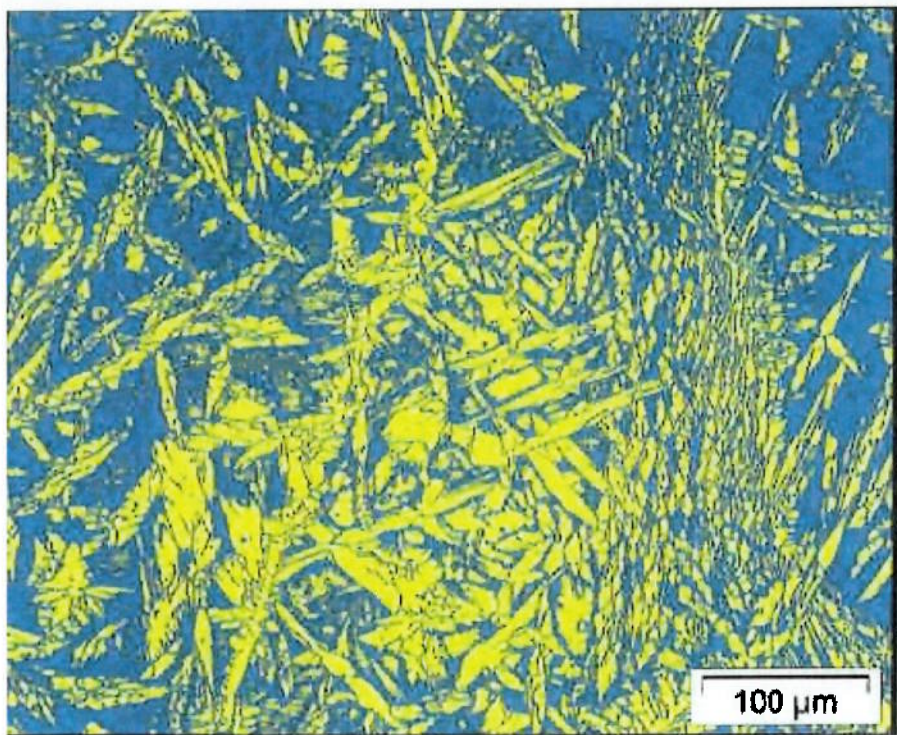
**Figura 82:** Metal Base super duplex (UNS S32760) CP 03 (ref. Figura 74).



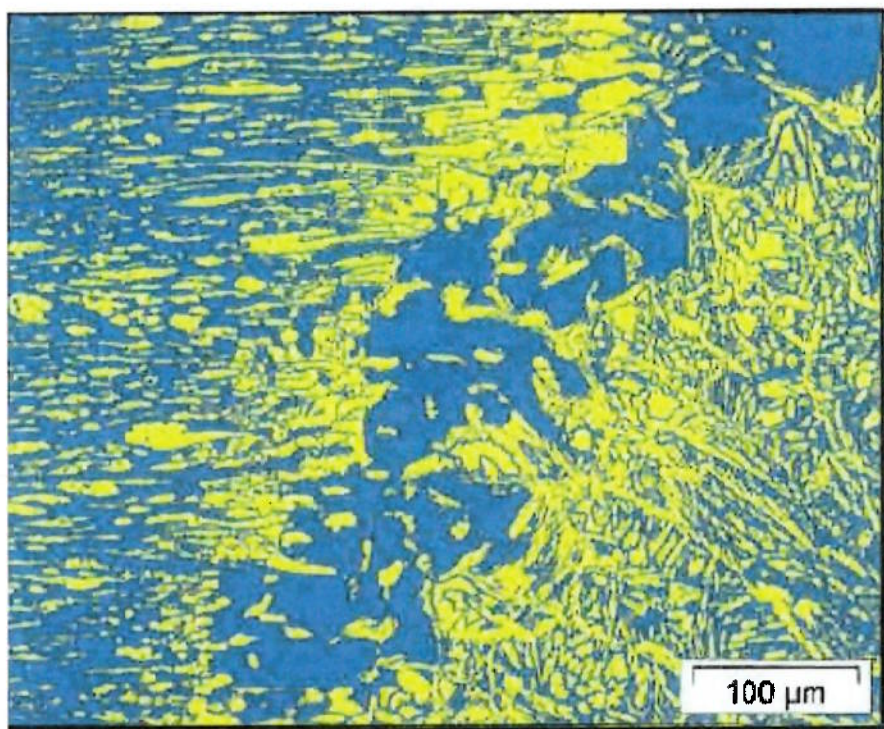
**Figura 83:** Metal Base lean duplex (UNS S32204) CP 03 (ref. Figura 75).



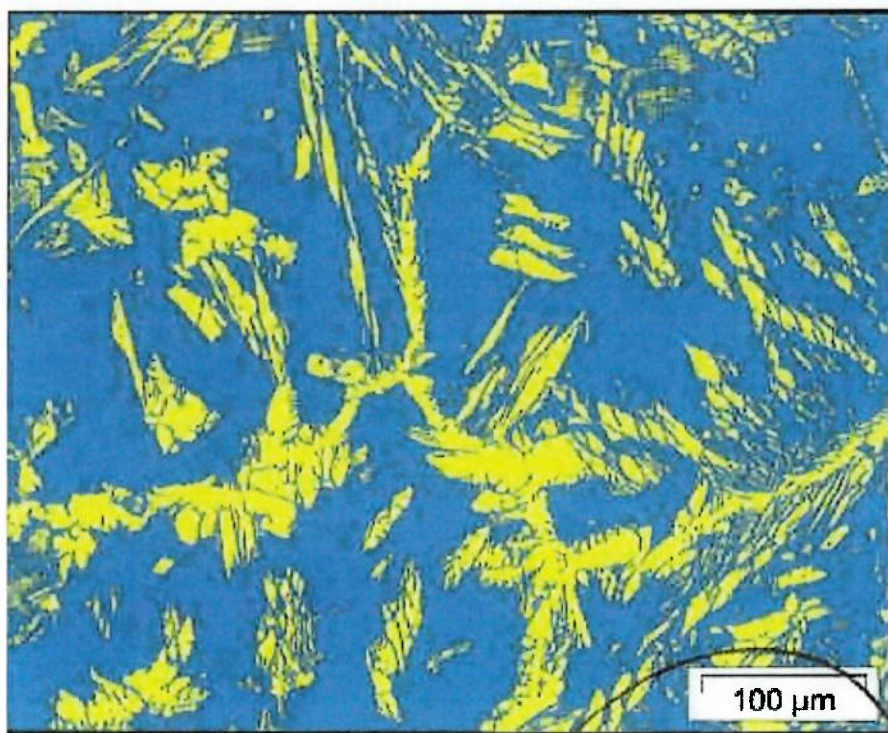
**Figura 84:** ZAC 3° passe 3° camada super duplex (UNS S32760) CP 03 (ref. Figura 76).



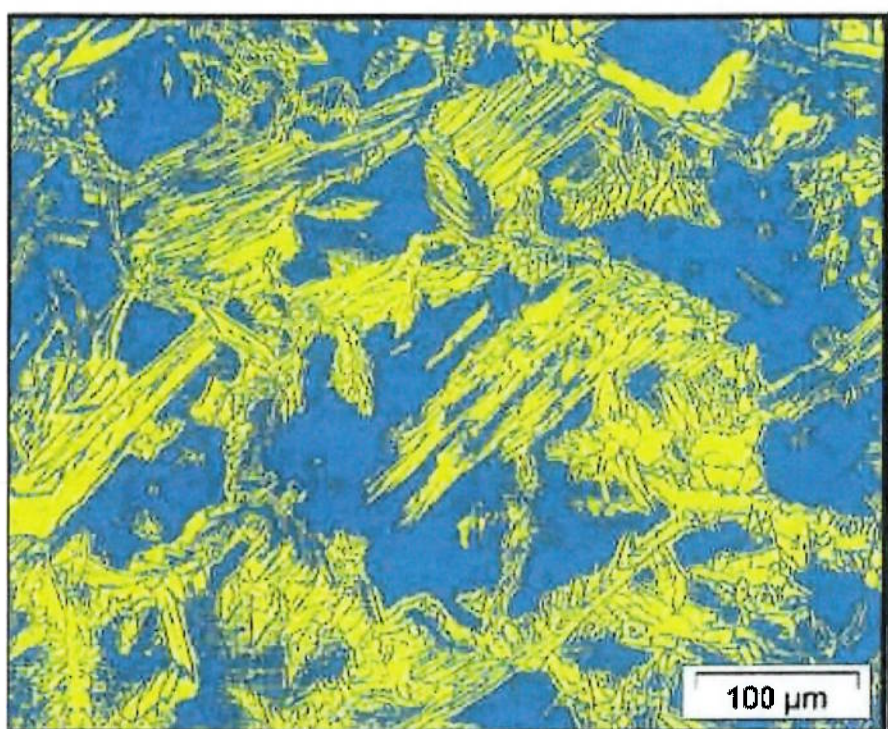
**Figura 85:** ZF 4° passe 3° camada x 3° passe 3° camada CP 03 (ref. Figura 77).



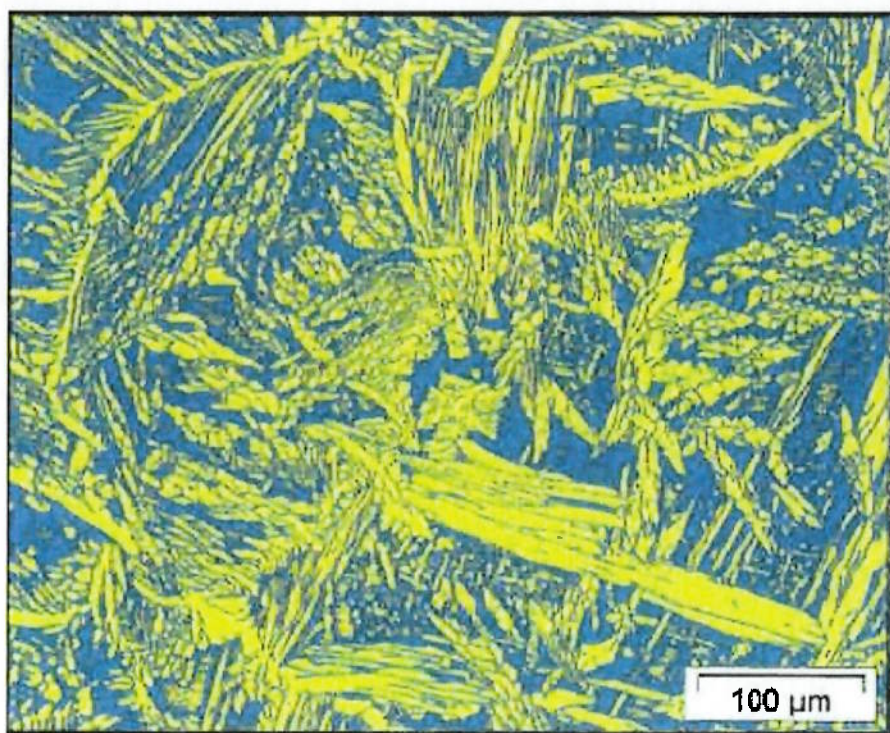
**Figura 86:** ZAC 4° passe 3° camada – lean duplex (UNS S32304) - CP 03 (ref. Figura 78).



