

Omar Abou Samra Filho

**SOLDAGEM DE TUBO DE AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX
UNS S31803 PELOS PROCESSOS DE SOLDAGEM
TIG E ARAME TUBULAR E AVALIAÇÃO DE SUAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE RESISTÊNCIA
À CORROSÃO DE ACORDO COM OS REQUISITOS
DA NORMA PETROBRAS N-133**

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

São Paulo

Outubro/2012

Omar Abou Samra Filho

(Engenheiro de Materiais, FEI, 2007)

**SOLDAGEM DE TUBO DE AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX
UNS S31803 PELOS PROCESSOS DE SOLDAGEM
TIG E ARAME TUBULAR E AVALIAÇÃO DE SUAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE RESISTÊNCIA
À CORROSÃO DE ACORDO COM OS REQUISITOS
DA NORMA PETROBRAS N-133**

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

Área de Concentração:
Engenharia da Soldagem

Orientador:
Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi

São Paulo

Outubro/2012

"O lucro do nosso estudo é tornarmo-nos melhores e mais sábios."

Michel Eyquem de Montaigne

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Omar Abou Samra e Carmen Helena Tanus Abou Samra,
que sempre possibilitaram meus estudos, formação, e contribuem
cada dia mais para que eu seja uma pessoa cada vez melhor.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi, pela competência, paciência e pelo conhecimento adquirido.

Aos meus pais, Omar e Carmen, meu irmão, Alexandre, e minha namorada, Shirley pelo apoio incondicional.

Ao meu amigo e colega de trabalho, Ricardo Alexandre Fedele por sempre acreditar no meu trabalho e estimular meu crescimento profissional.

Ao meu amigo e colega de trabalho, Daniel Pereira Guedes, pelas sugestões, encorajamento e amizade.

A empresa BÖHLER Welding Group, que contribuiu para conclusão deste trabalho fornecendo os consumíveis de soldagem utilizados.

Ao amigo José Otávio Ohlweiler, pela parceria técnica de sempre e fornecimento dos metais de base para realização deste trabalho.

Ao soldador técnico e colega de trabalho na BÖHLER, Rodrigo da Silva Santos, pela realização das soldagens.

A toda a equipe do laboratório Team Lab, especialmente ao amigo José de Deus Brito, pelo auxílio nas atividades experimentais.

A todos que direta ou indiretamente me auxiliaram neste trabalho.

CURICULUM VITAE

OMAR ABOU SAMRA FILHO

Brasileiro, solteiro, 27 anos.
Rua Embuaçú, 1, apto. 61A – Vila Mariana.
São Paulo – SP – CEP: 04118-080
Tels.: (11) 5589-1672 e (11) 97169-6960
omar_absam@hotmail.com

1. Formação:

- Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem – PECE/USP – 2010 à 2012
- Engenharia de Materiais – FEI – concluído em dezembro/2007.
- Ensino Médio – Colégio Etapa – concluído em dezembro/2002.

2. Experiência Profissional:

- Professor de inglês na Escola Wizard – 2006.
- Projeto de Iniciação Científica na FEI – 2006.
"Montagem e utilização de um sistema de deposição eletroforética" (Cerâmicas Avançadas).
- Estágio no Departamento de Engenharia de Aplicação da empresa BÖHLER THYSSEN TÉCNICAS DE SOLDAGEM Ltda. - 2007.
- Engenheiro de Materiais/Aplicação na empresa BÖHLER TÉCNICAS DE SOLDAGEM Ltda. – a partir de janeiro/2008.
- Professor do Curso de Inspetor de Soldagem Nível I na Fundação Brasileira de Tecnologia de Soldagem (FBTS) – a partir de janeiro/2009.

Principais atividades desenvolvidas:

- Engenheiro responsável pelo desenvolvimento de consumíveis de soldagem nos clientes com potencial nos segmentos offshore, naval e químico, a partir de julho de 2009;
- Elaboração e análise de procedimentos de soldagem;
- Interpretação de normas técnicas (ASME, ASTM, ANSI, AWS, API, NACE, PETROBRAS, etc.);
- Consultoria técnica em desenvolvimento de projeto, desde a fase inicial até a conclusão de obras de empresas pertencentes aos mais variados segmentos industriais: Offshore e Naval, Petroquímico e Químico, Geração de Energia, Papel & Celulose, Dutos e tubulações, Automotivo, Siderurgia e Mineração, etc.

- Atuação junto à Petrobras para discussão de normas, especificações técnicas, metalurgia e processos de soldagem.
- Elaboração de propostas técnico-comerciais e abordagem direta em clientes, analisando todos os requisitos especiais que porventura possam existir em determinados projetos.

3. Aperfeiçoamento e Atividades Extra-Curriculares:

- Presidente do CEM – Centro de Estudos Metalúrgicos e de Materiais da FEI (2005).
- Presidente de mesa redonda e mediador de debates do 6º ENEMET; e participação no 61º Congresso Anual da ABM (julho/2006 no Rio de Janeiro).
- Curso - Tratamentos Térmicos e Metalografia (julho/2006 na FEI).
- Curso "Inspetor de Soldagem Nível 1" – Centro de Treinamento CETRE – aproveitamento de 94,25% (fevereiro/2008 a abril/2008).
- Participação em feiras e congressos relacionados ao ramo de soldagem nos últimos quatro anos (Rio Oil&Gas, Feira da Mecânica, etc.)
- Participação na feira "Schweissen & Schneiden" na Alemanha em setembro de 2009 (maior feira do mundo no ramo de soldagem e corte).
- Palestrante convidado no 10º ENEMET - "Principais Projetos, em Alguns Segmentos Industriais, que Implicarão Diretamente no Crescimento do Mercado Brasileiro" (julho/2010 no Rio de Janeiro)
- Palestrante na NAVALSHORE 2012 – "Desafios da Soldagem nos Segmentos Naval & Offshore" (julho/2012 no Rio de Janeiro)

4. Idioma:

- Inglês Avançado (Nível CPE-3) – Sociedade Brasileira de Cultura Inglesa (1992 a 2004).
- Certificado FCE da Universidade de Cambridge (2004).

5. Informática:

- Bons conhecimentos em Microsoft Office (Word, PowerPoint, Excel e Outlook) e Internet.

São Paulo, agosto de 2012.

RESUMO

Os aços inoxidáveis duplex têm sido utilizados cada vez mais na indústria, principalmente no segmento de construção naval & offshore. O aumento da aplicação destes aços é devido às suas excelentes propriedades mecânicas e propriedades de resistência à corrosão nos meios a que são submetidos. O aço inoxidável duplex UNS S31803 possui ótima soldabilidade e pode ser soldado por diversos processos de soldagem ao arco elétrico. A busca por processos de soldagem mais produtivos, como o processo Arame Tubular, têm sido grande no mercado devido ao aumento de produtividade e redução de custos dos projetos. Uma junta de aço inoxidável UNS S31803 foi soldada pelos processos de soldagem TIG nos passes de raiz e reforço; e Arame Tubular nos passes de enchimento e acabamento. Exame visual, ensaio de líquido penetrante e radiografia para detecção de descontinuidades foram realizados na junta soldada. A microestrutura resultante do processo de soldagem, o balanço entre as fases ferrita e austenita, propriedades de resistência mecânica, tenacidade e a resistência à corrosão por pites foram avaliados de acordo com os requisitos da norma Petrobras N-133, revisão K, uma das normas que determina os requisitos de soldagem aplicáveis aos projetos da Petrobras para os aços inoxidáveis duplex.

ABSTRACT

The duplex stainless steels have been used increasingly in different kinds of industry segments, mainly in shipbuilding & offshore. The increasing application of these stainless steels is due to their excellent mechanical properties and corrosion resistance properties against the media to which they are subjected. The duplex stainless steel UNS S31803 has excellent weldability and can be welded by several arc welding processes. The searching for more productive welding processes, as Flux Cored Arc Welding, have been done due to increased productivity and reduced project costs that can be achieved. An UNS S31803 joint was welded in which TIG welding processes was used for the root and reinforcement passes, and Flux Cored Arc Welding was used for filling and cap passes. Visual inspection, liquid penetrant examination and radiography tests were done for detecting discontinuities in the welding joint. The microstructure, balance between ferrite and austenite phases, tensile strength, toughness and pitting corrosion resistance were evaluated according to requirements of Petrobras N-133 standard, Revision K, which determines the welding requirements applicable to projects of Petrobras for duplex stainless steels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Diagrama pseudobinário Fe-Cr-Ni, exemplificado em 70% de Fe.....	5
Figura 2.2	Microestrutura do aço inoxidável duplex UNS S31803 laminado a quente	6
Figura 2.3	Influência de elementos químicos na cinética de precipitação de fases secundárias	7
Figura 2.4	Repartição térmica de uma junta soldada	12
Figura 2.5	Representação esquemática dos ciclos térmicos de alguns pontos da ZAC de uma junta soldada	13
Figura 2.6	Microestrutura do metal de solda de um aço UNS S31803 soldado por eletrodo revestido, metal de adição AWS A 5.4 E2209- 17. MO. (200X). Matriz ferrítica (escura) com precipitações de austenita (claras)	16
Figura 2.7	Relação entre o ciclo térmico de um ponto qualquer da ZACTE e o diagrama pseudobinário Fe-Cr-Ni destacado em 70% de Fe.....	18
Figura 2.8	Relação entre o ciclo térmico esquemático de um ponto qualquer da ZACTB e o diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni exemplificado para 70% de Fe.....	19
Figura 2.9	Microestrutura de aço UNS S32750 soldado. Região A: Metal de base com balanço ideal de ferrita e austenita (aproximadamente 50% de cada uma das fases). Região B: ZAC com balanço das fases ferrita e austenita alterado devido a operação de soldagem não apropriada. (aproximadamente 75% e 25% das fases, respectivamente). Região C: Metal depositado por processo de soldagem, com as fases equilibradas.	21
Figura 2.10	Amostra de pedaço de tubo de aço inoxidável duplex UNS S 31803 retirada de sistema de tubulação em módulo de plataforma de petróleo. A circunferência vermelha mostra a região da zona termicamente afetada (aproximadamente 2mm distante da região do metal depositado) durante a soldagem do tubo, a qual sofreu corrosão durante trabalho na plataforma, devido a perda da estrutura do aço inoxidável duplex	22
Figura 4.1	Configuração da junta	28
Figura 4.2	Passe de raiz realizado pelo processo TIG.....	28

Figura 4.3	Seqüência de passes	29
Figura 4.4	Junta devidamente soldada e pronta para ensaio visual....	31
Figura 5.1	Microestrutura do MB, região da face, posição 12h.....	42
Figura 5.2	Microestrutura do MB, região da raiz, posição 12h.....	42
Figura 5.3	Microestrutura da ZAC, região da face, posição 12h	43
Figura 5.4	Microestrutura da ZAC, região da raiz, posição 12h	43
Figura 5.5	Microestrutura do MS, região da face, posição 12h.....	44
Figura 5.6	Microestrutura do MS, região da raiz, posição 12h.....	44
Figura 5.7	Microestrutura do MB, região da face, posição 3h	45
Figura 5.8	Microestrutura do MB, região da raiz, posição 3h	45
Figura 5.9	Microestrutura da ZAC, região da face, posição 3h	46
Figura 5.10	Microestrutura da ZAC, região da raiz, posição 3h	46
Figura 5.11	Microestrutura do MS, região da face, posição 3h.....	47
Figura 5.12	Microestrutura do MS, região da raiz, posição 3h.....	47
Figura 5.13	Microestrutura do MB, região da face, posição 6h	48
Figura 5.14	Microestrutura do MB, região da raiz, posição 6h	48
Figura 5.15	Microestrutura da ZAC, região da face, posição 6h	49
Figura 5.16	Microestrutura da ZAC, região da raiz, posição 6h	49
Figura 5.17	Microestrutura do MS, região da face, posição 6h.....	50
Figura 5.18	Microestrutura do MS, região da raiz, posição 6h.....	50
Figura 5.19	Microestrutura do MB, região da face, posição 9h	51
Figura 5.20	Microestrutura do MB, região da raiz, posição 9h	51
Figura 5.21	Microestrutura da ZAC, região da face, posição 9h	52
Figura 5.22	Microestrutura da ZAC, região da raiz, posição 9h	52
Figura 5.23	Microestrutura do MS, região da face, posição 9h.....	53
Figura 5.24	Microestrutura do MS, região da raiz, posição 9h.....	53
Figura 5.25	Microestrutura preparada para contagem de fases do MS, região da raiz, posição 3h	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição química dos aços inoxidáveis duplex mais utilizados atualmente	4
Tabela 2.2	Propriedades físicas de alguns aços inoxidáveis duplex	8
Tabela 2.3	Propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis	9
Tabela 2.4	Eficiência térmica dos principais processos de soldagem ...	15
Tabela 4.1	Composição química do metal de base e consumíveis de soldagem utilizados	27
Tabela 4.2	Acompanhamento de soldagem	30
Tabela 5.1	Ensaio para avaliação das propriedades mecânicas e de resistência à corrosão conforme requisitos da norma Petrobras N-133 revisão K	38
Tabela 5.2	Fração volumétrica de fase ferrita	55
Tabela 5.3	Ensaio de Impacto Charpy na região do metal de solda	59
Tabela 5.4	Ensaio de Impacto Charpy na região da linha de fusão	60
Tabela 5.5	Ensaio de Impacto Charpy na região à 2mm da linha de fusão.....	60

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

ASME:	American Society Of Mechanical Engineers
ASTM:	American Society For Testing And Materials
AWS:	American Welding Society
BOP:	Blow Out Preventer
CPs:	Corpos de Prova
DF:	Dobramento de Face
DL:	Dobramento Lateral
DR:	Dobramento de Raiz
LF:	Linha de Fusão
MAG:	Metal Active Gas
MB:	Metal de Base
MIG:	Metal Inert Gas
MS:	Metal de Solda
PRE:	Pitting Resistance Equivalent
TIG:	Tungsten Inert Gas
UNS:	Unified Number System
ZAC:	Zona Afetada pelo Calor
ZACTB:	Zona Afetada Pelo Calor de Temperatura Baixa
ZACTE:	Zona Afetada Pelo Calor de Temperatura Elevada
ZF:	Zona Fundida

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS	iv
Curriculum vitae	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	xii
SUMÁRIO.....	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Os Aços Inoxidáveis Duplex.....	3
2.1.1 Microestrutura.....	4
2.1.2 Precipitação de fases secundárias.....	7
2.1.3 Propriedades físicas	8
2.1.4 Propriedades Mecânicas.....	9
2.1.5 Resistência à corrosão	9
2.2 Soldagem dos aços inoxidáveis duplex.....	11
2.2.1 Transferência de calor	11
2.2.1.1 História térmica	11
2.2.1.2 Repartição térmica.....	12
2.2.1.3 Ciclo térmico de soldagem.....	13
2.2.1.4 Velocidade de resfriamento	13
2.2.2 Energia de soldagem	14
2.2.3 Eficiência térmica dos processos de soldagem	14
2.2.4 Metalurgia da Soldagem.....	15
2.2.4.1 Desenvolvimento microestrutural da junta soldada	15
2.2.4.1.a Zona Fundida (ZF)	15
2.2.4.1.b Zona Afetada pelo Calor (ZAC).....	17
A) Zona Afetada pelo Calor de Temperatura Elevada (ZACTE)	17
B) Zona Afetada pelo Calor de Temperatura Baixa (ZACTB).....	19
2.2.4.2 Influência da Energia de Soldagem	20
2.2.4.3 Metais de adição.....	23
2.3 Norma Petrobras N-133	23

3. OBJETIVOS	25
4. MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 Materiais	26
4.2 Métodos	27
4.2.1 Preparação da junta	27
4.2.2 Acompanhamento de soldagem	28
4.2.3 Exame Visual	30
4.2.4 Ensaio de Líquido Penetrante	31
4.2.5 Radiografia	32
4.2.6 Exame Microestrutural	32
4.2.7 Contagem de Fases (Ferrita/Austenita)	33
4.2.8 Ensaio de Tração	33
4.2.9 Ensaio de Dobramento	34
4.2.10 Ensaio de Impacto Charpy V	34
4.2.11 Ensaio de susceptibilidade à corrosão por pite	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5.1 Análise química e cálculo do $PREN_N$	36
5.2 Acompanhamento de soldagem	37
5.3 Ensaios	38
5.3.1 Exame Visual	39
5.3.2 Ensaio de Líquido Penetrante	39
5.3.3 Radiografia	39
5.3.4 Exame Microestrutural	40
5.3.5 Contagem de Fases (Ferrita/Austenita)	54
5.3.6 Ensaio de Tração	58
5.3.7 Ensaio de Dobramento	58
5.3.8 Ensaio de Impacto Charpy V	59
5.3.9 Ensaio de susceptibilidade à corrosão por pites.	61
6. CONCLUSÕES	62
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXO 1	68
ANEXO 2	69
ANEXO 3	70

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex têm sido utilizados em quantidades cada vez maiores nos últimos anos, principalmente na construção de estruturas, componentes e equipamentos relacionados a plantas químicas, indústria de papel e celulose, indústria petroquímica e segmento de construção naval & offshore. Destaque para este último segmento industrial cujas aplicações desta classe de aço inoxidável são inúmeras, dentre elas, componentes "subsea" como equipamentos de perfuração, corpos de válvulas, tubulações em árvores de natal molhadas, manifolds e sistemas BOP. Outras aplicações são em equipamentos e estruturas de módulos de plataforma como sistemas de dessulfuração, trocadores de calor, separadores de óleo, gás e água, conjuntos de hidrociclones, módulos lançadores e recebedores de "pig", dentre outras. Trata-se de liga especial que possui uma combinação de excelentes propriedades mecânicas e de resistência à corrosão que são essenciais para aplicação nestes componentes. A princípio, esses metais possuem boa soldabilidade e podem ser soldados pela maioria dos processos usuais de soldagem a arco elétrico como, Eletrodo Revestido, MIG/MAG, TIG, Arame Tubular e Arco Submerso. Apesar da grande gama de processos de soldagem aplicáveis para soldagem dessas ligas, e da sua boa soldabilidade, operações de soldagem inadequadas, que não tenham seu procedimento elaborado de maneira correta, fazem com que todas as boas propriedades que podem ser obtidas por aços inoxidáveis duplex sejam perdidas. Sendo assim, empresas como Petrobras, SBM, OSX, e outros donos de projetos para este segmento

industrial que atuam no Brasil, atualizam seus conhecimentos sobre estes aços e sua soldagem com frequência, e colocam cada vez mais requisitos e restrições em suas especificações técnicas. Uma das restrições que têm sido colocadas referente à soldagem deste tipo de aço é a proibição de utilização do processo de soldagem Arame Tubular. Isso porque os resultados obtidos em qualificações de procedimentos de soldagem no mercado, com utilização deste processo de soldagem, têm sido negativos principalmente quanto a requisitos de tenacidade na região do metal depositado. No entanto, procedimentos de soldagem devidamente elaborados com utilização deste processo de soldagem ajudariam muito as empresas fabricantes de componentes para este segmento industrial já que os projetos envolvem juntas cada vez mais espessas, quantidades cada vez maiores de aço inoxidável duplex e busca de processos de soldagem cada vez mais produtivos, que reduzam prazos de entrega e custos dos projetos. Sendo assim, este trabalho foi desenvolvido com o intuito de auxiliar os interessados na soldagem de aços inoxidáveis duplex pelo processo de soldagem Arame Tubular.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 OS AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX

Aços inoxidáveis duplex são basicamente ligas Fe-Cr-Ni-Mo que apresentam microestrutura bifásica, composta de austenita e ferrita, que devem ser encontradas em proporções aproximadamente iguais ⁽¹⁾. Esses materiais apresentam vantagens quando comparados aos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos para utilização em alguns componentes. O limite de escoamento dos aços inoxidáveis duplex é aproximadamente duas vezes maior do que o dos aços inoxidáveis austeníticos, além de apresentarem resistência mecânica maior. Essas características mecânicas implicam na redução das espessuras de projeto de alguns componentes pela metade quando se utilizam aços inoxidáveis duplex em substituição aos aços inoxidáveis austeníticos convencionais, o que acarreta na redução de peso do componente. Além da redução de peso, devido à possibilidade de utilizar materiais de espessuras menores, os produtos fabricados com este aço combinam resistência mecânica com boa tenacidade, apresentam maior resistência à corrosão, principalmente em meios contendo íons cloreto, e apresentam excelente soldabilidade. Devido a todos estes fatores, a escolha de fabricar produtos em aço inoxidável duplex, em substituição aos aços inoxidáveis austeníticos convencionais, faz com que a vida útil do produto seja prolongada, tornando estes materiais muito atrativos economicamente ⁽²⁾. Atualmente, os aços inoxidáveis duplex contêm reduzidos teores de carbono e adições de nitrogênio ⁽³⁾.

