

LUIGI EDUARDO AMENDOLA

AO PROF. SERGIO BRANDI PELA DEDICAÇÃO
E INSPIRAÇÃO.

Luigi E Amendola
23/06/2015.

**ESTUDO DA SOLDAGEM DA LIGAÇÃO TUBO-
ESPELHO DE AIR COOLERS EM AÇO
INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S31803**

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

Maio/2015

LUIGI EDUARDO AMENDOLA

(Engenheiro Mecânico, Faculdade de Engenharia Industrial, 1984)

**ESTUDO DA SOLDAGEM DA LIGAÇÃO TUBO-
ESPELHO DE AIR COOLERS EM AÇO
INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S31803**

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. Sergio Duarte Brandi

São Paulo

Maio/2015

Na mitologia grega, Anteu foi um gigante que era forte enquanto se mantivesse em contato com a terra. Quando ele foi levantado da terra, perdeu sua força. Assim é com os engenheiros. Eles não podem se isolar do mundo real . . . O diabo mora nos detalhes, mas a salvação também.

Almirante Hyman G. Rickover

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Cecília, aos meus filhos Beatriz e Augusto e à memória dos meus pais Carlota (Lotti) e Cosmo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Sergio Duarte Brandi, pelo apoio na elaboração deste trabalho e por ter contribuído de forma significativa na ampliação dos meus conhecimentos sobre soldagem.

À GEA DO BRASIL S.A. por gentilmente ceder os materiais e os recursos necessários para a fabricação do “mockup” utilizado neste trabalho.

A todo o pessoal da GEA envolvido na fabricação do “mockup”, em especial a Francis Zippa, Alexandre Borghi Cunha, Robinson R. Iamagate (Robinho) e Carlos Roberto Ferreira Machado (Galinho).

Aos meus colegas e amigos da Turma V do Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem do PECE pela convivência agradável e pela troca de experiências ao longo desses anos.

A todos os funcionários e professores do PECE que se dedicaram para que o curso pudesse ser conduzido de forma satisfatória.

Ao pessoal do Departamento de Metalurgia e Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pelo apoio e aconselhamento sobre a elaboração desta monografia, em especial a Thiago Ferreira Martins e Dario Magno Batista Ferreira pelo excelente trabalho realizado no levantamento dos ciclos térmicos da soldagem do “mockup”.

À minha querida família pela compreensão e apoio durante o período do curso e de preparação deste trabalho.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho pudesse ser elaborado.

CURRICULUM VITAE

LUIGI EDUARDO AMENDOLA

FORMAÇÃO ACADÊMICA

MBA em Gerenciamento de Projetos

Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2008

Engenharia Mecânica

Faculdade de Engenharia Industrial, São Bernardo do Campo, 1984

ATIVIDADES PROFISSIONAIS

CNO - Construtora Norberto Odebrecht

Coordenador de Diligenciamento e Inspeção de Fabricação, de 2009 – presente

SETAL Engenharia

Gerente de Inspeção e Diligenciamento, de 2000 a 2009

Supervisor de Inspeção, de 1998 a 2000

Engenheiro Projetista de Vasos de Pressão, de 1995 a 1998

EMGEPRON – Empresa Gerenciadora de Projetos Navais

Engenheiro Projetista, de 1990 a 1995

CBC Indústrias Pesadas S.A.

Engenheiro Projetista, de 1985 a 1990

ASSOCIAÇÕES PROFISSIONAIS

American Welding Society (**AWS**)

Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção (**ABENDI**)

The American Society of Mechanical Engineers (**ASME**)

RESUMO

A utilização dos aços inoxidáveis duplex (AID) na fabricação de equipamentos de caldeiraria para o setor de refino de petróleo, devido às suas propriedades de resistência mecânica e de resistência à corrosão, vem apresentando um crescimento significativo nos últimos anos. Dentre os equipamentos fabricados em AID estão os trocadores de calor do tipo casco e tubos e os "air coolers". Nestes equipamentos, em função das condições de projeto, pode ser necessário realizar a soldagem dos tubos de troca térmica aos espelhos dos mesmos. O código ASME seção IX apresenta as diretrizes para a qualificação dos procedimentos de soldagem das ligações tubo-espelho, porém, devido aos cuidados exigidos na soldagem dos AID, se utilizadas de forma isolada não serão suficientes para garantir a integridade da ligação soldada.

Com a publicação pelo American Petroleum Institute (API) do relatório técnico API TR 938-C, foram sugeridas diretrizes específicas para a qualificação de procedimentos de soldagem das ligações tubo-espelho em AID.

Este trabalho faz a análise de um corpo de prova representativo de uma ligação tubo-espelho ("*mockup*"), soldado utilizando-se um procedimento qualificado, à luz do relatório técnico API TR 938-C. Os resultados dos ensaios mecânicos e metalográficos são apresentados e discutidos. Foi possível comprovar que o procedimento de soldagem utilizado para soldar o "*mockup*" atende os requisitos do relatório técnico API TR 938-C. Todos os ensaios e testes requeridos pelo documento foram realizados sem maiores dificuldades pelo laboratório.

Um dos tubos do "*mockup*" (tubo B) foi soldado sem o controle da temperatura interpases estabelecida pelo procedimento de soldagem qualificado. O objetivo seria avaliar os resultados obtidos nessa condição e compará-los com aqueles obtidos no tubo que foi soldado seguindo o procedimento. Os ensaios realizados com o tubo B também apresentaram resultados satisfatórios, porém, fica a recomendação que, caso se opte por executar a soldagem de uma ligação tubo espelho sem o controle da temperatura interpases, o procedimento correspondente deverá ser documentado e qualificado conforme os requisitos do relatório técnico API TR 938-C.

ABSTRACT

The use of duplex stainless steel (DSS) in the manufacturing of static equipment for the refining industry is growing because of the mechanical strength and corrosion resistance offered by these alloys. Among the equipment manufactured in DSS we find the shell and tube heat exchangers and air coolers. Depending on equipment design conditions the welding of tube-to-tubesheet joint is sometimes required. Section IX of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code (ASME Code) presents the requirements for the qualification of tube-to-tubesheet welding procedures. However Section IX requirements didn't cover the special care required to weld DSS and cannot assure alone the integrity of the welded joint.

With the publication of Technical Report 938-C by the American Petroleum Institute (API TR 938-C), specific requirements were suggested for the qualification of welding procedures for DSS tube-to-tubesheet joints.

In the present work a mockup representing a tube-to tubesheet joint welded with a qualified procedure will be analyzed in accordance with API TR 938-C requirements. The results of metallographic and mechanical tests are presented and discussed.

It was possible to verify that the welding procedure used to weld the mockup meets the requirements of API TR 938-C. All metallographic and mechanical tests were easily performed by the laboratory.

One of the tube-to-tubesheet joints was welded without controlling the interpass temperature stated in the qualified welding procedure. The objective

was to compare the tests results of this joint with those of a tube welded strictly in accordance with the qualified procedure. The results of tube B welded joint tests were found satisfactory but it is recommended that any tube-to-tubesheet welding operation to be executed without interpass temperature control shall be supported by a written procedure qualified in accordance with technical report API TR 938-C.

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 2.1</u> – Vista em corte do feixe tubular de um "air cooler" com cabeçotes do tipo tampo removível.	3
<u>Figura 2.2</u> – "Air Cooler" de tiragem induzida (a) e de tiragem forçada (b).....	4
<u>Figura 2.3</u> – Tipos de cabeçotes de "Air Coolers".	5
<u>Figura 2.4</u> – Temperaturas críticas de pite (CPT) para os AID S32205 e S32304 em várias concentrações de cloreto de sódio (% peso) a 300 mV x eletrodo de calomelano (SCE), pH neutro	14
<u>Figura 2.5</u> – Resistência a corrosão sob tensão para os AID S32750, S32205 e S32304 em solução de cloreto de sódio (% peso)	15
<u>Figura 2.6</u> – Diagrama pseudobinário Fe-Cr-Ni	16
<u>Figura 2.7</u> – Localização das fases indesejáveis nos AID	18
<u>Figura 2.8</u> – Fragilização dos AID UNS S32304, S32205 e S32507	18
<u>Figura 2.9</u> – Diagrama WRC-1992 para aços inoxidáveis	25
<u>Figura 2.10</u> – Repartição térmica	34
<u>Figura 2.11</u> – Ciclos térmicos	35
<u>Figura 2.12</u> – Ciclos térmicos de uma solda de topo multipasses com relação ao ponto A.....	35
<u>Figura 2.13</u> – Fluxo de calor tridimensional e bidimensional	36
<u>Figura 4.1</u> – Localização dos termopares, ponto de início e progressão da soldagem do "mockup"	44
<u>Figura 4.2</u> – Juntas ensaiadas do "mockup"	45
<u>Figura 4.3</u> – Corte com as dimensões da ligação tubo espelho	47

<u>Figura 4.4</u> – Corte com a localização das medições de dureza	50
<u>Figura 5.1</u> – Macrografias dos tubos B e 7	52
<u>Figura 5.2</u> – Micrografia do MB tubo 7 (tubo). Ataque eletrolítico com solução de 40% _{vol} de NaOH. Aumento de 400X.....	55
<u>Figura 5.3</u> – Micrografia do MS tubo 7 no centro do cordão. Ataque eletrolítico com solução de 40% _{vol} de NaOH. Aumento de 400X.....	55
<u>Figura 5.4</u> – Micrografia da ZAC na raiz tubo 7 (lado do tubo). Ataque eletrolítico com solução de 40% _{vol} de NaOH. Aumento de 1000X.....	56
<u>Figura 5.5</u> – Micrografia da ZAC no acabamento tubo 7 (lado do tubo). Ataque eletrolítico com solução de 40% _{vol} de NaOH. Aumento de 1000X.....	56
<u>Figura 5.6</u> – Micrografia do MB tubo B (tubo). Ataque eletrolítico com solução de 40% _{vol} de NaOH. Aumento de 400X.....	57
<u>Figura 5.7</u> – Micrografia do MS tubo B no centro do cordão. Ataque eletrolítico com solução de 40% _{vol} de NaOH. Aumento de 400X.....	57
<u>Figura 5.8</u> – Micrografia da ZAC na raiz tubo B (lado do tubo). Ataque eletrolítico com solução de 40% _{vol} de NaOH. Aumento de 1000X.....	58
<u>Figura 5.9</u> – Micrografia da ZAC no acabamento tubo B (lado do tubo). Ataque eletrolítico com solução de 40% _{vol} de NaOH. Aumento de 1000X.....	58
<u>Figura 5.10</u> – Arranjo típico dos termopares nas ligações soldadas do “mockup”	61
<u>Figura 5.11</u> – Gráficos do ciclo térmico do passe de raiz do tubo 7	61
<u>Figura 5.12</u> – Gráficos do ciclo térmico do passe de acabamento do tubo 7 .	62
<u>Figura 5.13</u> – Gráficos do ciclo térmico do passe de raiz do tubo B.....	62
<u>Figura 5.14</u> – Gráficos do ciclo térmico do passe de acabamento do tubo B.	63

LISTA DE TABELAS

<u>Tabela 2.1</u> – Especificações ASTM para os AID	8
<u>Tabela 2.2</u> – Composição química (% massa) dos AID mais comuns.....	9
<u>Tabela 2.3</u> – Propriedades físicas dos AID	10
<u>Tabela 2.4</u> – Propriedades mecânicas do AID S31803 e outros aços	10
<u>Tabela 2.5</u> – Dados de projeto para um costado cilíndrico de vaso de pressão	11
<u>Tabela 2.6</u> – Tensões admissíveis de materiais	12
<u>Tabela 2.7</u> – Espessuras e pesos do costado cilíndrico para os diversos materiais.....	12
<u>Tabela 2.8</u> – Limites de temperatura para utilização dos AID.....	13
<u>Tabela 2.9</u> – Principais fases precipitadas nos AID	17
<u>Tabela 2.10</u> – Energia de soldagem para os AID	22
<u>Tabela 2.11</u> – Temperaturas de tratamento térmico após soldagem para os AID	24
<u>Tabela 2.12</u> – Fração volumétrica de ferrita recomendada para as soldas dos AID	26
<u>Tabela 2.13</u> – Gases de proteção utilizados em soldagem	29
<u>Tabela 2.14</u> – Consumíveis para soldagem a arco dos AID.....	31
<u>Tabela 4.1</u> - Composição química da chapa utilizada no experimento.....	38
<u>Tabela 4.2</u> – Propriedades mecânicas da chapa utilizada no experimento.....	38
<u>Tabela 4.3</u> - Composição química dos tubos utilizados no experimento	39
<u>Tabela 4.4</u> – Propriedades mecânicas dos tubos utilizados no experimento ..	39

<u>Tabela 4.5</u> – Composição química dos consumíveis utilizados no experimento	40
<u>Tabela 4.6</u> – Parâmetros de soldagem utilizados na produção do “mockup”	43
<u>Tabela 4.7</u> – Localização dos termopares nos componentes do “mockup” ...	44
<u>Tabela 4.8</u> – Ensaio não destrutivo das soldas do “mockup”	46
<u>Tabela 4.9</u> – Análise das macrografias das soldas do “mockup”	47
<u>Tabela 4.10</u> – Dimensões da ligação tubo espelho conforme figura 4.1.....	48
<u>Tabela 4.11</u> – Valores de dureza admissíveis nas soldas do mockup	50
<u>Tabela 5.1</u> – Dimensões obtidas na análise das macrografias dos tubos B e 7	53
<u>Tabela 5.2</u> – Medição do teor de ferrita nas soldas do “mockup”	54
<u>Tabela 5.3</u> – Valores das medições de dureza realizadas nas soldas dos tubos B e 7	59
<u>Tabela 5.4</u> – Valores obtidos no ensaio de corrosão das amostras dos tubos B e 7	60
<u>Tabela 5.5</u> – Valores das temperaturas máximas e tempos de resfriamento registrados durante a soldagem dos tubos B e 7	64

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

AID:	Aços Inoxidáveis Duplex
API:	American Petroleum Institute
ASME:	The American Society of Mechanical Engineers
ASTM:	American Society for Testing and Materials
AWS:	American Welding Society
CCC:	Cúbico de Corpo Centrado
CCEN:	Corrente Contínua Eletrodo Negativo
CFC:	Cúbico de Face Centrada
CPT:	Critical Pitting Temperature
CST:	Corrosão Sob Tensão
Cr _{EQ}	Cromo Equivalente
E:	Energia de Soldagem
Ej:	Eficiência da Junta Soldada
END:	Ensaio Não Destrutivo
FN:	Ferrite Number
h:	Espessura da Chapa
I:	Intensidade de Corrente de Soldagem
LE:	Limite de Escoamento
LR:	Limite de Resistência à Tração
MB:	Metal Base
MIG:	Metal Inert Gas

MS:	Metal de Solda
Ni _{EQ}	Níquel Equivalente
P:	Pressão de Projeto
PREN:	Pitting Resistance Equivalent Number
R:	Raio Interno
RP:	Recommended Practice
S:	Tensão Admissível
SCC:	Stress Corrosion Cracking
SCE:	Saturated Calomel Electrode
t:	Espessura Mínima de Cálculo
T ₀ :	Temperatura Inicial da Chapa
T _c :	Temperatura de Interesse
TIG:	Tungsten Inert Gas
TR:	Technical Report
UFSC:	Universidade Federal de Santa Catarina
UNS:	Unified Numbering System
v:	Velocidade de Soldagem
V:	Tensão de Soldagem
WRC:	Welding Research Council
ZAC:	Zona Afetada pelo Calor
ZACTB:	Zona Afetada pelo Calor de Temperatura Baixa
ZACTE:	Zona Afetada pelo Calor de Temperatura Elevada
ZF:	Zona Fundida
Δt ₁₂₋₈ :	Tempo de Resfriamento entre 1200°C e 800°C

η :	Eficiência do Arco Elétrico
ρC :	Calor Específico Volumétrico
τ :	Adimensional

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
CURRICULUM VITAE	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	xii
SUMÁRIO	xv
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	2
2.1 "AIR COOLERS"	2
2.1.1 DESCRIÇÃO.	2
2.1.2 TIPOS DE CABEÇOTES.....	4
2.1.3 LIGAÇÃO TUBO ESPELHO.	5
2.1.3.1 LIGAÇÃO POR EXPANSÃO.	5
2.1.3.2 LIGAÇÃO POR EXPANSÃO E SOLDA DE SELAGEM.....	6
2.1.3.3 LIGAÇÃO POR SOLDA DE RESISTÊNCIA.....	6
2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX.	6
2.2.1 COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES.....	7
2.2.1.1 ESPECIFICAÇÕES.	7
2.2.1.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	8
2.2.1.3 PROPRIEDADES FÍSICAS.....	9
2.2.1.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	10
2.2.1.5 RESISTÊNCIA A CORROSÃO.....	13
2.2.2 CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS.	15
2.2.2.1 SOLIDIFICAÇÃO.	16
2.2.2.2 PRECIPITAÇÃO DE FASES.	17
2.3 SOLDAGEM DOS AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX.....	19
2.3.1 METALURGIA DA SOLDAGEM E SOLDABILIDADE DOS AID.	19
2.3.1.1 ZONAS DE INTERESSE NAS JUNTAS SOLDADAS.....	19
2.3.1.2 ENERGIA DE SOLDAGEM.....	21
2.3.1.3 PRÉ-AQUECIMENTO E TEMPERATURA INTERPASSES. ...	22
2.3.1.4 TRATAMENTO TÉRMICO APÓS SOLDAGEM.	23
2.3.1.5 PREVISÃO E CONTROLE DO TEOR DE FERRITA.	24

2.3.1.6 LIMPEZA ANTES E DEPOIS DA SOLDAGEM.....	26
2.3.2 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG PARA OS AID.	27
2.3.2.1 EQUIPAMENTO.....	27
2.3.2.2 ELETRODO NÃO CONSUMÍVEL.	28
2.3.2.3 GÁS DE PROTEÇÃO E GÁS DE PURGA.....	28
2.3.3 CONSUMÍVEIS PARA SOLDAGEM A ARCO DOS AID.	30
2.3.4 QUALIFICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM DOS AID.	31
2.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM.....	32
2.4.1 BALANÇO DE ENERGIA NA SOLDAGEM.	33
2.4.2 HISTÓRIA TÉRMICA.	33
2.4.3 CÁLCULOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM.	35
3. OBJETIVOS.....	37
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
4.1 MATERIAIS.....	38
4.1.1 CHAPA.....	38
4.1.2 TUBOS DE TROCA TÉRMICA.	38
4.1.3 CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM.....	39
4.2 PREPARAÇÃO DO "MOCKUP".	41
4.2.1 USINAGEM:.....	41
4.2.2 LIMPEZA:.....	41
4.2.3 SOLDAGEM:	42
4.2.3.1 EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM.....	42
4.2.3.2 PARÂMETROS DE SOLDAGEM.	42
4.2.3.3 ELETRODO NÃO CONSUMÍVEL.	43
4.2.3.4 MEDIÇÃO DO CICLO TÉRMICO.....	43
4.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.	45
4.4 MACROGRAFIAS.	46
4.5 MICROGRAFIAS.	48
4.5.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.	48
4.5.2 CONTAGEM DE FERRITA.....	48
4.5.3 PRECIPITAÇÃO DE FASES INTERMETÁLICAS.	49
4.6 DUREZA.	49
4.7 CORROSÃO.....	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
5.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.	52
5.2. MACROGRAFIAS.	52
5.3 MICROGRAFIAS.	53
5.3.1 CONTAGEM DE FERRITA.....	53
5.3.2 PRECIPITAÇÃO DE FASES INTERMETÁLICAS.	54

5.4 DUREZA.	57
5.5 CORROSÃO.	59
5.6 CICLOS TÉRMICOS.	60
6. CONCLUSÕES.	65
<i>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.</i>	66
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	67
ANEXO I – DESENHO DA CHAPA DO “MOCKUP”	72

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.