**Figura 87:** ZAC lean duplex (UNS S32304) – Raiz - CP 03 (ref. Figura 79)

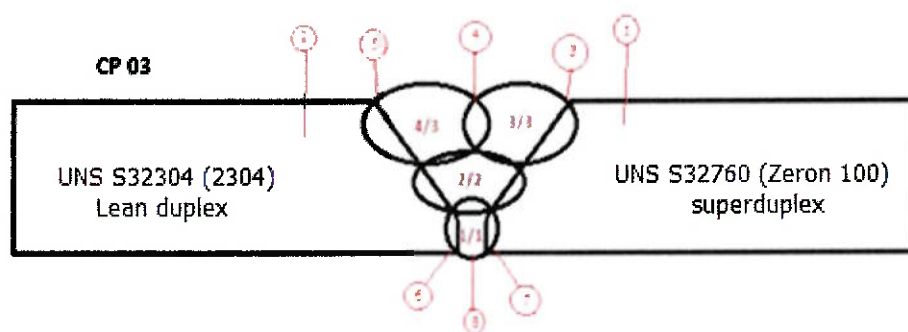


**Figura 88:** ZAC super duplex (UNS S32760) – Raiz - CP 03 (ref. Figura 80).



**Figura 89:** Zona fundida - Raiz - 1º passe 1ª camada - CP 03 (ref. Figura 81)

**Tabela 19:** Valores de % de ferrita / austenita para o CP 03



| Ponto | % de ferrita | % de austenita | fig.    | Região                 |
|-------|--------------|----------------|---------|------------------------|
| 1     | 56           | 44             | 74 e 82 | MB - SD                |
| 2     | 55           | 45             | 75 e 83 | MB - D                 |
| 3     | 61           | 39             | 76 e 84 | ZAC 3ºp 3ºc - SD       |
| 4     | 59           | 41             | 77 e 85 | ZF - 4ºp 3ºc x 3ºp 3ºc |
| 5     | 59           | 41             | 78 e 86 | ZAC 4ºp 3ºc - D        |
| 6     | 72           | 28             | 79 e 87 | ZAC - D - Raiz         |
| 7     | 58           | 42             | 80 e 88 | ZAC - SD - Raiz        |
| 8     | 54           | 46             | 81 e 89 | ZF - 1ºp 1ºc           |

#### **4.6 Ensaio de Microdureza**

Foram realizados ensaios de microdureza Vickers ( $HV_{500}$ ) nas amostras previamente submetidas ao ataque eletrolítico, a microdureza foi medida através da utilização de um microscópio equipado com um dispositivo para ensaio de microdureza. A norma ASTM E 3 - 07 foi utilizada como parâmetro para a preparação dos corpos de prova, o método de ensaio seguiu os critérios da norma ASTM E 384 – 09, o critério de aceitação não foi especificado, uma vez que um dos objetivos desse trabalho é avaliar e comparar a microdureza nas diferentes regiões dos três corpos de prova.

##### **4.6.1 Determinação das áreas**

O critério para definição das áreas escolhidas para o ensaio de microdureza foi baseado nos objetivos desse estudo.

Abaixo temos um descritivo da localização e quantidade de pontos de medição de microdureza.

CP 01 foram realizados 26 pontos de microdureza:

- 2 pontos metal de base UNS S32760 (1 ponto na face, 1 ponto na raiz).
- 2 pontos metal de base UNS S32304 (1 ponto na face, 1 ponto na raiz).
- 3 pontos na ZAC da zona fundida (3º passe 3º camada) com metal base UNS S32760 na região da face.

- 3 pontos na ZAC da zona fundida (4º passe 3º camada) com metal base UNS S32304 na região da face.
- 3 pontos na ZAC da zona fundida no passe reaquecimento do material de UNS S32760 (6º passe 4º camada x 3º passe 3º camada) na região da face.
- 3 pontos na ZAC da zona fundida no passe reaquecimento do material de UNS S32304 (5º passe 4º camada x 4º passe 3º camada) na região da face.
- 1 ponto na zona fundida do passe de reaquecimento do material de UNS S32760.
- 1 ponto na zona fundida do passe de reaquecimento do material de UNS S32304.
- 1 ponto na ZAC da zona fundida no passe reaquecimento do material de UNS S32304 x UNS S32760 (5º passe 4º camada x 6º passe 4º camada) na face.
- 3 pontos na ZAC da zona fundida (1º passe 1º camada) com metal base UNS S32760 na região da raiz.
- 3 pontos na ZAC da zona fundida (1º passe 1º camada) com metal base UNS S32304 na região da raiz.
- 1 ponto na zona fundida na raiz (1º passe 1º camada).

CP 02 foram realizados 21 pontos de microdureza:

- 2 pontos metal de base UNS S32760 (1 ponto na face, 1 ponto na raiz).
- 2 pontos metal de base UNS S32304 (1 ponto na face, 1 ponto na raiz).
- 3 pontos na ZAC da zona fundida (3º passe 3º camada) com metal base UNS S32760 na região da face.

- 3 pontos na ZAC da zona fundida (4º passe 3º camada) com metal base UNS S32304 na região da face.
- 1 ponto na zona fundida do passe sem reaquecimento (3º passe 3º camada).
- 1 ponto na ZAC da zona fundida (4º passe 3º camada x 3º passe 3º camada) na região da face.
- 1 ponto na zona fundida do passe de reaquecimento do material de UNS S32304 (5º passe 4º camada)
- 3 pontos na ZAC da zona fundida no passe reaquecimento do material de UNS S32304 (5º passe 4º camada x 4º passe 3º camada) na região da face.
- 3 pontos na ZAC da zona fundida (1º passe 1º camada) com metal base UNS S32760 na região da raiz.
- 3 pontos na ZAC da zona fundida (1º passe 1º camada) com metal base UNS S32304 na região da raiz.
- 1 ponto na zona fundida na raiz (1º passe 1º camada).

CP 03 foram realizados 18 pontos de microdureza:

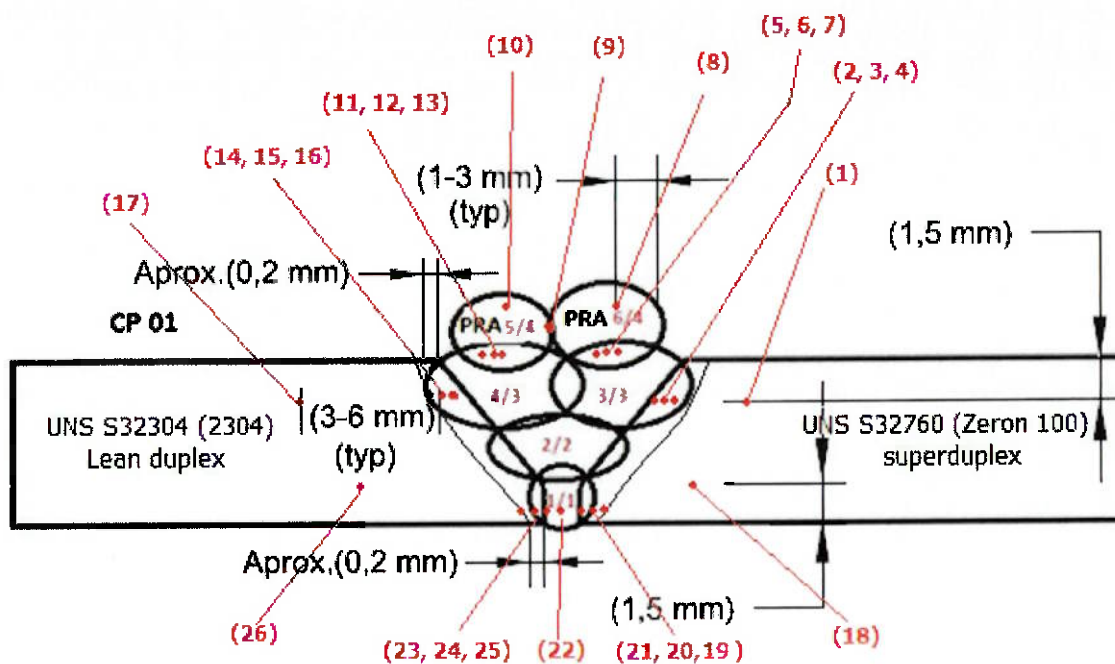
- 2 pontos metal de base UNS S32760 (1 ponto na face, 1 ponto na raiz).
- 2 pontos metal de base UNS S32304 (1 ponto na face, 1 ponto na raiz).
- 3 pontos na ZAC da zona fundida (3º passe 3º camada) com metal base UNS S32760 na região da face.
- 3 pontos na ZAC da zona fundida (4º passe 3º camada) com metal base UNS S32304 na região da face.

- 1 ponto na ZAC da zona fundida (4º passe 3º camada x 3º passe 3º camada) na região da face.
- 3 pontos na ZAC da zona fundida (1º passe 1º camada) com metal base UNS S32760 na região da raiz.
- 3 pontos na ZAC da zona fundida (1º passe 1º camada) com metal base UNS S32304 na região da raiz.
- 1 ponto na zona fundida na raiz (1º passe 1º camada).