A Tabela 2.1 mostra os principais aços inoxidáveis duplex utilizados no mercado, juntamente com suas composições químicas.

Tabela 2.1 – Composição química dos aços inoxidáveis duplex mais utilizados atualmente ⁽⁴⁾.

Norma	Classificação		Composição química (% em peso)								
			C	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W	P	S
UNS	S31803	Min	-	21,0	4,5	2,5	0,08	-	-	-	-
		Max	0,030	23,0	6,5	3,5	0,20	-	-	0,030	0,020
	S32550	Min	-	24,0	4,5	2,0	0,10	1,5	-	-	-
		Max	0,040	27,0	6,5	4,0	0,25	2,5	-	0,040	0,030
	S32750	Min	-	24,0	6,0	3,0	0,24	-	-	-	-
		Max	0,030	26,0	8,0	5,0	0,32	-	-	0,035	0,020
	S32760	Min	-	24,0	6,0	3,0	-	0,5	0,5	-	-
		Max	0,030	36,0	8,0	4,0	0,30	1,0	1,0	0,030	0,010

2.1.1 MICROESTRUTURA

Os aços inoxidáveis duplex apresentam microestrutura bifásica com composição aproximada de 50% de ferrita e 50% de austenita (composição desejável). A Figura 2.1 mostra em um diagrama pseudobinário, 70% Fe-Cr-Ni, que a solidificação de um aço inoxidável duplex é completamente ferrítica. Ao longo do resfriamento ocorre a transformação de parte da ferrita em austenita, em estado sólido. Quando a temperatura ambiente é atingida, obtém-se uma estrutura austenita/ferrita.

Para a obtenção de uma microestrutura com aproximadamente 50% de ferrita e 50% de austenita, um tratamento térmico de solubilização seguido de resfriamento rápido pode ser realizado após o resfriamento, em temperaturas de 1050 a 1100°C ⁽⁷⁾.

Os aços inoxidáveis duplex são normalmente utilizados na forma de chapas obtidas por processos de conformação mecânica, como por exemplo, a laminação. A microestrutura resultante é composta por lamelas de ferrita e austenita alternadas, superpostas e ordenadas no sentido do esforço mecânico aplicado. Mas dependendo das temperaturas utilizadas no processo mecânico e das condições de resfriamento, algumas fases podem precipitar na microestrutura duplex. A Figura 2.2 mostra a microestrutura de um aço inoxidável duplex.

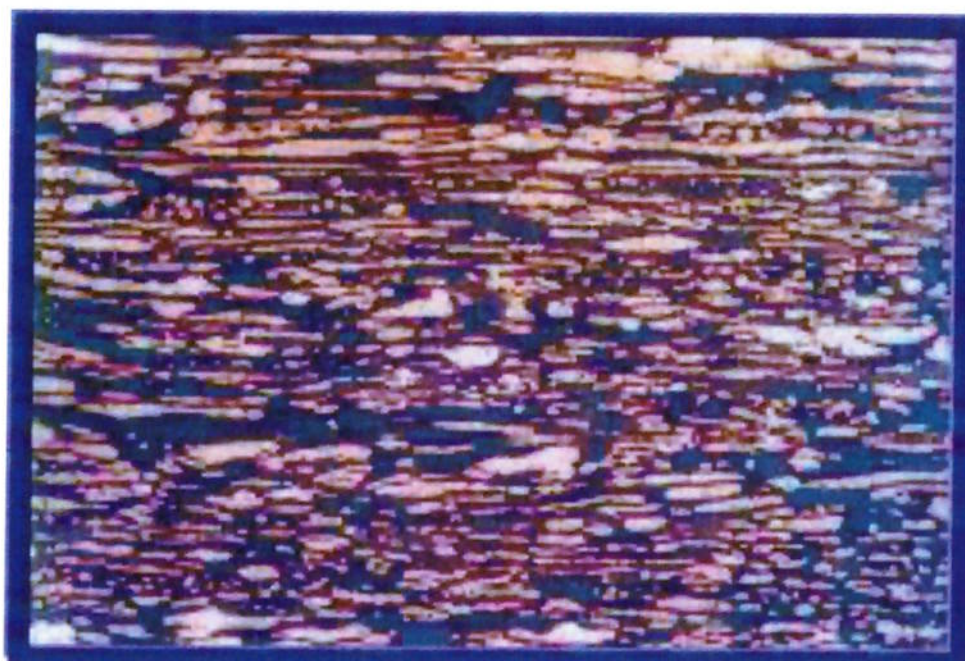


Figura 2.2 – Microestrutura do aço inoxidável duplex UNS S31803 laminado a quente.

2.1.2 Precipitação de fases secundárias

Quando submetido a resfriamento lento, o aço inoxidável duplex pode apresentar precipitação de fases secundárias, pois a microestrutura teoricamente bifásica não é estável abaixo de 1000°C⁽³⁾.

Essas precipitações ocorrem em faixas específicas de temperatura (em intervalos de tempo que sejam favoráveis ao fenômeno) e são compostas por elementos químicos, tais como cromo, molibdênio, cobre, tungstênio, silício, dentre outros; elementos estes que têm elevada importância nas características do material, como a resistência à corrosão.

A composição química do material exerce forte influência na cinética de precipitação de fases secundárias. A influência de alguns elementos químicos na cinética de precipitação de fases secundárias é mostrada na Figura 2.3.

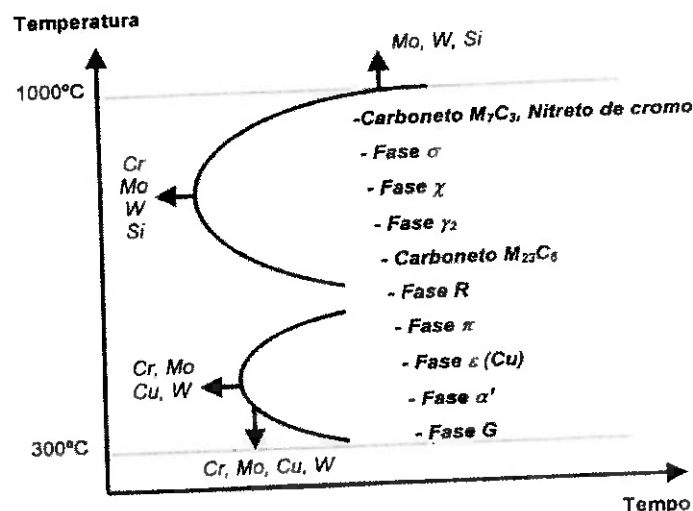


Figura 2.3 – Influência de elementos químicos na cinética de precipitação de fases secundárias⁽⁸⁾.

As propriedades mecânicas, a resistência à corrosão e a soldabilidade dos aços inoxidáveis duplex são seriamente afetadas pela precipitação de fases secundárias como nitretos, fase chi, fase sigma e austenita secundária.

2.1.3 PROPRIEDADES FÍSICAS

A Tabela 2.2 a seguir mostra que para as mesmas faixas de temperatura o coeficiente de expansão térmica linear dos aços inoxidáveis duplex atinge valores muito próximos aos coeficientes dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos. Esta propriedade faz com que a soldabilidade entre os aços inoxidáveis duplex e os aços inoxidáveis austeníticos, em juntas dissimilares, não seja um problema.

Tabela 2.2 – Propriedades físicas de alguns aços inoxidáveis duplex^(9,10).

Tipo	UNS	Temp. (°C)	Densid. (g/cm ³)	Módulo Young (GPa)	Calor especific. (J/kg.K)	Condut. Térmica (W/m.K)	Coeficiente de expansão térmica linear (m/cm.K)	
							Temp. (°C)	X10 ⁶ /K
Ferrítico	S43000	20	7,7	216	460	25	20-100	10
		100	-	213	-	-	20-200	10,5
	S43100	20	7,7	216	460	20	20-100	10
		100	-	213	-	-	20-200	10,5
Austenítico	S30400	20	7,9	200	500	15	20-100	16
		100	-	194	-	-	20-200	17
	S31603	20	7,98	200	500	15	20-100	16,5
		100	-	194	-	-	20-200	17,5
Duplex /Duplex	S31803	20	7,8	200	450	19	20-100	13
		100	-	194	-	19	20-200	12,5
	S32750	20	7,8	200	480	15	20-100	13,5
		100	-	194	-	15	20-200	14,0
	S32760	20	7,8	205	450	15	20-100	13,3
		100	-	200	-	-	20-200	13,6

2.1.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A Tabela 2.3 apresenta as propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis. Nota-se que o limite de escoamento dos aços inoxidáveis duplex é praticamente duas vezes maior que o dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos.

Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis ⁽¹¹⁾.

Tipo	UNS	Limite de escoamento (MPa) mín.	Limite de Resistência (MPa) mín.	Alongamento (%) mín.	Energia absorvida no ensaio Charpy V (J)
Austenítico	S30400	205	515	40	>300
	S31603	170	485	40	-
Ferrítico	S43000	205	450	22	-
	S40900	205	380	20	-
Duplex / Duplex	S32304	400	600	25	300
	S31803	450	620	25	250
	S32550	550	760	15	-
	S32750	550	795	15	-
	S32760	550	750	25	-

2.1.5 RESISTÊNCIA À CORROSÃO

Comparados aos aços inoxidáveis austeníticos convencionais, os aços inoxidáveis duplex apresentam maior resistência a todas as formas de corrosão, sendo elas do tipo generalizado, por pite, intergranular, sob tensão, em fresta e por cavitação ⁽⁷⁾.

Referente à resistência à corrosão por pites, como o potencial de pite está relacionado à composição química do material, foram desenvolvidas expressões matemáticas que relacionam a influência de alguns elementos na resistência à corrosão por pite, o chamado "Pitting Resistance Equivalent (PRE)". Estas expressões matemáticas são mostradas nas equações 1 à 4 abaixo:

1 - $PRE = (\%Cr) + 3,3(\%Mo)$	Aços inoxidáveis ferríticos
2 - $PRE = (\%Cr) + 3,3(\%Mo) + 30(\%N)$	Aços inox. austeníticos
3 - $PRE_N = (\%Cr) + 3,3(\%Mo) + 16(\%N)$	Aços inoxidáveis duplex
4 - $PRE_W = (\%Cr) + 3,3[(\%Mo) + 0,5(\%W)] + 16(\%N)$	Aços inox. superduplex

Os aços inoxidáveis duplex apresentam valores de PRE maiores do que os apresentados pelos aços inoxidáveis austeníticos convencionais. O que diferencia os aços inoxidáveis duplex dos superduplex é exatamente estes valores, calculados pela composição química dos aços. Desta forma, os aços inoxidáveis duplex apresentam PRE maior que 35 e os aços inoxidáveis superduplex maior que 40.

Estes aços apresentam também excelente resistência à corrosão intergranular devido à precipitação reduzida de carbonetos (baixos teores de carbono em sua composição) e a presença de elevados teores de cromo (evitam a sensitização) ⁽¹²⁾.

2.2 SOLDAGEM DOS AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX

A viabilidade operacional e de serviço e a avaliação das transformações metalúrgicas que ocorrem na soldagem é chamada de soldabilidade. Em termos de viabilidade operacional e de serviço, a soldabilidade dos aços inoxidáveis duplex não apresenta muitas restrições. Estes materiais podem ser soldados sem maiores problemas por praticamente todos os processos de soldagem a arco elétrico como Eletrodo Revestido, TIG, MIG, Plasma, Arco Submerso e Arame Tubular.

Alguns conceitos básicos que devem ser avaliados para a elaboração de um procedimento de soldagem correto, para os aços inoxidáveis duplex, são descritos a seguir.

2.2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

2.2.1.1 HISTÓRIA TÉRMICA

A História térmica de uma junta soldada é composta pela repartição térmica e pelos ciclos térmicos de soldagem, sendo determinada pelas propriedades do material, temperatura de pré-aquecimento e máxima interpasse, geometria da junta e energia de soldagem ⁽¹³⁾.

2.2.1.2 REPARTIÇÃO TÉRMICA

Repartição térmica é o termo utilizado para se referir à largura da zona afetada pelo calor (região onde ocorrem fenômenos metalúrgicos que podem afetar a junta soldada). A Figura 2.4 mostra a repartição térmica de uma junta soldada ⁽¹³⁾.

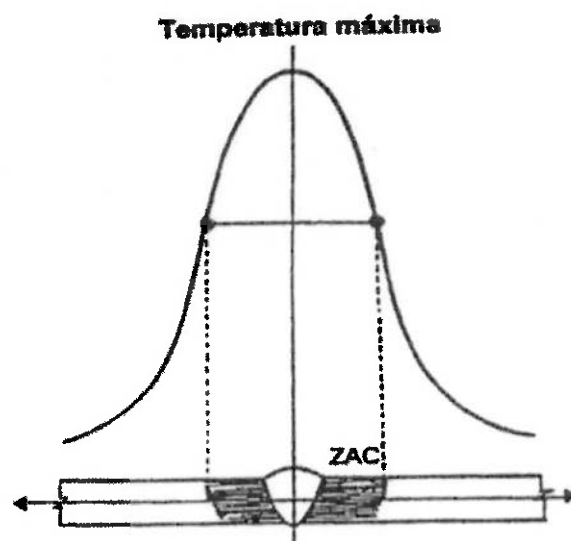


Figura 2.4 – Repartição térmica de uma junta soldada ⁽¹⁴⁾.

Há duas maneiras básicas de mensurar a repartição térmica de um componente soldado. Na primeira maneira, são utilizados termopares ligados a diferentes regiões da junta soldada. São colhidas as temperaturas máximas de cada ponto escolhido. Na segunda maneira, são utilizadas expressões matemáticas para determinar a máxima temperatura atingida em pontos distintos da ZAC, estimar a largura da ZAC e verificar o efeito da temperatura de pré-aquecimento e dos parâmetros de soldagem nesta região ⁽¹⁴⁾.

2.2.1.3 CICLO TÉRMICO DE SOLDAGEM

O ciclo térmico de soldagem é a representação gráfica, em função do tempo, da variação de temperatura de um ou mais pontos encontrados na junta soldada. A Figura 2.5 mostra uma representação esquemática dos ciclos térmicos de alguns pontos da ZAC de uma junta soldada ⁽¹³⁾. Os ciclos térmicos também podem ser utilizados para o estudo de precipitações de fases secundárias e para a determinação do comprimento da zona afetada pelo calor.

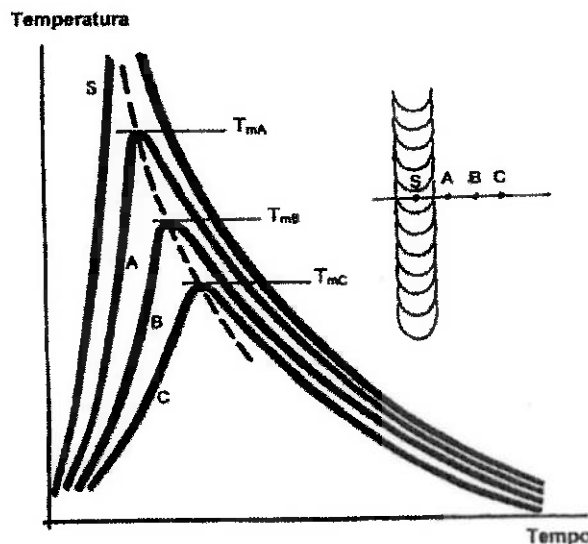


Figura 2.5 – Representação esquemática dos ciclos térmicos de alguns pontos da ZAC de uma junta soldada ⁽¹⁴⁾.

2.2.1.4 VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO

Nos processos de soldagem a arco, diferentemente dos tratamentos térmicos, o aquecimento é localizado. Isso resulta em uma condição em que materiais de base de maiores dimensões resfriam mais rápido do que os de menores

dimensões. Dependendo do material a ser soldado, são requeridas velocidades de resfriamento mais altas ou mais baixas num determinado procedimento de soldagem e esta velocidade de resfriamento influenciará diretamente nas características e propriedades finais do material soldado.

2.2.2 ENERGIA DE SOLDAGEM

Energia de soldagem é a energia térmica aplicada ao metal de base por unidade de comprimento do cordão de solda, ou seja, é a relação entre a tensão e a corrente de soldagem em função da velocidade de soldagem. A energia de soldagem também dependerá da eficiência térmica do processo de soldagem escolhido para determinada aplicação ⁽¹³⁾.

2.2.3 EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM

A energia gerada pelo equipamento de soldagem não é totalmente transmitida à junta. Grande parte desta energia é perdida para o meio através do aquecimento de gases de proteção, na pistola de soldagem, na geração de energia luminosa, ruídos, dentre outras maneiras de dispersão ⁽¹³⁾. Sendo assim, a eficiência térmica será diferente para os diferentes processos de soldagem. A Tabela 2.4 apresenta a eficiência térmica dos principais processos de soldagem a arco elétrico.

Tabela 2.4 – Eficiência térmica dos principais processos de soldagem ⁽¹³⁾.