A qualificação dos procedimentos de soldagem das ligações tubo espelho para permutadores de calor e "*air coolers*" é abordada pelo código ASME Seção IX, porém, quando a construção desses equipamentos envolve a utilização dos aços inoxidáveis duplex (AID), os requisitos do código não são suficientes para assegurar que as juntas soldadas apresentarão a resistência mecânica e resistência à corrosão esperadas.

Com a publicação pelo American Petroleum Institute (API) do relatório técnico TR 938-C, sobre o uso dos AID na indústria de refino de petróleo, foram sugeridos requisitos complementares ao código ASME seção IX para a soldagem de ligações tubo espelho em AID.

Ao longo deste trabalho será preparado, conforme estabelecido pelo código ASME Seção IX, um "*mockup*", isto é, um modelo que reproduz a configuração da furação do espelho e a geometria da ligação tubo-espelho do "*air cooler*" em AID, utilizando-se um procedimento de soldagem devidamente qualificado. O "*mockup*" assim fabricado será submetido a todos os ensaios complementares sugeridos pelo relatório técnico TR 938-C e, dessa forma, poderão ser avaliadas as eventuais dificuldades para a utilização desse documento como item mandatório no processo de qualificação de procedimentos de soldagem desse tipo de junta soldada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

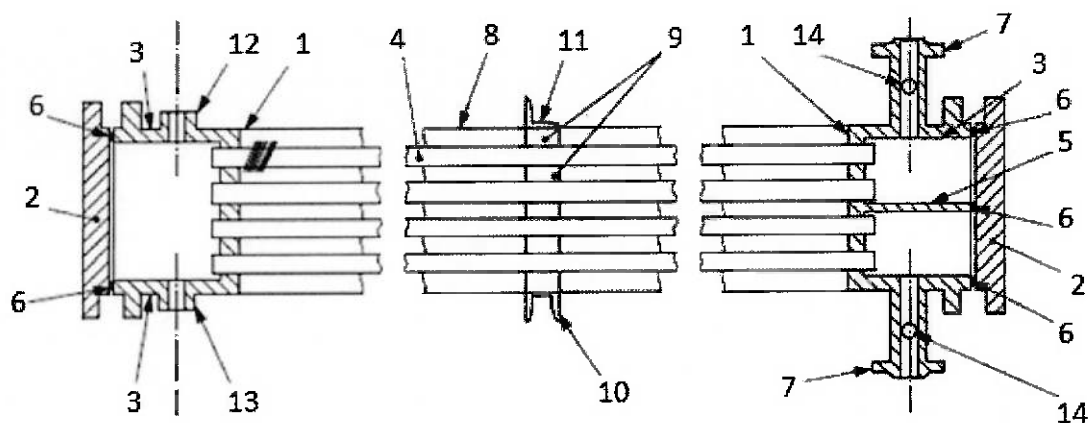
2.1 "AIR COOLERS".

Os equipamentos de troca térmica têm ampla utilização nas indústrias de processos químicos, tais como, refinarias, petroquímicas, papel e celulose, etc.. No caso das refinarias de petróleo os tipos mais comuns de equipamentos de troca térmica utilizados são os trocadores de calor (tipos casco e tubos e duplo tubo), os trocadores de placas, os "*air coolers*" e as serpentinas de aquecimento.

Os "*air coolers*" são equipamentos de troca térmica que utilizam o ar atmosférico como fluido de resfriamento. As utilizações mais típicas dos "*air coolers*" nas refinarias de petróleo são como condensadores, resfriadores ou aplicações similares.

2.1.1 DESCRIÇÃO.

Nos "*air coolers*" o fluido de processo circula no interior de tubos aletados ligados a cabeçotes por onde o fluido entra e sai do equipamento [1]. O conjunto de cabeçotes, tubos aletados, perfis estruturais e suportes é denominado feixe tubular [2]. Na Figura 2.1 é apresentada uma vista em corte de um feixe tubular típico de um "*air cooler*" com cabeçotes do tipo tampo removível.



- | | | |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 Espelho | 6 Junta de vedação | 11 Limitador dos tubos |
| 2 Tampo removível | 7 Bocais | 12 Respiro ("vent") |
| 3 Corpo do cabeçote | 8 Viga lateral do feixe | 13 Dreno |
| 4 Tubos aletados | 9 Espaçador dos tubos | 14 Conexão p/ instrumento |
| 5 Chapa divisora | 10 Viga suporte dos tubos | |

Figura 2.1 – Vista em corte do feixe tubular de um "air cooler" com cabeçotes do tipo tampo removível [2].

O feixe tubular dos "air coolers" é suportado por uma estrutura metálica que contém os outros componentes do equipamento, tais como, ventiladores, acionamento, transmissão, câmara "plenum", proteções, passarelas, guarda-corpo e venezianas.

O ar ambiente circula perpendicularmente aos tubos aletados do feixe tubular por meio de tiragem induzida, quando os tubos encontram-se a montante do ventilador, ou por tiragem forçada, quando os tubos encontram-se a jusante do ventilador. A Figura 2.2 mostra os "air coolers" típicos utilizados nas indústrias de processos.



(a)



(b)

Figura 2.2 – “Air Cooler” de tiragem induzida (a) e de tiragem forçada (b) [3].

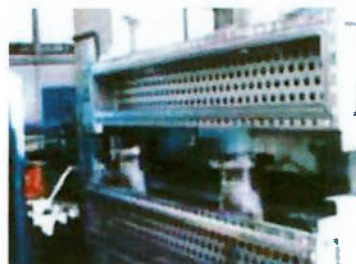
2.1.2 TIPOS DE CABEÇOTES.

A escolha do tipo de cabeçote mais adequado para os “air coolers” depende basicamente do fluido de processo e da pressão de trabalho do equipamento.

Na Figura 2.3 podem ser vistos os principais tipos de cabeçotes de “air coolers” utilizados.



(a) com bujões ou plugues



(b) com tampo removível



(c) com cabeçote removível



(d) tubular

Figura 2.3 – Tipos de cabeçotes de "Air Coolers" [3,4].

2.1.3 LIGAÇÃO TUBO ESPELHO.

A ligação entre os tubos e o espelho de um "air cooler" deve ser estanque, para evitar o vazamento do fluido de processo para o ambiente, e deve apresentar uma resistência mecânica adequada aos carregamentos de projeto.

Os tipos mais comuns de ligação tubo espelho são os seguintes:

2.1.3.1 LIGAÇÃO POR EXPANSÃO.

O tubo é expandido contra o espelho por meio de uma ferramenta até que seja atingido o nível especificado de deformação plástica. Durante o processo, o espelho se deforma elasticamente e é a recuperação elástica do mesmo que produz a interferência necessária para produzir uma ligação adequada [5]. A

norma API 661 estabelece que os furos dos espelhos possuam ranhuras usinadas no seu interior, sendo que para espelhos com espessura menor do que 25 mm é requerida uma ranhura e para espelhos com espessura maior ou igual a 25 mm são requeridas duas ranhuras [2].

2.1.3.2 LIGAÇÃO POR EXPANSÃO E SOLDA DE SELAGEM.

Para fluidos de processo perigosos como, por exemplo, hidrogênio e H_2S , a selagem propiciada somente pela expansão do tubo no espelho não é suficiente. Nesses casos, além da expansão é realizada uma solda de selagem entre o tubo e a superfície do espelho exposta ao fluido de processo [4,5]. Neste tipo de ligação, a expansão é realizada após a soldagem [5].

2.1.3.3 LIGAÇÃO POR SOLDA DE RESISTÊNCIA.

Para os casos em que o carregamento na ligação tubo espelho é elevado, pode ser necessária a utilização de uma ligação soldada para que as condições de projeto sejam atendidas. O código ASME Sec. VIII div. 1, parágrafo UW-20, estabelece as regras para a determinação dos tamanhos das soldas e as cargas admissíveis na ligação soldada [6].

2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX.

Os aços inoxidáveis duplex são ligas Fe-Cr-Ni-N que apresentam na temperatura ambiente uma microestrutura balanceada de austenita e ferrita [7,8,9]. Por apresentarem propriedades mecânicas e resistência à corrosão

superiores àquelas dos aços inoxidáveis austeníticos, os AID são amplamente utilizados na indústria de óleo e gás e em outros setores. Particularmente no setor de "*downstream*" da indústria de óleo e gás os AID estão ganhando espaço, fato que levou o American Petroleum Institute – API a publicar em 2005 um relatório técnico com orientações sobre o uso dos AID na indústria do refino de petróleo [10]. Hoje esse relatório já está na segunda edição. Outro exemplo da crescente utilização dos AID na indústria do refino de petróleo é a existência na norma API de tanques de armazenamento atmosféricos [11], de um apêndice com os requisitos para materiais, projeto, fabricação, montagem e testes de tanques em AID.

2.2.1 COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES.

2.2.1.1 ESPECIFICAÇÕES.

Os AID estão disponíveis em todas as formas de produtos necessárias para a fabricação de tubulações, vasos de pressão, tanques, bombas, trocadores de calor, válvulas e outros equipamentos e componentes de utilização industrial. As especificações ASTM para as diversas formas de produto dos AID estão apresentadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Especificações ASTM para os AID [10].

FORMA DO PRODUTO	NORMA ASTM
Chapas	A240
Barras	A479, A276
Tubo de condução	A790, A928
Tubo de troca térmica	A789
Conexões	A815
Forjados	A182
Fundidos	A351, A890, A995

2.2.1.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.

A tabela 2.2 apresenta a composição química dos AID mais usados na indústria de óleo e gás [10]. Além da composição química, a tabela contém o valor do equivalente de resistência à corrosão por pites (PREN) que será explicado adiante.

Tabela 2.2 – Composição química (% massa) dos AID mais comuns [10].

UNS	TIPO	C	Cr	Ni	Mo	N	Outros	PREN Min.
LEAN E SEMI-LEAN DUPLEX								
S32304	2304	0,03	21,5 – 24,5	3,0 – 5,5	0,05 – 0,60	0,05 – 0,20	-	22,5
S32101	2101	0,04	21,0 – 22,0	1,35 – 1,70	0,10 – 0,80	0,20 – 0,25	-	24,5
S32003	2003	0,03	19,5 – 22,5	3,0 – 4,0	1,5 – 2,0	0,14 – 0,20	-	26,7
DUPLEX STANDARD								
S31803	-	0,03	21,0 – 23,0	4,5 – 6,5	2,5 – 3,5	0,08 – 0,20	-	30,5
S32205	2205	0,03	22,0 – 23,0	4,5 – 6,5	3,0 – 3,5	0,14 – 0,20	-	34,1
25%Cr e SUPER DUPLEX								
S31200	-	0,03	24,0 – 26,0	5,5 – 6,5	1,2 – 2,0	0,14 – 0,20	-	30,2
S31260	-	0,03	24,0 – 26,0	5,5 – 7,5	2,5 – 3,5	0,10 – 0,30	W: 0,1 – 0,5	34,0
S32520	-	0,03	24,0 – 26,0	5,5 – 8,0	3,0 – 5,0	0,20 – 0,35	-	37,1
S32550	255	0,04	24,0 – 27,0	4,5 – 6,5	2,9 – 3,9	0,10 – 0,25	-	35,2
S32750	2507	0,03	24,0 – 26,0	6,0 – 8,0	3,0 – 5,0	0,24 – 0,32	-	37,7
S32760	Z100	0,03	24,0 – 26,0	6,0 – 8,0	3,0 – 4,0	0,20 – 0,30	W: 0,5 – 1,0	37,9
S32950	-	0,03	26,0 – 29,0	3,5 – 5,2	3,5 – 5,2	0,15 – 0,35	-	31,7
S39274	-	0,03	24,0 – 26,0	6,0 – 8,0	6,0 – 8,0	0,24 – 0,32	W: 1,5 – 2,5	38,6
S39277	-	0,025	24,0 – 26,0	6,5 – 8,0	6,5 – 8,0	0,23 – 0,33	W: 0,8 – 1,2	38,9
Notas:								
1. Os valores individuais indicam o teor máximo do elemento.								
2. $PREN = \% Cr + 3,3 \times (\% Mo + 0,5 \times \% W) + 16 \times \% N$								

2.2.1.3 PROPRIEDADES FÍSICAS.

A tabela 2.3 apresenta as propriedades físicas dos AID comparadas com as do aço inoxidável austenítico 316 e do aço carbono.

Pode ser notado que o coeficiente de expansão térmica dos AID é similar aos dos aços carbono, o que os torna uma opção aos aços inoxidáveis austeníticos

nos casos onde as tensões devido à expansão térmica diferencial podem ser um problema [9].

Tabela 2.3 – Propriedades físicas dos AID [8,12,13].

PROPRIEDADE	AID	Inox 316	Aço carbono
Densidade, g/cm ³	7,70 – 7,85	8,03	7,75
Módulo de elasticidade, GPa	190 – 210	197	209
Calor específico, J/kg-K	450 – 505	500	486
Resistividade elétrica, $\mu\Omega\cdot m$	0,75 – 0,85	0,74	0,159
Coef. de expansão térmica, $\mu m/m\cdot K$	11,6 – 14,0	15,9	12,2
Condutividade térmica, W/m-K	13,0 – 20,1	16,2	51,9

2.2.1.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS.

A tabela 2.4 apresenta as propriedades mecânicas do AID S31803 comparadas com as dos aços inoxidáveis austeníticos 316 e 316L e com as do aço carbono SA-516 Gr. 60 utilizado na fabricação de vasos de pressão.

Tabela 2.4 – Propriedades mecânicas do AID S31803 e outros aços [14].

	SA-240 UNS S31803	SA-240-316	SA-240- 316L	SA-516-60
Mínima tensão de ruptura, MPa	620	515	485	415
Mínima tensão de escoamento, MPa	450	205	170	220
Relação entre as tensões mínimas de escoamento e ruptura	0,725	0,398	0,350	0,530
Alongamento mínimo em 50 mm, %	25	40	40	25
Dureza máxima, Brinell	293	217	217	-

Analisando-se os dados da Tabela 2.4 é possível verificar que o AID S31803 apresenta uma tensão de escoamento superior ao dobro das dos outros aços. Essa propriedade permite que as construções em AID sejam mais leves que as similares em aço inoxidável austeníticos ou em aço carbono.

Para ilustrar a vantagem em termos de peso que apresentam os AID sobre os demais, será calculada a espessura de um costado cilíndrico de um vaso de pressão cujos dados de projeto constam da Tabela 2.5. O cálculo será realizado conforme o parágrafo UG-27(c)(1) do código ASME Sec. VIII div. 1 [6].

Tabela 2.5 – Dados de projeto para um costado cilíndrico de vaso de pressão.

Dados	Valores
Raio interno, mm	500
Pressão de projeto, MPa	2
Temperatura de projeto, °C	150
Sobresspessura de corrosão (para o aço carbono somente), mm	3,0
Eficiência da junta soldada	1,0
Tensão admissível do material, MPa	Tabela 2.6
Coluna de líquido no costado, mm	0

A Fórmula 2.1 é utilizada para o cálculo da espessura mínima t de um costado cilíndrico de vaso de pressão [6]:

$$t = (P.R) / (S.E_j - 0,6.P) \longrightarrow (2.1)$$

onde:

P é a pressão de projeto;

R é o raio interno do costado cilíndrico;

S é a tensão admissível do material do costado cilíndrico na temperatura de projeto;

E_j é a eficiência da junta soldada.

Na Tabela 2.6 estão indicados os valores das tensões admissíveis de diversos materiais conforme o código ASME Sec. II parte D.

Tabela 2.6 – Tensões admissíveis de materiais [12].

FORMA	ESPECIF.	GRAU	UNS nº	MÁXIMA TENSÃO ADMISSÍVEL, MPa, PARA UMA TEMPERATURA DE METAL, °C, NÃO EXCEDENDO					
				-30 a 40	100	150	200	250	300
Chapa	SA-240	-	S32304	172	164	155	150	147	145
Chapa	SA-240	-	S31803	177	177	171	165	161	160
Chapa	SA-240	316	S31600	138	138	138	134	126	119
Chapa	SA-240	316L	S31603	115	115	115	109	103	98
Chapa	SA-516	60	K02100	118	118	118	118	118	115

Os resultados dos cálculos das espessuras mínimas de projeto do costado, bem como o peso por metro linear de costado para cada material estão indicados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Espessuras e pesos do costado cilíndrico para os diversos materiais.

Material	Espessura mínima de cálculo mm	Espessura mínima final (com acréscimo para corrosão) mm	Espessura nominal mm	Peso do costado kg / m
SA-240 S31803	5,89	5,89	6,0	149
SA-240 S32304	6,50	6,50	7,0	174
SA-240 316	7,31	7,31	8,0	203
SA-240 316L	8,79	8,79	9,0	229
SA-516-60	8,56	11,56	12,0	296
Nota: Para este cálculo foi adotado como valor da espessura nominal da chapa do costado o número inteiro superior mais próximo à espessura mínima final.				

O aço carbono foi incluído na análise comparativa, pois, segundo o relatório técnico do API, algumas plantas estão considerando a utilização dos AID como material base no lugar dos aços carbono [10].

Os AID, quando expostos a temperaturas acima de 260°C a 340°C por longos períodos, estão sujeitos à fragilização. Por esse motivo, as normas e códigos

limitam a temperatura máxima para utilização desses materiais. Na tabela 2.8 estão indicados os limites de temperatura especificados por alguns códigos e normas para os AID [10].

Tabela 2.8 – Limites de temperatura para utilização dos AID [12,15,11].