## **5. Resultados e Discussões**

### ***5.1 Microdureza***

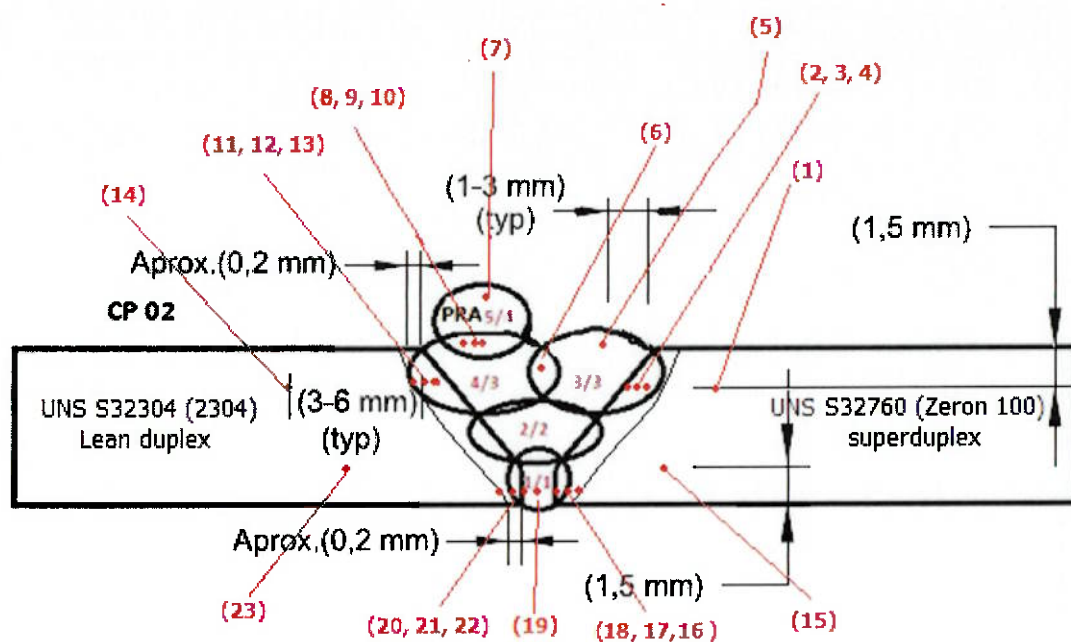
As regiões ensaiadas estão informadas nos croquis das figuras 90, 91 e 92 para os CP 01, CP 02 e CP 03 respectivamente. Os resultados obtidos na medição da microdureza Vickers HV<sub>500</sub> estão descritos nas tabelas 20, 21 e 22 para os CP 01, CP 02 e CP 03 respectivamente.



**Figura 90:** Localização das regiões onde foi medida a microdureza no CP 01

**Tabela 20:** Resultado da medição de microdureza no CP 01 - Face / Raiz

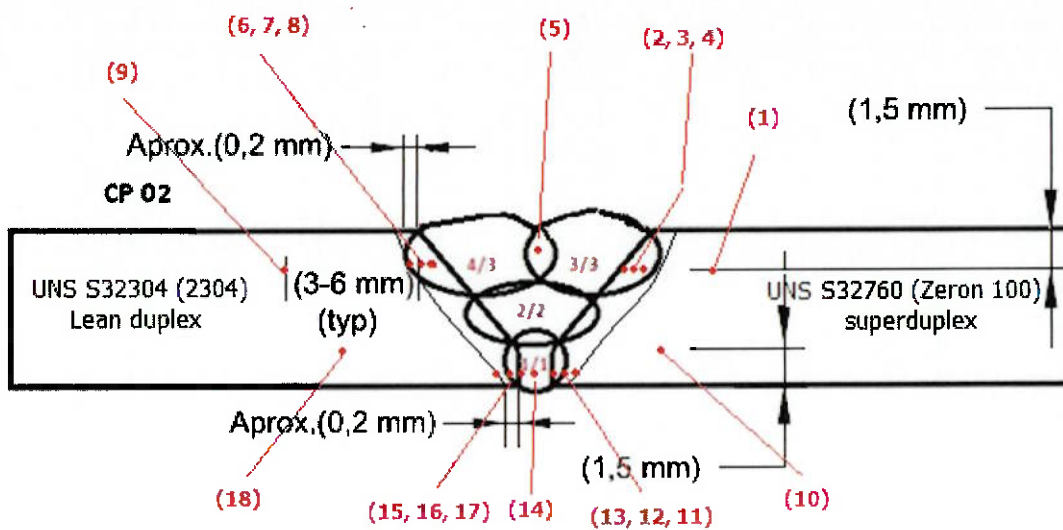
| FACE  |                                |                                    | RAIZ  |                                |                     |
|-------|--------------------------------|------------------------------------|-------|--------------------------------|---------------------|
| Ponto | Dureza<br>(HV <sub>500</sub> ) | Região                             | Ponto | Dureza<br>(HV <sub>500</sub> ) | Região              |
| 1     | 343                            | MB - SD                            | 18    | 360                            | MB - SD             |
| 2     | 370                            | ZAC 3°p 3°c - SD                   | 19    | 350                            | ZAC - SD - Raiz     |
| 3     | 386                            | ZAC 3°p 3°c - SD                   | 20    | 349                            | ZAC - SD - Raiz     |
| 4     | 382                            | ZAC 3°p 3°c - SD                   | 21    | 327                            | ZAC - SD - Raiz     |
| 5     | 367                            | ZAC - PRA - 6°p 4°c x 3°p 3°c - SD | 22    | 339                            | ZF - Raiz - 1°p 1°c |
| 6     | 360                            | ZAC - PRA - 6°p 4°c x 3°p 3°c - SD | 23    | 359                            | ZAC - D - Raiz      |
| 7     | 365                            | ZAC - PRA - 6°p 4°c x 3°p 3°c - SD | 24    | 362                            | ZAC - D - Raiz      |
| 8     | 375                            | ZF - 6°p 4°c                       | 25    | 306                            | ZAC - D - Raiz      |
| 9     | 363                            | ZF - 5°p 4°c x 6°p 4°c             | 26    | 296                            | MB - D              |
| 10    | 373                            | ZF - 5°p 4°c                       |       |                                |                     |
| 11    | 378                            | ZAC - PRA - 5°p 4°c x 4°p 3°c - D  |       |                                |                     |
| 12    | 386                            | ZAC - PRA - 5°p 4°c x 4°p 3°c - D  |       |                                |                     |
| 13    | 356                            | ZAC - PRA - 5°p 4°c x 4°p 3°c - D  |       |                                |                     |
| 14    | 299                            | ZAC 4°p 3°c - D                    |       |                                |                     |
| 15    | 302                            | ZAC 4°p 3°c - D                    |       |                                |                     |
| 16    | 301                            | ZAC 4°p 3°c - D                    |       |                                |                     |
| 17    | 299                            | MB - D                             |       |                                |                     |



**Figura 91:** Localização das regiões onde foi medida a microdureza no CP 02

**Tabela 21:** Resultado da medição de microdureza no CP 02 - Face / Raiz

| FACE  |                   |                                   | RAIZ  |                   |                     |
|-------|-------------------|-----------------------------------|-------|-------------------|---------------------|
| Ponto | Dureza<br>(HV500) | Região                            | Ponto | Dureza<br>(HV500) | Região              |
| 1     | 364               | MB - SD                           | 15    | 366               | MB - SD             |
| 2     | 371               | ZAC 3°p 3°c - SD                  | 16    | 363               | ZAC - SD - Raiz     |
| 3     | 375               | ZAC 3°p 3°c - SD                  | 17    | 356               | ZAC - SD - Raiz     |
| 4     | 370               | ZAC 3°p 3°c - SD                  | 18    | 357               | ZAC - SD - Raiz     |
| 5     | 366               | ZF 3°p 3°c - SD                   | 19    | 367               | ZF - Raiz - 1°p 1°c |
| 6     | 350               | ZF - 4°p 3°c x 3°p 3°c            | 20    | 348               | ZAC - D - Raiz      |
| 7     | 372               | ZF - 5°p 4°c                      | 21    | 340               | ZAC - D - Raiz      |
| 8     | 378               | ZAC - PRA - 5°p 4°c x 4°p 3°c - D | 22    | 330               | ZAC - D - Raiz      |
| 9     | 343               | ZAC - PRA - 5°p 4°c x 4°p 3°c - D | 23    | 333               | MB - D              |
| 10    | 350               | ZAC - PRA - 5°p 4°c x 4°p 3°c - D |       |                   |                     |
| 11    | 336               | ZAC 4°p 3°c - D                   |       |                   |                     |
| 12    | 299               | ZAC 4°p 3°c - D                   |       |                   |                     |
| 13    | 298               | ZAC 4°p 3°c - D                   |       |                   |                     |
| 14    | 330               | MB - D                            |       |                   |                     |



**Figura 92:** Localização das regiões onde foi medida a microdureza no CP 03

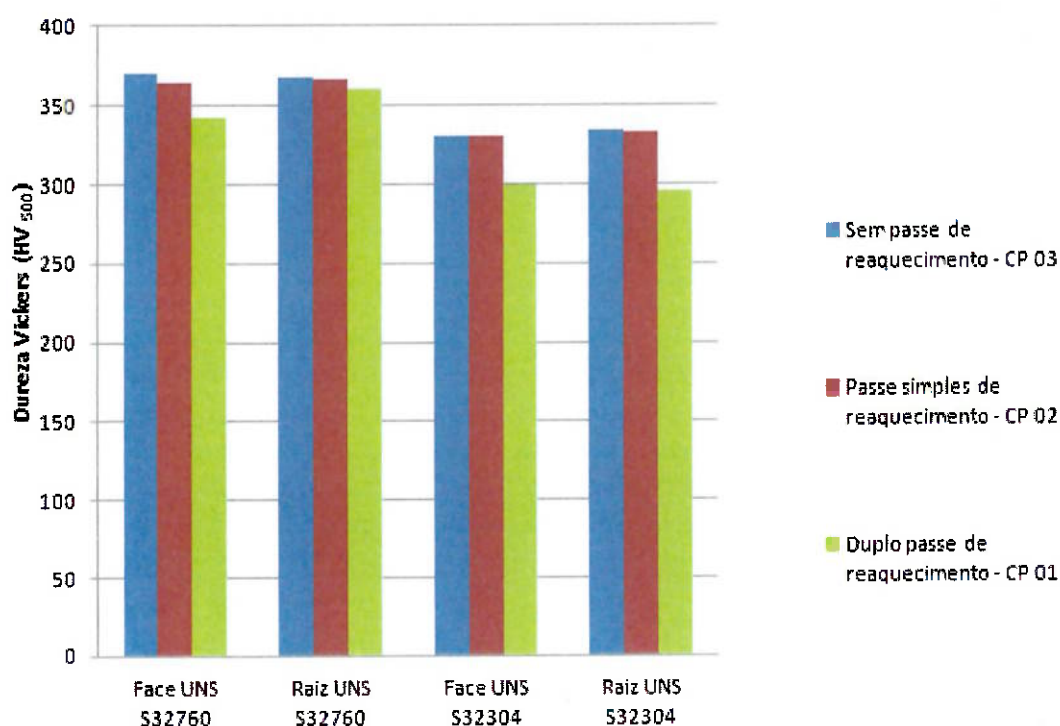
**Tabela 22:** Resultado da medição de microdureza no CP 03 - Face / Raiz

| FACE  |                      |                        | RAIZ  |                      |                     |
|-------|----------------------|------------------------|-------|----------------------|---------------------|
| Ponto | Dureza               | Região                 | Ponto | Dureza               | Região              |
|       | (HV <sub>500</sub> ) |                        |       | (HV <sub>500</sub> ) |                     |
| 1     | 370                  | MB - SD                | 10    | 368                  | MB - SD             |
| 2     | 360                  | ZAC 3°p 3°c - SD       | 11    | 367                  | ZAC - SD - Raiz     |
| 3     | 357                  | ZAC 3°p 3°c - SD       | 12    | 367                  | ZAC - SD - Raiz     |
| 4     | 357                  | ZAC 3°p 3°c - SD       | 13    | 360                  | ZAC - SD - Raiz     |
| 5     | 349                  | ZF - 4°p 3°c x 3°p 3°c | 14    | 340                  | ZF - Raiz - 1°p 1°c |
| 6     | 356                  | ZAC 4°p 3°c - D        | 15    | 348                  | ZAC - D - Raiz      |
| 7     | 350                  | ZAC 4°p 3°c - D        | 16    | 330                  | ZAC - D - Raiz      |
| 8     | 357                  | ZAC 4°p 3°c - D        | 17    | 350                  | ZAC - D - Raiz      |
| 9     | 330                  | MB - D                 | 18    | 334                  | MB - D              |