Processos	Eficiência térmica (η)
Laser / Feixe de elétrons	5 – 20
TIG	30 – 60
Plasma	50 – 60
MIG / MAG / Arame Tubular	60 – 80
Eletrodo revestido	80 – 90
Arco submerso	90 – 99

2.2.4 METALURGIA DA SOLDAGEM

2.2.4.1 DESENVOLVIMENTO MICROESTRUTURAL DA JUNTA SOLDADA

Em uma junta soldada de aço inoxidável duplex a microestrutura será constituída de duas regiões distintas: a Zona Fundida (ZF) e a Zona Afetada pelo Calor (ZAC) ⁽¹⁵⁾. A ZF é a região da junta que se funde durante a soldagem. A ZAC é a região do metal de base que não é fundida, mas pode sofrer alterações microestruturais devido à proximidade ao cordão de solda (alterações devido ao calor gerado). A microestrutura desta região é determinada pela repartição térmica e pelos ciclos térmicos de soldagem.

2.2.4.1.A ZONA FUNDIDA (ZF)

Quando a ZF dos aços inoxidáveis duplex se solidifica, apenas fase ferrita é formada ⁽¹⁵⁾. O gradiente de temperatura na interface líquido/sólido faz com que os grãos cresçam de forma colunar, onde seus eixos principais são orientados no sentido de máxima extração do calor. Entre 1250 e 800°C, a

austenita inicia sua precipitação nos contornos de grão da ferrita ⁽¹⁶⁾. A Figura 2.6 mostra a microestrutura do metal de solda de um aço duplex UNS S31803 com adição AWS E2209-17.

A quantidade de fases ferrita e austenita, em fração volumétrica, dependerá da composição química, da cinética da reação de transformação da ferrita em austenita, do tamanho dos grãos ferríticos, dos parâmetros de soldagem e da geometria do cordão de solda ⁽¹⁷⁾. O equilíbrio dessas fases pode ser feito inclusive pela diluição dos metais de adição e pelo controle da composição dos gases de proteção.

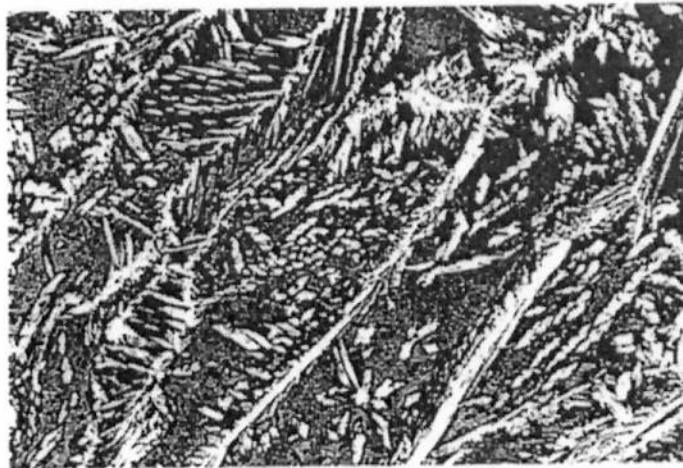


Figura 2.6 – Microestrutura do metal de solda de um aço UNS S31803 soldado por eletrodo revestido, metal de adição AWS A 5.4 E2209- 17. MO. (200X). Matriz ferrítica (escura) com precipitações de austenita (claras).

Com a velocidade de resfriamento muito elevada (como acontece na soldagem), o equilíbrio entre as fases ferrita e austenita pode não ser atingido. No entanto, além da velocidade de resfriamento, a composição do metal de adição (normalmente mais rico em teor de Ni) vai influenciar no controle destas fases. No caso da presença de elementos ferritizantes e austenitizantes em

quantidades controladas, uma velocidade de resfriamento elevada pode ser considerada.

2.2.4.1.B ZONA AFETADA PELO CALOR (ZAC)

Apesar das fases predominantes nos aços inoxidáveis duplex serem a austenita e a ferrita, outras fases indesejáveis podem se precipitar. Além disso, na zona afetada pelo calor, o balanço entre as duas fases principais deverá ser controlado apenas pelo correto procedimento de soldagem, já que nesta região não se pode contar com a adição de elementos austenitizantes e ferritizantes provenientes do metal de adição, já que não há diluição. Devido a essa situação, a ZAC dos aços inoxidáveis duplex é normalmente dividida em duas sub-regiões: a Zona Afetada pelo Calor de Temperatura Elevada (ZACTE) e a Zona Afetada pelo Calor de Temperatura Baixa (ZACTB) ⁽¹⁵⁾.

A) Zona Afetada pelo Calor de Temperatura Elevada (ZACTE)

A ZACTE é a região da ZAC que abrange temperaturas superiores à de solvus da ferrita e inferiores à de solidus do material. A largura da ZACTE é determinada pelos parâmetros de soldagem, geometria da junta e composição química do material.

A evolução da microestrutura da ZACTE pode ser analisada através de um ciclo térmico de um ponto qualquer desta sub-região, juntamente com o diagrama

pseudobinário Fe-Cr-Ni, exemplificado para 70% de Fe. A Figura 2.7 mostra esta evolução. Este ciclo térmico possui três regiões distintas: as regiões I e II correspondem às etapas de aquecimento e resfriamento em temperatura elevada, respectivamente; a Região III é a etapa final de resfriamento, em temperaturas mais baixas.

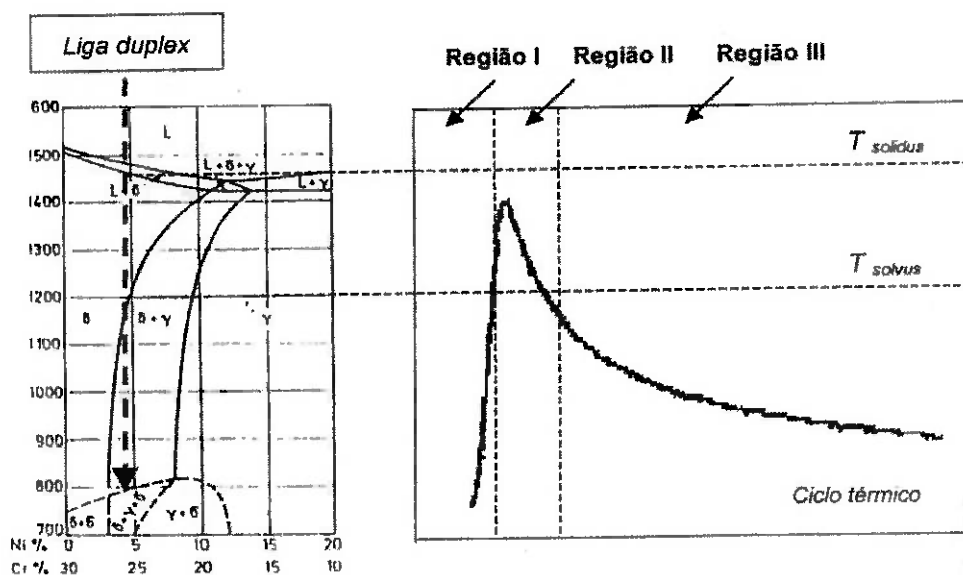


Figura 2.7 – Relação entre o ciclo térmico de um ponto qualquer da ZACTE e o diagrama pseudobinário Fe-Cr-Ni destacado em 70% de Fe⁽¹⁵⁾.

Nas regiões I e II, ocorre transformação da fase austenita em ferrita e a microestrutura duplex tende a apresentar apenas estrutura ferrítica. Fases secundárias, como nitretos e carbonetos, são geralmente dissolvidas em altas temperaturas geralmente atingidas nestas regiões, mas se uma taxa de resfriamento muito baixa for utilizada na região III, essas fases indesejáveis provavelmente voltarão a precipitar na ZACTE.

B) Zona Afetada pelo Calor de Temperatura Baixa (ZACTB)

A ZACTB é a região na ZAC que abrange temperaturas inferiores à temperatura solvus da ferrita. Essa região apresenta estrutura bifásica durante a soldagem e a proporção entre as fases ferrita e austenita dependerá somente da temperatura atingida ⁽¹⁵⁾. A evolução da microestrutura da ZACTB pode ser analisada através de um ciclo térmico de um ponto qualquer desta sub-região, juntamente com o diagrama pseudobinário Fe-Cr-Ni, exemplificado para 70% de Fe. A Figura 2.8 mostra esta evolução.

O ciclo térmico da ZACTB apresenta duas regiões distintas: a região I corresponde à etapa de aquecimento e resfriamento em temperaturas elevadas, a região II refere-se à faixa de temperatura onde ocorre a precipitação de fase secundária.

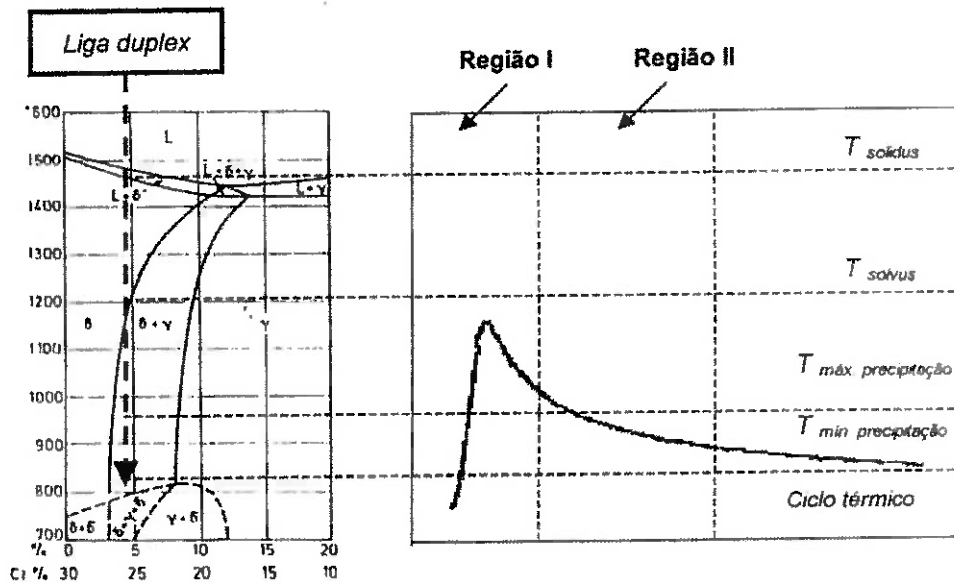


Figura 2.8— Relação entre o ciclo térmico esquemático de um ponto qualquer da ZACTB e o diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni exemplificado para 70% de Fe ⁽¹⁵⁾.

Na Região I, há a possibilidade de dissolução parcial da austenita, que no resfriamento voltará a se precipitar. Assim, a quantidade de austenita da ZACTB será maior do que a encontrada na ZACTE. Essas transformações serão dependentes da temperatura máxima atingida nessas regiões, das taxas de aquecimento e resfriamento⁽¹⁵⁾.

No resfriamento, a ZACTB entra numa faixa de temperatura de formação de fases secundárias. Caso a velocidade de resfriamento seja elevada na região II, a precipitação das fases secundárias pode ser evitada⁽¹⁸⁾.

2.2.4.2 INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM

A energia de soldagem está associada às transformações de fases e ao desempenho da junta soldada. Energias de soldagem elevadas originam grande transferência de calor à junta o que, por conseguinte, provoca baixas velocidades de resfriamento. Esta condição beneficia a precipitação de austenita e o equilíbrio entre os teores de ferrita e austenita^(19,20,21).

Energia de soldagem baixa transfere apenas uma pequena quantidade de calor à junta, tendo como efeito maiores velocidades de resfriamento. Nesta condição, a precipitação de austenita não é favorável, portanto o equilíbrio entre as fases é prejudicado.

Desta forma, a energia de soldagem deve ser calculada a fim de propiciar formação de fase austenita e minimizar ao máximo a formação de fases secundárias. Recomenda-se, para soldagem de aços inoxidáveis duplex, energia de soldagem entre 0,5 e 1,5 kJ/mm. A Figura 2.9 mostra a microestrutura típica de uma junta de aço inoxidável duplex UNS S 31803 soldada, onde a energia de soldagem utilizada foi inferior a 0,5 kJ/mm.

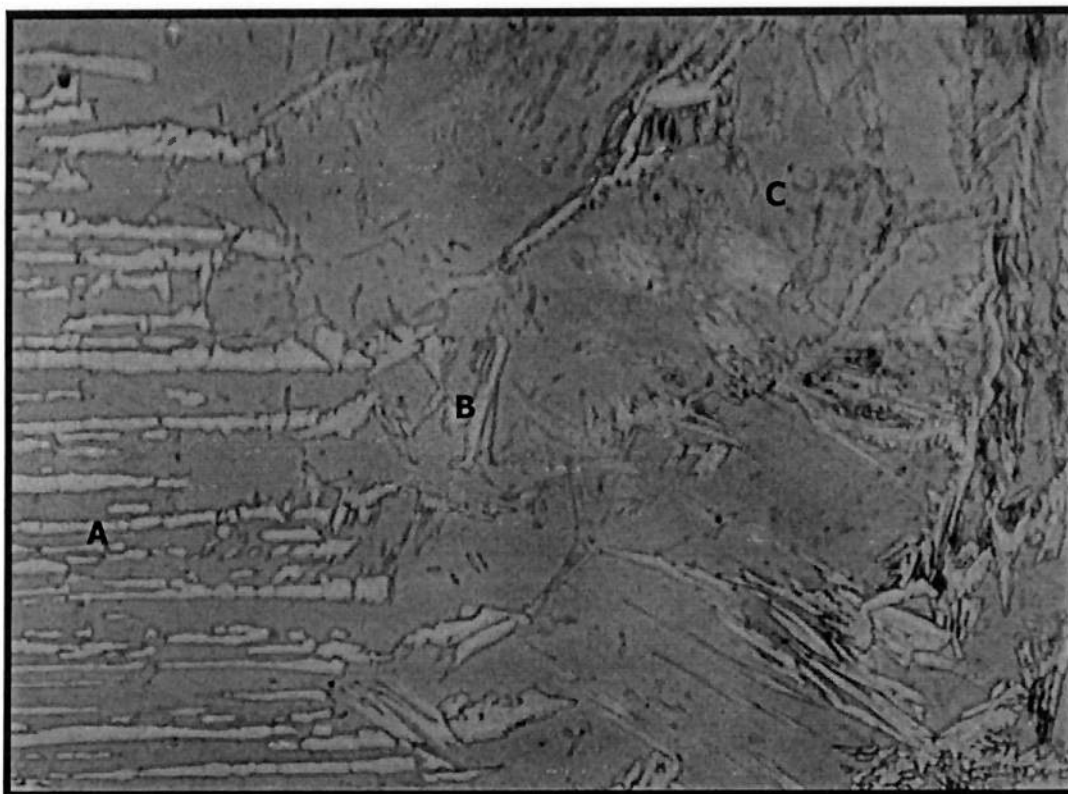


Figura 2.9 – Microestrutura de aço UNS S32750 soldado. Região A: Metal de base com balanço ideal de ferrita e austenita (aproximadamente 50% de cada uma das fases). Região B: ZAC com balanço das fases ferrita e austenita alterado devido a operação de soldagem não apropriada. (aproximadamente 75% e 25% das fases, respectivamente). Região C: Metal depositado por processo de soldagem, com as fases equilibradas.

A microestrutura resultante mostrada na Figura 2.9 pode levar a consequências como elevada dureza na região da ZAC e perda das propriedades de corrosão nesta região. A Figura 2.10 mostra a região de um tubo de aço inoxidável UNS S31803 com microestrutura similar a mostrada acima. Este tubo foi colocado em serviço (módulo de plataforma de petróleo). É possível observar que houve início de corrosão na região da ZAC. O mesmo não foi encontrado na região do metal de base nem na ZF.



Figura 2.10 – Amostra de pedaço de tubo de aço inoxidável duplex UNS S 31803 retirada de sistema de tubulação em módulo de plataforma de petróleo. A circunferência vermelha mostra a região da zona afetada pelo calor (aproximadamente 2mm distante da região do metal depositado) durante a soldagem do tubo, a qual sofreu corrosão durante trabalho na plataforma, devido a perda da estrutura do aço inoxidável duplex.

2.2.4.3 METAIS DE ADIÇÃO

Na soldagem dos aços inoxidáveis duplex existem dois tipos de metais de adição normalmente utilizados: os de composição microestrutural duplex / superduplex e as ligas de níquel ⁽²²⁾. Neste trabalho serão utilizados metais de adição de composição microestrutural duplex tanto para o processo de soldagem TIG quanto para o processo Arame Tubular.

Os metais de adição de composição igual ou próxima à composição do metal de base, enriquecidos em níquel, são utilizados amplamente. O aumento do teor de níquel no consumível de soldagem confere um melhor balanço de fases, aumentando a quantidade de austenita no metal depositado. Os níveis de níquel nos consumíveis são de, aproximadamente, 2,5 a 4,0% maiores que aqueles presentes no metal de base. As soldagens realizadas com consumíveis enriquecidos em níquel não necessitam de tratamento térmico pós-soldagem. O tratamento térmico promoveria a diminuição de ferrita no material devido ao alto teor de níquel, prejudicando sua resistência mecânica.

2.3 NORMA PETROBRAS N-133

A norma Petrobras N-133 têm o título de "Soldagem". Esta é a norma utilizada em todos os projetos da Petrobras e contém os requisitos técnicos e práticas recomendadas como referência em soldagem, ou seja, todos os requisitos de soldagem descritos nesta norma devem ser respeitados e atendidos para

qualquer projeto da Petrobras em vigência, além dos requisitos específicos de cada projeto.

Referente à soldagem dos aços inoxidáveis duplex, a norma Petrobras N-133 traz um capítulo exclusivo para soldagem destes aços, contendo todos os requisitos técnicos e restrições da soldagem para seus projetos. Na última revisão desta norma, Rev. K, de agosto de 2012, trata-se do capítulo 5.7 – “Aços Inoxidáveis Duplex, Superduplex e Hiperduplex”⁽²³⁾.

Dentre os sub-capítulos dentro do capítulo 5.7 desta norma, os quais abordam os assuntos de introdução, soldabilidade, técnicas de soldagem e processos de soldagem aplicáveis aos aços inoxidáveis duplex, neste último, a Petrobras proíbe a soldagem pelo processo arame tubular.

3. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é:

Verificar o atendimento dos requisitos de composição química, propriedades mecânicas e resistência à corrosão impostos pela norma Petrobras N-133, revisão K, para soldagem de tubo de aço inoxidável duplex UNS S31803, utilizando os processos de soldagem TIG para os passes de raiz e reforço e Arame Tubular para os passes de enchimento e acabamento.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Para realização das soldagens os seguintes materiais foram utilizados:

- Tubos de aço inoxidável duplex UNS S31803, diâmetro nominal 8", Sch 160 (diâmetro 219,1mm e 18,26mm de espessura) como metal de base;
- Vareta para soldagem pelo processo TIG de classificação AWS A 5.9 ER 2209, diâmetro 2,40mm;
- Arame tubular de classificação AWS A 5.22 E 2209T-1 1/4, diâmetro 1,20mm;
- Gás de proteção para soldagem pelo processo TIG e gás de purga: Ar + 2%N₂.
- Gás de proteção para soldagem pelo processo arame tubular: Ar + 18%CO₂.