Grau	ASME Sec. VIII div.1	ASME B31.3	API 650
S32304	316°C	316°C	260°C
S32101	316°C	NL	260°C
S32003	343°C Code case 2503	343°C Code case 2503	260°C
S31803	316°C	316°C	260°C
S32205	316°C	316°C	260°C
S31200	316°C	NL	NL
S31260	316°C	NL	NL
S32550	260°C	NL	260°C
S32750	316°C	316°C	260°C
S32760	316°C	316°C	260°C
NL: não listado			

2.2.1.5 RESISTÊNCIA À CORROSÃO.

A prática API RP 571 [16], sobre mecanismos de dano nos equipamentos estáticos de refinarias, cita mais de 60 mecanismos de dano sendo que 25 deles são relacionados à corrosão [16]. Os AID apresentam, em alguns meios, uma resistência à corrosão superior àquela dos aços inoxidáveis austeníticos mais utilizados (304L, 316L, etc.) [8].

Devido à presença de Cr, Mo, W e N na sua composição química, os AID apresentam uma resistência à corrosão por pites e por frestas superior àquela dos aços inoxidáveis austeníticos [8,9]. Um indicador para verificar a resistência à corrosão por pites é o equivalente de resistência a pites, PREN, cuja fórmula mais comum é:

$$\text{PREN} = \text{Cr} + 3,3 \times (\text{Mo} + 0,5 \times \text{W}) + 16 \times \text{N} \longrightarrow (2.2)$$

Pode-se notar a grande influência do N na resistência à corrosão por pites [9].

A resistência à corrosão por pites e por frestas é avaliada por ensaios normalizados que, para um dado meio, fornecem a temperatura crítica a partir da qual a corrosão se estabelece e avança até ser perceptível a olho nu [8]. Na Figura 2.4 estão mostradas as temperaturas críticas de corrosão por pites (CPT) para alguns aços inoxidáveis austeníticos e AID em diversas concentrações de cloreto de sódio [18].

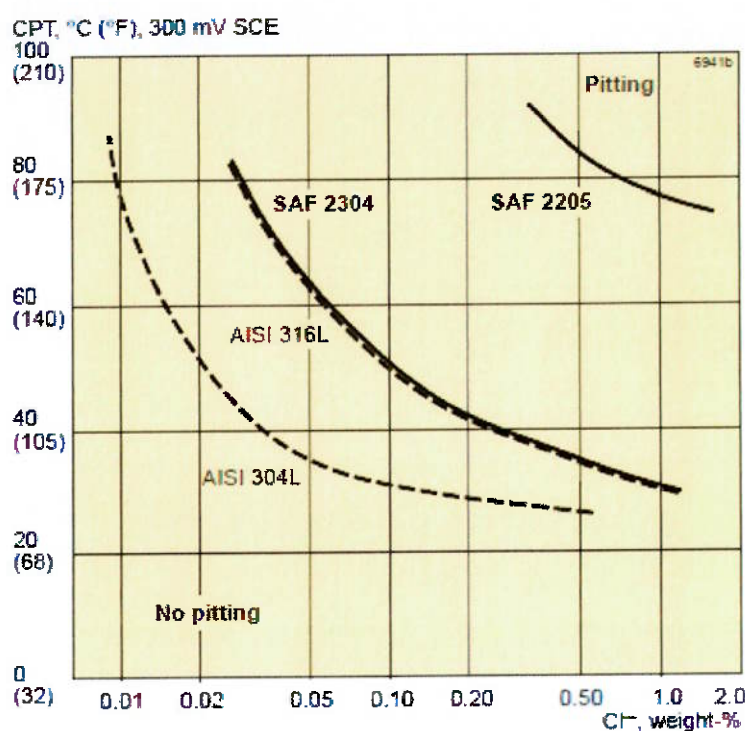


Figura 2.4 – Temperaturas críticas de pite (CPT) para os AID S32205 e S32304 em várias concentrações de cloreto de sódio (% peso) a 300 m x eletrodo de calomelano (SCE), pH neutro [18].

Os AID também apresentam uma resistência à corrosão sob tensão – CST por cloretos superior àquela dos aços inoxidáveis austeníticos. Isso se deve ao maior teor de Cr e baixo teor de Ni dos AID [9].

Na Figura 2.5 está mostrado o comportamento de alguns aços inoxidáveis austeníticos e AID à corrosão sob tensão por cloretos [18].

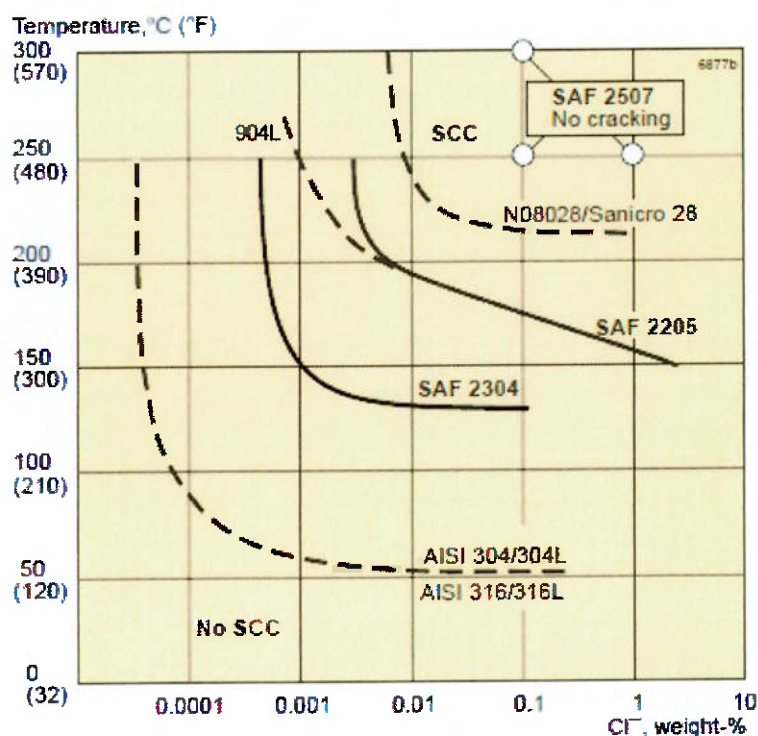


Figura 2.5 – Resistência à corrosão sob tensão para os AID S32750, S32205 e S32304 em solução de cloreto de sódio (% peso) [18].

2.2.2 CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS.

Os AID nas suas diversas formas são produzidos de modo a apresentar uma estrutura balanceada e isenta de fases intermetálicas e precipitados. Os AID são fornecidos com tratamento térmico de solubilização conforme especificado na norma do produto. Uma chapa de AID S31803, por exemplo, é aquecida a 1040°C e resfriada em água ou em outro meio que garanta um resfriamento rápido [19].

As melhores propriedades mecânicas e resistência à corrosão são obtidas quando o balanço de fases fica ao redor de 50% de ferrita e 50% de austenita [20].

2.2.2.1 SOLIDIFICAÇÃO.

Os AID solidificam como ferrita primária [7,9], portanto, toda a transformação da austenita se dá no estado sólido. A Figura 2.6 mostra o diagrama pseudobinário Fe-Cr-Ni onde podem ser vistos os diferentes modos de solidificação dos aços inoxidáveis [21]. A solidificação dos AID ocorre na região 4 do diagrama.

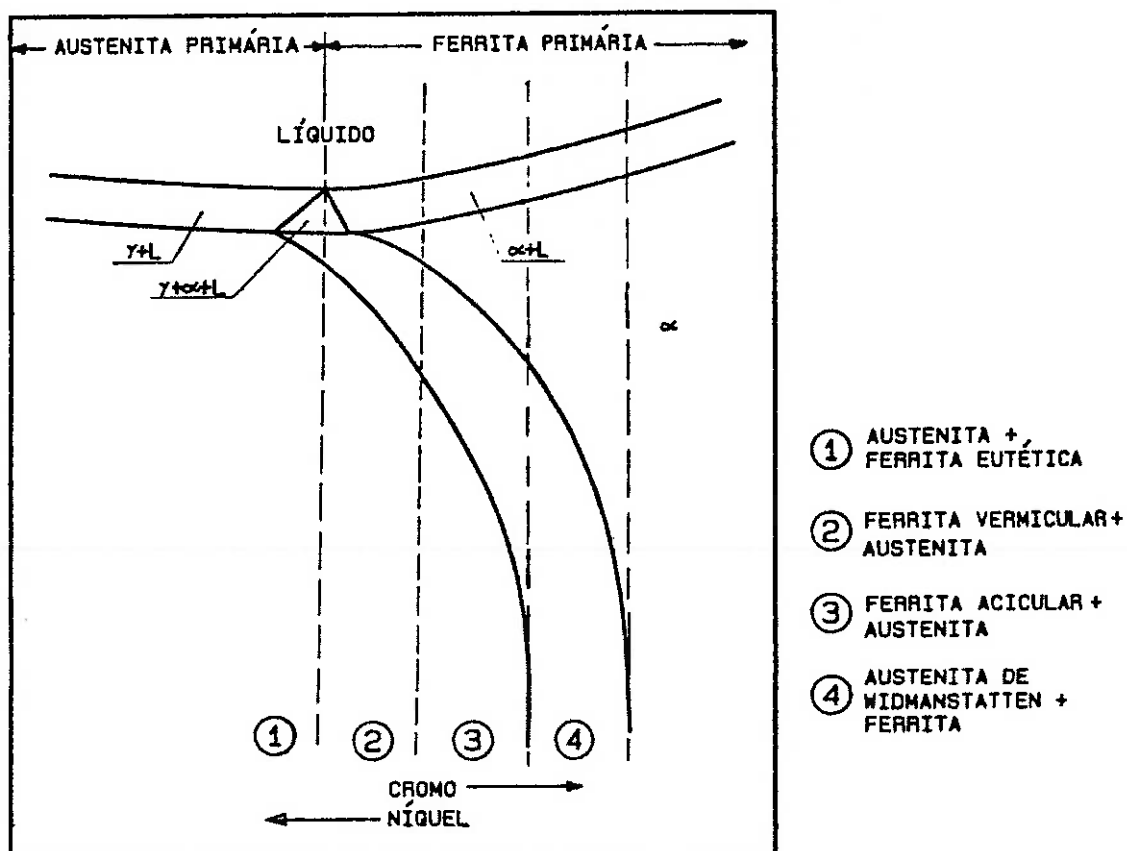


Figura 2.6 – Diagrama pseudobinário Fe-Cr-Ni [21].

A precipitação da austenita nos AID ocorre no resfriamento tão logo é ultrapassada a linha solvus da ferrita. Para os AID essa temperatura é de aproximadamente 1.200°C [7,21].

2.2.2.2 PRECIPITAÇÃO DE FASES.

Além da austenita, outras fases poderão precipitar durante o resfriamento dos AID, sendo que as mais importantes para este estudo estão indicadas na tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Principais fases precipitadas nos AID [22].

Fase	Estrutura cristalina	Faixa de temperatura °C	Composição química %				
			Fe	Cr	Ni	Mo	Outros
Austenita secundária (Y ₂)	CFC	600 - 1000	56,8	27,9	8,4	2,9	0,05 N
Nitreto (Cr ₂ N)	Trigonal	550 - 1000	4,6	85,5	-	4,8	5,1 V N
Carboneto (M ₂₃ C ₆)	CFC	550 - 1000	35	60	2	3	C
σ (FeCr)	Tetragonal	650 - 1000	55	29	5	11	-
α' (α de alto Cr)	CCC	350 - 750	12	72	3	10	3 Si

As fases citadas na Tabela 2.9 são indesejáveis nos AID, pois prejudicam as suas propriedades mecânicas e a sua resistência à corrosão [7].

A Figura 2.7 mostra a localização de algumas dessas fases na microestrutura dos AID.

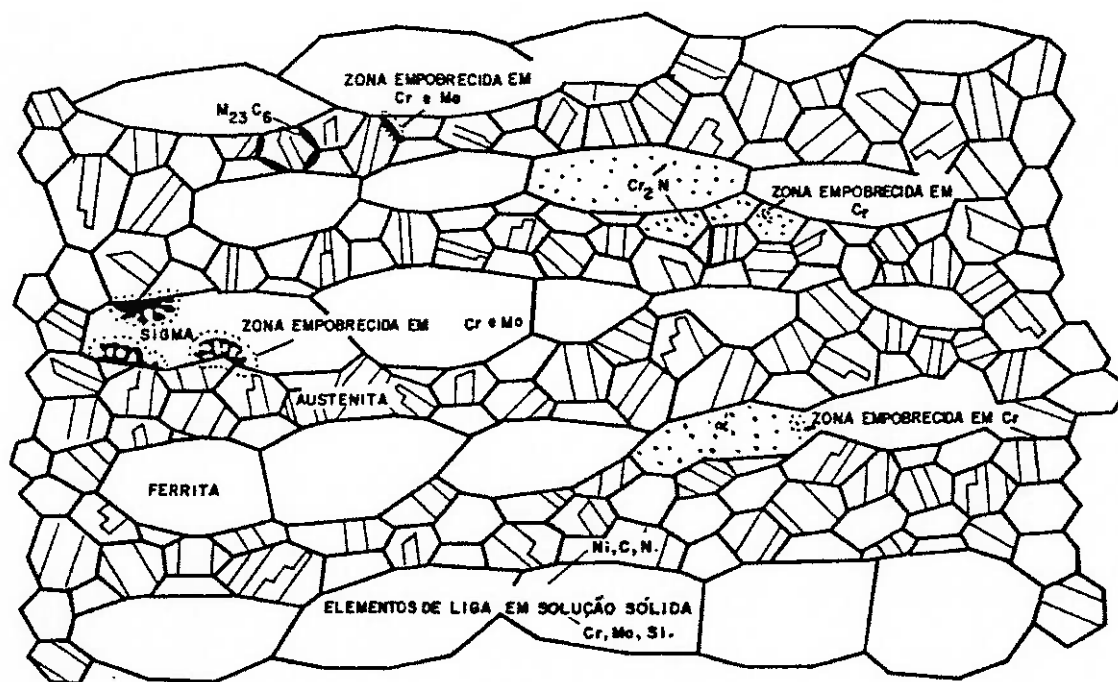


Figura 2.7 – Localização das fases indesejáveis nos AID [21].

A Figura 2.8 mostra as curvas de fragilização de alguns AID em função da temperatura e do tempo de exposição.

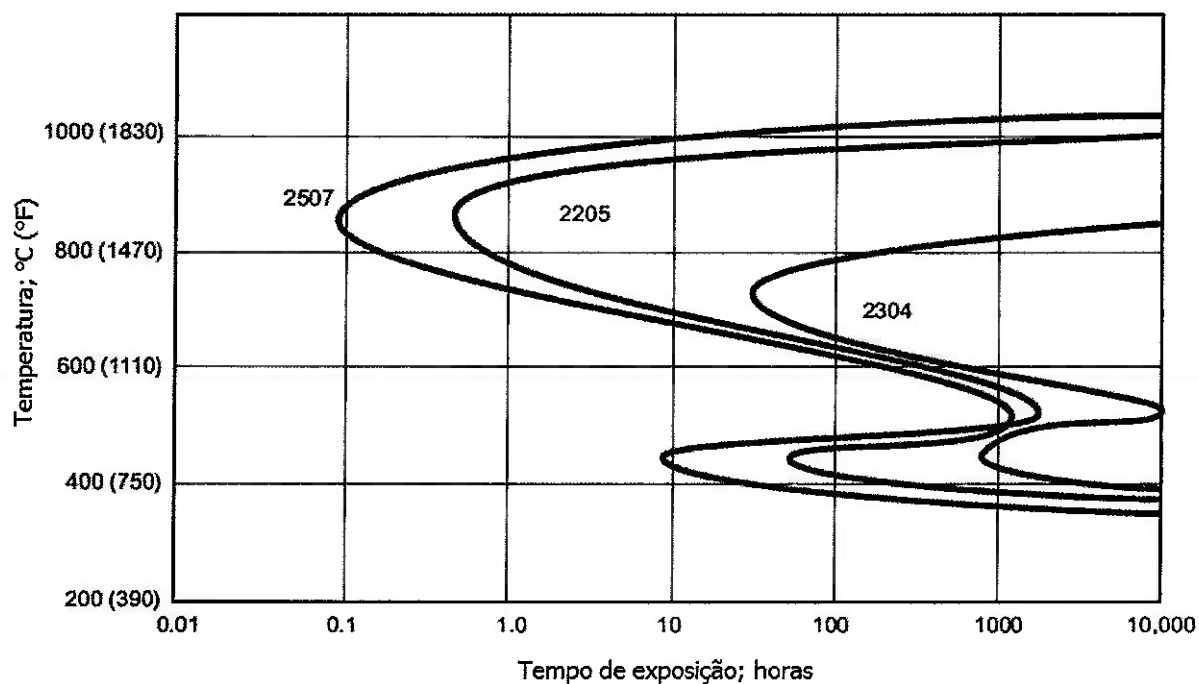


Figura 2.8 – Fragilização dos AID UNS S32304, S32205 e S32507 [10].

2.3 SOLDAGEM DOS AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX.

Tanto a composição química quanto a microestrutura dos AID são facilmente controladas nas usinas onde os produtos são fabricados, já na soldagem dos AID não existe tanta flexibilidade. Os cuidados que deverão ser tomados durante a soldagem dos AID, de modo a garantir a manutenção das suas propriedades, serão abordados neste capítulo.

2.3.1 METALURGIA DA SOLDAGEM E SOLDABILIDADE DOS AID.

Os AID apresentam boa soldabilidade, porém, devido aos problemas de fragilização citados anteriormente, os parâmetros de soldagem devem ser controlados com rigor [8,21].

O relatório técnico da API [10] apresenta várias recomendações adicionais ao código ASME Sec. IX [23] para a elaboração de procedimentos de soldagem dos AID. Dentre essas recomendações está a realização de testes complementares para a qualificação dos procedimentos de soldagem que incluem: testes de corrosão conforme norma ASTM A923 método C [24], medição de dureza, medição de ferrita por contagem de pontos (norma ASTM E562 [25]), micrografias, etc.

2.3.1.1 ZONAS DE INTERESSE NAS JUNTAS SOLDADAS.

Nas juntas soldadas dos AID, as microestruturas da zona fundida – ZF e da zona afetada pelo calor – ZAC são os objetos de estudo para assegurar um correto balanceamento de fases. Enquanto na ZF é possível alterar a

composição química do cordão, seja por meio de metais de adição ou pela reação gás-líquido na poça de fusão ou por ambos, na ZAC o controle de fases passa pela seleção adequada dos metais de base e pelo controle da história térmica da soldagem [7,8].

Também existe a possibilidade de realizar um tratamento térmico pós-soldagem nas juntas com o objetivo de restabelecer o balanceamento de fases [7], porém, essa alternativa na maioria dos casos não é viável.

2.3.1.1.A Zona Fundida.

Os metais de adição para a soldagem dos AID contêm cerca de 9% de Ni em sua composição [7]. Esse teor de Ni eleva o valor do Ni_{eq} do depósito provocando um aumento na temperatura de precipitação da austenita [21] e com isso a fração volumétrica de austenita na solda será próxima àquela do metal base [7]. As fórmulas do Ni_{eq} e do Cr_{eq} são apresentadas a seguir [9,26]:

$$Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N + 0,25Cu \longrightarrow (2.3)$$

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0,7Nb \longrightarrow (2.4)$$

Os AID possuem adições de nitrogênio, entre 0,08 e 0,35% em peso, para melhorar a resistência mecânica e a resistência à corrosão por pites [9].