### 5.1.1 Comparativo dos Metais Base

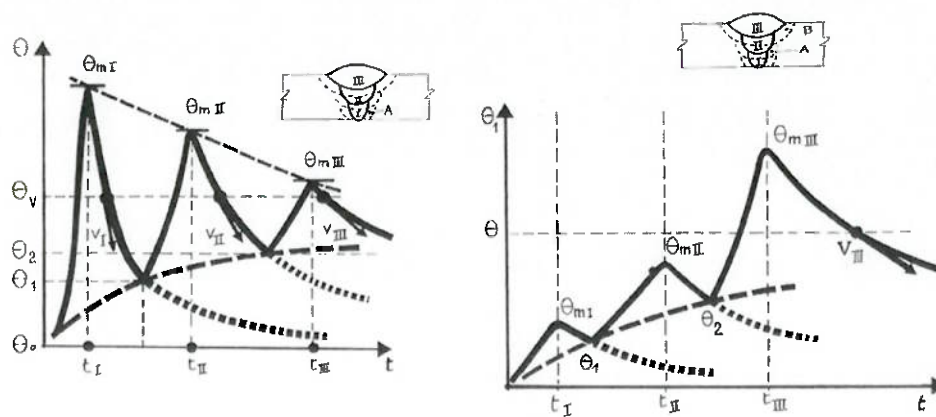
As figuras 93 abaixo apresentam o comparativo das microdurezas Vickers HV<sub>500</sub>, nos metais base sem passe de reaquecimento, com passe simples de reaquecimento e com duplo passe de reaquecimento.

#### Comparativo de Dureza nos Metais Base



**Figura 93:** Comparativo de dureza nos metais de base sem passe de reaquecimento, com passe simples de reaquecimento e com duplo passe de reaquecimento.

Comparando-se os valores de dureza nos metais base, observa-se que os mesmos diminuem com os passes de reaquecimento tanto para a face quanto para a raiz para ambos os metais base.

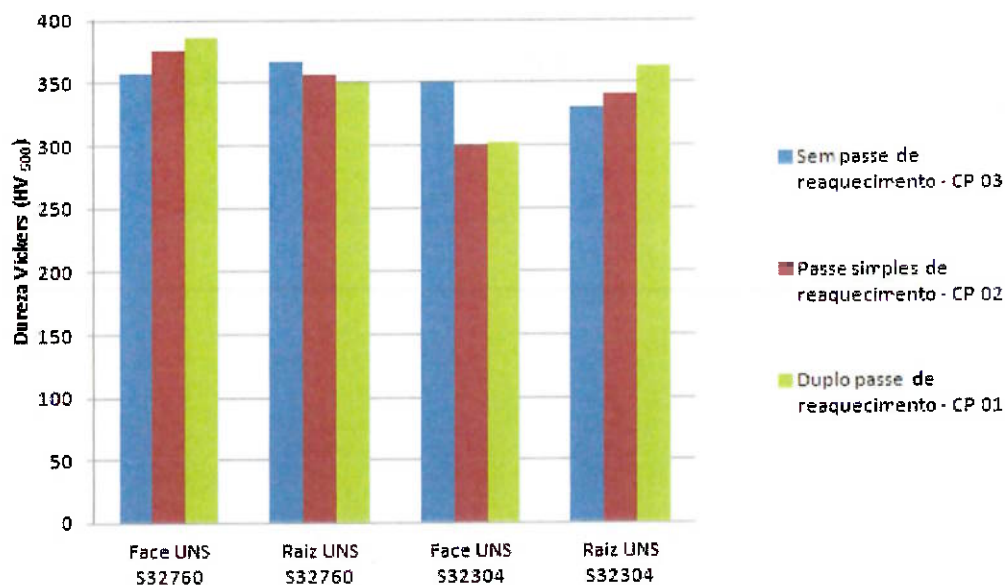


**Figura 94:** Ciclos térmicos na soldagem multipasses <sup>[46]</sup>

No caso do duplo passe de reaquecimento, os menores valores de dureza foram obtidos. Estes resultados sugerem que os metais base laminados sofreram um provável processo de recuperação.

### 5.1.2 Comparativo das Zonas Afetadas pelo Calor

#### Comparativo de Dureza nas Zonas Afetadas pelo Calor



**Figura 95:** Comparativo de dureza nas zonas afetadas pelo calor sem passe de reaquecimento, com passe simples de reaquecimento e com duplo passe de reaquecimento.

As figuras 76 e 84 apresentam as micrografias da ZAC na face do aço inoxidável super duplex UNS S32760 sem passe de reaquecimento.

As figuras 58 e 67 apresentam as micrografias da ZAC na face do aço inoxidável super duplex UNS S32760 no caso do passe simples de reaquecimento.

As figuras 38 e 48 apresentam as micrografias da ZAC na face do aço inoxidável super duplex UNS S32760 no caso do duplo passe de reaquecimento.

Observou-se aumento da dureza na ZAC na face do aço inoxidável super duplex UNS S32760 com o passe de reaquecimento. No caso do duplo passe de reaquecimento o aumento de dureza na ZAC na face é ainda maior.

As figuras 80 e 88 apresentam as micrografias da ZAC na raiz do aço inoxidável super duplex UNS S32760 sem passe de reaquecimento.

As figuras 63 e 72 apresentam as micrografias da ZAC na raiz do aço inoxidável super duplex UNS S32760 no caso do passe simples de reaquecimento.

As figuras 44 e 54 apresentam as micrografias da ZAC na raiz do aço inoxidável super duplex UNS S32760 no caso do duplo passe de reaquecimento.

Observa-se efeito contrário em relação à dureza na ZAC na raiz do aço inoxidável super duplex UNS S32760 com o passe de reaquecimento. No caso do duplo passe de reaquecimento a diminuição de dureza na ZAC na raiz é ainda maior.

Observa-se um aumento na fração volumétrica de ferrita na ZAC na raiz do aço inoxidável super duplex UNS S32760 com o passe de reaquecimento.

As figuras 78 e 86 apresentam as micrografias da ZAC na face do aço inoxidável lean duplex UNS S32304 sem passe de reaquecimento.

As figuras 61 e 70 apresentam as micrografias da ZAC na face do aço inoxidável lean duplex UNS S32304 no caso do passe simples de reaquecimento.

As figuras 42 e 52 apresentam as micrografias da ZAC na face do aço inoxidável lean duplex UNS S32304 no caso do duplo passe de reaquecimento.

Observou-se redução da dureza na ZAC na face do aço inoxidável lean duplex UNS S32304 com o passe de reaquecimento. No caso do duplo passe de reaquecimento o aumento de dureza na ZAC na face é ainda maior.

As figuras 79 e 87 apresentam as micrografias da ZAC na raiz do aço inoxidável lean duplex UNS S32304 sem passe de reaquecimento.

As figuras 62 e 71 apresentam as micrografias da ZAC na raiz do aço inoxidável lean duplex UNS S32304 no caso do passe simples de reaquecimento.

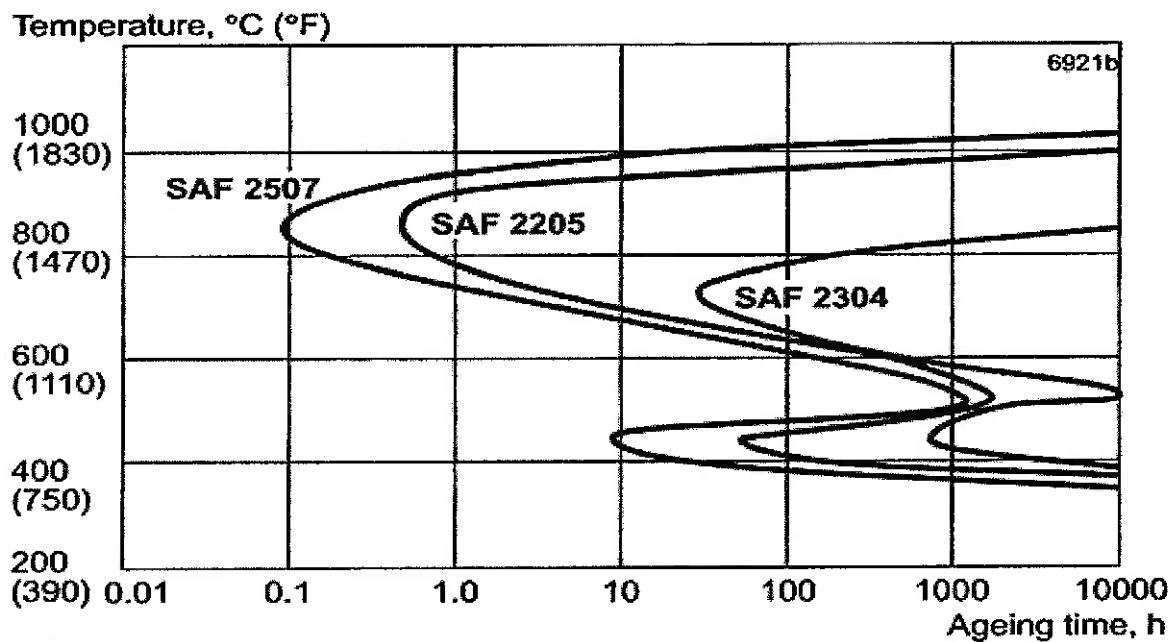
As figuras 43 e 53 apresentam as micrografias da ZAC na raiz do aço inoxidável lean duplex UNS S32304 no caso do duplo passe de reaquecimento.