A composição química do metal de base e dos consumíveis de soldagem utilizados estão descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Composição química do metal de base e consumíveis de soldagem utilizados

 Materiais	 C	 Mn	 Fe	 P	 S	 Si	 Ni	 Cr	 Mo	 N
 Metal Base	0,020	1,42	Resto	0,026	0,001	0,51	5,19	22,51	3,09	0,18
 ER 2209	0,019	1,66	Resto	0,016	0,006	0,39	8,51	22,44	3,13	0,16
 E 2209T-1	0,030	1,06	Resto	0,018	0,007	0,61	9,11	22,54	3,04	0,19

4.2 MÉTODOS

4.2.1 PREPARAÇÃO DA JUNTA

Uma junta de topo foi confeccionada com chanfro do tipo V com 60°, abertura de raiz de 3,00mm e nariz de 2,00mm. Para isso, foram utilizados dois tubos de aço inoxidável duplex UNS S31803, com as dimensões já descritas anteriormente. A representação esquemática da junta pode ser visualizada na Figura 4.1.

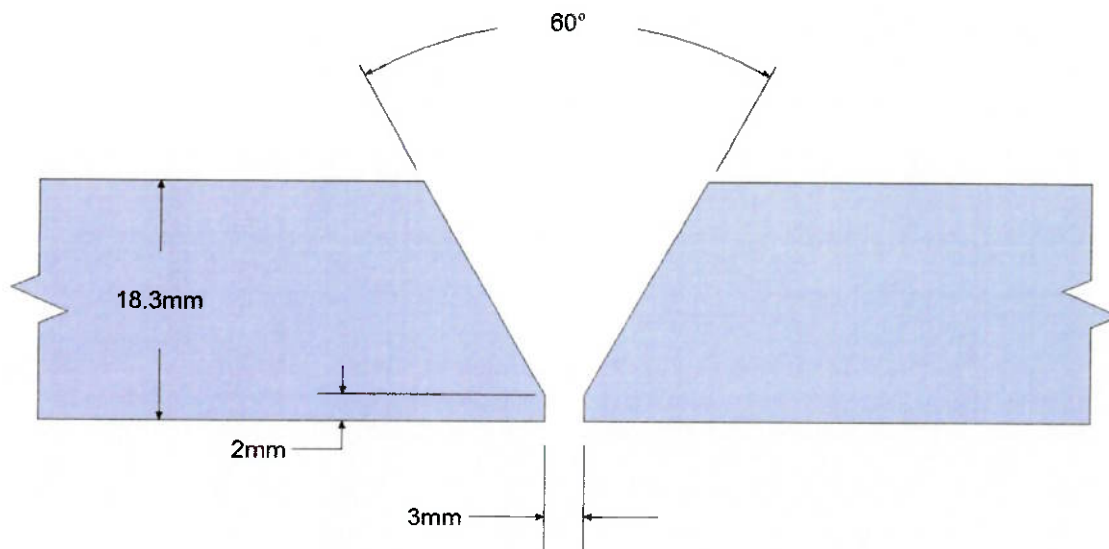


Figura 4.1 – Configuração da junta

4.2.2 ACOMPANHAMENTO DE SOLDAGEM

A junta foi soldada manualmente, sendo os dois primeiros passes (passe de raiz e passes de reforço) pelo processo TIG. A Figura 4.2 mostra a região da junta após execução do passe de raiz pelo processo TIG.



Figura 4.2 - Passe de raiz realizado pelo processo TIG

Os passes de enchimento e acabamento foram realizados através do processo Arame Tubular. A seqüência de passes está indicada na Figura 4.3, e o acompanhamento de soldagem passe a passe com os respectivos parâmetros de soldagem, na Tabela 4.2. As soldagens foram executadas na posição 6G, progressão ascendente, e temperatura de pré-aquecimento 25°C (temperatura ambiente). A temperatura máxima interpasse foi de 150°C, controlada através de um termopar de contato e lápis térmico. A limpeza entre os passes foi realizada com auxílio de escova rotativa de aço inoxidável e esmerilhadeira, a fim de garantir a total remoção de escória gerada pelo processo Arame Tubular entre a execução dos cordões de solda. Antes do início das soldagens, a junta tubular foi devidamente purgada com utilização de gás de purga Ar + 2%N₂, vazão de 15 l/min, e auxílio de oxímetro para garantir o teor de O₂ inferior a 50 ppm, conforme requisitos da norma Petrobras aplicável.

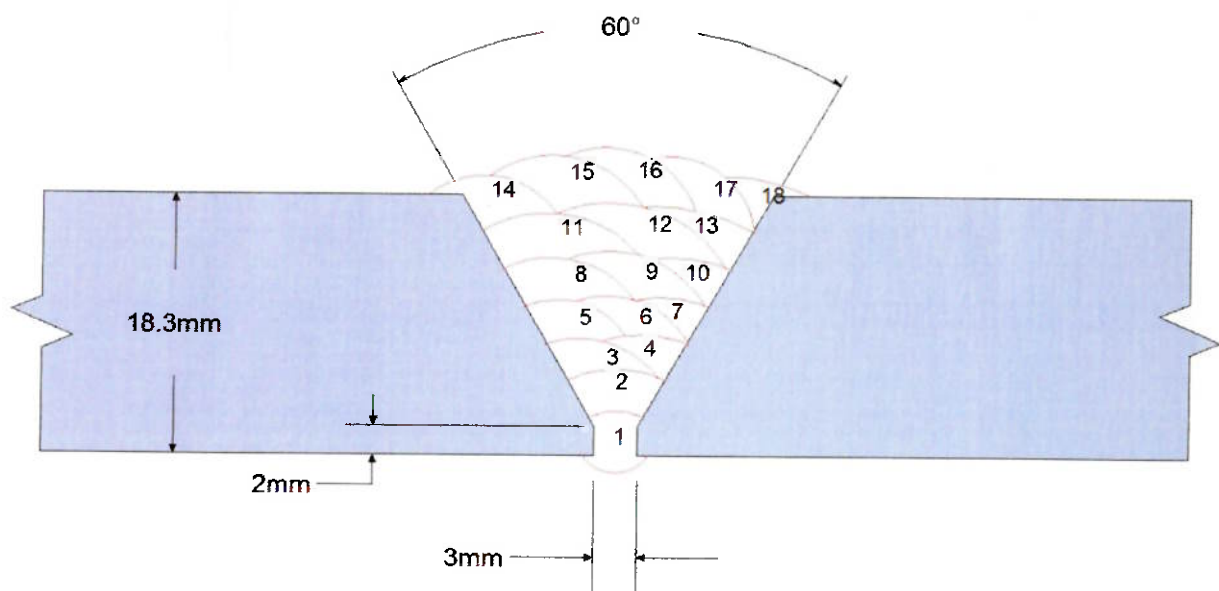


Figura 4.3 – Seqüência de passes

Tabela 4.2 - Acompanhamento de soldagem

Passo Nº	Camada Nº	Metal de Adição (AWS)	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Polaridade	Vazão de Gás (l/min)	Velocidade (cm/min)	Energia de Soldagem (kJ/cm)
1	1	ER 2209	2,40	100	12	CC-	14	8,76	8,22
2	2	ER 2209	2,40	90	11	CC-	14	7,92	7,50
3	3	E 2209 T-1	1,20	184	22	CC+	20	29,20	8,32
4	3	E 2209 T-1	1,20	176	23	CC+	20	23,86	10,18
5	4	E 2209 T-1	1,20	188	23	CC+	20	26,80	9,68
6	4	E 2209 T-1	1,20	192	23	CC+	20	28,31	9,36
7	4	E 2209 T-1	1,20	184	23	CC+	20	21,61	11,75
8	5	E 2209 T-1	1,20	184	23	CC+	20	27,79	9,14
9	5	E 2209 T-1	1,20	184	23	CC+	20	25,56	9,94
10	5	E 2209 T-1	1,20	172	24	CC+	20	23,79	10,41
11	6	E 2209 T-1	1,20	168	23	CC+	20	26,96	8,60
12	6	E 2209 T-1	1,20	168	24	CC+	20	28,03	8,63
13	6	E 2209 T-1	1,20	156	24	CC+	20	25,98	8,65
14	7	E 2209 T-1	1,20	152	23	CC+	20	26,55	7,90
15	7	E 2209 T-1	1,20	152	23	CC+	20	28,26	7,42
16	7	E 2209 T-1	1,20	148	23	CC+	20	26,87	7,60
17	7	E 2209 T-1	1,20	148	23	CC+	20	27,20	7,51
18	7	E 2209 T-1	1,20	148	23	CC+	20	26,55	7,69

4.2.3 EXAME VISUAL

De acordo com a norma Petrobras N-133 revisão K, para qualificações de procedimentos de soldagem de aços inoxidáveis duplex, 100% das juntas soldadas devem ser inspecionadas visualmente ⁽²³⁾. O exame visual tem a função de verificar a presença de possíveis defeitos encontrados na junta, se

estes forem perceptíveis a olho nu. Alguns defeitos que podem ser detectados por este ensaio são: trinca, falta de fusão, falta de penetração, dentre outros. A Figura 4.4 mostra a junta após conclusão da soldagem, a qual foi devidamente inspecionada por exame visual.

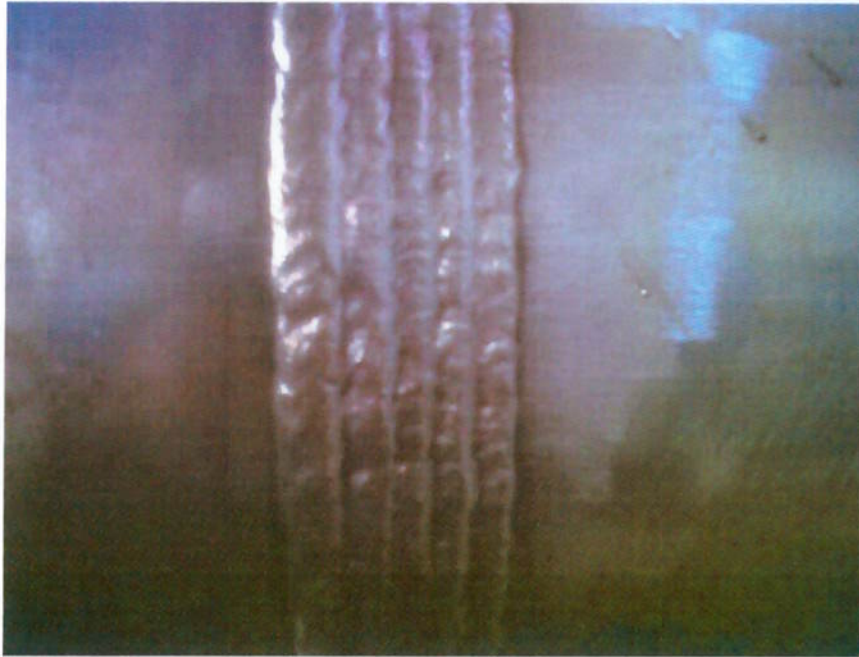


Figura 4.4 - Junta devidamente soldada e pronta para ensaio visual.

4.2.4 ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE

Além do exame visual, outro ensaio exigido pela norma em questão é o de líquido penetrante, com o mesmo intuito de verificar descontinuidade ou imperfeições na superfície da junta soldada, tanto na região da face quanto na região da raiz da solda. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma ASME Seção VIII Div.1 Ape.8 ⁽²⁴⁾, conforme instrução da norma Petrobras N-133.

4.2.5 RADIOGRAFIA

Após ensaio de líquido penetrante, foi feito um exame radiográfico da junta soldada com o objetivo de identificar a possível ocorrência de descontinuidades não superficiais, tais como: falta de fusão, inclusão de escória, porosidade, mordeduras, dentre outras. Assim como para o exame visual, este ensaio foi realizado de acordo com a norma ASME Seção IX ⁽²⁵⁾.

4.2.6 EXAME MICROESTRUTURAL

Este ensaio visa analisar, através da microestrutura do metal depositado, ZAC e metal de base, a possível presença de precipitados e fases indesejáveis. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NORSOK M-601 e o total de 24 (vinte e quatro) corpos de provas foram retirados das posições 3h, 6h, 9h, e 12h, tanto na região da face quanto na região da raiz do tubo soldado para análise ⁽²⁶⁾. O reagente utilizado para ataque dos corpos de provas foi 85g NaOH em 50mL de água destilada (ataque eletrolítico com utilização de 6 volts). As análises foram realizadas em microscópio óptico com aumento de 400 vezes.

4.2.7 CONTAGEM DE FASES (FERRITA/AUSTENITA)

Trata-se também de ensaio microestrutural que foi realizado conforme norma ASTM E 562 e têm como objetivo quantificar as fases presentes no material. No caso dos aços inoxidáveis duplex, o objetivo é verificar se o balanço entre as fases ferrita e austenita foi mantido nas regiões da ZAC e do metal depositado após a soldagem, além de checar a estrutura do metal de base. Os mesmos corpos de provas e reagente para ataque metalográfico do item anterior deste trabalho foram utilizados.

4.2.8 ENSAIO DE TRAÇÃO

Para a garantia da continuidade das propriedades mecânicas da junta soldada, normalmente o limite de resistência do metal depositado deve ser igual ou maior que o limite de resistência do metal de base. Com isso é possível garantir que, se de alguma forma uma fratura ocorrer na região do metal depositado sob um limite de resistência menor que o do metal de base, as possíveis causas deste defeito poderão ser a presença de descontinuidades e/ou fases secundárias provenientes do processo de soldagem. De acordo com a norma ASME Seção IX, 2 (dois) corpos de provas foram retirados da seção transversal da junta soldada para análise do limite de resistência. O critério de aceitação mínimo de limite de resistência para o aço UNS S31803 é $> 620\text{MPa}$ ⁽²⁵⁾.

4.2.9 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Para este ensaio foram confeccionados 4 (quatro) corpos de prova de dobramento lateral de acordo com a norma ASME Seção IX, QW-462.2. Os ensaios foram realizados com utilização de cutelo de 38,00mm e distância entre roletes de 61,00mm. Todos os corpos de prova foram dobrados até 180°. O ensaio foi realizado à temperatura ambiente de 25°C em máquina universal de ensaios.

4.2.10 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY V

O ensaio de impacto avalia a tenacidade do material testado, ou seja, a energia absorvida durante o impacto através da propagação de uma trinca em uma região pré-determinada (região do entalhe). Através deste ensaio também se obtém medidas de expansão lateral. Para qualificações de procedimento de soldagem conforme norma PetrobrasN-133 para aços inoxidáveis duplex, 3 (três) corpos de provas devem ser retirados e ter o entalhe localizado na região do metal de solda e mais 3 (três) com entalhe localizado na região da linha de fusão. Os ensaios foram realizados à temperatura de -46°C e conforme os critérios de aceitação da norma NORSOK M-601. Ensaio adicional com entalhe na região a 2 mm da linha de fusão em direção ao metal de base também foram realizados.

4.2.11 ENSAIO DE SUSCEPTIBILIDADE À CORROSÃO POR PITE

O ensaio de corrosão permite a detecção de fases intermetálicas prejudiciais à corrosão que possam estar presentes nos aços inoxidáveis duplex. A interpretação dos resultados é feita através dos cálculos de perda de massa e de taxa de corrosão, além de análise para verificação de formação de pites. Os ensaios foram realizados conforme norma ASTM G 48 Método A com temperatura de ensaio de 20°C ⁽²⁷⁾. Após ensaio, os valores de perda de massa foram calculados para os 4 (quatro) corpos de provas analisados, sendo eles retirados das posições 3h, 6h, 9h e 12h do tubo soldado. Além disso, análise da superfície de todos os corpos de provas foi feita com auxílio de lupa com aumento de 20 vezes para detecção de princípio de corrosão por pites.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE QUÍMICA E CÁLCULO DO PREN_N

Através das análises químicas mostradas na Tabela 4.1, é possível calcular o PREN_N do metal de base e dos consumíveis de soldagem (resultado do metal depositado por eles):

- PREN_N do Metal de base:

$$\text{PREN}_N = (\%Cr) + 3,3(\%Mo) + 16(\%N) = 22,51 + 3,3(3,09) + 16(0,18) = 35,59$$

- PREN_N da vareta ER 2209:

$$\text{PREN}_N = (\%Cr) + 3,3(\%Mo) + 16(\%N) = 22,44 + 3,3(3,13) + 16(0,16) = 35,33$$

- PREN_N do arame tubular E 2209 T-1:

$$\text{PREN}_N = (\%Cr) + 3,3(\%Mo) + 16(\%N) = 22,54 + 3,3(3,04) + 16(0,19) = 35,61$$

Todos os resultados obtidos estão com valores acima dos mínimos exigidos para os aços inoxidáveis do tipo duplex (maior que 35,00). É possível notar também que o teor de níquel (Ni) apresentado pelos consumíveis de soldagem

é maior que o apresentado pelo metal de base UNS S31803. A diferença entre o teor de Ni na vareta TIG e no metal de base é de 3,32%Ni e, entre o arame tubular e o metal de base 3,92%Ni. A norma Petrobras N-133 cita que os consumíveis de soldagem para aços inoxidáveis duplex devem ter em sua composição de 2,00%Ni à 4,00%Ni acima do metal de base, o que está satisfatório.

5.2 ACOMPANHAMENTO DE SOLDAGEM

Conforme acompanhamento de soldagem descrito na Tabela 4.2, é possível observar que atenção especial foi dada ao aporte térmico e controle de temperatura interpasse. A energia de soldagem máxima calculada durante todo o procedimento de soldagem foi de 11,75 kJ/cm, muito menor do que os 15,00 kJ/cm máximo. Desta forma, a cinética de formação de fases como carbonetos, nitretos, fase sigma, fase chi, dentre outras que são prejudiciais à estrutura dos aços inoxidáveis duplex foi diminuída e evitada ao máximo, principalmente na região da ZAC.

A energia mínima registrada, de 7,42 kJ/cm, também está muito distante do valor mínimo recomendado por norma (5,00kJ/cm), visando principalmente manter a velocidade de resfriamento do conjunto soldado em níveis que permitam a formação de fase austenita a partir da matriz ferrítica e, conseqüentemente, o balanço entre estas fases, principalmente na ZAC.

Conforme já descrito, a temperatura máxima interpasse durante toda a soldagem foi 150°C.

5.3 ENSAIOS

A Tabela 5.1 mostra um resumo de todos os ensaios realizados na junta de aço inoxidável duplex soldada pelos processos TIG + Arame Tubular, a fim de garantir o atendimento integral aos requisitos da norma Petrobras N-133 revisão K. A tabela mostra todos os ensaios, a quantidade necessária de cada um dos ensaios exigidos pela norma de referência aplicável, e os critérios de aceitação para cada um deles.

Tabela 5.1 – Ensaios para avaliação das propriedades mecânicas e de resistência à corrosão conforme requisitos da norma Petrobras N-133 revisão K.