Durante o processo de soldagem o nitrogênio pode se desprender da poça de fusão e alterar a composição química do depósito. Por esse motivo, nos processos TIG e MIG é adicionado entre 2 e 5% de nitrogênio ao argônio [7]. Como pode ser visto nas fórmulas acima, o nitrogênio tem uma grande influência no valor do Ni_{eq} .

2.3.1.1.B Zona Afetada pelo Calor.

Como já foi dito, na ZAC as transformações de fase são decorrentes da temperatura máxima alcançada na região e do tempo de resfriamento. Em função do ciclo térmico a que está sujeita a ZAC, pode-se dividi-la em duas zonas distintas [7,8]:

ZAC de temperatura elevada – ZACTE onde a temperatura máxima alcançada está acima da temperatura solvus da ferrita (1200°C) e abaixo da temperatura solidus do material. Nessa região o balanceamento de fases existente no metal base é alterado. Para promover a formação da austenita é necessário controlar a taxa de resfriamento a partir dessa região [8]. Um parâmetro adotado para realizar esse controle é o tempo decorrido no resfriamento entre 1200°C e 800°C, ou Δt_{12-8} . O tempo mínimo recomendado para o Δt_{12-8} é 10 segundos para propiciar a formação de austenita em uma fração próxima àquela do metal base como fornecido [8]. Outro benefício do controle do Δt_{12-8} é que haverá maior dissolução do nitrogênio na austenita, reduzindo assim a possibilidade da ocorrência da precipitação de nitretos de cromo na ferrita [8,9].

ZAC de temperatura baixa – ZACTB onde a temperatura alcançada fica abaixo da temperatura de solubilização e dentro da região de precipitação de fases, isto é, entre 600 e 900°C [8].

2.3.1.2 ENERGIA DE SOLDAGEM.

A energia de soldagem especificada em um procedimento de soldagem de AID deverá estar acima de um valor mínimo que previna a formação excessiva de ferrita devido ao rápido resfriamento da junta soldada e deverá estar abaixo de

um valor máximo que, se ultrapassado, permitirá que o tempo mínimo para que ocorra a precipitação de fases prejudiciais seja alcançado [8,20]. Os valores recomendados para a energia de soldagem dos AID estão indicados na Tabela 2.10 [8].

Tabela 2.10 – Energia de soldagem para os AID [8].

AID	Energia mínima, kJ/mm	Energia máxima, kJ/mm
Duplex	0,5	2,5
Super Duplex	0,5	1,5

2.3.1.3 PRÉ-AQUECIMENTO E TEMPERATURA INTERPASSES.

Apesar de não ser recomendado, o pré-aquecimento dos AID pode ser necessário em situações específicas, tais como, temperatura do metal abaixo de 5°C, condensação presente nas superfícies a serem soldadas ou soldagem de seções muito espessas [8,20]. Para esses casos o pré-aquecimento deverá ser de no máximo 95°C dependendo do AID [8].

A temperatura interpasses tem uma grande influência na taxa de resfriamento da junta soldada e, portanto, na microestrutura da ZF e ZAC. O valor recomendado para a temperatura interpasses dos AID é 150°C [8].

As temperaturas de pré-aquecimento e interpasses deverão constar dos procedimentos de soldagem e deverão ter um controle rigoroso durante a soldagem de produção.

2.3.1.4 *TRATAMENTO TÉRMICO APÓS SOLDAGEM.*

Os AID são raramente submetidos a tratamentos térmicos após soldagem. Os tratamentos para alívio de tensões após soldagem não são recomendados uma vez que a sua faixa de temperatura pode causar a fragilização de 475°C e a precipitação de outras fases intermetálicas [8].

O tratamento térmico de solubilização também encontra dificuldades para sua aplicação. As peças devem ser colocadas inteiras dentro de um forno, aquecidas a temperaturas da ordem de 1050°C e resfriadas rapidamente em água o que é impraticável para a maioria das estruturas soldadas [8,20].

O código ASME Sec. VIII div. 1 informa que o tratamento térmico após soldagem dos AID não é nem requerido nem proibido, porém, qualquer tratamento realizado deverá seguir as temperaturas indicadas no código, reproduzidas na Tabela 2.11, e deverá ser seguido de resfriamento rápido em líquido ou por outro meio adequado [6].

Tabela 2.11 – Temperaturas de tratamento térmico após soldagem para os AID [6].

Liga UNS	Temperatura de tratamento térmico após soldagem, °C
S32550	1040 - 1120
S31260	1020 - 1100
S31803	1020 - 1100
S32900 (%C 0,08 máx.)	940 - 955
S31200	1040 - 1095
S31500	975 - 1025
S32304	950 - 1050
J93345	1120 mín.
S32750	980 - 1130
S32950	1000 - 1025
S39274	1050 - 1130
Nota: o tempo mínimo na temperatura de tratamento térmico não é informado no código ASME. A Prática API RP 582 estabelece esse tempo como sendo uma hora por polegada com uma hora como mínimo.	

2.3.1.5 PREVISÃO E CONTROLE DO TEOR DE FERRITA.

A previsão da fração volumétrica de ferrita presente nas soldas dos AID pode ser realizada a partir da composição química do metal depositado [9,26]. A Figura 2.9 apresenta o diagrama WRC-1992 que é utilizado para essa estimativa.

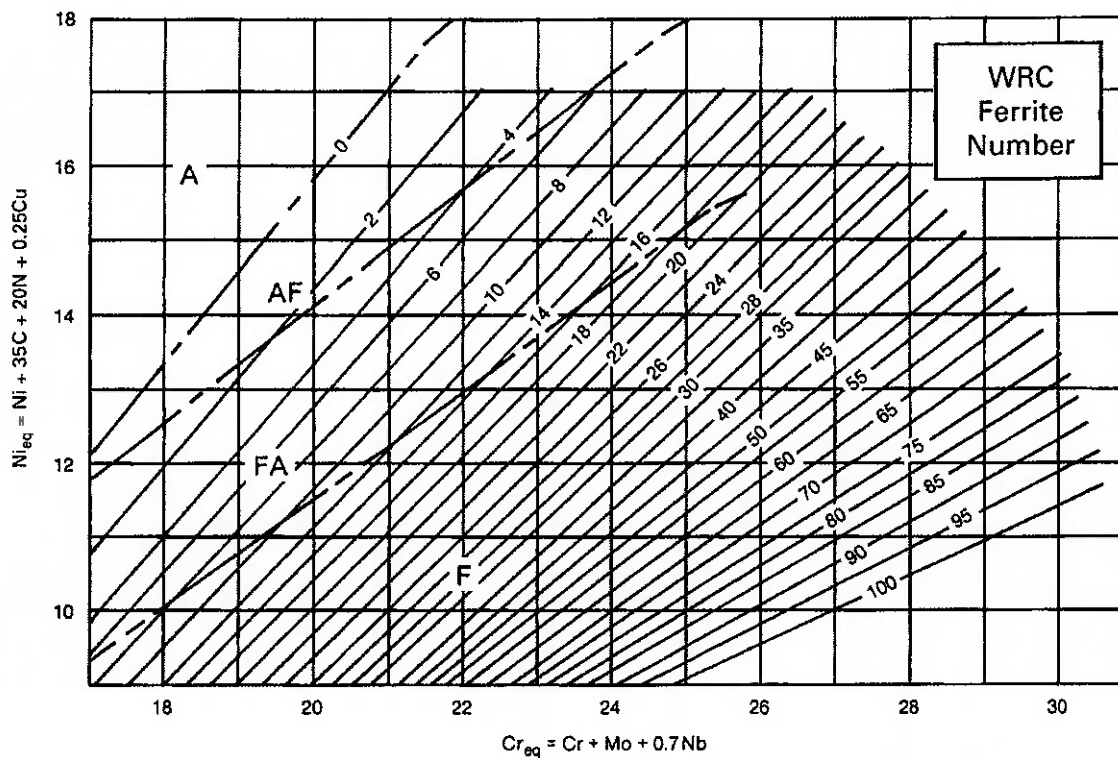


Figura 2.9 – Diagrama WRC-1992 para aços inoxidáveis [26].

O diagrama WRC-1992 apresenta o teor de ferrita em termos de um número de ferrita (FN). O número de ferrita pode ser convertido para percentual em volume através da seguinte relação [8,9]:

$$\% \text{Ferrita} = 0,7 \text{ FN} \longrightarrow \text{(2.5)}$$

A medição do teor de ferrita é importante para assegurar que o processo de soldagem resultou em um depósito de solda que atende as especificações do produto. As medições podem ser realizadas por meio de instrumentos magnéticos que, por restrições dimensionais, não permitem realizar medidas precisas em regiões pequenas como a ZAC [8].

As técnicas metalográficas para medição de ferrita são cobertas pelas normas ASTM E562, que utiliza o método de contagem de pontos, e a ASTM E1245, que mede o teor de ferrita por análise de imagem [8,25,27].

Na Tabela 2.12 estão indicados os valores recomendados pelo relatório técnico API TR 928-C [10] para as frações volumétricas de ferrita nas soldas dos AID.

Tabela 2.12 – Fração volumétrica de ferrita recomendada para as soldas dos AID [10].

Local	Fração volumétrica de ferrita
Metal base	De 30% a 65%
ZAC	De 40% a 65%
Metal de solda	De 25% a 60%

2.3.1.6 LIMPEZA ANTES E DEPOIS DA SOLDAGEM.

Antes da soldagem dos AID todos os contaminantes, tais como resíduos de usinagem, graxa e tinta, devem ser removidos e a junta deverá ser limpa com solvente e secada completamente. Sempre que for necessária limpeza por meio de escovas metálicas, as mesmas deverão ser em aço inoxidável. O não atendimento ao requisito de limpeza antes da soldagem pode provocar contaminação e comprometer a resistência mecânica e de corrosão da junta soldada [8,20,28].

Os respingos de solda, escória, camadas de óxidos, carepa, tintas e outras incrustações originadas no processo de soldagem, podem se comportar como frestas e comprometer a resistência à corrosão do componente quando em serviço. As regiões que contém esses contaminantes superficiais e a região ao seu redor, devem ser submetidas à limpeza mecânica seguida de decapagem química para eliminar a presença dos mesmos. Cuidados devem ser tomados

para que o processo de limpeza mecânica não provoque a formação de riscos que venham a se comportar como frestas quando em serviço [8,28].

Os requisitos de limpeza antes de depois da soldagem deverão constar dos procedimentos de soldagem correspondentes.

2.3.2 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG PARA OS AID.

O processo TIG é utilizado para a soldagem dos AID normalmente em soldas de pequena extensão, passes de raiz ou para paredes finas. Dentre os processos de soldagem a arco é o que produz as soldas com melhores propriedades mecânicas e de resistência à corrosão [8,29].

A soldagem autógena não é recomendada, a menos que seja possível solubilizar a peça após a soldagem para restabelecer o balanceamento de fases no metal de solda e na ZAC [8]. A Prática API RP 582 estabelece que a utilização de processo de soldagem autógena está sujeita a aprovação do cliente [30].

A soldagem dos AID pode ser realizada pelo processo TIG manual, mecanizado ou automatizado. A soldagem com TIG orbital é muito utilizada nas ligações tubo-espelho de trocadores de calor e "*air coolers*".

2.3.2.1 EQUIPAMENTO.

Para a soldagem TIG dos AID é utilizada uma fonte de corrente constante, preferencialmente com um circuito de alta frequência para a abertura do arco. A soldagem TIG é realizada com corrente contínua eletrodo negativo (CCEN) [31].

2.3.2.2 ELETRODO NÃO CONSUMÍVEL.

O eletrodo recomendado para a soldagem dos AID, conforme especificação AWS A5.12, é o de classificação EWTh-2, tungstênio com 2% de tória (ThO_2). O eletrodo deve ser apontado com um ângulo entre 30 e 60° e a ponta levemente desbastada [31].

2.3.2.3 GÁS DE PROTEÇÃO E GÁS DE PURGA.

A poça de fusão deve ser protegida da contaminação do ar atmosférico por meio de um gás inerte.

Normalmente o gás de proteção utilizado na soldagem TIG dos AID é o argônio puro ou o argônio com 1 a 2% de nitrogênio. Quantidades maiores de nitrogênio podem causar instabilidade do arco elétrico podendo produzir respingos e porosidade [31,32].

Se argônio puro for utilizado como gás de proteção, ocorrerá uma perda de nitrogênio no metal de solda e na região do metal de base próxima à zona fundida, prejudicando a formação de austenita durante o resfriamento da junta soldada. Dependendo da aplicação essa condição pode ser aceitável.

A utilização do gás argônio com 1 a 2% de nitrogênio previne a perda de nitrogênio durante a soldagem e resultará em uma maior fração de austenita no metal de solda, reduzindo a possibilidade de precipitação de nitretos na superfície exposta do cordão e, dessa forma, melhorando a resistência à corrosão da junta soldada [32].

A utilização de difusores nos bocais da tocha TIG é desejável para evitar um fluxo turbulento de gás que pode arrastar o ar atmosférico para a poça de fusão e contaminá-la [31]. A vazão do gás de proteção deverá ser iniciada antes da abertura do arco e deverá ser mantida por pelo menos 5 segundos após a extinção do mesmo. A vazão recomendada do gás de proteção é de 12 a 18 l/min [31].

Durante a soldagem do passe de raiz dos AID, o lado oposto ao da execução da soldagem deverá ser protegido por um gás de purga. O gás de purga deverá ser mantido pelo menos até os dois primeiros passes de enchimento [20]. Argônio puro, argônio com nitrogênio, nitrogênio puro ou nitrogênio com 10% de hidrogênio podem ser utilizados como gás de purga [20,32].

Antes do início da soldagem, o volume confinado na raiz da solda deverá ser purgado pelo menos sete vezes. A vazão do gás de purga varia de 3 a 20 l/min, dependendo do volume da raiz da solda [31].

A Tabela 2.13 apresenta as informações sobre os gases de proteção utilizados em soldagem conforme a especificação AWS A5.32 [26].

Tabela 2.13 – Gases de proteção utilizados em soldagem [26].

Gas	Classificação AWS	Estado do produto	Pureza mínima %	Umidade máxima ppm (1)	Ponto de orvalho °C (2)
Argônio	SG-A	Gás	99,997	10,5	-60
		Líquido	99,997	10,5	-60
Hidrogênio	SG-H	Gás	99,95	32	-51
		Líquido	99,995 (3)	32	-51
Nitrogênio	SG-N	Gás	99,9	32	-51
		Líquido	99,998	4	-68

Notas:

(1) Especificação garantida para o cilindro na pressão máxima.

(2) Na umidade máxima a 1 atm.

(3) Incluindo hélio.

2.3.3 CONSUMÍVEIS PARA SOLDAGEM A ARCO DOS AID.

A seleção dos consumíveis para a soldagem dos AID deve ser realizada de modo a obterem-se no cordão de solda, como mínimo, as mesmas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão do metal base. Devido ao rápido resfriamento que ocorre no metal de solda, é necessário aumentar a formação de austenita para que o balanceamento de fases na condição como soldado não fique comprometido. Por esse motivo, os consumíveis de soldagem para os AID apresentam um teor de níquel superior ao do metal base [8][9]. A utilização de consumíveis com composição exatamente igual àquela do metal base deve ser considerada nos casos em que a peça soldada será submetida ao tratamento de solubilização [8].

A Tabela 2.14 lista os consumíveis para os AID conforme as normas AWS [26].

Tabela 2.14 – Consumíveis para soldagem a arco dos AID [26].

Especificação AWS	Classificação AWS	Composição nominal, % em vol.					
		Cr	Ni	Mo	N	Cu	W
A5.4	E2209-XX	22,5	9,5	3,0	0,15	-	-
	E2553-XX	25,5	7,5	3,4	0,17	2,0	-
	E2593-XX	25,0	9,5	3,4	0,20	2,5	-
	E2594-XX	25,5	10,0	4,0	0,25	-	-
	E2595-XX	25,5	9,0	3,8	0,25	0,7	0,7
A5.9	ER2209	22,5	8,5	3,0	0,15	-	-
	ER2553	25,5	5,5	3,4	0,20	2,0	-
	ER2594	25,5	9,2	3,5	0,25	-	-
A5.22	E2209TX-X	22,0	8,5	3,5	0,15	-	-
	E2553TX-X	25,5	9,5	3,4	0,18	2,0	-
	E2594TX-X	25,5	9,3	3,5	0,25	-	-
	EC2209	22,5	8,5	3,0	0,15	-	-
	EC2553	25,5	5,5	3,4	0,20	2,0	-
	EC2594	25,5	9,2	3,5	0,25	-	-
Notas: A5.4 – Specification for stainless steel electrodes for shielded metal arc welding. A5.9 – Specification for bare stainless steel welding electrodes and rods. A5.22 – Specification for stainless steel flux cored and metal cored welding electrodes and rods.							

2.3.4 QUALIFICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM DOS AID.

Segundo a Prática API RP 582 [30], um procedimento de soldagem é definido como: “Um documento que fornece as variáveis de soldagem requeridas para uma aplicação específica para assegurar a sua repetibilidade por soldadores e operadores de soldagem devidamente treinados” [30].

A qualificação dos procedimentos de soldagem é um requisito mandatório nos principais códigos e normas de equipamentos e tubulações para as indústrias de processo.

No caso de vasos de pressão e tubulações de processo, o código ASME Sec. IX [23] é amplamente utilizado para a qualificação dos procedimentos de soldagem. Esse código estabelece que as organizações devam preparar

procedimentos de soldagem escritos contendo todas as variáveis de cada processo de soldagem utilizado no procedimento. Um corpo de prova deverá ser soldado conforme as variáveis que constam do procedimento e submetido aos ensaios previstos no código. As variáveis utilizadas na soldagem dos corpos de prova e os resultados dos ensaios são registrados no documento Registro de Qualificação do Procedimento de Soldagem [23].

Devido aos cuidados necessários com a soldagem dos AID, especificações e normas com requisitos complementares aos do código ASME são comuns. O relatório técnico API TR 938-C, já citado neste trabalho, traz diversas recomendações adicionais àquelas do código ASME como, por exemplo, avaliação da microestrutura e da fração volumétrica de ferrita, dureza e ensaios de corrosão conforme método C da norma ASTM A923 [10][24].

Para a soldagem da ligação tubo-espelho de trocadores de calor e *"air coolers"*, objeto do presente trabalho, o código ASME Sec. IX requer a fabricação de um *"mockup"* representativo dessa ligação. O *"mockup"* deverá ter dez ligações soldadas [23]. O relatório técnico API TR 938-C também traz recomendações adicionais ao código para as ligações tubo-espelho [10].