Observa-se efeito contrário em relação à dureza na ZAC na raiz do aço inoxidável lean duplex UNS S32304 com o passe de reaquecimento. No caso do duplo passe de reaquecimento o aumento de dureza na ZAC na raiz é ainda maior.

O resultado encontrado é extremamente interessante e complexo. As diferentes composições químicas dos aços inoxidáveis duplex estudados resultam em propriedades físicas distintas.

Diferenças de condutibilidade térmica sugerem que os mesmos apresentem transformações microestruturais diferentes nas suas respectivas ZACs quando submetidos a ciclos térmicos resultantes de um processo de soldagem multipasses.

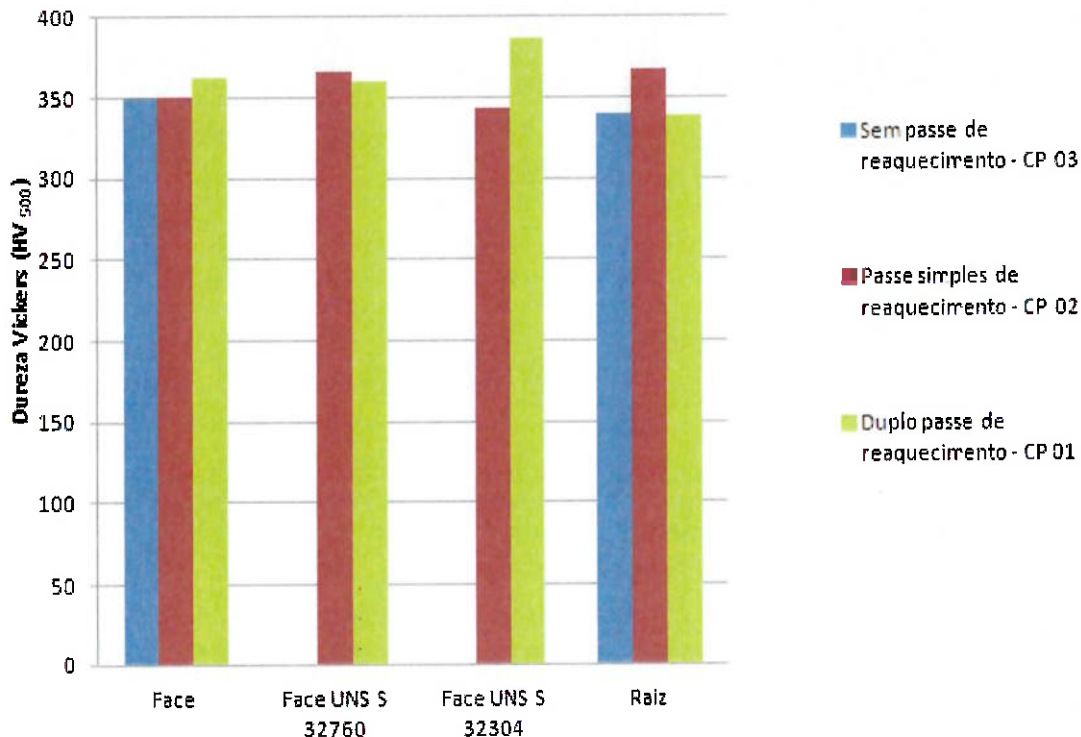
Outro ponto importante é a susceptibilidade dos metais de base à precipitação de fases deletérias. Os aços inoxidáveis duplex mais ligados apresentam seus diagramas TTT mais deslocado para a esquerda sendo, portanto, mais suscetíveis à precipitação de fases deletérias.



**Figura 96:** Diagramas TTT (fase sigma) de diferentes Aços Inoxidáveis Duplex <sup>[6]</sup>

### 5.1.3 Comparativo das Zonas Fundidas

#### Comparativo de Dureza nas Zonas Fundidas



**Figura 97:** Comparativo de dureza nas zonas fundidas sem passe de reaquecimento, com passe simples de reaquecimento e com duplo passe de reaquecimento.

As figuras 77 e 85 apresentam as micrografias da zona fundida na face sem passe de reaquecimento.

As figuras 59, 60, 68 e 69 apresentam as micrografias da zona fundida na face do aço inoxidável lean duplex UNS S32304 no caso do passe simples de reaquecimento.

As figuras 40 e 50 apresentam as micrografias da zona fundida na face no caso do duplo passe de reaquecimento.

As figuras 41 e 51 apresentam as micrografias da zona fundida na face do lado do aço inoxidável lean duplex UNS S32304 no caso do duplo passe de reaquecimento.

As figuras 39 e 49 apresentam as micrografias da zona fundida na face do lado do aço inoxidável super duplex UNS S32760 no caso do duplo passe de reaquecimento.

As figuras 81 e 89 apresentam as micrografias da zona fundida na raiz sem passe de reaquecimento.

As figuras 64 e 73 apresentam as micrografias da zona fundida na raiz no caso do passe simples de reaquecimento.

As figuras 45 e 55 apresentam as micrografias da zona fundida na raiz no caso do duplo simples de reaquecimento.

Observa-se que os valores de dureza obtidos nas zonas fundidas nas raízes tendem a serem menores que aqueles obtidos nas zonas fundidas nas faces.

## ***5.2 Análise Microestrutural***

As figuras 98, 99 e 100 abaixo apresentam as variações das frações volumétricas de ferrita para diversos pontos tanto da face quanto da raiz do CP 01, CP 02 e CP 03, conforme representado nos croquis.

Foram elaborados dois gráficos do tipo dispersão para representar essa variação nas regiões da face e na região da raiz para cada corpo de prova. A conclusão das análises será apresentada a seguir no próximo tópico.

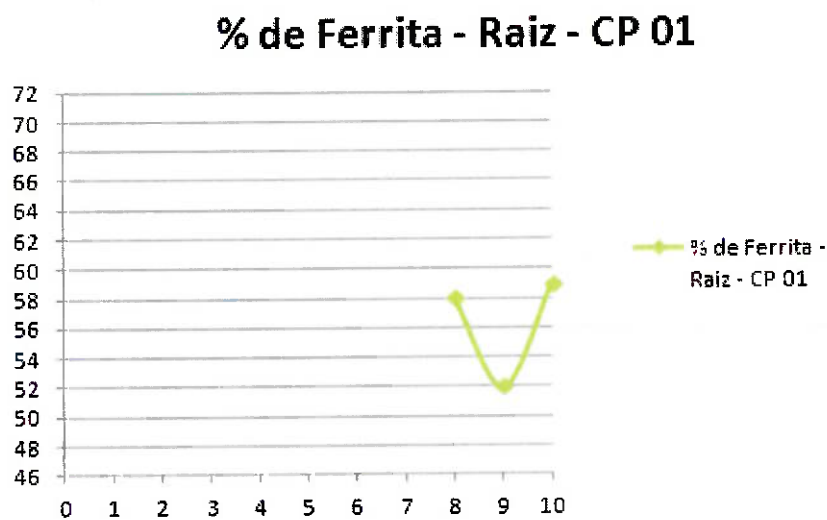
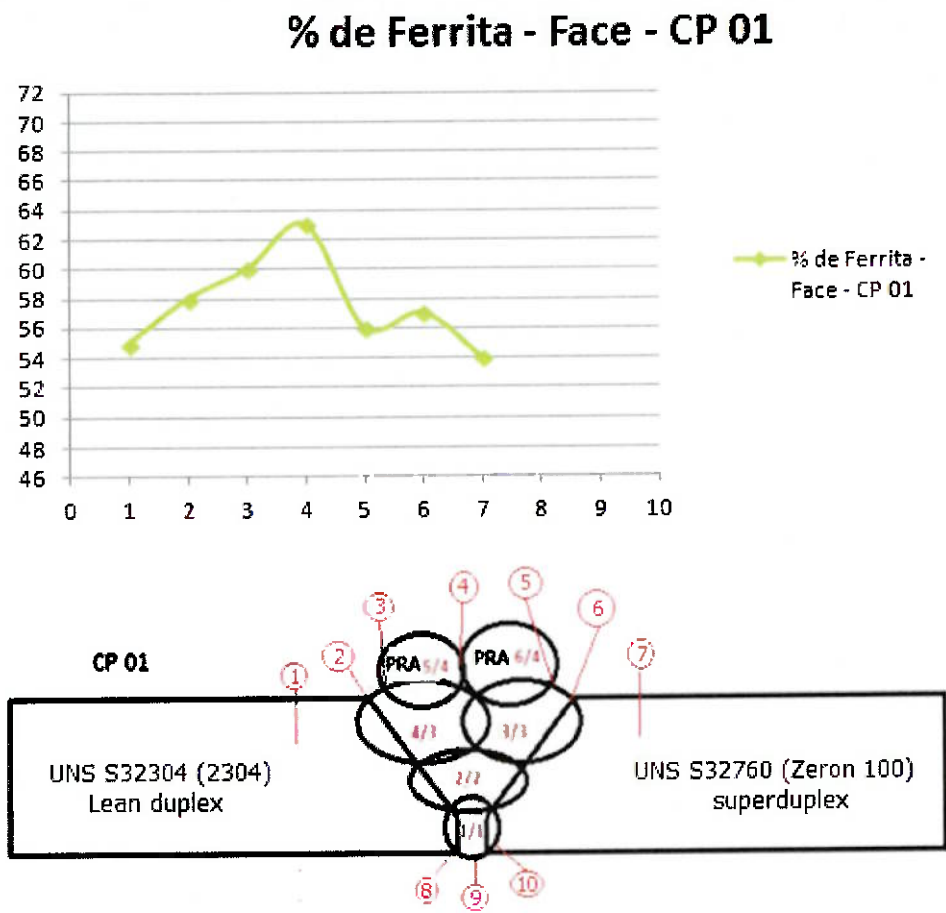
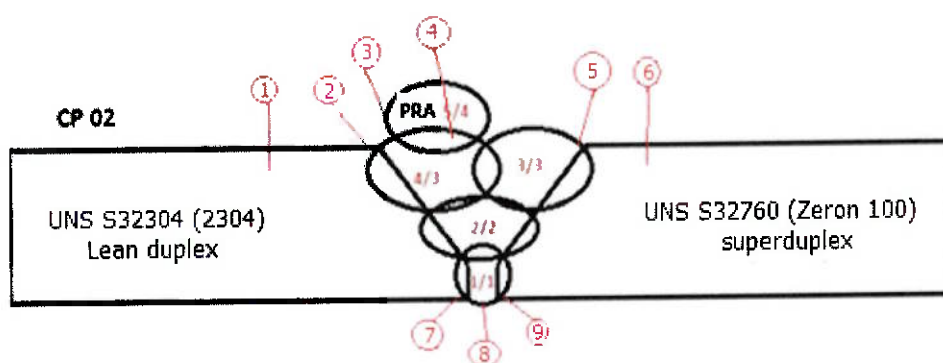
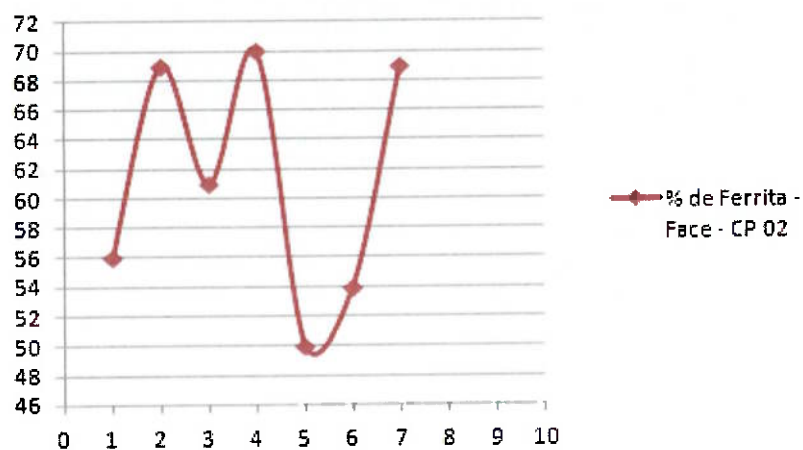
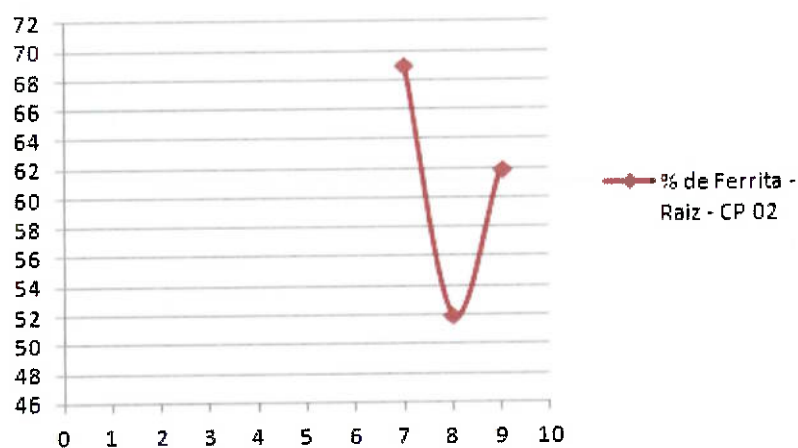