<i>Ensaio</i>	Método de ensaio	Critério de aceitação	Nº de Ensaios
Exame Visual	ASME IX-10 Addenda 2011	ASME IX-10 Addenda 2011	100%
Líquido Penetrante	ASME VIII-10 Div.1 Ape.8 Addenda 2011	ASME VIII-10 Div.1 Ape.8 Addenda 2011	100%
Radiografia	ASME IX-10 Addenda 2011	ASME IX-10 Addenda 2011	100%
Exame Microestrutural	NORSOK M-601	Sem Precipitações – 400X	MS, ZAC, MB
Contagem de fases (ferrita)	ASTM E 562	35% a 65%	MS, ZAC, MB
Tração	ASME IX-10 Addenda 2011	>620 MPa	2 transversais
Dobramento	ASME IX-10 Addenda 2011	ASME IX-10 Addenda 2011	2 DF+2 DR ou 4 DL
Impacto Charpy V (-46°C)	NORSOK M-601	>27J e expansão lateral mínima de 0,38	MS, LF (3CPs)
Corrosão (20°C, 24h)	ASTM G 48 Método A	Sem pitting (20X) Perda de massa <4,0g/m ²	1CP MS+ZAC+MB

Os resultados obtidos em cada um dos ensaios são discutidos a seguir:

5.3.1 EXAME VISUAL

Após realização de inspeção visual nas regiões da face da solda e raiz da solda, nenhuma descontinuidade ou qualquer tipo de indicação foi observada, o que pode ser verificado em relatório de laboratório no Anexo 1 deste trabalho.

5.3.2 ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE

Após realização de ensaio de líquido penetrante nas regiões da face da solda e raiz da solda, nenhuma descontinuidade ou qualquer tipo de indicação foi observada, o que pode ser verificado em relatório de laboratório no Anexo 2 deste trabalho.

5.3.3 RADIOGRAFIA

A radiografia da junta soldada foi aprovada pelos critérios de aceitação da norma aplicável sem nenhuma indicação de descontinuidades ou defeitos em toda extensão do conjunto soldado, o que pode ser verificado em relatório de laboratório no Anexo 3 deste trabalho.

5.3.4 EXAME MICROESTRUTURAL

As Figuras 5.1 a 5.6 mostram a microestrutura resultante de corpos de provas (CPs) retirados da posição 12h da junta de aço inoxidável duplex soldada. As Figuras 5.1 e 5.2 retratam as microestruturas da região do metal de base (MB) para a face e raiz da solda, respectivamente. As Figuras 5.3 e 5.4 retratam as microestruturas da região da ZAC para a face e raiz da solda, respectivamente. As Figuras 5.5 e 5.6 retratam as microestruturas da região do metal de solda (MS) para a face e raiz da solda, respectivamente.

As Figuras 5.7 a 5.12 mostram a microestrutura resultante de corpos de provas (CPs) retirados da posição 3h da junta de aço inoxidável duplex soldada. As Figuras 5.7 e 5.8 retratam as microestruturas da região do metal de base (MB) para a face e raiz da solda, respectivamente. As Figuras 5.9 e 5.10 retratam as microestruturas da região da ZAC para a face e raiz da solda, respectivamente. As Figuras 5.11 e 5.12 retratam as microestruturas da região do metal de solda (MS) para a face e raiz da solda, respectivamente.

As Figuras 5.13 a 5.18 mostram a microestrutura resultante de corpos de provas (CPs) retirados da posição 6h da junta de aço inoxidável duplex soldada. As Figuras 5.13 e 5.14 retratam as microestruturas da região do metal de base (MB) para a face e raiz da solda, respectivamente. As Figuras 5.15 e 5.16 retratam as microestruturas da região da ZAC para a face e raiz da solda,

respectivamente. As Figuras 5.17 e 5.18 retratam as microestruturas da região do metal de solda (MS) para a face e raiz da solda, respectivamente.

As Figuras 5.19 a 5.24 mostram a microestrutura resultante de corpos de provas (CPs) retirados da posição 9h da junta de aço inoxidável duplex soldada. As Figuras 5.19 e 5.20 retratam as microestruturas da região do metal de base (MB) para a face e raiz da solda, respectivamente. As Figuras 5.21 e 5.22 retratam as microestruturas da região da ZAC para a face e raiz da solda, respectivamente. As Figuras 5.23 e 5.24 retratam as microestruturas da região do metal de solda (MS) para a face e raiz da solda, respectivamente.

Todas as microestruturas foram registradas com aumento de 400X em microscópio óptico. Para todos os casos, a microestrutura é composta pelas fases ferrita (regiões escuras) e austenita (regiões claras). Não foi possível observar formação de precipitados e carbonetos em contornos de grão em nenhum dos casos. Sendo assim, todos os resultados foram satisfatórios em relação aos critérios de aceitação da norma aplicável.