2.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM.

A transferência de calor durante a soldagem a arco é a responsável pelas mudanças de fase que ocorrem na junta soldada e, portanto, tem influência direta na microestrutura e nas propriedades da mesma [33]. A variação das temperaturas ao longo do tempo, além de influenciar na microestrutura da

junta soldada, pode causar tensões residuais e distorções na estrutura soldada [33,34].

2.4.1 BALANÇO DE ENERGIA NA SOLDAGEM.

A eficiência do arco elétrico é definida como sendo a razão entre a energia absorvida pela peça e a energia total fornecida pelo arco elétrico. Durante a soldagem nem toda a energia fornecida pelo arco elétrico é absorvida pelo metal base. Ocorrem perdas por radiação e convecção na coluna do arco e por radiação a partir da superfície da peça [34].

A eficiência do arco elétrico depende do processo de soldagem utilizado. No caso da soldagem TIG, o tipo de corrente também influencia a eficiência do arco elétrico. No caso de corrente contínua eletrodo negativo (CCEN), maior calor é fornecido para a peça, portanto, é a condição que fornece maior eficiência [33].

Para o processo TIG CCEN a eficiência do arco elétrico se situa entre 60% e 80% [33].

2.4.2 HISTÓRIA TÉRMICA.

A história térmica de uma junta soldada é a representação gráfica da distribuição de temperaturas em uma peça durante a soldagem [33]. A história térmica é formada pela repartição térmica e pelos ciclos térmicos.

2.4.2.1 *REPARTIÇÃO TÉRMICA.*

Como pode ser visto na Figura 2.10, a repartição térmica representa a variação da temperatura máxima com relação à distância medida a partir do centro do cordão. A repartição térmica está relacionada com a ZAC [35].

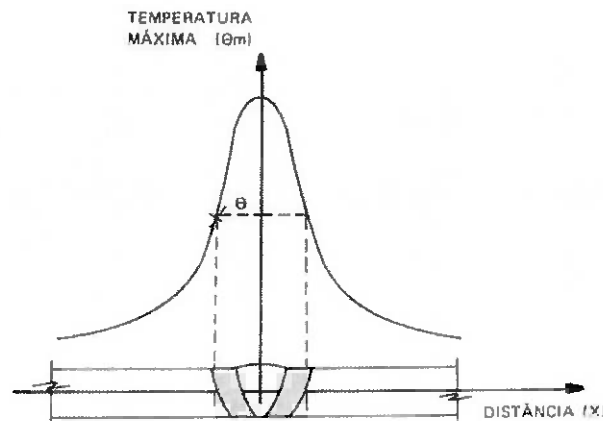


Figura 2.10 – Repartição térmica [35].

2.4.2.1 *CICLOS TÉRMICOS.*

Como pode ser visto na Figura 2.11, os ciclos térmicos representam a variação da temperatura ao longo do tempo com relação à distância medida a partir do centro do cordão. Os ciclos térmicos estão relacionados com as transformações de fase na ZAC [35].

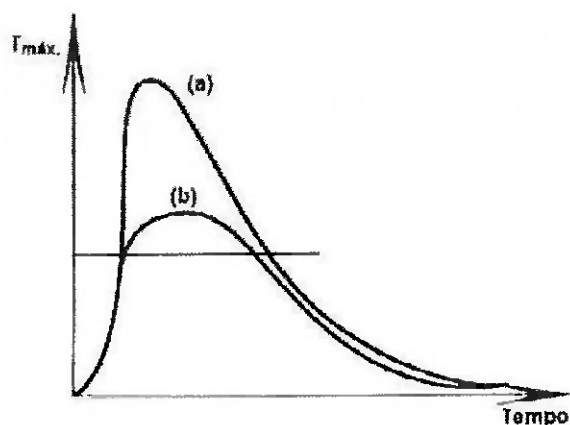


Figura 2.11 – Ciclos térmicos [35].

Na Figura 2.12 estão representados os ciclos térmicos de uma soldagem multipasses.

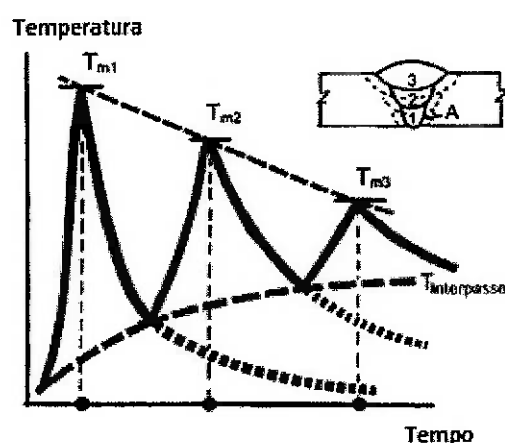


Figura 2.12 – Ciclos térmicos de uma solda de topo multipasses com relação ao ponto A [22].

2.4.3 CÁLCULOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM.

Algumas soluções simplificadas foram desenvolvidas para auxiliar nas previsões de temperaturas, tempos de resfriamento e extensão da ZAC nas juntas soldadas [34]. Algumas dessas soluções têm formulações diferentes para o

caso de chapas finas e de chapas grossas com relação ao fluxo de calor, isto é, se o fluxo de calor é bidimensional ou tridimensional. O adimensional na fórmula abaixo é utilizado para definir se uma chapa é fina ou grossa sob o ponto de vista de fluxo de calor [35]:

$$\tau = h \sqrt{\frac{\rho C (T_c - T_0)}{E}}$$

$$E = \eta \frac{V \cdot I}{v}$$

$\tau > 0,9 =$ chapa grossa

$\tau < 0,6 =$ chapa fina

A Figura 2.13 representa o fluxo de calor bidimensional e tridimensional em uma junta soldada.

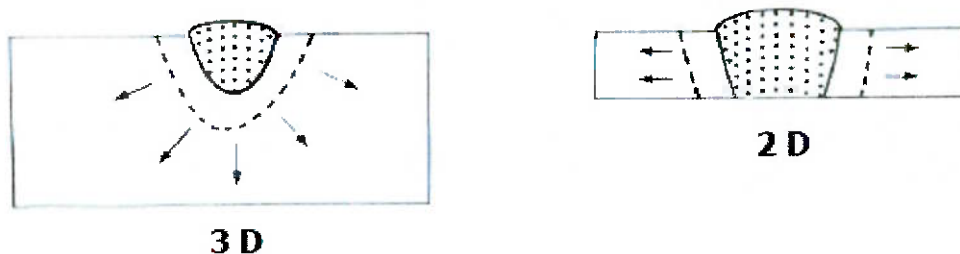


Figura 2.13 – Fluxo de calor tridimensional e bidimensional [35].

3. OBJETIVOS.

A partir da soldagem de um "*mockup*", representativo de uma união tubo-espelho de um "*air cooler*" em aço inoxidável UNS S31803, utilizando-se um procedimento qualificado, os objetivos deste trabalho são:

- avaliar se as soldas do "*mockup*" atendem os requisitos do relatório técnico TR 938-C do American Petroleum Institute – API.
- avaliar se o controle de temperatura interpasse é importante para a soldagem de tubos com espelho.

4. MATERIAIS E MÉTODOS.

4.1 MATERIAIS.

4.1.1 CHAPA:

Para a realização deste experimento foi utilizada uma amostra de chapa em AID, conforme especificação ASME SA-240 UNS S31803 [36], com espessura de 32 mm e medindo 190 mm X 270 mm. A composição química e as propriedades mecânicas da chapa, de acordo com o certificado do fabricante, constam das tabelas 4.1 e 4.2 respectivamente.

Tabela 4.1 - Composição química da chapa utilizada no experimento.

UNS	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	N
S31803	0,021	1,853	0,029	0,0006	0,260	4,941	22,373	2,518	0,1661

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas da chapa utilizada no experimento.

UNS	LE [MPa]	LR [MPa]	Alongamento [%]
S31803	547	731	34

4.1.2 TUBOS DE TROCA TÉRMICA.

Para a realização deste experimento foram utilizadas dez amostras de tubo em AID sem costura, conforme especificação ASME SA-789 UNS S31803 [37], com diâmetro externo de 25,4 mm e espessura 2,11 mm. A composição química e

as propriedades mecânicas dos tubos, de acordo com o certificado do fabricante, constam das tabelas 4.3 e 4.4 respectivamente.

Tabela 4.3 - Composição química dos tubos utilizados no experimento.

UNS	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	N
S31803	0,019	1,31	0,023	0,001	0,39	4,93	22,58	3,10	0,189

Tabela 4.4 – Propriedades mecânicas dos tubos utilizados no experimento.

UNS	LE [MPa]	LR [MPa]	Alongamento [%]
S31803	545	790	39,5

4.1.3 CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM.

Para as soldagens requeridas no experimento foram utilizadas varetas sólidas com diâmetro de 1,6 mm e comprimento de 900 mm. Na tabela 4.5 está informada a composição química das varetas utilizadas.

Tabela 4.5 – Composição química dos consumíveis utilizados no experimento.

Consumível	AWS	Certificado do Fabricante
Especificação AWS	A5.9	A5.9
Classificação AWS	ER2209	ER2209
UNS nr. / Código fabr.	S39209	WI T 2209
C	0,03 máx.	0,019
Cr	21,5 – 23,5	22,25
Ni	7,5 – 9,5	8,49
Mo	2,5 – 3,5	2,9
Mn	0,5 – 2,0	1,35
Si	0,9 máx.	0,45
P	0,03 máx.	0,016
S	0,03 máx.	0,013
N	0,08 – 0,20	0,12
Cu	0,75 máx.	0,06

4.2 PREPARAÇÃO DO "MOCKUP".

Apesar do objetivo deste trabalho não ser a elaboração de um procedimento de soldagem, foi preparado um *"mockup"* conforme os requisitos do parágrafo QW-193 do código ASME seção IX [23], utilizado para qualificar o procedimento de soldagem da ligação tubo espelho. Pela definição do ASME seção IX [23], *"mockup"* é um modelo que reproduz a furação existente no espelho e a configuração da junta soldada. A espessura mínima da chapa do *"mockup"* deverá ser igual àquela do espelho a ser produzido não necessitando, porém, ser superior a 50 mm [23].

4.2.1 USINAGEM:

Foram usinados dez furos na chapa, com arranjo idêntico ao do espelho a ser produzido, para atender o requisito do parágrafo QW-193.1 do código ASME seção IX [23] que requer dez cordões de solda para qualificação do procedimento de soldagem da ligação tubo espelho. No Anexo I está o desenho da chapa com a respectiva furação.

4.2.2 LIMPEZA:

Antes da soldagem dos tubos na chapa representativa do espelho, foi realizada a limpeza dos componentes com solvente visando à eliminação de todo e qualquer contaminante que poderia prejudicar o processo de soldagem.

4.2.3 SOLDAGEM:

A soldagem do "mockup" foi realizada utilizando-se o processo TIG manual com metal de adição. A soldagem foi realizada com a chapa representativa do espelho na posição vertical.

Das dez juntas do "mockup", sete foram soldadas em estrita observância ao procedimento qualificado (tubos de 1 a 7 da Figura 4.2) e três foram soldadas sem atender os requisitos de temperatura máxima interpasses (tubos A, B e C da Figura 4.2).

4.2.3.1 EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM.

Foi utilizada uma fonte retificadora marca Titan, modelo RSA-375. Foi utilizada uma tocha sem refrigeração.

4.2.3.2 PARÂMETROS DE SOLDAGEM.

A soldagem dos tubos na chapa foi realizada com dois passes, obedecendo-se os parâmetros indicados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Parâmetros de soldagem utilizados na produção do "mockup".

Parâmetro	1º passe	2º passe
Gás de proteção	98,3% Ar + 1,7% N ₂	98,3% Ar + 1,7% N ₂
Vazão do gás de proteção (l/min)	12 a 18	12 a 18
Gás de purga	NA	NA
Tensão do arco (V)	10 a 11	10 a 11
Corrente de soldagem (A)	90 a 95	85 a 90
Energia de soldagem (kJ/mm)	1,2 máx.	1,2 máx.
Temperatura mínima de pré-aquecimento (°C)	20	20
Temperatura máxima interpasses (°C)	75	75
Posição de soldagem	Vertical	Vertical
Progressão da soldagem	Ascendente	Ascendente
Nota: soldagem realizada com CCEN.		

4.2.3.3 ELETRODO NÃO CONSUMÍVEL.

O eletrodo de tungstênio não consumível utilizado na tocha TIG foi o 2%Th de diâmetro 2,4 mm de acordo com a especificação AWS A5.12 classificação EWTh-2. O ângulo de afiação utilizado foi 30°.

4.2.3.4 MEDIÇÃO DO CICLO TÉRMICO.

Para medir o ciclo térmico produzido pela soldagem dos tubos na chapa do "mockup", foram instalados termopares nas posições indicadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Localização dos termopares nos componentes do "mockup".

Componente	Quantidade de termopares	Localização dos termopares
Tubos	03 termopares por tubo	No interior do tubo a 3, 6 e 7,5 mm da extremidade externa do mesmo.
Chapa	02 termopares por furo	Um par por furo na face externa da chapa, localizados a 1 mm da borda do chanfro.

A coleta dos dados da leitura dos termopares foi realizada utilizando-se um sistema de coleta de dados fabricado pela IMC Soldagem. A Figura 4.1 mostra a localização dos termopares no interior dos tubos e na chapa.



Figura 4.1 – Localização dos termopares, ponto de início e progressão da soldagem do "mockup".

Os ensaios do "mockup" foram realizados para duas ligações soldadas, sendo uma selecionada entre os tubos que seguiram o procedimento qualificado (tubo 7) e outra selecionada entre os tubos em cuja soldagem não foi observada a temperatura máxima interpasses (tubo B). A Figura 4.2 mostra o "mockup" soldado e as juntas escolhidas para a realização dos ensaios.

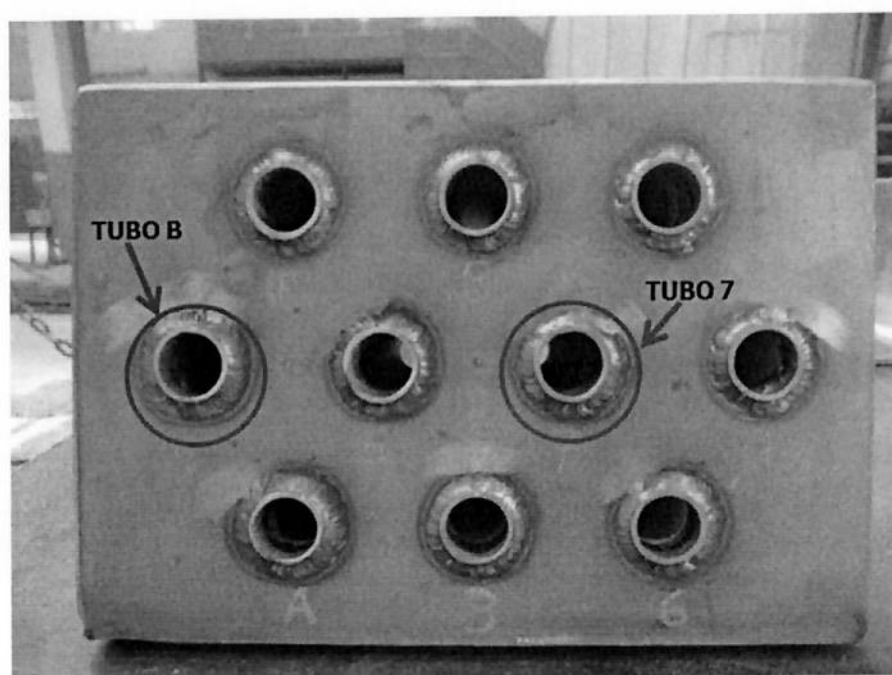


Figura 4.2 – Juntas ensaiadas do "mockup".

4.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.

Os ensaios não destrutivos (ENDs) das soldas do "mockup" foram realizados após a conclusão das mesmas. Na tabela 4.8 estão relacionados os ENDs aplicados, as normas e os respectivos critérios de aceitação.

Tabela 4.8 – Ensaios não destrutivos das soldas do "mockup".

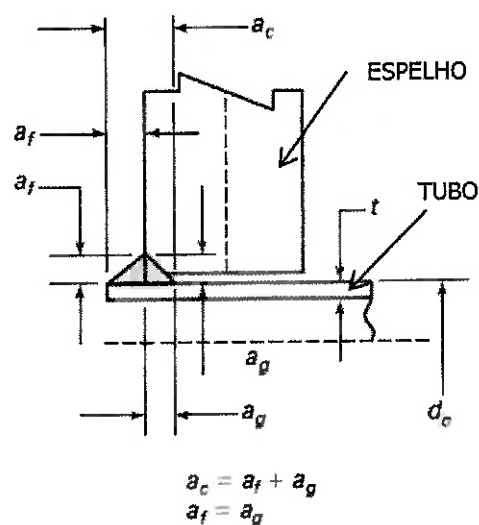
Ensaio	Descontinuidade	Critério de aceitação	Referência
Visual	Falta de fusão	Não aceitável	QW-193.1.1 [23]
	Trincas	Não aceitável	QW-193.1.1 [23]
	Porosidade	Não aceitável	QW-193.1.1 [23]
	Perfuração do tubo	Não aceitável	QW-193.1.1 [23]
Líquido penetrante	Indicações lineares relevantes acima de 1,6 mm	Não aceitável	QW-195.2.2 [23]
	Indicações arredondadas relevantes acima de 5 mm	Não aceitável	QW-195.2.2 [23]
	Quatro ou mais indicações arredondadas relevantes em linha com espaçamento menor ou igual a 1,6 mm	Não aceitável	QW-195.2.2 [23]
Nota: indicações relevantes são aquelas com dimensões principais maiores do que 1,6 mm.			

4.4 MACROGRAFIAS.

As soldas do "mockup" foram seccionadas na linha de centro dos tubos escolhidos deixando expostas quatro superfícies por tubo. A região das soldas foi atacada com água régia por 5 minutos para revelar a extensão do metal de solda e da ZAC [23,38]. As superfícies foram examinadas com um aumento de 10X para avaliar a existência de descontinuidades. A Tabela 4.9 relaciona as descontinuidades investigadas e o respectivo critério de aceitação.

Tabela 4.9 – Análise das macrografias das soldas do "mockup".

Ensaio	Descontinuidade	Critério de aceitação	Referência
Macrografia	Dimensões do caminho preferencial de vazamento menores do que as mínimas de projeto (nota 1)	Não aceitável	QW-193.1.3.a [23]
	Trincas	Não aceitável	QW-193.1.3.b [23]
	Falta de fusão na chapa ou na parede do tubo	Não aceitável	QW-193.1.3.c [23]
	Falta de penetração (nota 2)	Não aceitável	QW-193.1.3.d [23]
	Porosidade que cause redução na garganta da solda abaixo do mínimo requerido.	Não aceitável	QW-193.1.3.e [23]
Notas: 1. As dimensões mínimas do caminho de vazamento estão representadas na Figura 4.3 e na tabela 4.9. 2. A penetração na raiz da solda deverá ser de no mínimo 0,4 mm.			