Figura 98: Variação da fração volumétrica de % de ferrita - Face e Raiz - CP 01

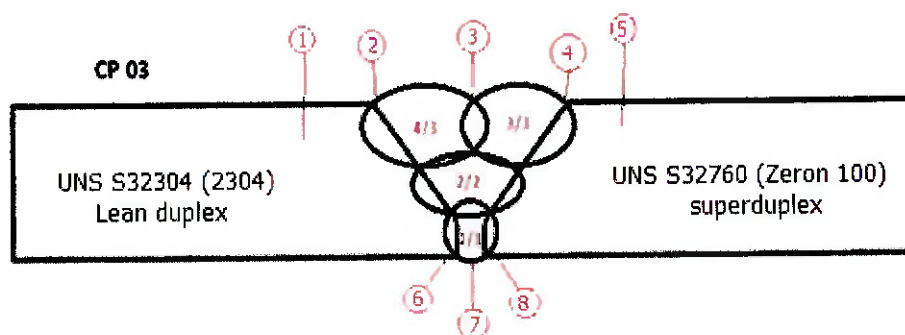
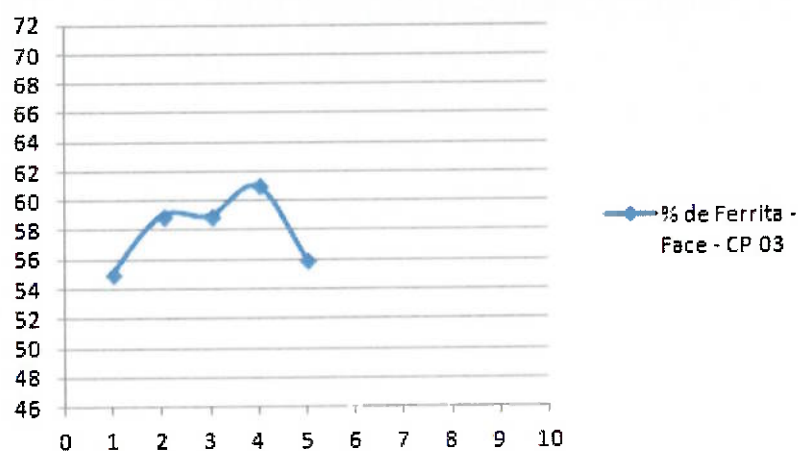
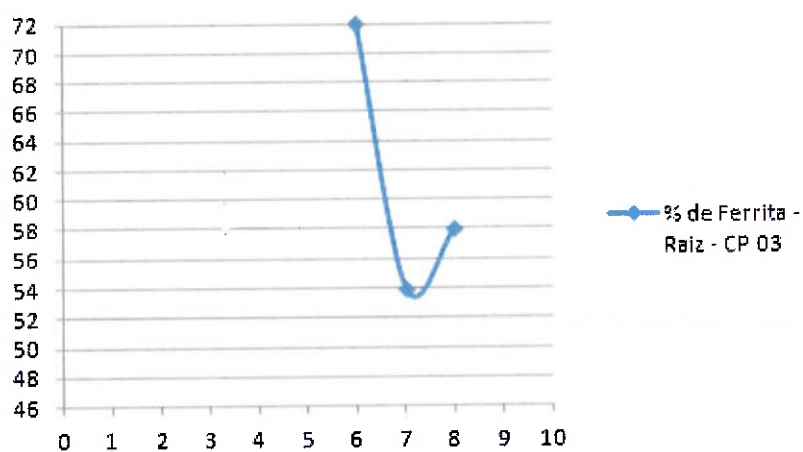
### % de Ferrita - Face - CP 02



### % de Ferrita - Raiz - CP 02

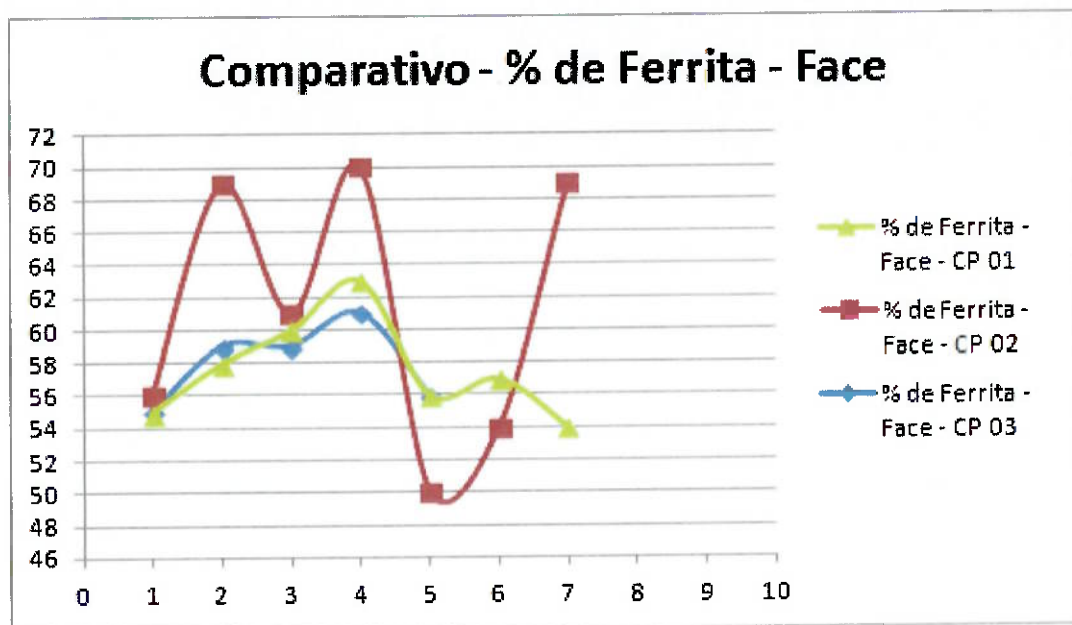


**Figura 99:** Variação da fração volumétrica de % de ferrita - Face e Raiz - CP 02

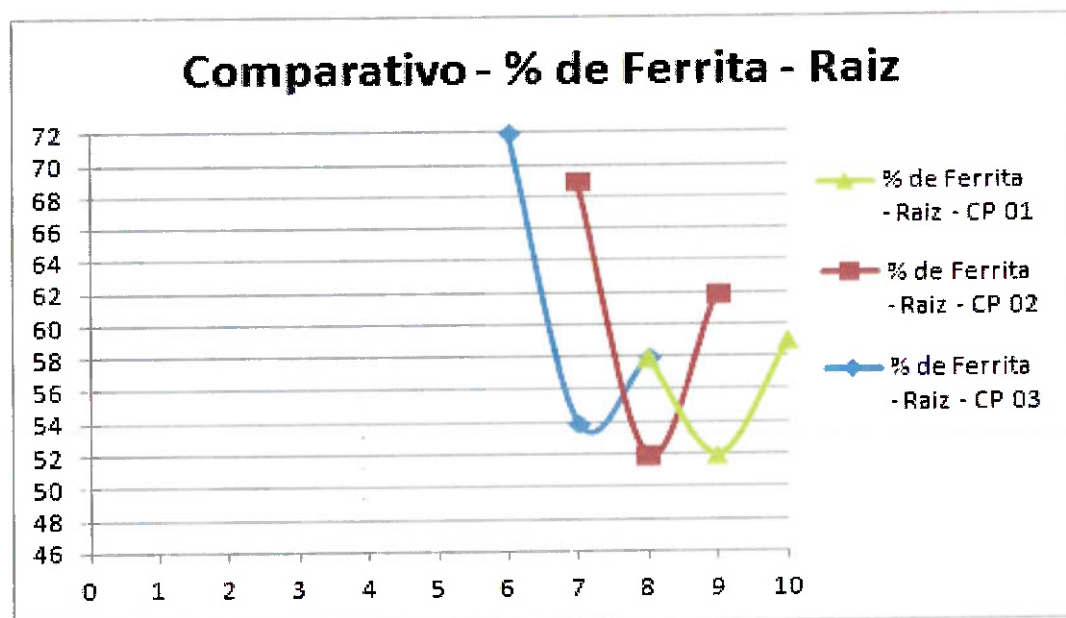
**% de Ferrita - Face - CP 03****% de Ferrita - Raiz - CP 03**

**Figura 100:** Variação da fração volumétrica de % de ferrita - Face e Raiz - CP 03

As figuras 101 e 102 apresentam um comparativo das variações volumétricas analisadas no CP 01, CP 02 e CP 03 nas regiões da face e da raiz.