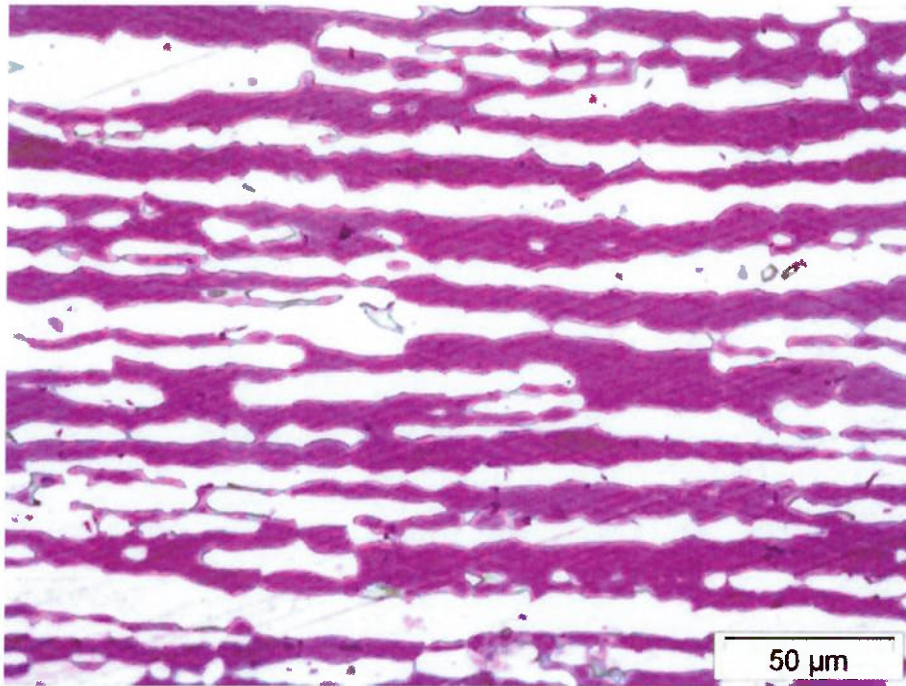


Figura 5.1 – Microestrutura do MB, região da face, posição 12h

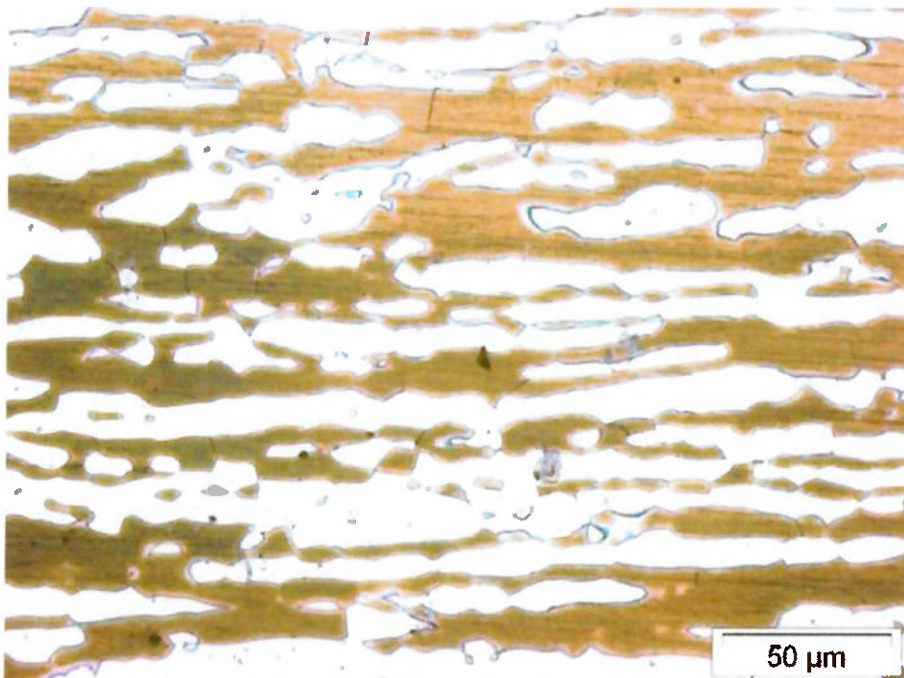


Figura 5.2 – Microestrutura do MB, região da raiz, posição 12h

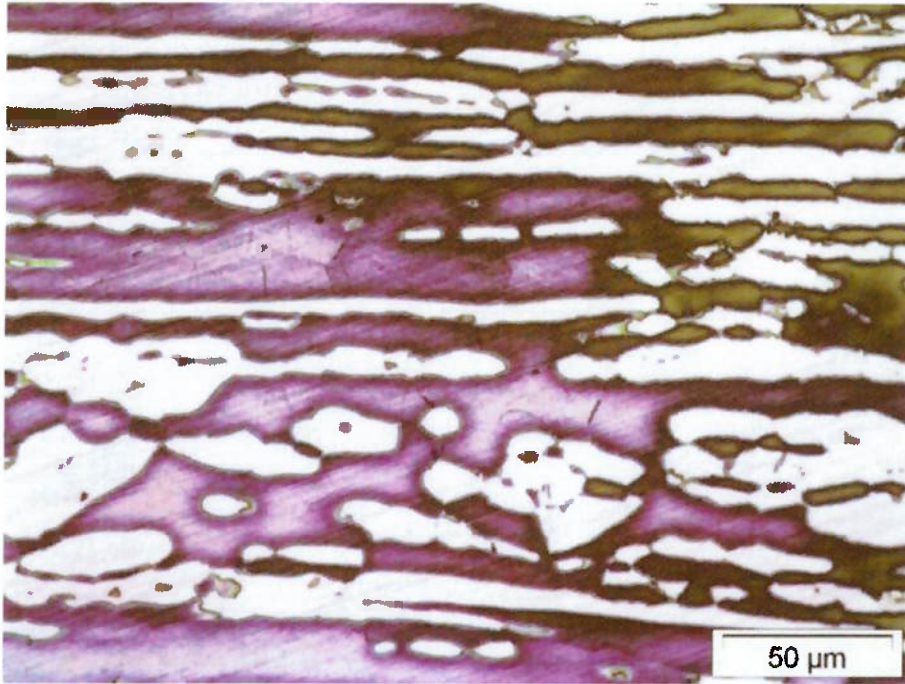


Figura 5.3 – Microestrutura da ZAC, região da face, posição 12h

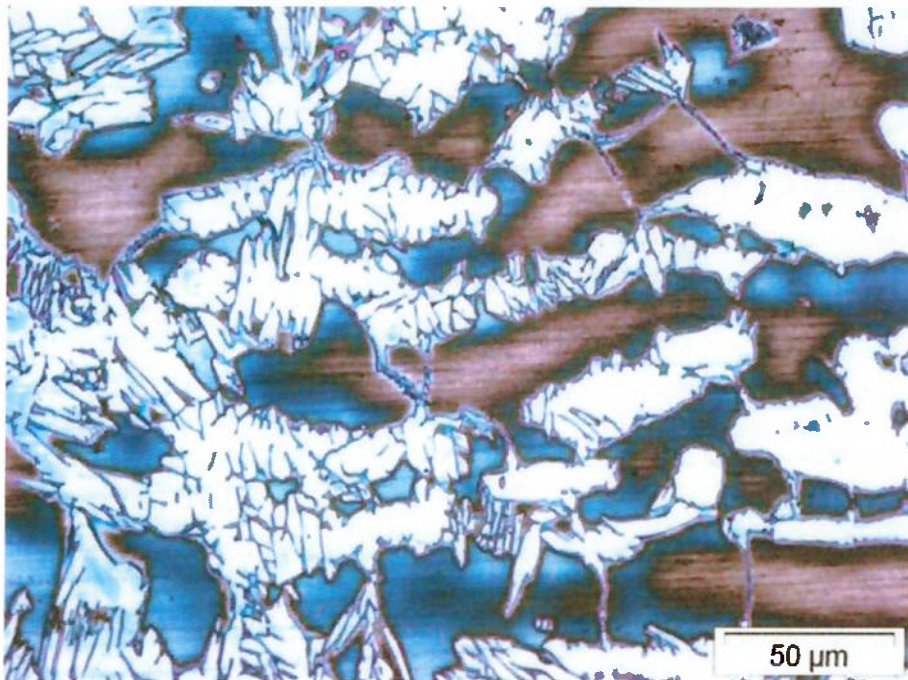


Figura 5.4 – Microestrutura da ZAC, região da raiz, posição 12h

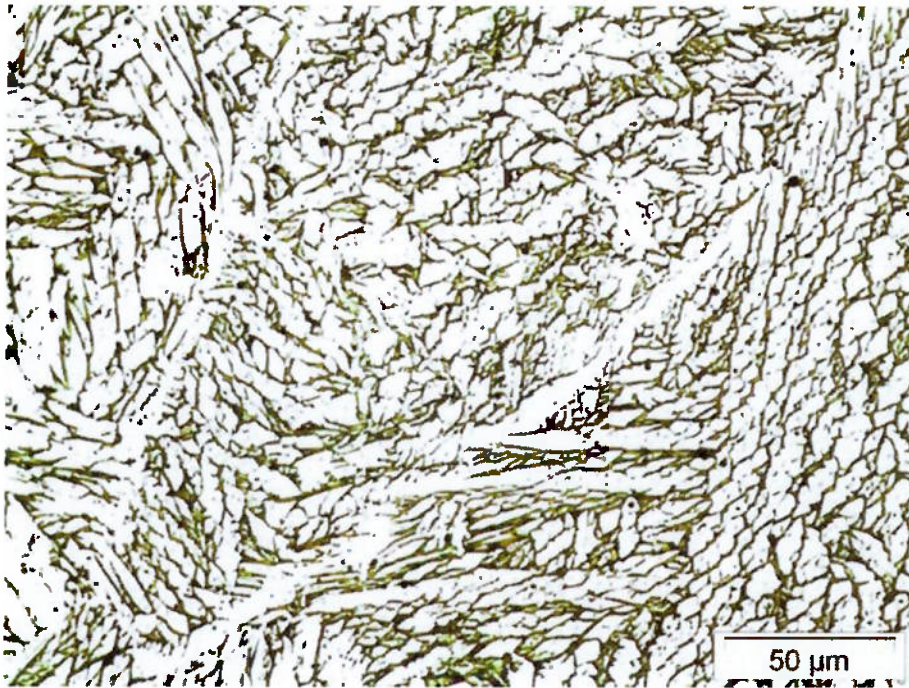


Figura 5.5 - Microestrutura do MS, região da face, posição 12h

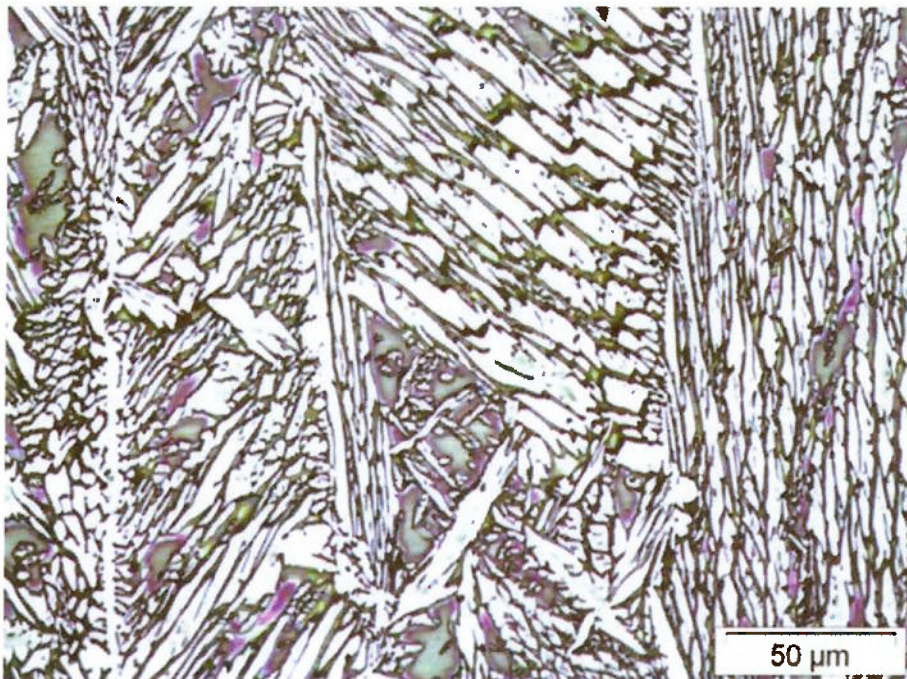


Figura 5.6 - Microestrutura do MS, região da raiz, posição 12h

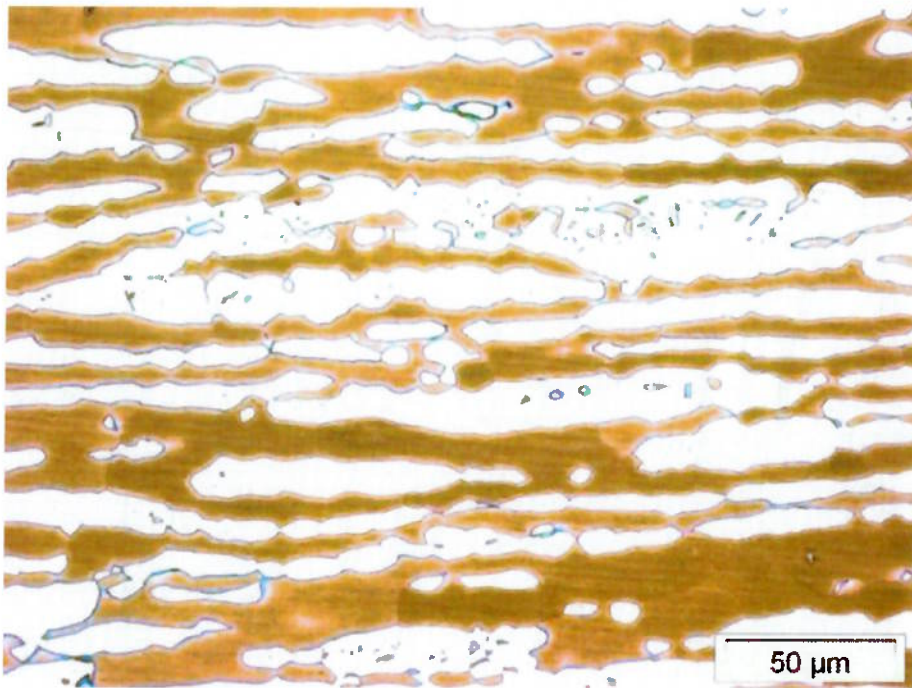


Figura 5.7 – Microestrutura do MB, região da face, posição 3h

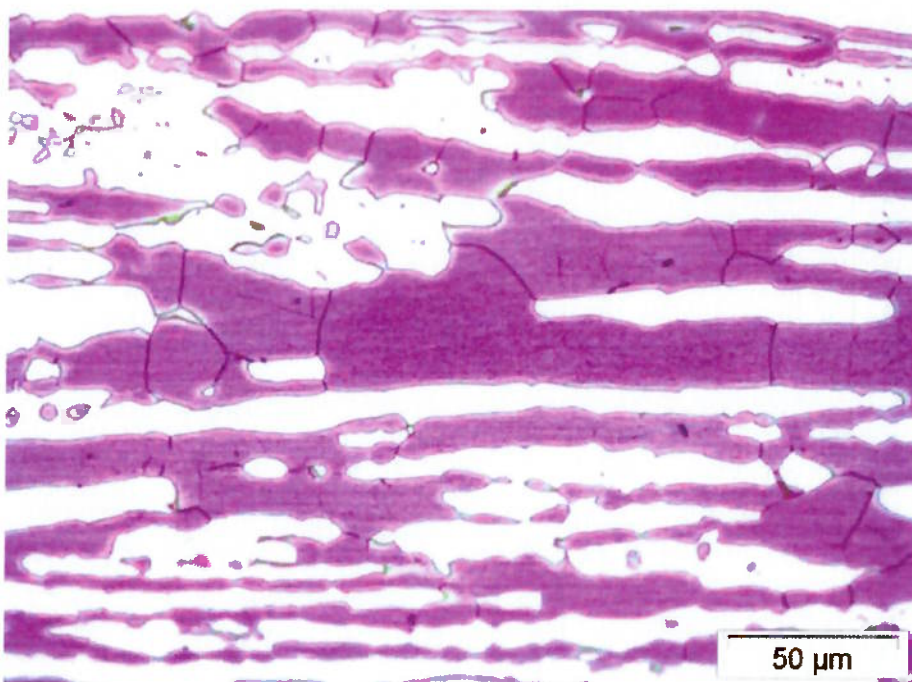


Figura 5.8 - Microestrutura do MB, região da raiz, posição 3h

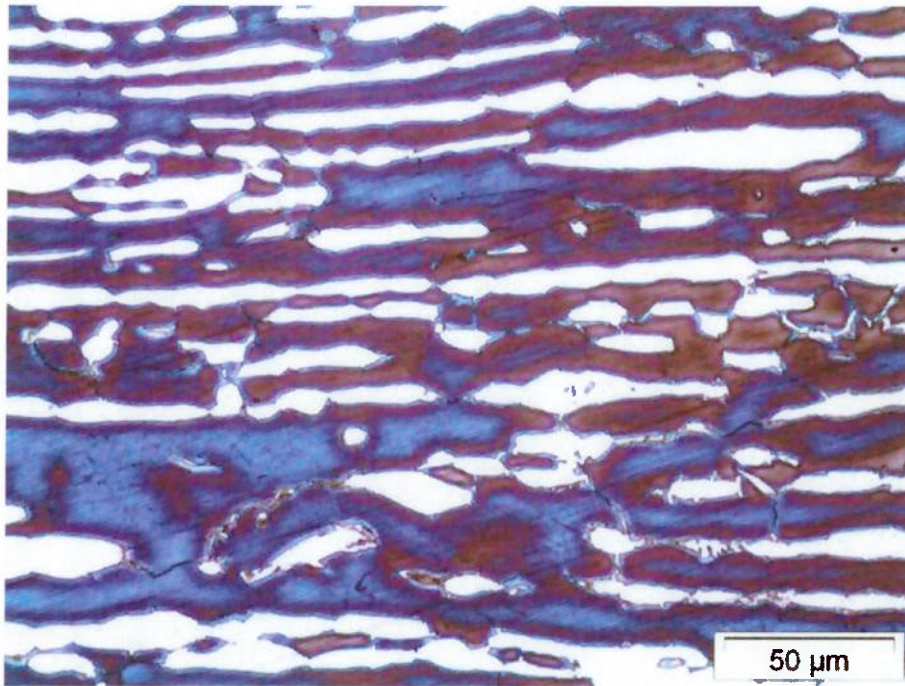


Figura 5.9 - Microestrutura da ZAC, região da face, posição 3h

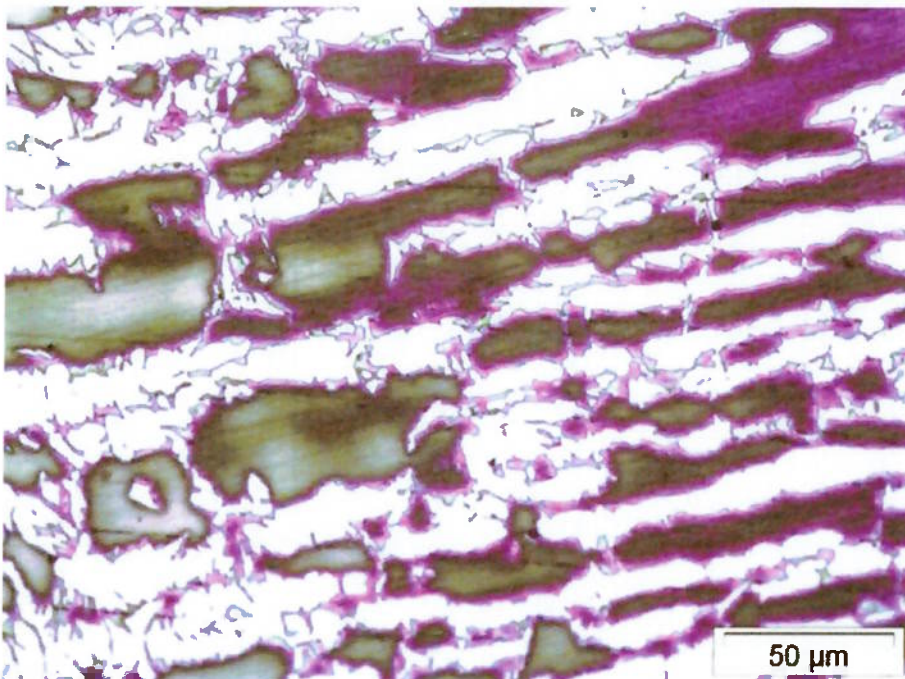


Figura 5.10 - Microestrutura da ZAC, região da raiz, posição 3h

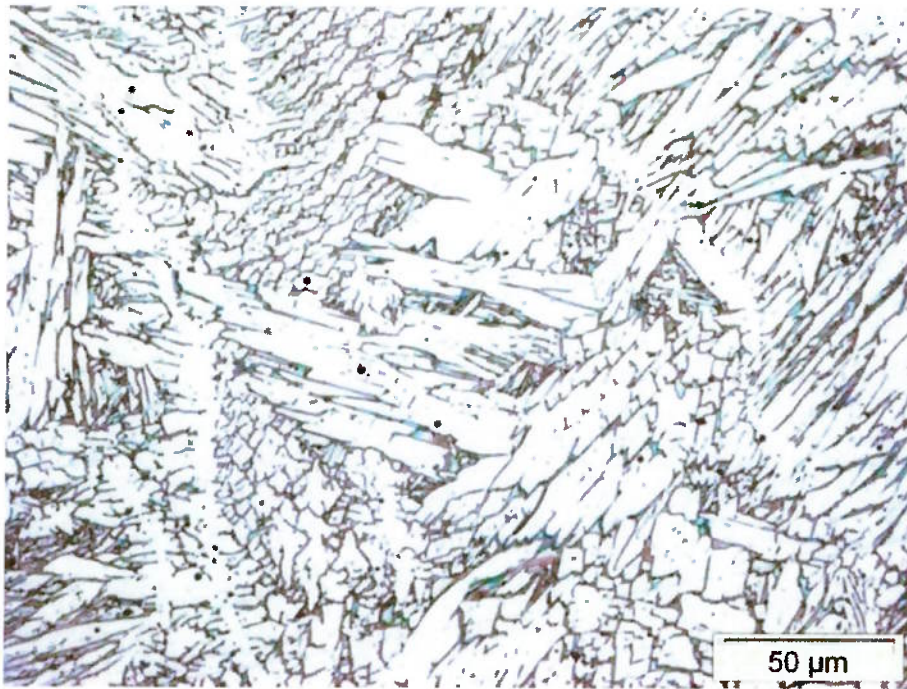


Figura 5.11 - Microestrutura do MS, região da face, posição 3h

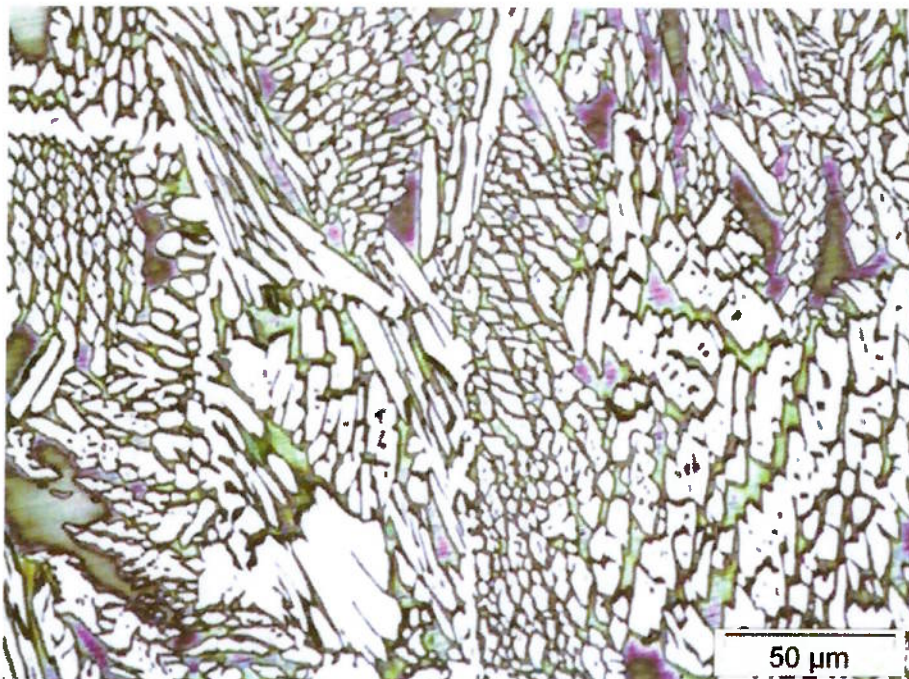


Figura 5.12 - Microestrutura do MS, região da raiz, posição 3h

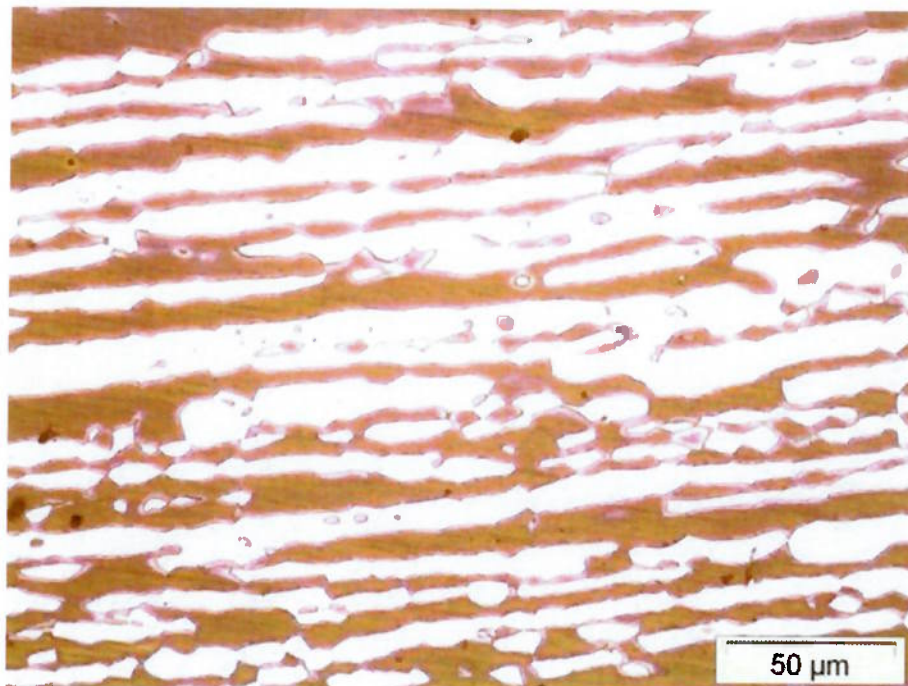


Figura 5.13 - Microestrutura do MB, região da face, posição 6h.

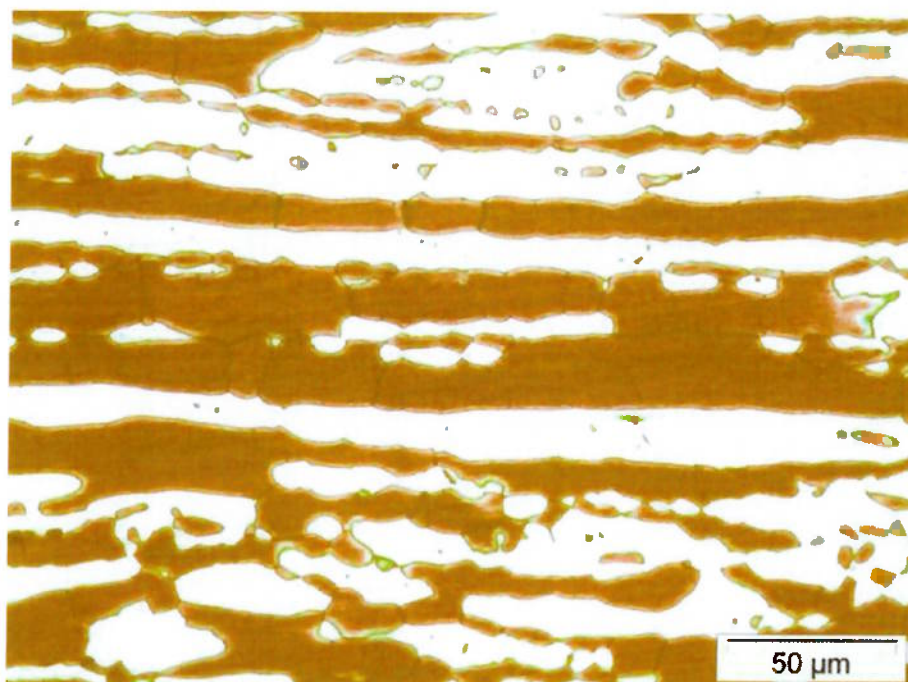


Figura 5.14 - Microestrutura do MB, região da raiz, posição 6h

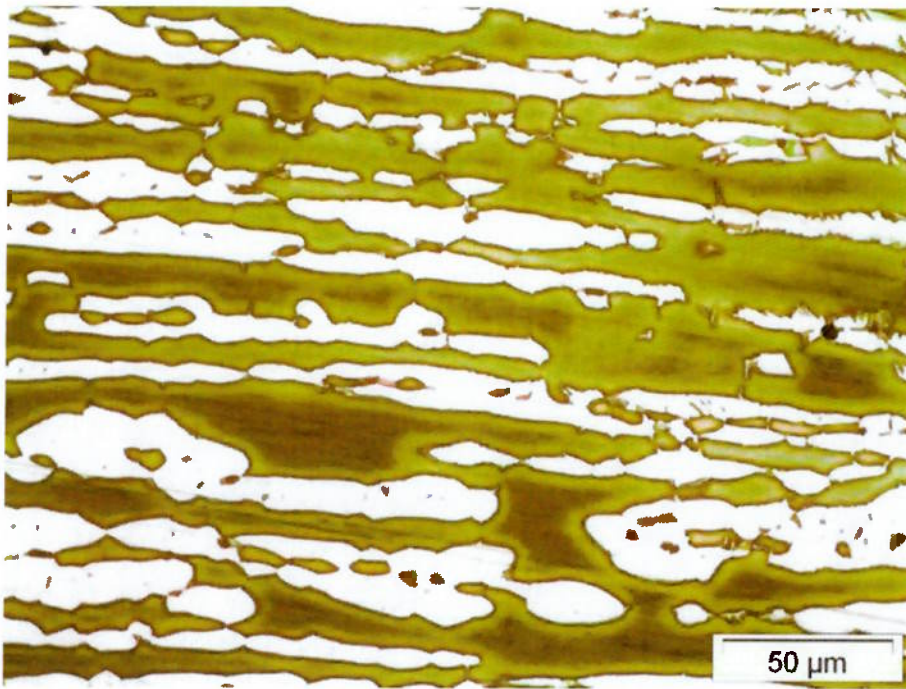


Figura 5.15 - Microestrutura da ZAC, região da face, posição 6h.