**Figura 4.3** – Corte com as dimensões da ligação tubo espelho [6].

Na Tabela 4.10 estão indicadas as dimensões mínimas da solda de ligação tubo espelho com base no parágrafo UW-20 do código ASME Sec. VIII div. 1 [6]. As dimensões adotadas no projeto também estão informadas.

Tabela 4.10 – Dimensões da ligação tubo espelho conforme figura 4.3.

Dimensão	Mínima ASME (mm)	Adotada no projeto (mm)
a_c	2,7	6,0
a_f	1,35	3,0
a_d	1,35	3,0
garganta	0,95	2,1

4.5 MICROGRAFIAS.

A elaboração de micrografias da ligação tubo espelho não é um requisito do ASME Sec. IX [23] para a qualificação do procedimento de soldagem, porém, é um requisito presente no relatório API TR 938-C [10].

4.5.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.

As soldas selecionadas do mockup foram seccionadas por meio de serra e preparadas para a micrografia conforme norma ASTM E3 [39]. Essa preparação consistiu das seguintes etapas:

- 1 Lixamento com grana 80, 150, 320, 600 e 1200.
- 2 Polimento com pasta de diamante de 3 μm e 1 μm .
- 3 Ataque químico com solução de NaOH por 1 minuto.

4.5.2 CONTAGEM DE FERRITA.

A contagem de ferrita foi realizada pelo método descrito na norma ASTM E1245 [27] nas seguintes localizações [10]:

- Metal base: uma medição de cada lado da solda no meio do chanfro (total de duas medições).

- Metal de solda: três medições próximas da linha de centro vertical do cordão sendo uma na raiz, uma no acabamento e outra no meio da espessura (total de três medições).
- ZAC: uma medição de cada lado da solda na raiz e no acabamento da solda (total de quatro medições).

A Tabela 2.12 apresenta o critério de aceitação para o teor de ferrita na ligação tubo espelho.

4.5.3 PRECIPITAÇÃO DE FASES INTERMETÁLICAS.

A precipitação de fases intermetálicas foi avaliada conforme norma ASTM A923 método A [24] e relatório API TR 938-C [10]. A superfície da amostra foi analisada em microscópio ótico com aumento de 400X.

4.6 DUREZA.

Em cada uma das amostras preparadas para micrografia foram realizadas medições de dureza conforme abaixo:

- Metal base: duas medições, uma de cada lado da solda. Ensaio de dureza Vickers com carga de 10 kg (HV_{10}).
- Metal de solda: quatro medições. Ensaio de dureza Vickers com carga de 10 kg (HV_{10}).
- ZAC: seis medições, três de cada lado da solda. Ensaio de dureza Vickers com carga de 5 kg (HV_5).

Na Tabela 4.11 estão os valores admissíveis de dureza.

Tabela 4.11 – Valores de dureza admissíveis nas soldas do mockup [10].

	Média das medições	Valor individual
Dureza	≤ 310 HV	≤ 320 HV

A Figura 4.4 mostra os locais onde foram obtidas as medições de dureza de cada amostra.

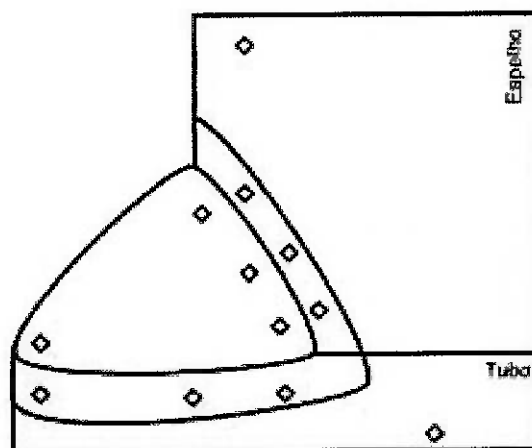


Figura 4.4 – Corte com a localização das medições de dureza.

4.7 CORROSÃO.

Um setor de cada uma das duas ligações tubo espelho selecionadas, foi submetido a um ensaio de corrosão conforme norma ASTM A923 método C [24]. Apesar da norma ASTM A923 especificar que o ensaio seja realizado a 22°C, o mesmo foi realizado a 40°C, conforme requisito do relatório técnico API TR 938-C [10].

As amostras foram mantidas por 24 horas em uma solução de cloreto de ferro a 40°C. As amostras foram pesadas antes e depois do ensaio para avaliar a perda de peso. A taxa de corrosão foi calculada conforme abaixo:

Taxa de corrosão (mdd) = perda de peso (mg) / [área da amostra (dm²) x tempo (dias)] **(4.1)**

O critério de aceitação da ASTM A923 é que a taxa de corrosão deverá ser menor do que 10 mdd e o critério do relatório técnico API TR 938-C [10] é que as amostras estejam isentas de corrosão por pites depois de concluído o ensaio.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

5.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.

Exceto por uma deposição insuficiente na soldagem do tubo 7, não foram detectadas descontinuidades no ensaio visual e por líquido penetrante nas ligações soldadas do "mockup". Optou-se por não reparar a descontinuidade detectada na solda do tubo 7, já que a sua localização não causaria prejuízo aos ensaios realizados.

5.2. MACROGRAFIAS.

A Figura 5.1 apresenta as macrografias dos tubos B e 7.

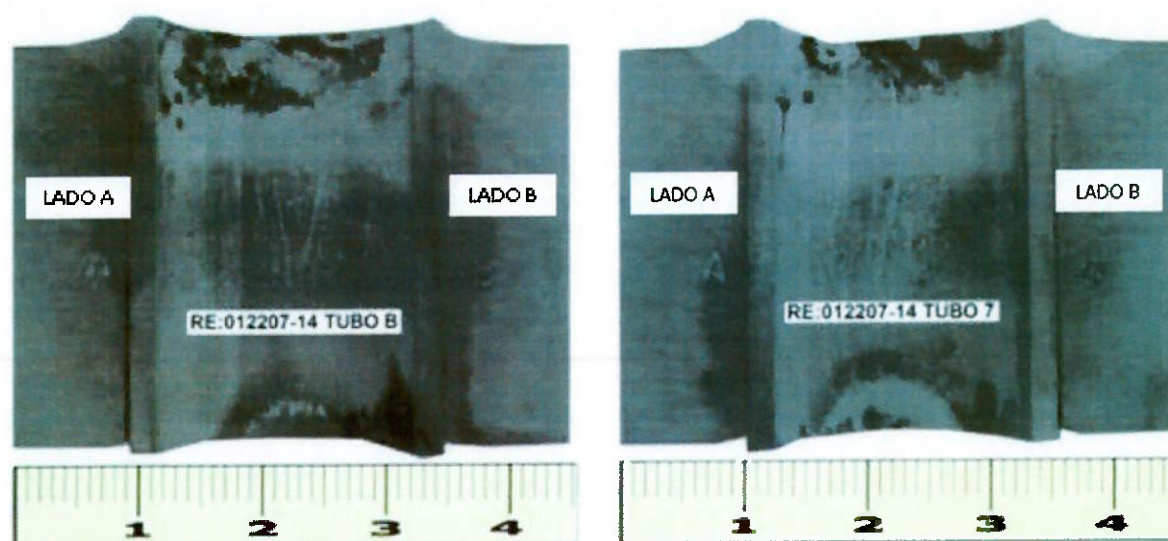


Figura 5.1 – Macrografias dos tubos B e 7.

As ligações soldadas não apresentam nenhuma das descontinuidades indicadas na Tabela 4.9 e as dimensões da solda atendem os requisitos do projeto e do código ASME Seção IX [23], conforme pode ser visto na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dimensões obtidas na análise das macrografias dos tubos B e 7.

Tubo	Lado	Garganta (mm)		Penetração (mm)	
		Obtida	Especificada	Obtida	Especificada
B	A	3	2,1	0,7	0,4
B	B	3	2,1	0,5	0,4
7	A	3	2,1	0,5	0,4
7	B	3	2,1	0,6	0,4

Nota: lados A e B conforme Figura 5.1.

5.3 MICROGRAFIAS.

5.3.1 CONTAGEM DE FERRITA.

Na Tabela 5.2 constam os valores obtidos na medição do teor de ferrita para as amostras dos tubos 7 e B, mostrados na figura 4.2, conforme prática ASTM E1245 [27]. Todos os valores obtidos encontram-se dentro da faixa especificada pelo relatório técnico API TR 938-C [10], mesmo para o tubo B, que foi soldado sem que fosse observada a temperatura mínima interpasses.

É possível observar que os valores do teor de ferrita no MS e ZAC do tubo 7 são sempre superiores aos encontrados para o tubo B e bem próximos ao limite superior da faixa de aceitação especificada.

Os valores elevados de ferrita podem ter relação com os tempos de resfriamento encontrados (Tabela 5.5) que são menores do que o tempo mínimo de resfriamento recomendado, isto é, Δt_{12-8} maior do que 10 segundos.

A geometria da ligação, com a chapa do espelho de espessura elevada, pode

ter contribuído para o rápido resfriamento da solda e, assim, provocando a retenção de mais ferrita na microestrutura.

Seria prudente incorporar ao procedimento de soldagem medidas para diminuir a taxa de resfriamento de modo a reduzir o teor de ferrita retida na microestrutura. Um aumento na temperatura de pré-aquecimento, na temperatura interpasses e/ou na energia de soldagem são alternativas que podem ser estudadas para melhorar esse requisito, observando as recomendações e os limites estabelecidos em 2.3.1.

Tabela 5.2 – Medição do teor de ferrita nas soldas do "mockup".

LOCAL	TEOR DE FERRITA %		
	MEDIDO PARA O TUBO 7	MEDIDO PARA O TUBO B	ESPECIFICADO
MS face	56,00	53,00	25 a 60
MS centro da solda	57,50	56,00	25 a 60
MS raiz	58,50	49,86	25 a 60
ZAC espelho face	64,90	58,89	40 a 65
ZAC espelho raiz	65,00	64,60	40 a 65
ZAC tubo face	62,74	60,96	40 a 65
ZAC tubo raiz	63,67	62,66	40 a 65
MB espelho	49,38	54,58	30 a 65
MB tubo	53,00	48,00	30 a 65

5.3.2 PRECIPITAÇÃO DE FASES INTERMETÁLICAS.

A análise realizada nas amostras dos tubos B e 7, conforme norma ASTM A923 método A [24], não apontou a existência de fases intermetálicas nas juntas soldadas. As Figuras 5.2 a 5.9 mostram algumas das micrografias obtidas na análise dos tubos 7 e B.

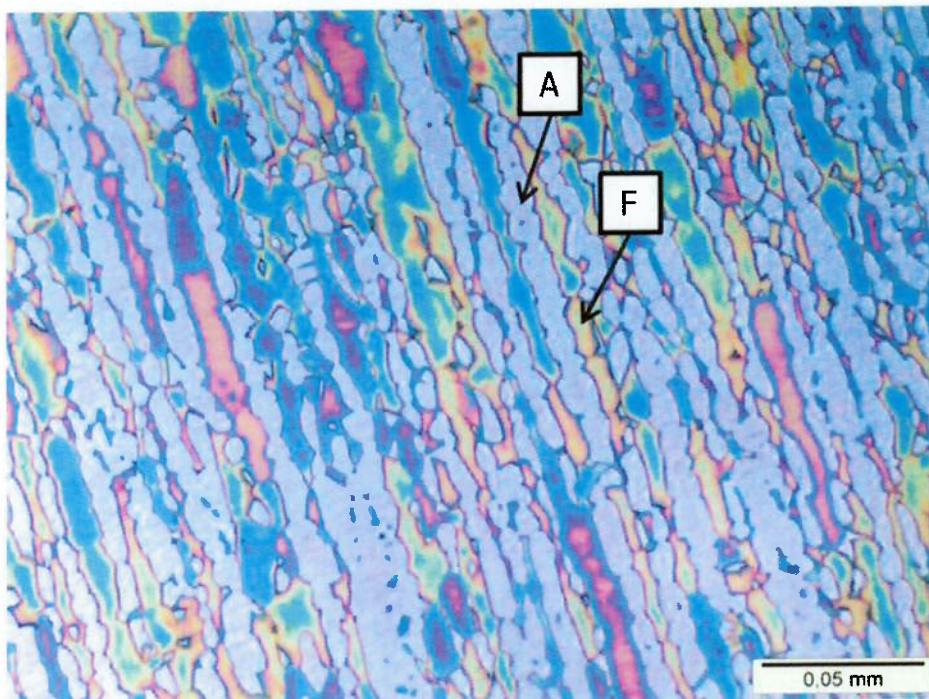


Figura 5.2 – Micrografia do MB tubo 7 (tubo). Ataque eletrolítico com solução de 40%_{vol} de NaOH. Aumento de 400X. A: austenita; F: ferrita.

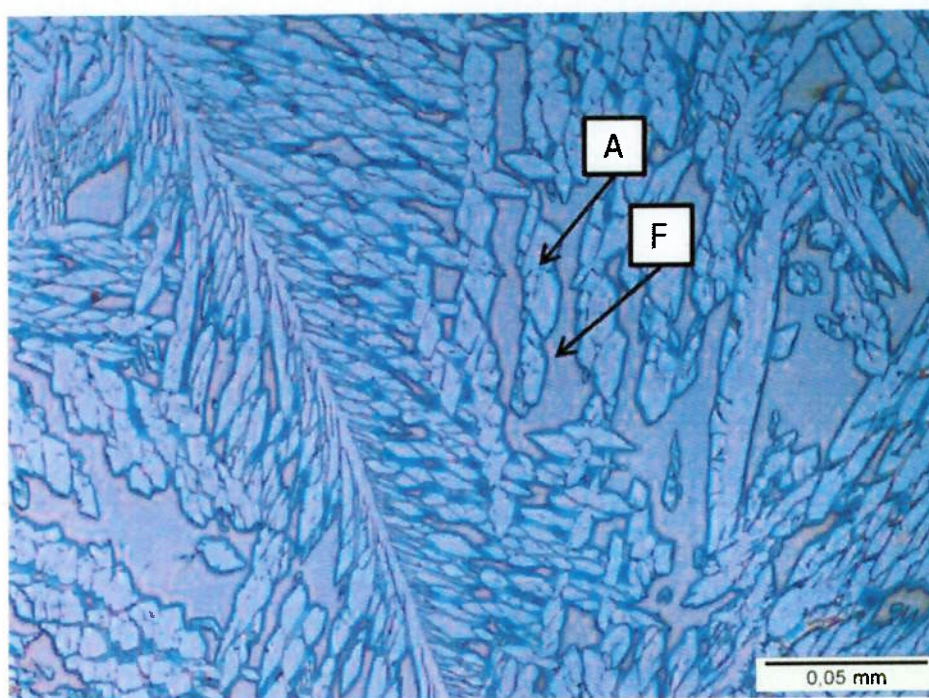


Figura 5.3 – Micrografia do MS tubo 7 no centro do cordão. Ataque eletrolítico com solução de 40%_{vol} de NaOH. Aumento de 400X. A: austenita; F: ferrita.

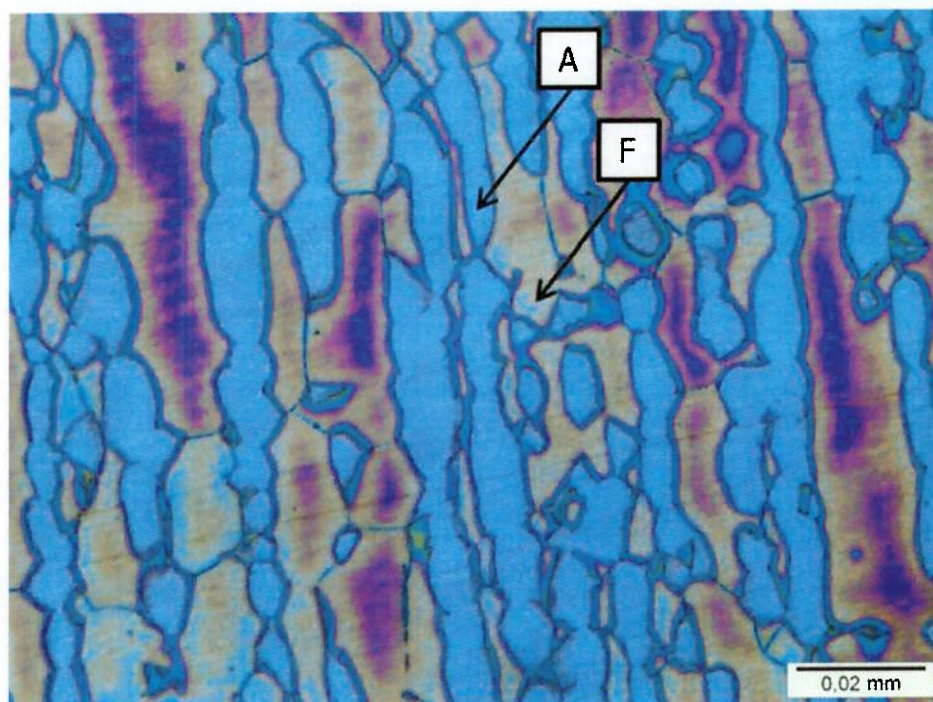


Figura 5.4 – Micrografia da ZAC na raiz tubo 7 (lado do tubo). Ataque eletrolítico com solução de 40%_{vol} de NaOH. Aumento de 1000X. A: austenita; F: ferrita.

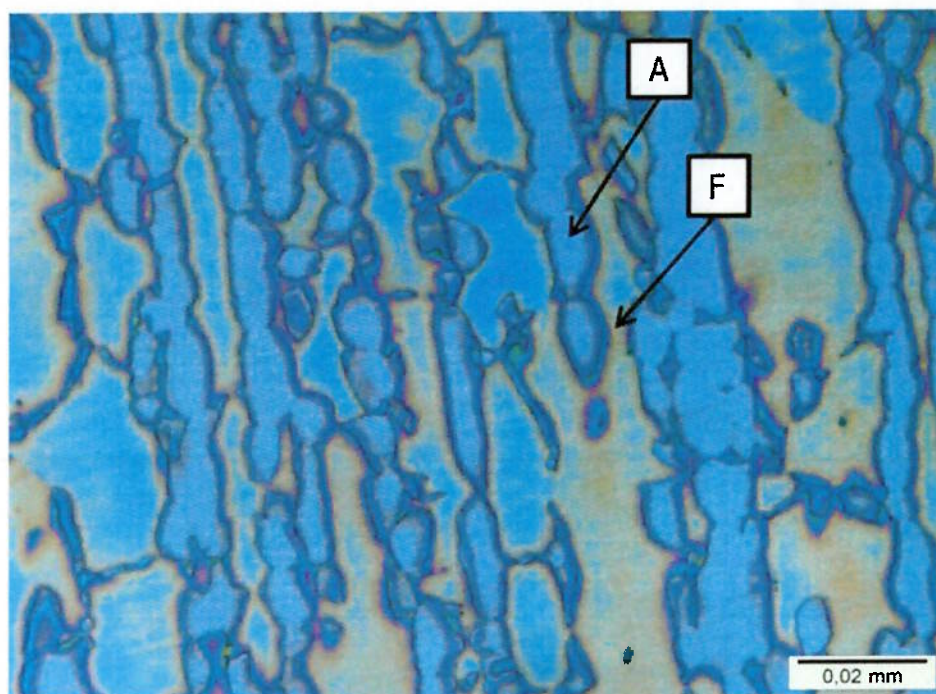


Figura 5.5 – Micrografia da ZAC no acabamento tubo 7 (lado do tubo). Ataque eletrolítico com solução de 40%_{vol} de NaOH. Aumento de 1000X. A: austenita; F: ferrita.