**Figura 101:** Comparativo % de Ferrita - CP 01 / CP 02 / CP 03 - Face



**Figura 102:** Comparativo % de Ferrita - CP 01 / CP 02 / CP 03 - Raiz

Observa-se que a fração volumétrica de ferrita nas zonas fundidas das raízes tende a 50% com os passes de reaquecimento.

## **6. Conclusões**

1. O passe de reaquecimento altera a microestrutura das zonas afetadas pelo calor resultando em valores de dureza diferentes para as mesmas regiões estudadas com e sem passe(s) de reaquecimento.

2. O comportamento dos aços inoxidáveis super duplex UNS S32760 e lean duplex UNS S32304 quando submetidos ao passe de reaquecimento é diferente.

3. Os valores de dureza obtidos nas zonas fundidas nas raízes tendem a serem menores que aqueles obtidos nas zonas fundidas nas faces.

4. O passe de reaquecimento não diminui a dureza da zona fundida na raiz.

5. A fração volumétrica de ferrita nas zonas fundidas nas raízes tende a 50% com os passes de reaquecimento.

### **7. Sugestões de Trabalhos Futuros**

A complexidade da soldagem dissimilar de aços inoxidáveis duplex é bastante grande.

A técnica de passe de reaquecimento em uma junta dissimilar de aços inoxidáveis super duplex UNS S32760 e lean duplex UNS S32304 mostrou resultados bastante interessantes visto que o comportamento dos aços foi bastante diferente.

Como sugestão poderia-se refazer os estudos em juntas similares dos mesmos aços.

### **8. Referências Bibliográficas**

1. BRANDI, S. D.; LIPPOLD, J. C.; Considerações sobre a metalurgia da soldagem de aços inoxidáveis duplex e super duplex. Metalurgia & Materiais, São Paulo, v. 53, n. 463, p.141-146, mar. 1997. Bimestral.
2. BAIN, E. C.; GRIFFITHS, W. E.; Trans, AIME, 1927, 75, 166. (Paper R&D Centre AB SANDVIK Stell / Super duplex Stainless Stell)
3. GUNN, R. N.; (Ed.) Duplex Stainless Steels: Microstructure, properties and applications. Cambridge: Abington Publishing, 1997. 204p
4. COBB, H. M.; The History of Stainless Steel. Ohio: ASM International, 2010. 359p.
5. COLOMBIER, L.; HOCHMANN, J.; "Aciers Inoxydable Aciers Réfractaire"; 1955, Paris Dunod.
6. VICENTE, A. A.; Prática de Soldagem para aços Inoxidáveis Duplex, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2013. Apostila de Aula.
7. CHIAVERINE, F.; Aços e Ferros Fundidos, 4º Ed. ABM, São Paulo, 1977, p-309-344.
8. CHARLES, J.; BERNHARDSSON, S.; Super duplex stainless steels: structure and properties. In: DUPLEX STAINLESS STEELS'91, Beaune, Proceedings. Ed: Charles, J.; Bernhardsson, S. Les Ulis, France, Les Éditions de physique, v.1, 1991
9. MARTINS, M.; CASTELETTI, L.C.; Aços inoxidáveis duplex e super duplex – obtenção e caracterização In: Revista Fundição e Serviços, ano 17, nº 169, Rio de Janeiro: Aranda Editora, 2007.
10. SEDRIKS, A. J.; Corrosion of Stainless Steels (2nd edition), 1996. 437 pag.
11. PARK, Y. H.; LEE, Z. H.; The Effect of Nitrogen and Heat Treatment on the Microstructure and Tensile Properties of 25Cr – 7Ni – 1.5Mo – 3W – xN Duplex Stainless Steel Casting. Materials Science and Engineering A297, 2001.
12. LOPEZ, N.; CID, M.; PUIGGALI, M.; Influence of  $\sigma$ -Phase on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steels, Corrosion Science, nº 41, 1999.
13. PADILHA, A. F.; Microestrutura e Propriedades. In: Materiais de Engenharia. São Paulo: Editora Hemus, Edição Eletrônica, vol. 1, 2000.

14. BRANDI, S. D.; Tese de Doutorado 1992, Estudo da Soldabilidade do Aço Inoxidável Duplex DIN W. Nr 1.4462 (UNS S31803), Escola Politécnica da USP.
15. ASTM; American Society for Testing and Materials, A 800/A 800M – 01. Standard Practice for Steel Casting, Austenitic Alloy, Estimating Ferrite Content Thereof, Ferrous Castings; Ferroalloys, West Conshohocken, vol.01.02, ASTM, 2001.
16. CASTELETTI, L. C.; MARTINS, M.; Aços Inoxidáveis Duplex e Super Duplex – Obtenção e Caracterização. Revista Fundição e Serviços, ano 17, nº169 Janeiro de 2007 / <http://www.fundinox.com.br/imagens/publishing/fundicaoeservicos.pdf> pág acessada em 11/2013.
17. SOUTWICK, P. D; HONEYCOMBE, W. K.; Decomposition of ferrite to austenite in 26%Cr-5%Ni, Stainless Steel, Metal Science, v 14, n7 p. 253 – 261, 1980.
18. PARAYIL, T. R.; HOWELL, P. R.; Decomposition of deformed ferrite in a duplex stainless steel, Material Science and Technology, v2, n11, p. 1131 – 1139, 1986.
19. ROSCOE, C. V.; GRADWELL, K. J.; LORIMER, G. W.; Structure/property relationships in a series of duplex stainless steels. In. Conference Stainless Steels '84. Göteborg, 1984. Proceeding. London, The Institute of Metals, 1985, p. 563-577.
20. BECKITT, F. R.; The formation of sigma phase from delta-ferrite in a stainless steel. Journal of the Iron and Steel Institute v.207, n5, p 632 – 638, 1969.
21. KOKAWA, H; KUWANA, T; YAMAMOTO, A.; Crystallographic characteristics of delta-ferrite transformation in a 304L weld metal at elevated temperature. Welding Journal. v 68, n.3, p92s – 101s, 1989.
22. ATAMERT, S.; KING, J. E.; Elemental partitioning and microestrutural development in duplex stainless steel weld metal. Acta Metal. Mater. v.39, n.3, p 273- 285, 1991.
23. SOLOMON, H. D.; DEVINE, T. M.; A Tale of Two Phases, In: Conference Duplex Stainless Steel '84, St. Louis, USA, 1984. Proceedings. Ohio, American Society of metals, 1984, p. 693 – 756.
24. CHARLES, J.; Super Duplex Stainless Steel; Structure and Property. In. Conference Duplex Stainless Steel '91, Beaune Bourcogne – France, 1991. Proceedings France, 1991, p. 3 – 48.

25. DELONG, W. T.; A Modified Phase Diagram For Stainless Steel Weld Metal, Metal Progress. v. 77, February, p. 98 – 100B. 1960.
26. SCHAEFFLER, A. L.; Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metal. Metal Progress v. 56, November, p. 680 – 680B, 1949.
27. LONG, C. J.; DELONG, W. T.; The Ferrite Content of Austenitic Stainless Steel Weld Metal. Welding Journal v. 52, n.7, p.281s – 297s, 1973.
28. KOTECHI, D. J.; SIEMENT, T. A.; WRC – 1992 Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metal. A modification os the WRC-1988 Diagram, Welding Journal. V. 71, n5, p. 171s. -178s, 1992.
29. SCHOEFER, E. A.; Appendix. In Mössbauer, Effect examination of ferrite in stainless steel welds and casting. Welding Journal V. 53, n-1, p 10s – 12s.
30. PADILHA, A. F.; PLAUT, R. L.; RIOS, P. R.; Stainless steel heat treatment: metallurgy and technologies. In: Totten, George E, ed.. Steel Heat Treatment Handbook. Boca Raton: Taylor & Francis, 2007.
31. POHL, M.; PADILHA, A. F.; Aços inoxidáveis ferríticos-austeníticos com microestrutura duplex. Nickel, Sao Paulo, v.3 , n.8 , p.7 , 1988.
32. PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C.; Aços inoxidáveis Austeníticos. Hemus, p. 178, São Paulo, 1994, 349pag.
33. RAMIREZ, L. A. J.; Estudo da Precipitação de Nitreto de Cromo e Fase Sigma por Simulação Térmica da Zona Afetada pelo Calor na Soldagem Multipasse de Aços inoxidáveis Duplex- Tese Mestrado – Escola Politécnica da USP – Orientador Dr. Sergio Duarte Brandi – pag. 25 - São Paulo, 1997, 176 pag.
34. SIMMONS, J. W.; Overview: high – nitrogen alloying of stainless steels. Material Science and Engineering A. v A207, p 159 – 169, 1996.
35. RADEMAKERS, P. L. F.; VUIK, J.; Factors influencing microstructures and properties of weldments in duplex stainless steels In: Conference Joining / Welding 2000, The Hauge – The Netherland 1991. Proceedings. London, IIW, 1991, p- 253 – 270.
36. KAJIMURA, H.; OGAWA, K; NAGANO, H; Effects of  $\alpha$   $\gamma$  phase ratio and N addition on the corrosion resistance of Si-bearing duplex stainless steel in nitric acid. ISIJ International, v 31, n 2, p 216-222, 1991.
37. UME, K.; et al. Influence of thermal history on the corrosion resistance of duplex stainless steel linepipe. Materials Performance, v 26, n-8, p 25-31, 1987.