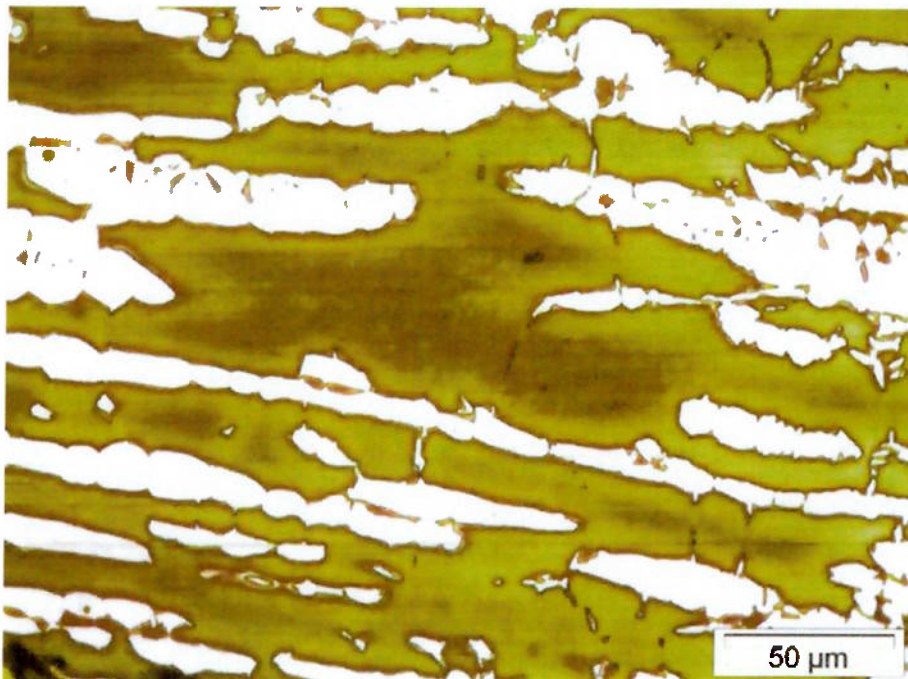


Figura 5.16 - Microestrutura da ZAC, região da raiz, posição 6h

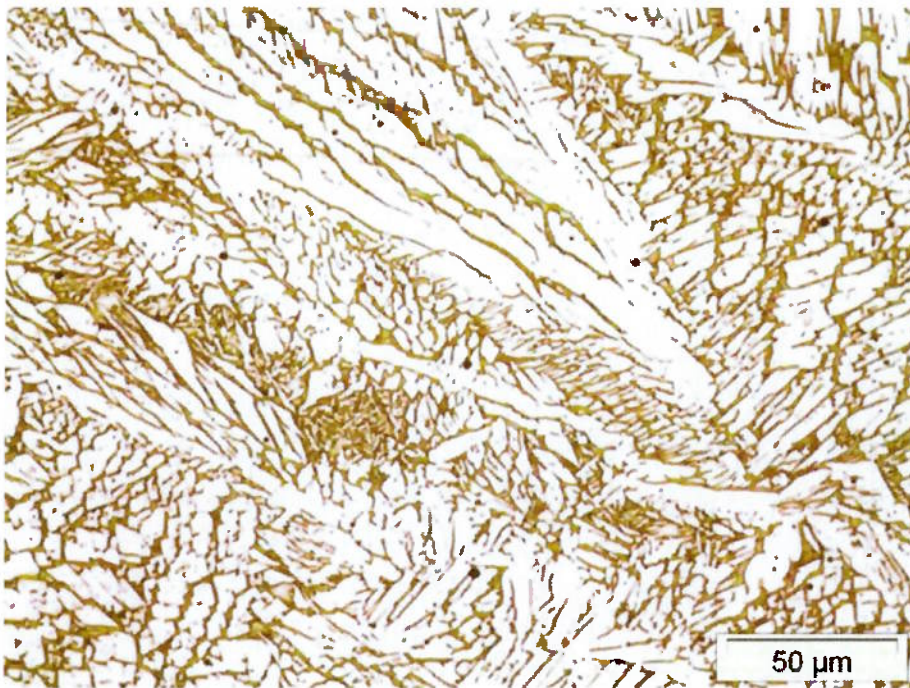


Figura 5.17 - Microestrutura do MS, região da face, posição 6h

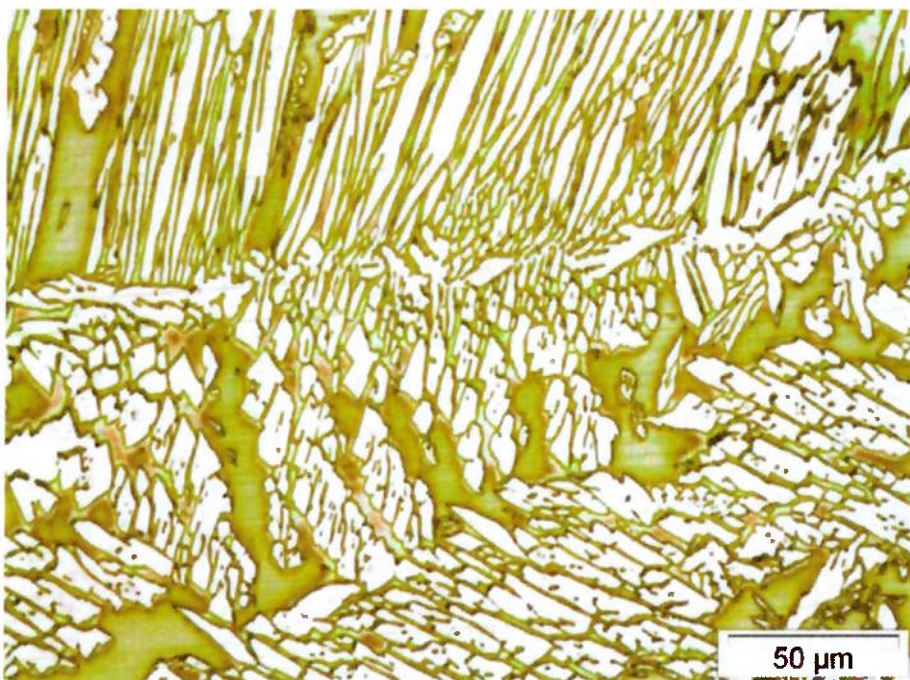


Figura 5.18 - Microestrutura do MS, região da raiz, posição 6h

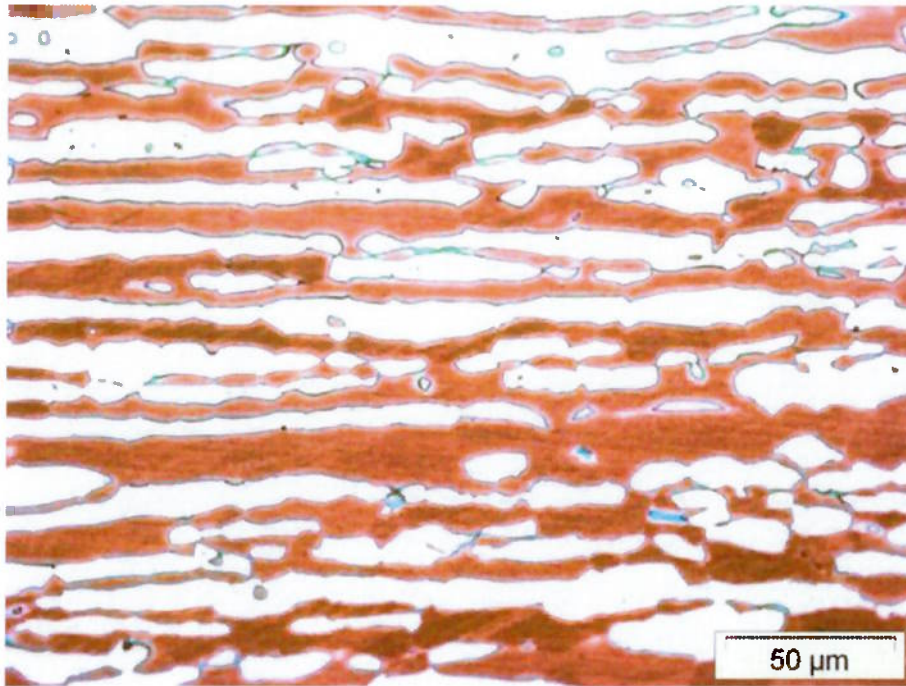


Figura 5.19 - Microestrutura do MB, região da face, posição 9h

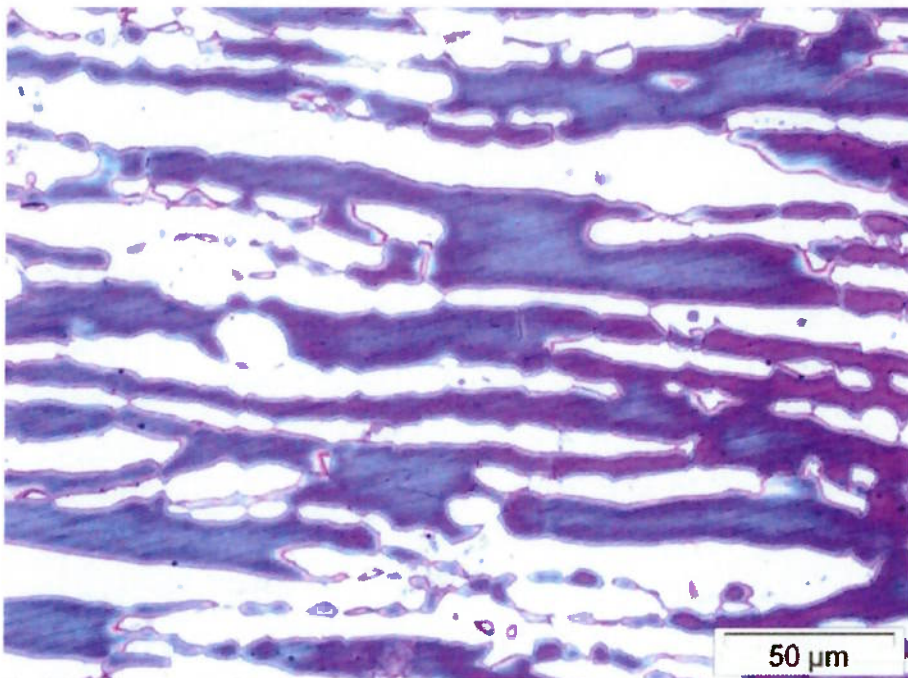


Figura 5.20 - Microestrutura do MB, região da raiz, posição 9h

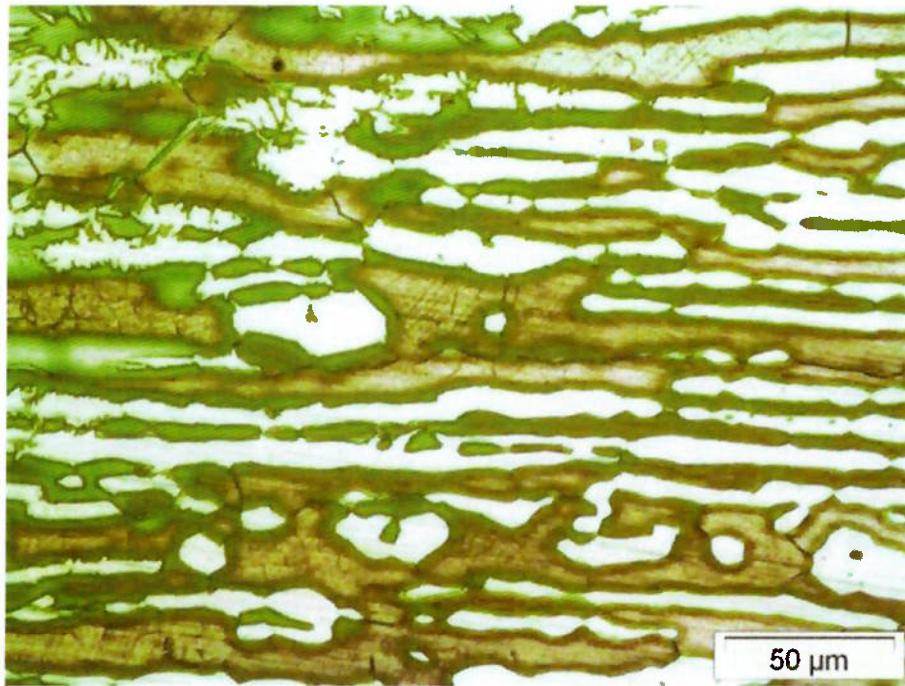


Figura 5.21 - Microestrutura da ZAC, região da face, posição 9h

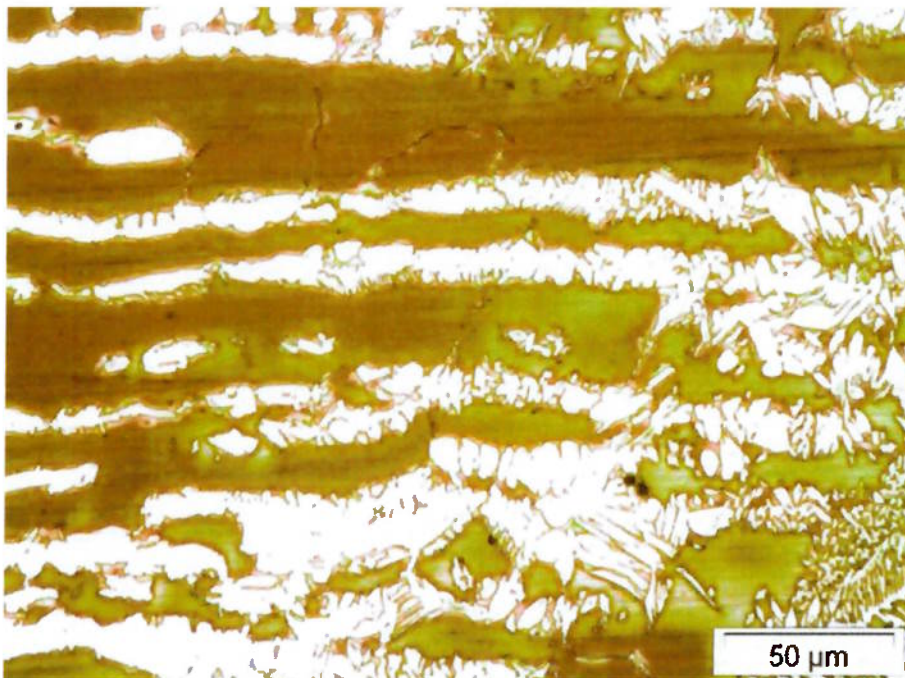


Figura 5.22 - Microestrutura da ZAC, região da raiz, posição 9h

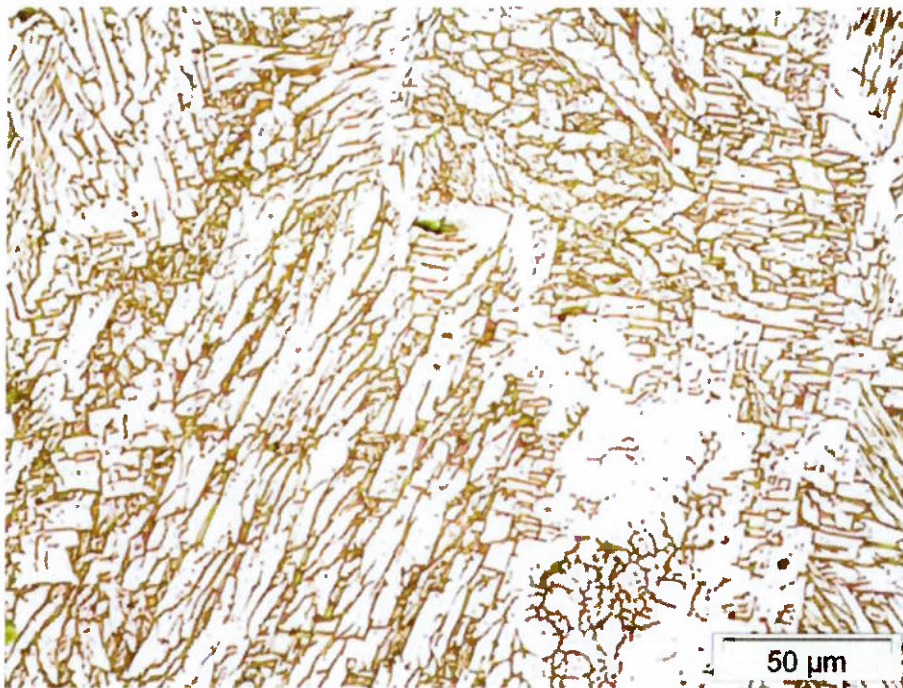


Figura 5.23 - Microestrutura do MS, região da face, posição 9h

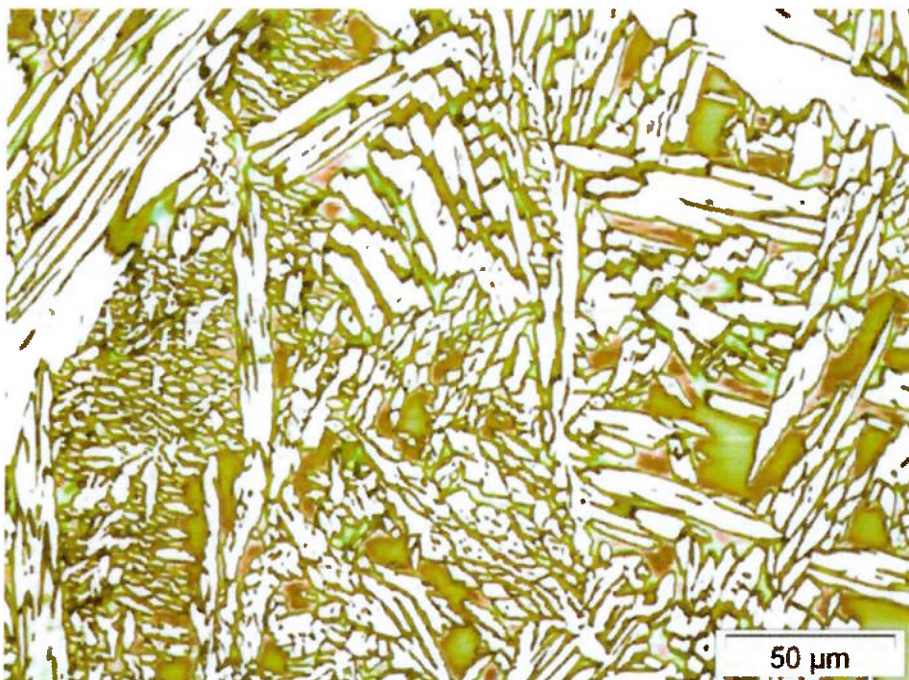


Figura 5.24 - Microestrutura do MS, região da raiz, posição 9h

5.3.5 CONTAGEM DE FASES (FERRITA/AUSTENITA)

As mesmas microestruturas utilizadas para verificação de possíveis precipitações de fases indesejáveis, para todas as situações descritas no item 5.3.4, foram utilizadas para contagem de fases e determinação dos teores de ferrita/austenita. A Figura 5.25 traz como exemplo a microestrutura, trabalhada em software, para contagem de fases conforme a norma aplicável. Trata-se da situação do metal de solda MS, na região da raiz, retirado da posição 3h da junta soldada. As regiões em azul representam as quantidades estimadas de fase ferrita. As regiões em amarelo representam as quantidades estimadas de fase austenita.

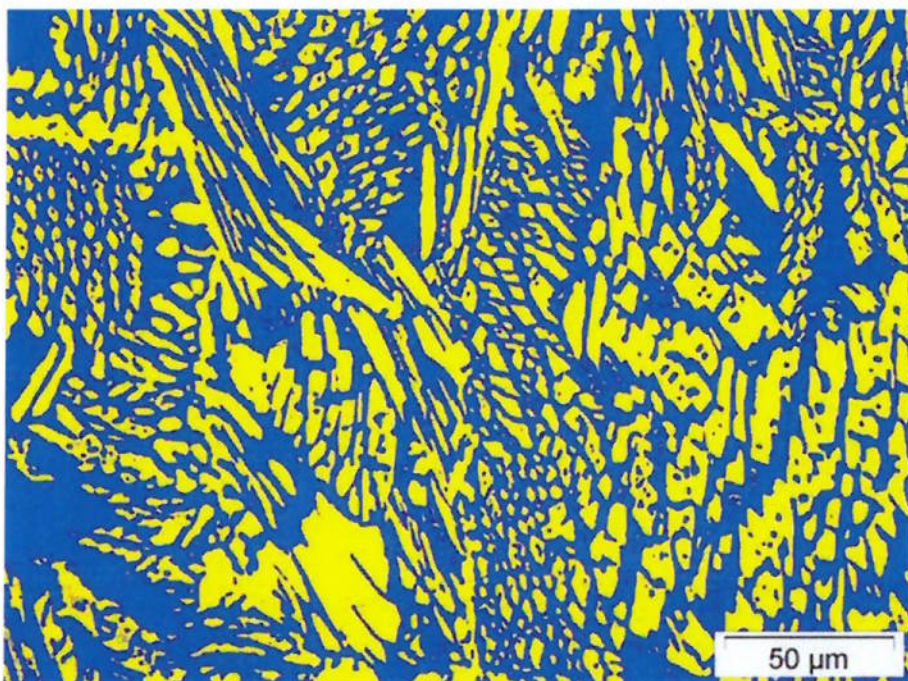


Figura 5.25 – Microestrutura preparada para contagem de fases do MS, região da raiz, posição 3h

A Tabela 5.2 mostra a fração volumétrica de fase ferrita, em %, encontrada em cada uma das regiões da junta soldada.