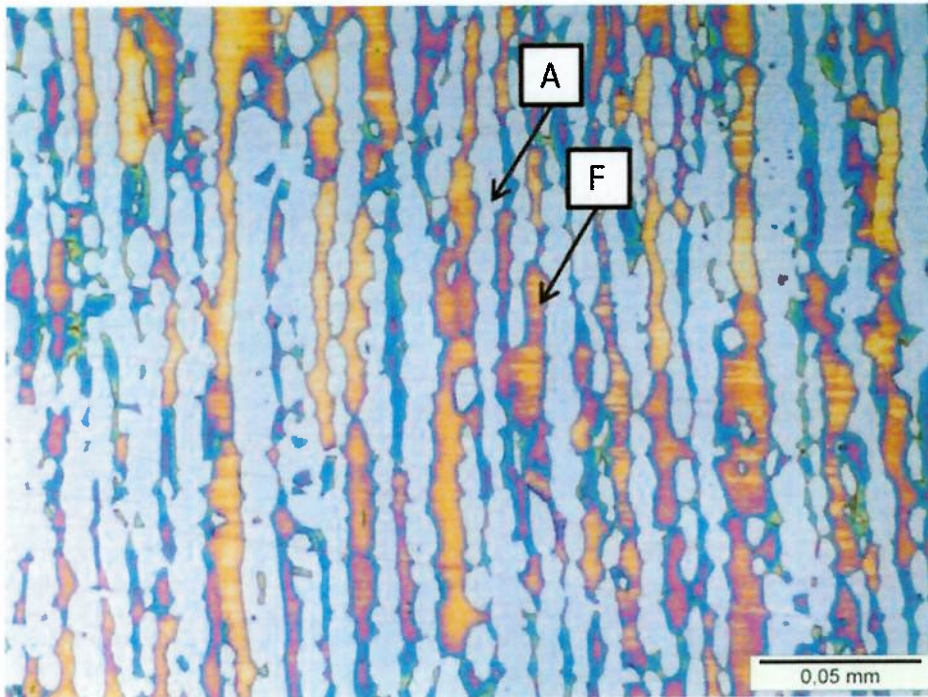


Figura 5.6 – Micrografia do MB tubo B (tubo). Ataque eletrolítico com solução de 40%_{vol} de NaOH. Aumento de 400X. A: austenita; F: ferrita.

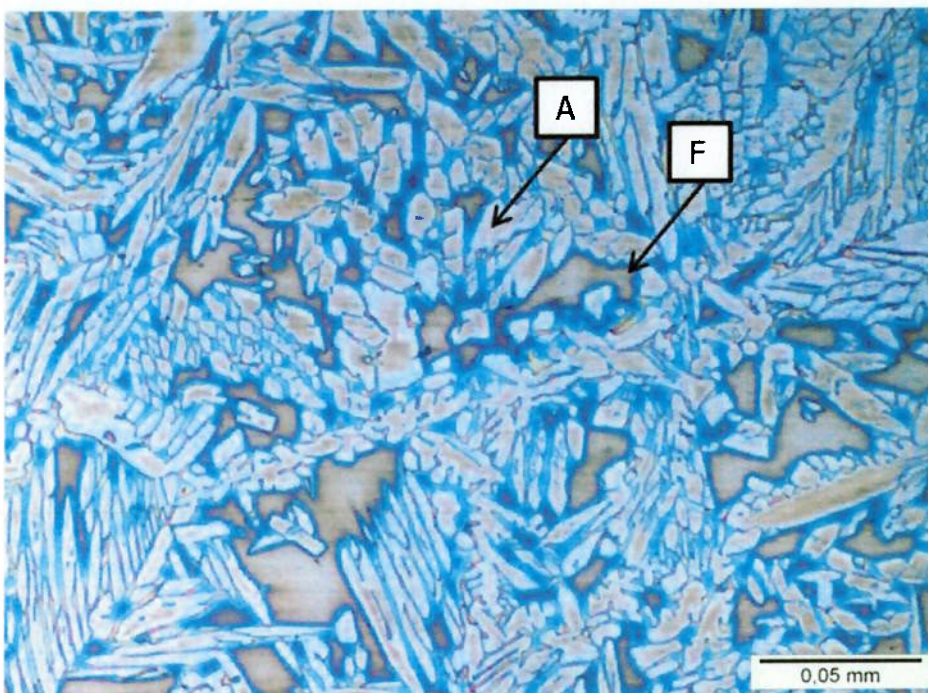


Figura 5.7 – Micrografia do MS tubo B no centro do cordão. Ataque eletrolítico com solução de 40%_{vol} de NaOH. Aumento de 400X. A: austenita; F: ferrita.

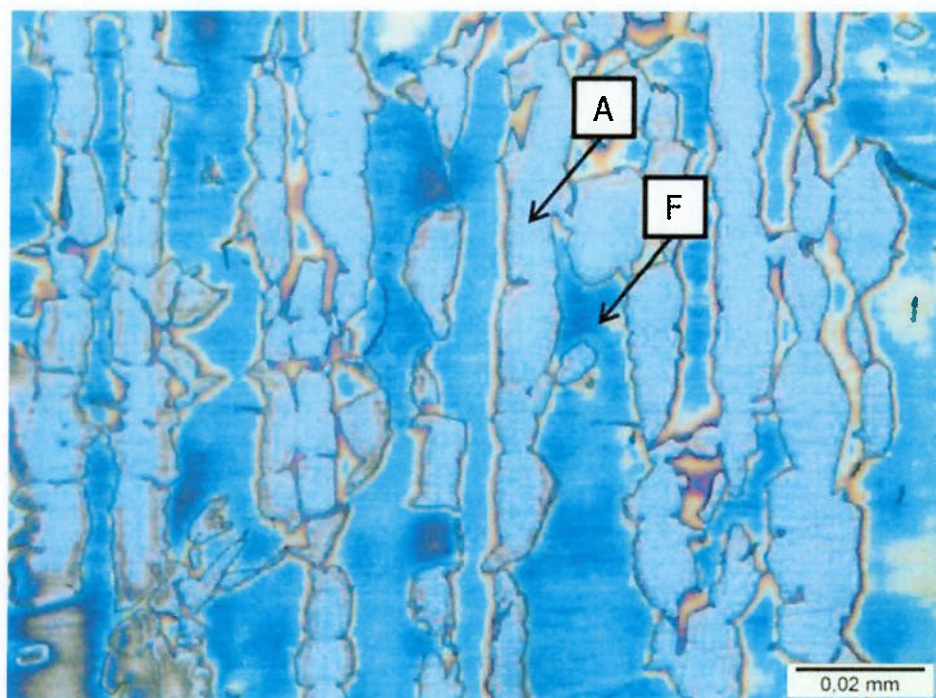


Figura 5.8 – Micrografia da ZAC na raiz tubo B (lado do tubo). Ataque eletrolítico com solução de 40%_{vol} de NaOH. Aumento de 1000X. A: austenita; F: ferrita.

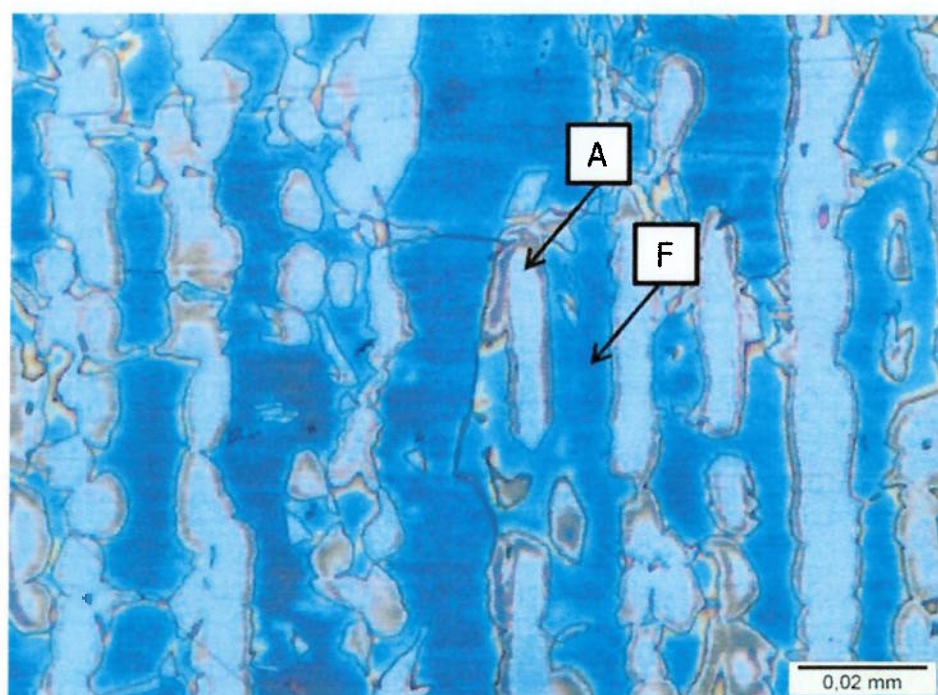


Figura 5.9 – Micrografia da ZAC no acabamento tubo B (lado do tubo). Ataque eletrolítico com solução de 40%_{vol} de NaOH. Aumento de 1000X. A: austenita; F: ferrita.

5.4 DUREZA.

As medições de dureza realizadas nas amostras atendem os critérios do relatório API TR 938-C [10], conforme valores listados na Tabela 5.3.

Nas ligações soldadas dos AID, a dureza da ZAC e do MS é normalmente superior à do metal base. O aumento da dureza nessas regiões é causado pelas deformações decorrentes do ciclo térmico da soldagem [40].

Tabela 5.3 – Valores das medições de dureza realizadas nas soldas dos tubos B e 7.

Tubo	Lado	Local	Valores obtidos HV	Valores admissíveis HV	
				Média	Individual
B	A	MB tubo	246	≤310	≤320
		ZAC tubo	263, 249, 240		
		MS	258, 247, 259, 239		
		ZAC espelho	228, 242, 233		
		MB espelho	244		
B	B	MB tubo	247	≤310	≤320
		ZAC tubo	248, 243, 243		
		MS	243, 240, 245, 238		
		ZAC espelho	239, 243, 238		
		MB espelho	231		
7	A	MB tubo	238	≤310	≤320
		ZAC tubo	243, 243, 243		
		MS	252, 254, 254, 252		
		ZAC espelho	264, 243, 243		
		MB espelho	231		
7	B	MB tubo	247	≤310	≤320
		ZAC tubo	250, 250, 253		
		MS	252, 244, 251, 253		
		ZAC espelho	235, 248, 243		
		MB espelho	247		

Nota: lados A e B conforme Figura 5.1.

5.5 CORROSÃO.

As amostras ensaiadas conforme norma ASTM A923 método C estavam isentas de pites e apresentaram uma taxa de corrosão inferior ao limite da norma, isto é, 10 mdd. A Tabela 5.4 mostra os resultados obtidos no ensaio de corrosão.

A taxa de corrosão medida no corpo de prova do tubo 7 apresentou valor superior àquela medida no corpo de prova do tubo B. A possível causa dessa diferença nas taxas de corrosão é a maior susceptibilidade das soldas do tubo 7 devido ao maior teor de ferrita na microestrutura.

Tabela 5.4 – Valores obtidos no ensaio de corrosão das amostras dos tubos B e 7.

Tubo	Area total da amostra dm ²	Peso inicial da amostra g	Peso final da amostra g	Perda de peso g	Taxa de corrosão mdd
B	0,3478	42,6635	42,6630	0,0005	1,4376
7	0,3317	37,8945	37,8930	0,0015	4,5221

5.6 CICLOS TÉRMICOS.

Foi possível registrar os ciclos térmicos de algumas das ligações soldadas do "mockup". A Figura 5.10 mostra o arranjo típico dos termopares em uma ligação tubo espelho do "mockup". A numeração dos termopares é a que consta dos ciclos térmicos das Figuras 5.11 a 5.14.

Na Tabela 5.5 constam as informações relevantes das juntas soldadas dos tubos 7 e B: temperaturas máximas registradas por cada termopar, tempo de resfriamento de 1.200°C a 800°C (Δt_{12-8}) e de 900°C a 700°C (Δt_{9-7}). Alguns termopares fundiram durante a soldagem impossibilitando os registros correspondentes.

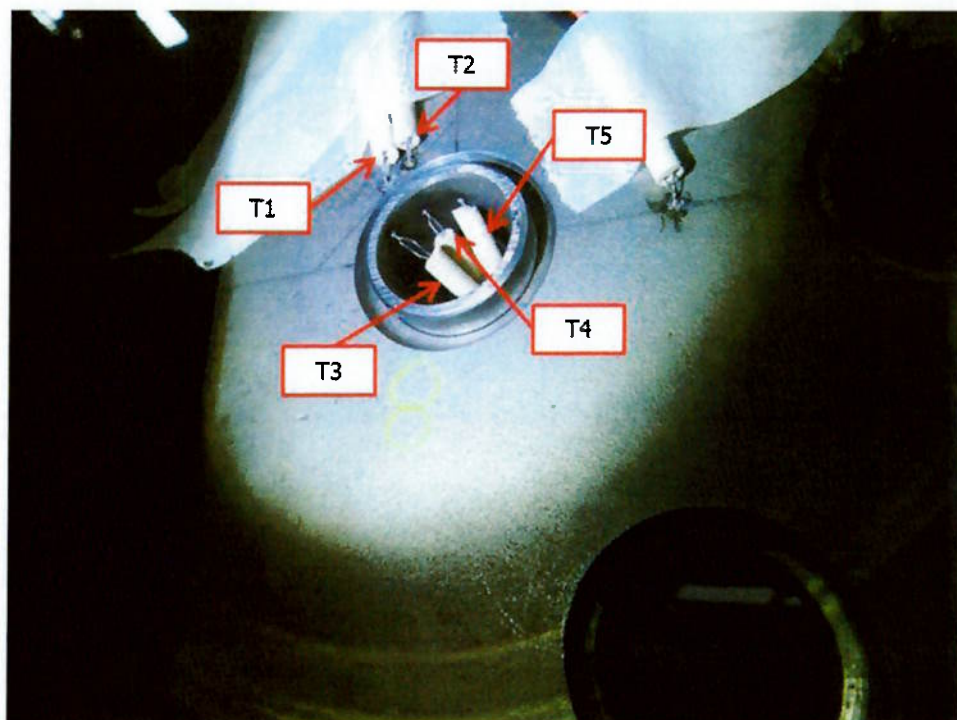


Figura 5.10 – Arranjo típico dos termopares nas ligações soldadas do "mockup".

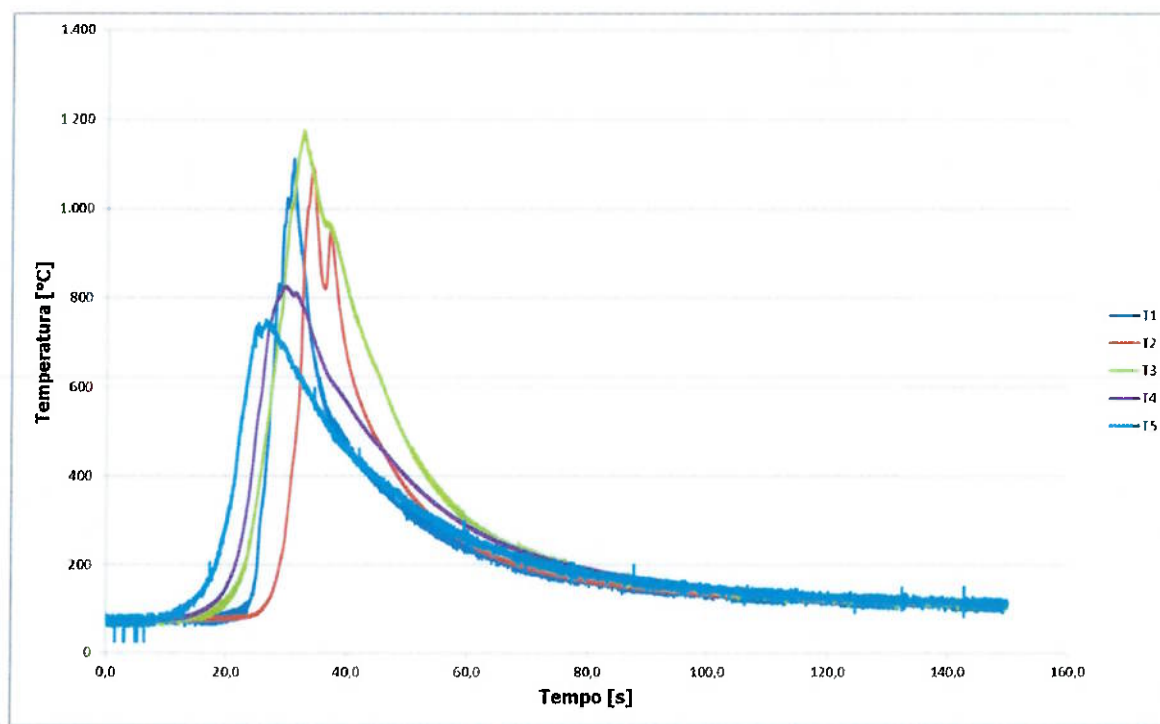


Figura 5.11 – Gráficos do ciclo térmico do passe de raiz do tubo 7.