38. ATAMERT, S.; KING, J. E.; – Super duplex Stainless Steel part 1 HAZ microstructure in three duplex stainless steel In: Conference Duplex Stainless Steel 91", Beaune Bourcogne France, 1991, Proceedings. France 1991, p 363 – 372.
39. NILSON, J. O.; WILSON, A.; Influence of isothermal phase transformation on toughness and pitting corrosion of super duplex stainless steel SAF 2507. Material Science and Technology v. 9, n 7, p 545 – 554, 1993.
40. LIPPOLD, J, C.; AL RUMAIH, A. M.; Toughness and pitting corrosion of duplex stainless steel heat affected zone microstructures containing secondary austenite. Conference Duplex Stainless steel 97, Maastricht – The Netherland 1997, p 1005 – 1010, 1997.
41. BRANDI, S. D.; PADILHA, A. F.; Precipitação de fase sigma em aços inoxidáveis ferríticos-austeníticos com microestrutura duplex. In II Seminário Brasileiro de aço inoxidável – Inox -90, Brasil, 1990. Proceedings Brasil 1990, p 135 – 152.
42. NILSON, J. O.; CHAI, G.; The Physical metallurgy of duplex stainless steel - Sandvik Materials Technology, R&D Centre, S-81181 Sandviken, Sweden. Pag 2 – 6.
43. ASME Boiler and Pressure Vessel Code IX/2010 – Qualification Standard for welding and brazing procedure, welders, brazers, and welding and brazing operators – QW/QB 422 – Ferrous and Nonferrous P-Numbers – Grouping of base metals for qualification. Pag 76 – 132.
44. COMBRADO, P.; AUDOUARD, P. P.; Duplex Stainless Steel and localized corrosion resistance. In. Conference Duplex Stainless Steel '91, Beaune Bourcogne – France, 1991. Proceedings France, 1991, p. 256 – 281.
45. GHENO, S. M.; SANTOS, F. S.; HURI, S. E.; microscopia de varredura por sonda (spm) aplicada a aços Inoxidáveis dúplex, 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2006, Foz do Iguaçu.
46. GRANJON, H.; Fundamentals of Welding Metallurgy. Ambiton Publishing, England 1991.
47. LANCASTER, J. F.; Metallurgy of Welding Ed. Chapman & Hall, London, 5 ed. pag 389, 1993.
48. FEBELE, R.; BRANDI, S. D.; LEBRÃO, S. G.; Soldagem multipasse do aço inoxidável duplex uns s31803 por eletrodo revestido. In: CONSOLDA Congresso Nacional de Soldagem, XXV, 1999, Belo Horizonte.

49. BRANDI, S. D.; WAINER, E.; DECOURT, F. H. M.; Soldagem, Processos e Metalurgia, Ed. Edgard Blucher Ltda. 1992, 8 ed. 2011, pag. 60 – 98.
50. CUNAT, P.J.; The welding of stainless steel: Euro Inox. Segunda Edição, 2007.
51. PHILLIPS, A. L.; – Current Welding Process; AWS, USA, 1968.
52. DBC Educacional – [HTTP://www.oxigenio.com/guia-dos-eletrodos-de-tungstenio-para-processo-de-soldagem-tig-gtaw/conhecendo-os-tipos-de-eletrodo-de-tungstenio-para-processos-de-soldagem-tig-e-plasma.htm](http://www.oxigenio.com/guia-dos-eletrodos-de-tungstenio-para-processo-de-soldagem-tig-gtaw/conhecendo-os-tipos-de-eletrodo-de-tungstenio-para-processos-de-soldagem-tig-e-plasma.htm) - pág acessada em 11/2013.
53. MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. ; **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2007.
54. AVESTA PAPER; How to weld duplex stainless steel, 10601EN-GB, Centrum, Tryck, Avesta 2006, Avesta Welding AB, Koppardalen, Sweden 2006. pag 8 – 16.
55. ASME Boiler and Pressure Vessel Code IX/2010; Qualification Standard for welding and brazing procedure, welders, brazers, and welding and brazing operators – QW 460 Graphics –. pag 183 – 188.
56. PETROBRAS; N 133 Rev L. Soldagem - 07/2013 – Item 5.1.4.2 GTAW pag. 34, Item 5.7 pag. 63, Item 5.7.4.2 pag. 67.
57. ATAMERT, S.; KING, J. E.; Super duplex stainless steel – part 1, heat affected zone microstructure materials Sc. An Tech. v 8, n 10, pag. 896 – 911. 1992.

**9. Anexos****Anexo A – Certificado Vareta ER 2594**
**CERTIFICADO DE QUALIDADE**  
**QUALITY CERTIFICATE**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                              |                                                |                                                                                     |                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Ordem do Cliente/Customer<br>Order<br><b>AMOSTRA</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Fatura/Domestic Invoice<br><b>014366</b>     | International Invoice                          | Data/Date<br><b>07/06/2013</b>                                                      | Certificado Nº/Certificate nr.<br><b>74.818 - II</b> |
| Cliente/Customer<br><b>NEUSA ALONSO FALLEIROS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                              | Produto/Product<br><b>R-25104L-1.60-1000-D</b> |                                                                                     |                                                      |
| <b>IDENTIFICAÇÃO :</b><br><b>IDENTIFICATION :</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                              | O.T.nº/Prod.Order<br><b>0084740</b>            | Lote Nº/Lot Nr.<br><b>75069</b>                                                     | Quantidade/Quantity<br><b>2,610 kg</b>               |
| <b>CARACTERÍSTICAS / CHARACTERISTICS :</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                              |                                                |                                                                                     |                                                      |
| Média /<br>Average:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Dimensão/<br>Dimension<br><b>1,586</b><br>mm | Comprimento/<br>Length<br><b>996</b><br>mm     | Resist.Tracção/<br>T.Strength                                                       | Alongamento/<br>Elongation(%)                        |
| Resist.Elétrica/<br>Linear Resistance                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                              |                                                |                                                                                     |                                                      |
| <b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA / CHEMICAL ANALYSIS (%PESO/WEIGHT%) :</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                              |                                                |                                                                                     |                                                      |
| Corrida Nº/HEAT #531779                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                              |                                                |                                                                                     |                                                      |
| C = 0,010                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Si = 0,38                                    | Mn = 0,48                                      |                                                                                     |                                                      |
| P = 0,016                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | S = 0,0005                                   | Cr = 25,14                                     |                                                                                     |                                                      |
| Ni = 9,50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Mo = 3,92                                    | Cu = 0,091                                     |                                                                                     |                                                      |
| Co = 0,130                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | N = 0,24                                     | Al = 0,009                                     |                                                                                     |                                                      |
| Ti = 0,003                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Nb = 0,01                                    | B = 0,0017                                     |                                                                                     |                                                      |
| W = 0,01                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | V = 0,085                                    | Ca = 0,0031                                    |                                                                                     |                                                      |
| <b>OBSERVAÇÕES / REMARKS :</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                              |                                                |                                                                                     |                                                      |
| AWS A5.9 ER2594 ASME II part C SFA 5.9 ER2594                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                              |                                                |                                                                                     |                                                      |
| Sandvik Materials Technology do Brasil S.A. Ind. e Com.<br>Av. Suécia, 3200 - Mogi Guaçu - SP - BR.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                              |                                                | Depto. de Garantia da Qualidade<br>Quality Assurance Department<br>Carlos Alcantara |                                                      |
| CERTIFICAMOS QUE O MATERIAL FOI PRODUZIDO DE ACORDO COM SUAS NORMAS E ESPECIFICAÇÕES, SATISFAZENDO O REQUERIDO.<br>WE HEREBY CERTIFY THAT MATERIAL HEREIN DESCRIBED HAS BEEN MANUFACTURED IN ACCORDANCE WITH AND MEETS THE REQUIREMENTS OF YOUR STANDARDS AND SPECIFICATIONS.<br>O MATERIAL FOI PRODUZIDO CONFORME SISTEMA DE QUALIDADE CERTIFICADO NO ISO 9001:2008<br>THE MATERIAL IS MANUFACTURED ACCORDING TO A QUALITY SYSTEM APPROVED AND REGISTERED TO ISO 9001:2008<br>O CERTIFICADO É ELABORADO POR PROCESSAMENTO ELETRÔNICO DE DADOS E É VÁLIDO SEM ASSINATURA<br>THE CERTIFICATE IS PRODUCED WITH EDP AND VALID WITHOUT SIGNATURE<br>RECLAMAÇÕES DEVIDO A CERTAS NO MÁXIMO ATÉ 90 DIAS DA DATA DO FORNECIMENTO. DEVOLUÇÕES SOMENTE PODERÃO SER EFETUADAS APÓS CONSULTA E AUTORIZAÇÃO DA ASSISTÊNCIA TÉCNICA.<br>COMPLAINTS ONLY ACCEPTED UP TO 90 DAYS AFTER BL/DXTE. MATERIAL RETURN ONLY WILL BE AFTER CONSULTING AND AUTHORIZATION OF OUR TECHNICAL DEPARTMENT. |                                              |                                                |                                                                                     |                                                      |

*Anexo B – Certificado Gás ATAL SD.*

|                                                                                                      |                                            |                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|  <b>AIR LIQUIDE</b> | Especificação Técnica de Venda de Produtos | ETV-SEDC-08.057<br><br>Revisão: 0<br>Data: 29/08/2013<br>Validade: 29/08/2018 |
| ATAL SD                                                                                              |                                            |                                                                               |
| CÓPIA NÃO-CONTROLADA                                                                                 |                                            |                                                                               |

**TERMO DE LIMITAÇÃO DE RESPONSABILIDADE**

As informações contidas neste documento são de propriedade da Air Liquide Brasil Ltda. e foram preparadas exclusivamente para uso interno da empresa, suas afiliadas e contratadas; seu conteúdo é confidencial e, assim, não pode ser transferido ou utilizado por terceiros sem prévia autorização escrita do seu aprovador. Tais informações não constituem nenhum tipo de garantia, obrigação, responsabilidade ou compromisso da empresa.

Este documento cancela e substitui os documentos:

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|

**Descrição das revisões**

| Rev. | Data       | Elaborado por    | Aprovado por                   | Descrição                |
|------|------------|------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 0    | 29/08/2013 | FERNANDO MACHADO | JOSE ANTONIO DOS REIS DA CUNHA | Implantação do Documento |

**1 - DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA**

FIS-SEDC-23.147 - Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - ATAL SD ( N2 + ARG)

| Produto                                                                              |                    |                |                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------|-------------------|
| Nome Comercial                                                                       | ATAL SD            |                |                   |
| Tipo de Produto                                                                      | Mistura            |                |                   |
| Aplicação                                                                            | Soldagem e corte   |                |                   |
| Estado Físico                                                                        | Gasoso             | Validade       | 5 ANOS            |
| Características Gerais                                                               | Gás de Proteção    |                |                   |
| Forma de Comercialização Padrão                                                      |                    |                |                   |
| Volume                                                                               | Unidade            | Pressão a 21°C | Unidade           |
| 10                                                                                   | m³                 | 200            | bar               |
| Embalagens                                                                           | Cilindro de aço    |                |                   |
| Tipo de Válvula                                                                      | SMARTOP            |                |                   |
| Especificações                                                                       |                    |                |                   |
| Componente                                                                           | Concentração       | Tolerância     | Unidade de Medida |
| Argônio (Ar)                                                                         | QS                 |                |                   |
| Nitrogênio (N2)                                                                      | 2,5                | ± 0,25         | %                 |
| Impureza                                                                             | Faixa de Aceitação |                | Unidade de Medida |
| Água (H2O)                                                                           | < 80               |                | ppm               |
| Observações                                                                          |                    |                |                   |
| Este produto poderá ser comercializado em outros volumes e embalagens, sob consulta. |                    |                |                   |