Tabela 5.2 – Fração volumétrica de fase ferrita.

Região	Fração volumétrica de fase ferrita (%)							
	Face				Raiz			
	Posições de soldagem				Posições de soldagem			
	12h	3h	6h	9h	12h	3h	6h	9h
MB	57	56	53	56	55	57	57	55
ZAC	68	69	65	68	65	63	68	61
MS	33	39	36	33	53	55	55	54

Com a análise dos resultados mostrados na tabela, é possível observar que a concentração de fase ferrita na região do metal de base, tanto na região da face como na região da raiz da solda é muito homogênea e fica em torno dos 55%. Como formações de fases indesejáveis não foram identificadas, subentende-se que o teor de fase austenita nestas regiões é de aproximadamente 45%, sendo assim, o requisito da norma aplicável para o metal de base é plenamente atendido. A mesma análise pode ser feita para a região do metal de solda na região da raiz.

No caso da zona afetada pelo calor, para todas as regiões analisadas, o teor de ferrita ficou acima ou próximo do limite superior recomendado pela norma Petrobras N-133, revisão K (65% de ferrita máximo). Com base na teoria desenvolvida na revisão bibliográfica deste trabalho, um dos motivos para resultados de elevados teores de ferrita na região da ZAC poderia ser justificado por elevadas velocidades de resfriamento desta região durante a soldagem, no

entanto, as energias de soldagem registradas passe a passe e a temperatura máxima interpasse foram devidamente controladas. De qualquer maneira, uma possível solução para aumento do teor de austenita nesta região poderia ser a utilização de parâmetros de soldagem que resultassem em energia de soldagem mais próxima de 15 kJ/cm, ou manter a temperatura de pré-aquecimento mais próxima dos 150°C. Claro que temos também que levar em consideração erros na medição de ferrita eminentes ao método de medição.

Contrário ao ocorrido na ZAC, nas regiões de metal de solda analisadas na face da solda, onde o processo de soldagem utilizado foi o arame tubular, os teores de ferrita encontrados foram próximos ou inferiores ao limite mínimo aceito pela norma em questão (35% de ferrita mínimo). O principal motivo que pode ter levado a isso é a influência dos elementos austenitizantes contidos no metal de adição, principalmente os teores de níquel e nitrogênio. Conforme explicado anteriormente, os consumíveis desenvolvidos para soldagem dos aços inoxidáveis duplex possuem em sua composição teor de níquel superior ao contido nos metais de base, visando melhor balanço de fases. Além disso, como perda de nitrogênio pode ser um fator deletério durante os procedimentos de soldagem, na maioria das vezes os consumíveis de soldagem contêm teores de nitrogênio (elemento austenitizante) próximos ao limite superior ao permitido por norma, a fim de compensar esta perda no metal depositado. Claro que neste caso também temos que considerar os possíveis erros e desvios na medição do teor de ferrita.

De qualquer forma, através das análises dos outros ensaios realizados neste trabalho será possível quantificar se estes valores de ferrita obtidos próximo ao limite superior descrito por norma na região da ZAC e próximo ao limite inferior ao descrito por norma na região do metal de solda na face terão alguma influência negativa.

Ainda vale ressaltar que, devido a incertezas nos processos de quantificação de fases e registros de cases de sucesso, a norma NORSOK M-601 traz como requisito o teor de ferrita entre 30% e 70% para medições conforme norma ASTM E 562 das regiões da face e raiz de juntas soldadas ⁽²⁶⁾.

5.3.6 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os valores de limite de resistência obtidos através do ensaio de tração nos dois corpos de provas ensaiados foram 761 MPa e 773 MPa. Estes valores são muito superiores ao valor mínimo requerido por norma para o metal de base do tubo duplex UNS S31803 (620 MPa). Além disso, ambos os corpos de provas romperam na região do metal de base, o que significa que a resistência mecânica da região do metal depositado é ainda maior.

Teoricamente, baixos valores de ferrita encontrados na região da face do metal depositado teriam uma forte influência negativa nas propriedades de resistência mecânica nesta região. Isto porque as propriedades de resistência mecânica obtidos pela fase ferrita são muito superiores aos obtidos pela fase austenita. No entanto, através dos resultados foi possível notar que teores de austenita próximos de 65% nesta região não foram críticos para perda destas propriedades, já que o local de ruptura dos corpos de prova foi na região do metal de base.

5.3.7 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Os quatro corpos de provas que foram submetidos a ensaio de dobramento lateral, à 180°C, foram aprovados conforme os requisitos da norma aplicável sendo que em nenhum deles houve indicações de descontinuidades ou fissuras.

Vale ressaltar que as dimensões dos corpos de provas ensaiados foram de 10mm X 18,3mm X 200mm, ou seja, a espessura dos corpos de provas é exatamente a mesma da espessura da parede do tubo soldado, ou seja, na análise de dobramento lateral tanto a região da face quanto à região da raiz da solda foram submetidos ao esforço mecânico e ficaram isentas de qualquer tipo de descontinuidades.

5.3.8 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY V

Os resultados obtidos através de ensaio de impacto Charpy na região do metal de solda (MS) são mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Ensaio de Impacto Charpy na região do metal de solda.

Temperatura de Ensaio (°C)	Energia Absorvida (J)				
	MS 1	MS 2	MS 3	Média	Desvio Padrão
-46	37	41	43	40	3,05
	Expansão Lateral (mm)				
	MS 1	MS 2	MS 3	Média	Desvio Padrão
	0,58	0,68	0,79	0,68	0,10

Os resultados obtidos através de ensaio de impacto Charpy na região da linha de fusão (LF) são mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Ensaio de Impacto Charpy na região da linha de fusão.

Temperatura de Ensaio (°C)	Energia Absorvida (J)				
	LF 1	LF 2	LF 3	Média	Desvio Padrão
-46	81	73	66	73	7,50
	Expansão Lateral (mm)				
	LF 1	LF 2	LF 3	Média	Desvio Padrão
	1,19	1,08	1,03	1,10	0,08

Os resultados obtidos através de ensaio de impacto charpy na região a 2 mm da linha de fusão (LF+2) são mostrados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Ensaio de Impacto Charpy na região à 2mm da linha de fusão

Temperatura de Ensaio (°C)	Energia Absorvida (J)				
	LF+2 - 1	LF+2 - 2	LF+2 - 3	Média	Desvio Padrão
-46	115	77	109	100	20,43
	Expansão Lateral (mm)				
	LF+2 - 1	LF+2 - 2	LF+2 - 3	Média	Desvio Padrão
	1,55	1,08	1,35	1,33	0,24

Em todos os casos os requisitos mínimos descritos pela norma aplicável, energia absorvida maior que 27J e expansão lateral maior que 0,38mm, foram atendidos.

Vale ressaltar que o maior receio na utilização do processo arame tubular para soldagem de aços inoxidáveis duplex é devido ao histórico de valores baixos de energia absorvida em ensaios de impacto Charpy na região do metal depositado. Isto porque a soldagem por este processo acarreta na inclusão de teores de oxigênio na região do metal depositado que são deletérios à tenacidade. No entanto as empresas que desenvolvem e fornecem consumíveis de soldagem vêm trabalhando fortemente com o intuito de desenvolver arames tubulares para soldagem desses aços inoxidáveis, visando atender os requisitos de impacto impostos pelas normas aplicáveis, o que pode ser verificado através dos resultados mostrados na Tabela 5.3.

5.3.9 ENSAIO DE SUSCEPTIBILIDADE À CORROSÃO POR PITES.

Neste ensaio, os quatro corpos de provas, cada retirado de um dos quadrantes do tubo soldado, posições 12h, 3h, 6h e 9h, respectivamente, tiveram as seguintes perdas de massa registradas: 2,38g/m²; 1,44g/m²; 2,85g/m²; 3,41g/m², todos os valores satisfatórios e que atendem ao requisito máximo imposto pela norma Petrobras N-133 de 4,00g/m².

Além disso, houve isenção de corrosão por pites após inspeção de todos os corpos de provas com lente de aumento de 20 vezes, o que foi uma surpresa já que os valores de ferrita encontrados na região da ZAC dos corpos de provas relatados na tabela 5.2, tanto na região da face como na região da raiz da junta

soldada, foram superiores aos especificados pela norma (65% máximo) e esta fase têm forte tendência a sofrer corrosão por pites.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados mostrados durante a elaboração deste trabalho, pode-se concluir que:

- Os tubos de aço inoxidável duplex UNS S31803, aplicados em projetos relacionados ao segmento offshore e outros, possuem excelente soldabilidade pelos processos de soldagem a arco elétrico TIG e Arame Tubular.
- A junta soldada pelos processos TIG e Arame Tubular atende os requisitos de composição química, propriedades mecânicas e resistência à corrosão impostos pela norma Petrobras N-133, revisão K; no entanto, os requisitos desta norma não foram atendidos na íntegra já que alguns dos valores de fração volumétrica de fase ferrita encontrados não se enquadram no limite especificado pela norma.
- Os valores de ferrita registrados abaixo do especificado pela norma Petrobras N-133, revisão K, na região do metal de solda (face), não foram críticos ao ponto de prejudicar os resultados de resistência mecânica da junta soldada.

- Os valores de ferrita registrados acima do especificado pela norma Petrobras N-133, revisão K, na região da zona afetada pelo calor, não foram críticos ao ponto de prejudicar a resistência à corrosão por pites da junta soldada, além disso, a norma Norsok M-601 prevê teores de ferrita para estas regiões nas quais os resultados mostrados neste trabalho se enquadram.
- Os resultados de tenacidade obtidos na região do metal de solda através de ensaio de impacto Charpy, após soldagem pelo processo de soldagem Arame Tubular, se mostraram extremamente satisfatórios.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Influência da utilização de diferentes energias de soldagem no balanço de fases microestruturais em tubos de aço inoxidável duplex UNS S31803 soldados pelo processo Arame Tubular.
- Qualificação de procedimento de soldagem em tubos de aço inoxidável duplex UNS S31803 soldados pelos processos TIG e Arame Tubular.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ CHARLES, J. Structure and mechanical properties of duplex stainless steels. In Conference Duplex Stainless Steels '82. St Louis-USA 1982. **Proceedings**. England, TWI, 1994, paper K1.
- ² CHARLES, J. Why and where duplex stainless steels. In Conference Duplex Stainless Steels '97, Maastricht – The Netherlands, 1997. **Proceedings**. The Netherlands, 1997, p. 29 – 42
- ³ LULA, R. A. Stainless Steel. **American Society for Metals**. Ed 3, EUA, 1989, p.71 – 80.
- ⁴ VAN NASSAU, L., MEELKER H.ILKES, J. Welding Duplex and Duplex Stainless Steels. In: Conference Duplex Stainless Steels'91. Beaune-Bourcogne. **Proceedings**. France. 1991, p.302-323.
- ⁵ SOLOMON, H. D. ; DEVINE, T. M. A tale of two fases. In: Conference duplex Stainless Steel '82, St. Louis – USA, 1982. **Proceedings**. Ohio, American Society for Metals, 1982, p.693 – 756.
- ⁶ FEDELE, R.A.; BRANDI, S.D.; LEBRÃO,S.G. Multipass SMAW of Duplex Stainless Steels: Weldability and Performance Evaluation. In: Duplex America 2000 Conference, Houston-USA, 2000. **Proceedings**, 2000, p.139-148.
- ⁷ FOLKHARD, E.; **Welding Metallurgy of Stainless Steels**. Springer-Verlag, Austria, 1988.
- ⁸ BIRKS, S. Success With Duplex Castings. In: Duplex America 2000 Conference, Houston-USA, 2000. **Proceedings**, 2000, p.415-423.
- ⁹ BÖHLER EDESTAHL. **Software Bohler Steel MBA**.

-
- ¹⁰ SANDVIK STEEL. **Catálogo técnico sobre o Aço Inoxidável Duplex SAF 2507.**
- ¹¹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A 240-83 Standard Specification for Heat Resisting Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, sheet, and Strip for Pressure Vessels.** ASTM. USA. v.01.04. 1984. p.185-194.
- ¹² SEDRIKS, A.J. **Corrosion of Stainless Steels.** Ed. John Wiley & Sons. New York. p.231-266, 1970.
- ¹³ BRANDI, S. D. **Metalurgia da Soldagem: Conceitos.** In: Soldagem. Coleção Tecnologia Senai, 1997, p.89-92.
- ¹⁴ GRANJON, H. **Fundamentals of Welding Metallurgy.** Arbington Publishing, England, 1991.
- ¹⁵ LIPPOLD, J.C.; VAROL, I.; BAESLACK III, W.A. Microestrutural Evolution in Duplex Stainless Steel Weldments. In: Conference Duplex Stainless Steels'91, Beaune Bourcogne-France, 1991. **Proceedings.** France, 1991, p.383-391.
- ¹⁶ STEKLY, J.J.K.; SCANDELLA, J.L.; SALMON, K.A. Effects of Welding Techniques on the Properties of Super duplex Stainless Steels. In: Conference Duplex Stainless Steels'91, Beaune Bourcogne-France, 1991. **Proceedings.** France, 1991, p.431-439.
- ¹⁷ ATAMERT, S.; REED, R.C.; KING, J.E. Modelling of Multipass Duplex Stainless Steel Weld Deposit Microestruturure. In: Conference Duplex Stainless Steels'91, Beaune Bourcogne-France, 1991. **Proceedings.** France, 1991, p.393-402.
- ¹⁸ ATAMERT, S.; KING, J.E. Super Duplex Stainless Steels – part 1 Heat Affected Zone Microestruturures. **Materials Science and Technology.** v.8, n.10, 1992, p.896-911.

¹⁹ BRANDI, S. D.; LIPPOLD, J. C.; Considerações sobre a metalurgia da soldagem de aços inoxidáveis duplex e duplex. **Metalurgia e Materiais (ABM)**, v. 53, 1997, p. 141-146.

²⁰ LONDONO, A. J. R.; BRANDI, S. D.; Estudo da precipitação de fases intermetálicas na ZAC de soldas multipasse de aços inoxidáveis duplex e duplex. In: V Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável INOX 96, **Proceedings**. 1996, p. 187-200.

²¹ WALKER, R.A.; Duplex and high alloy stainless steels – corrosion resistance and weldability. **Materials Science and Technology**, v. 4, 1988, p. 78-84.

²² CUNHA, J. A. R.; BRANDI, S. D. Aços inoxidáveis duplex: considerações sobre sua soldagem e processos empregados. In: Inox. **Núcleo Inox**. ano IV, n. 7, p. 6-8, 1996.

²³SOLDAGEM: N-133 Rev. K, Petróleo Brasileiro S.A., Rio de Janeiro. Agosto 2012.


²⁴AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessel. 2010 ed. New York: ASME, 2010, Addenda 2011.

²⁵ASME, 2010, Addenda 2011. Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX: Welding and Brazing Qualifications, ASME International, USA.

²⁶NORSOK STANDARD M-601: Welding and Inspection of Piping. Rev. 5, April 2008.

²⁷ASTM G 48-03 (Reapproved 2009): Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution.

ANEXO 1

	Relatório de Ensaio não Destrutivo Ensaio Visual	Ref. Nº 001 Data: 16/07/12 Folha 01/01			
Cliente: OMAR ABOU Local de ensaio: WDM-Galpão Norma de Referência: ASME SEÇÃO IX Metal Base: UNS S31803 Metal Adição: ER2209/E2209T1-1 EPS: N/A Procedimento PR-CP-002 Rev.2 Fase: () Fabricação (X) Montagem () Condicionamento Iluminação: >=1000 LUX Estado da Superfície: ESCOVADA Método de Ensaio: ENSAIO VISUAL Nome/Símbolo dos Instrumentos Utilizados: HI-LO[WDM-HL-002]/CALIBRE DE SOLDA[WDM-CS-003]					
Identificação da Junta	Soldador	Laudo	Descontinuidade	Consumível	Observações
JC-01	Raiz Ench/Acab V2 V2	EJ ES A A	-----	Raiz ER2209 E/A E2209T1 1	
Observações					
ES - ENSAIO DA SOLDA			EJ - ENSAIO DA JUNTA		
Avaliar 1- Visual de Solda (Descontinuidades) 2- Ângulo de Reforço 3- Altura do Reforço 4- Dimensão da Perna 5- Embicamento 6- Desalinhamento			Avaliar 1- Limpeza dos Componentes 2- Abertura da Raiz 3- Face da Raiz 4- Ângulo do Bise/ Chanfro 5- Desalinhamento () Interno () Externo 6- Desalinhamento 7- Profundidade de Preparação		
Legenda A - APROVADO R - REPROVADO					
INSPECTOR	CLIENTE	FISCALIZAÇÃO			
ROBSON LUIZ G. DE ALMEIDA Inspetor de Solda CREA 2002107595 IS - 4636 - N1					

ANEXO 3

RELATÓRIO DE REGISTRO RADIOGRÁFICO		Nº RRR: OMAR_001							
		Data: 18/07/2012							
		Folha: 1 1							
DADOS DO CLIENTE									
Cliente: OMAR ABOU		Obra: NAVAL E OFFSHORE							
Contratante:									
DADOS DA INSPEÇÃO									
Equipamento: CORPO DE PROVA		Norma: ASME IX							
Material: DUPLEX	Processo: TIG/AT	Fonte: Ir - 192	Procedimento: WDR-RAD-001 VER 03						
RADIOGRAFIAS									
PS	CD	Identificação	Junta	Ø	Espessura	Sold.	Descot.	L	TC
1		TUBO-UNS 531803	CP01	8"	18,26	V2 / V2	-	A	3
2		TUBO-UNS 531803	CP01	8"	18,26	V2 / V2	-	A	3
3		TUBO-UNS 531803	CP01	8"	18,26	V2 / V2	-	A	3
4		TUBO-UNS 531803	CP01	8"	18,26	V2 / V2	-	A	3
5		TUBO-UNS 531803	CP01	8"	18,26	V2 / V2	-	A	3

OBSERVAÇÃO:			
LEGENDA			
Descorruvidades (Descot)			Laudo (L)
CA - Concavidade	FF - Falta de Fusão	MO - Mordedura	A - Aprovado
CO - Concavidade	FP - Falta de Penetração	PA - Passe Oco	R - Reprovado
CR - Cratera	IE - Inclusão de Escória	PO - Porosidade	N - Necessário Exame Complementar
EP - Excesso de Penetração	IT - Inclusão de Tungstênio	TR - Trinca	
Código (CD)			Técnica (TC)
AM - Aumento de Amostragem	NT - Solda Totalmente Reparada	1 - PS/VS S	4 - PD/VD
NE - Trecho Esmerilhado	NX - Repetição por Erro de Execução	2 - PS/VS P	5 - PD/VD-S
NR - Solda Parcialmente Reparada	RX - Confirmação de Defeito	3 - PD/VS	
NÍVEL II	CLEBER DA SILVA LIMA BNOG - 0818 ER Nº 5 RG R: A 198 99	CLIENTE	FISCALIZAÇÃO