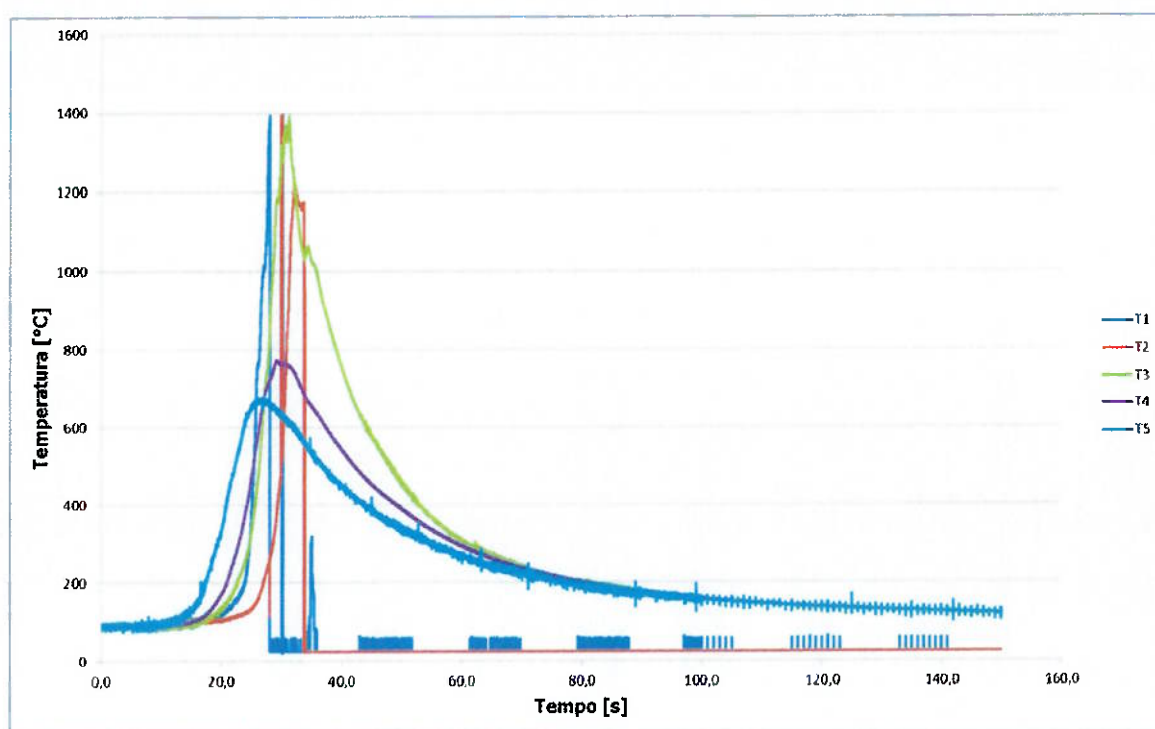


Figura 5.12 – Gráficos do ciclo térmico do passe de acabamento do tubo 7.

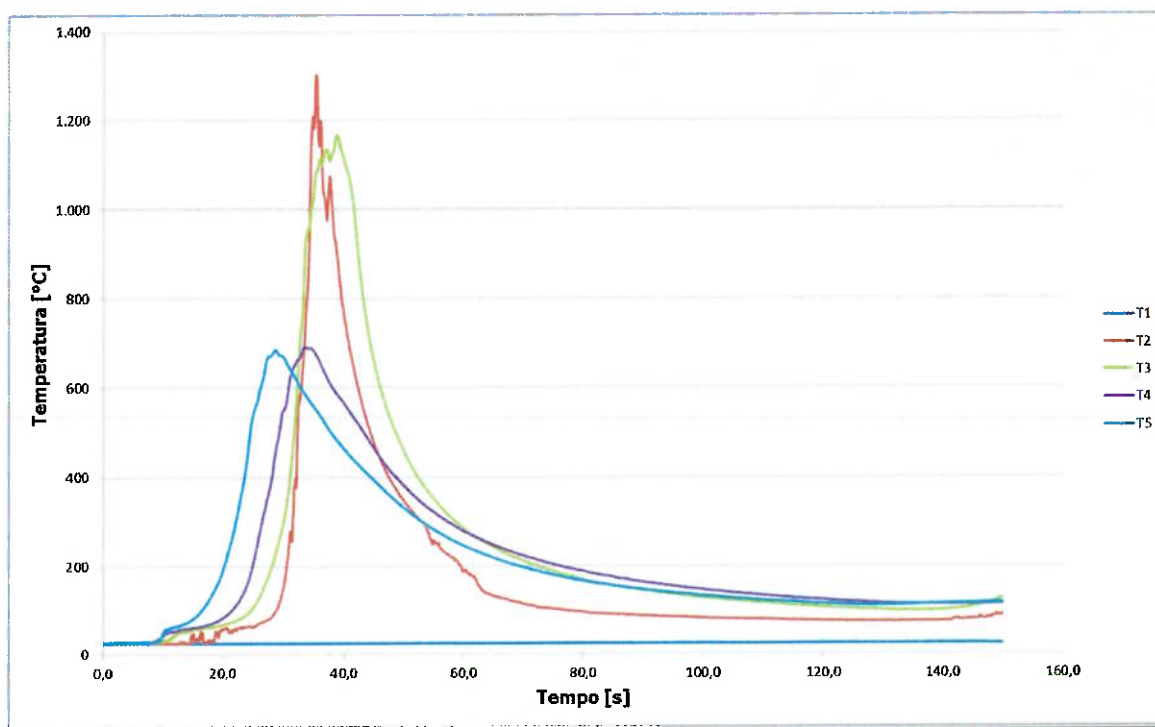


Figura 5.13 – Gráficos do ciclo térmico do passe de raiz do tubo B.

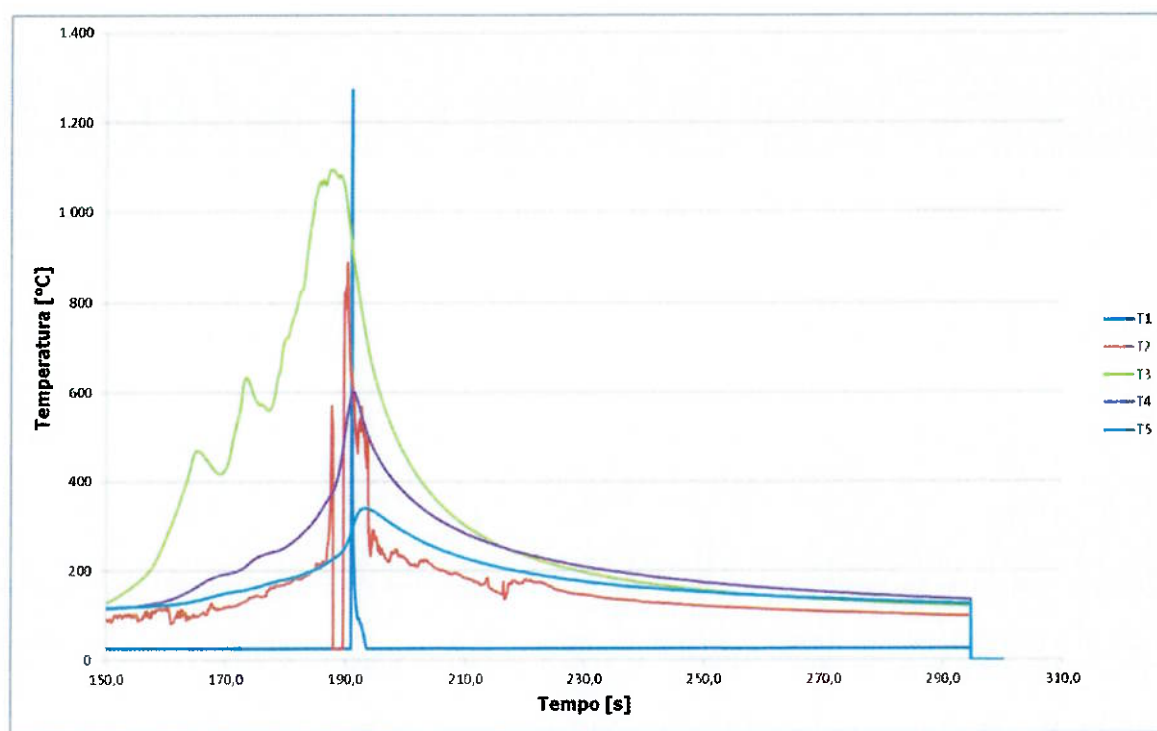


Figura 5.14 – Gráficos do ciclo térmico do passe de acabamento do tubo B.

Tabela 5.5 – Valores das temperaturas máximas e tempos de resfriamento registrados durante a soldagem dos tubos B e 7.

Tubo / Passe	Termopar (1)	Temp. Max. °C	Δt_{12-8} s	Δt_{9-7} s
B acabamento	T1	(5)	(5)	(5)
	T2	890	(4)	(4)
	T3	1.094	(4)	2,5
	T4	602	(3)	(3)
	T5	341	(3)	(3)
B raiz	T1	(5)	(5)	(5)
	T2	1.302	4	1,9
	T3	1.166	(4)	2
	T4	692	(3)	(3)
	T5	685	(3)	(3)
7 acabamento	T1	1.394	(2)	(2)
	T2	1.394	(2)	(2)
	T3	1.394	6,8	4,1
	T4	774	(3)	(4)
	T5	678	(3)	(3)
7 raiz	T1	1.112	(4)	1,7
	T2	1.093	(4)	4,2
	T3	1.177	7,6 (4)	4,4
	T4	827	(4)	(4)
	T5	750	(3)	(4)
NOTAS:				
(1) A numeração dos termopares está de acordo com a Figura 5.10.				
(2) Os termopares fundiram ao atingirem a temperatura máxima, portanto, não houve registros durante o resfriamento.				
(3) Não tem registros na faixa das temperaturas de interesse.				
(4) Não foi atingida a temperatura máxima da faixa de interesse.				
(5) Houve mau funcionamento do termopar gerando registros inadequados que não foram considerados neste estudo.				

6. CONCLUSÕES.

O procedimento de soldagem utilizado atende os requisitos do relatório técnico API TR 938-C, isto é: não foram detectadas fases deletérias conforme ASTM A923 método A, os teores de ferrita medidos (de 48,00 a 54,58% para o MB, de 58,89 a 65,00% para a ZAC e de 49,86 a 58,50% para o MS) encontram-se dentro da faixa estabelecida pelo relatório API (de 30 a 65% para o MB, de 40 a 65% para a ZAC e de 25 a 60% para o MS), as durezas medidas (de 228 a 264HV) estão abaixo dos limites máximos admissíveis do relatório API (média $\leq 310\text{HV}$ e individual $\leq 320\text{HV}$) e o ensaio de corrosão conforme método C da norma ASTM A923, realizado a 40°C, apresentou taxas de corrosão (4,5221 mdd para o tubo 7 e 1,4376 mdd para o tubo B) inferiores ao limite máximo fixado pelo relatório API (10 mdd).

A soldagem do tubo B sem controle da temperatura interpasses não causou, para o caso em estudo, nenhum resultado insatisfatório. Caso se opte pela soldagem de ligações tubo-espelho sem o controle da temperatura interpasses, recomenda-se que seja qualificado um procedimento para essa condição, observando todos os requisitos do relatório técnico API TR 938-C.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

1. Verificar a influência da espessura do espelho na microestrutura da ligação tubo espelho de permutadores de calor em AID.
2. Estudar o efeito cumulativo dos ciclos térmicos durante a fabricação e o reparo das ligações tubo espelho em AID.
3. Desenvolver um procedimento para soldagem orbital da ligação tubo espelho e elaborar um comparativo de produtividade com o processo manual.
4. Verificar a influência da temperatura interpases na soldagem de ligações tubo espelho em AID.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. CHEREMISINOFF, N. P. Handbook of Chemical Processing Equipment. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000. 535 p.
2. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Air-cooled Heat Exchangers for General Refinery Service: API Standard 661. 6º Ed. Washington. 115 p. 2006.
3. GEA Air-Cooled Heat Exchangers. Produzido Por GEA Batignoles Technologies Thermiques. Disponível em: <http://www.btt-nantes.com/opencms/export/sites/default/galleries/btt_gallery/brochure/GEABttGBJan2011.pdf> Acessado em: Out/2014.
4. PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. - PETROBRAS. Projeto e Fabricação de Resfriador a Ar: N-1858. Rev. B (1º emenda). Rio de Janeiro. 27 p. 2011.
5. LANCASTER, J. Handbook of Structural Welding. Cambridge: Abington Publishing, 1997. 436 p.
6. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Section VIII Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels. 2013.
7. BRANDI, S. D.; LIPPOLD, J. C. Considerações sobre a metalurgia da soldagem de aços inoxidáveis duplex e superduplex. Metalurgia & Materiais, São Paulo, v. 53, n. 463, p.141-146, mar. 1997. Bimestral.
8. BRANDI, S. D. Duplex Stainless Steels. In: American Welding Society. Welding Handbook: Materials and Applications: Part 1: Volume 4. 9 º ed. Miami. 2011. p. 351-368.

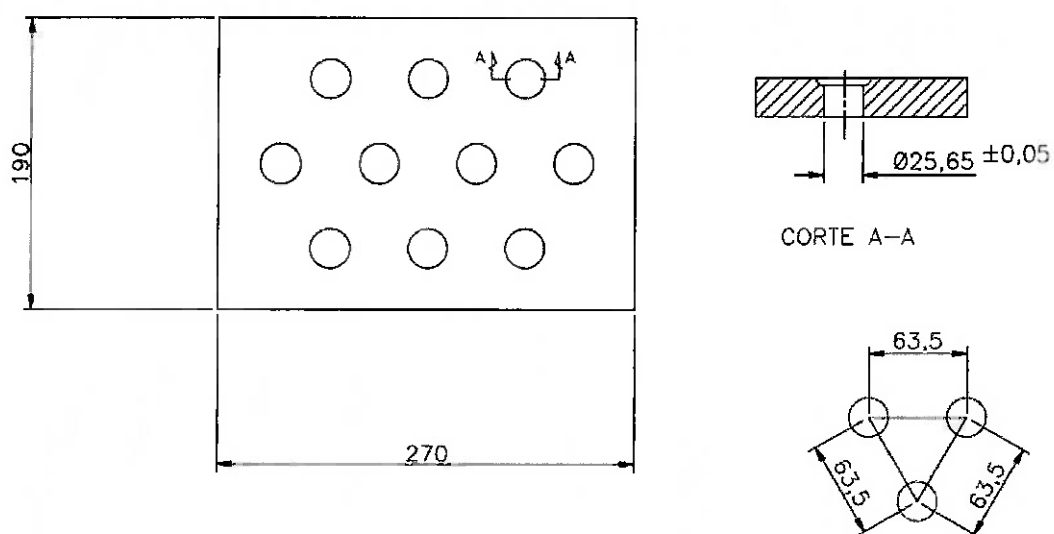
9. LIPPOLD, John C.; KOTECKI, Damian J.. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
10. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Use of Duplex Stainless Steel in the Oil Refining Industry: API Technical Report 938-C. 2º Ed. Washington. 44 p. 2011.
11. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Welded Tanks for Oil Storage: API Standard 650. 11º Ed. Washington. 438 p. 2007.
12. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Section II Part D: Properties. 2010.
13. ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook: Volume 1: Properties and Selection: Iron and High Performance Alloys. 10º Ed. EUA. 2521 p. 1990.
14. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Section II Part A: Ferrous Materials Specification. 2013.
15. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Code for Pressure Piping, B31: ASME B31.3: Process Piping. 2008.
16. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining industry: API Recommended Practice 571. 1º Ed. Washington. 268 p. 2003.
17. ROMANOW S. (Ed). The Silent Assassin: Corrosion. **Hydrocarbon Processing**, Houston, mar 2014.
18. SANDVIK STEEL. The Role of Duplex Stainless Steels in Oil Refinery Heat Exchanger Applications. Disponível em: www2.sandvik.com/sandvik/0140/.../ATTAHTER/ Acessado em: Ago/2014.

19. ASTM INTERNATIONAL. A480/A480M: Standard Specification for: General Requirements for Flat Rolled Stainless and Heat Resisting Steel Plate, Sheet, and Strip. West Conshohocken. 27 p. 2014.
20. THE WELDING INSTITUTE. Job Knowledge: Duplex Stainless Steel. Disponível em: <<http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/duplex-stainless-steel-part-1-105/>> Acessado em: Ago/2014.
21. BRANDI, S. D. Estudo da soldabilidade do Aço Inoxidável Duplex DIN W.Nr.1.4462 (UNS S31803). São Paulo, 1992, 265p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
22. LONDOÑO, A. J. R. Precipitação de Fases Intermetálicas e Austenita Secundária na ZAC de Soldagens Multipasse de Aços Inoxidáveis Duplex. Tese (Doutorado). Departamento de Eng. Metalúrgica da Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil, 2001.
23. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Section IX: Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operators. 2013.
24. ASTM INTERNATIONAL. A923: Standard Test Method for: Detecting Detrimental Intermetallic Phase in Duplex Austenitic/Ferritic Stainless Steel. West Conshohocken. 9 p. 2014.
25. ASTM INTERNATIONAL. E562: Standard Test Method for: Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count. West Conshohocken. 7 p. 2011.

26. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Section II Part C: Specifications for Welding Rods, Electrodes and Filler Metals. 2013.
27. ASTM INTERNATIONAL. E1245: Standard Practice for: Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis. West Conshohocken. 8 p. 2008.
28. INTERNATIONAL MOLYBDENUM ASSOCIATION (IMOA). Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels. 2. ed. London. 63 p. 2009. Disponível em: http://www.imoa.info/_files/stainless_steel/Duplex_Stainless_Steel_2d_Edition.pdf. Acesso em: Ago 2014.
29. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 494 p.
30. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Welding Guidelines for the Chemical, Oil, and Gas Industries: API Recommended Practice 582. 2º Ed. Washington. 28 p. 2009.
31. OUTOKUMPU. How to weld Type 2205 Code Plus Two® Duplex Stainless Steel. Disponível em: <http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Datasheet-how-to-weld-2205-hpsa-imperial-outokumpu-en-america.pdf> Acessado em: Out/2014.
32. PETTERSSON, C. O.; FAGER, S. A. Welding Practice for the Sandvik Duplex Stainless Steel SAF 2304, SAF 2205 and SAF 2507. Sandviken: R&D Centre AB Sandvik Steel, 1995. 15 p.

33. KOU, S. Welding Metallurgy. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
34. AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Handbook: Welding Science and Technology: Volume 1. 9^o ed. Miami. 2001.
35. BRANDI, S. D., Metalurgia da Soldagem - SLD 026, Especialização em Engenharia de Soldagem, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
36. ASTM INTERNATIONAL. A240/A240M: Standard Specification for: Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessel and for General Applications. West Conshohocken. 14 p. 2014.
37. ASTM INTERNATIONAL. A789/A789M: Standard Specification for: Seamless and Welded Ferritic/Austenitic Stainless Steel Tubing for General Service. West Conshohocken. 5 p. 2013.
38. ASTM INTERNATIONAL. E340: Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys. West Conshohocken. 11 p. 2013.
39. ASTM INTERNATIONAL. E3: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken. 12 p. 2011.
40. GUNN, Robert N.. Duplex Stainless Steels: Microstructure, properties and Applications. Cambridge: Abington Publishing, 1997.

ANEXO I – Desenho da chapa do “mockup”



Espessura da chapa (espelho) do "mockup" = 32 mm