



**ESTUDO DA SOLDAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO TP 347H PARA PREVENIR A CORROSÃO
LOCALIZADA "GUME DE FACA"**

AUTOR: AMILCAR ANDRADE SALES
ORIENTADOR: AUGUSTO J. DE A. BUSCHINELLI

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2005



AUTOR: AMILCAR ANDRADE SALES

**ESTUDO DA SOLDAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO TP 347H PARA PREVENIR A CORROSÃO
LOCALIZADA "GUME DE FACA"**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica

Campo de conhecimento: Engenharia Mecânica

Área de concentração: Fabricação

Orientador: Prof. Augusto J. de A. Buschinelli, Dr.-Ing.

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2005

FICHA CATALOGRÁFICA

Sales, Amilcar Andrade

- Estudo da soldagem do aço inoxidável austenítico TP 347H para prevenir a corrosão localizada "gume de faca".

- Orientador: Prof. Augusto J. de A. Buschinelli, Dr.-Ing.

- Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina

1. Soldagem 2. Aços Inoxidáveis Estabilizados 3. Metalurgia da Soldagem 4. Corrosão em Soldas 5. Corrosão "knife line attack"

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA SOLDAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO TP 347H PARA PREVENIR A CORROSÃO
LOCALIZADA "GUME DE FACA"

AMILCAR ANDRADE SALES

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE PROFISSIONAL EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

Augusto José de Almeida Buschinelli, Dr.-Ing. - **Orientador**

Prof. Júlio César Passos, Dr. – **Coordenador Acadêmico**

Prof. José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr. – **Coordenador do Programa**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Carlos Augusto Silva de Oliveira, Dr. Eng. (Presidente)

Prof. Carlos Enrique Niño Bohórquez, Dr. Eng.

Profª. Roseana da Exaltação Trevisan, Ph.D.

À memória de meu pai Antônio Sales, exemplo perene de seriedade e empenho; à minha mãe Olindina, sinônimo de sobriedade, calma e positivismo; à minha esposa Ana Carla e aos filhos Aline, Felipe e Luíza, pela paciência e compreensão da minha ausência-presente durante esta árdua jornada.

Agradecimentos

A oportunidade deste mestrado foi construída num momento particular (consciente, positivista e inovador) da antiga Copene – Petroquímica do Nordeste S.A.. A UFSC, por sua característica de empreendedorismo e pioneirismo, estava, naquele momento, com a possibilidade de um Mestrado Profissionalizante em Engenharia Mecânica aprovada pela CAPES-MEC. A nossa ação conjunta com a área de desenvolvimento de pessoal desta empresa e a coordenação da pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFSC (oficialmente reconhecida como uma das melhores do Brasil) permitiu converter em realidade este desejo e necessidade. Cabe aqui um agradecimento a Climério Brito, nosso parceiro indispensável na construção deste mestrado.

A chegada do Grupo Odebrecht ao controle acionário da Copene e a criação da Braskem, apesar da entropia e dificuldades naturais da montagem de uma nova empresa, só incrementou a visão atualizada e inteligente da necessidade de investimento na capacitação de seus integrantes. Registro também, portanto, o nosso agradecimento à direção da Braskem S.A..

Ao Professor Júlio César Passos, agradecemos como atuante Coordenador do PosMec/PPGEM quando da concepção deste curso, depois como nosso coordenador do mestrado e sempre como grande incentivador de todo o processo.

Agradecemos também à direção e colegas do SENAI/CIMATEC por terem abrigado grande parte das aulas do mestrado e pelo apoio sempre disponível e prazeroso quando da execução das soldas requeridas por este nosso projeto.

Aos nossos professores das disciplinas do curso (membros do valoroso e motivador corpo docente do mestrado em Engenharia Mecânica e de outros departamentos da UFSC), agradecemos a cada um, individualmente.

Agradecemos aos amigos Paulo Moura Bispo de Santana (colega do LabMAF – laboratório de metalurgia e análise de falhas da Braskem em Camaçari-BA) e Elias Cândido da Costa pelo indispensável apoio para termos chegado a realizar este trabalho de dissertação.

Ao professor Paulo Sergio Carvalho Pereira da Silva também o nosso muito obrigado pelo suporte na definição do tema e orientações nos primeiros passos deste trabalho de dissertação.

Ao meu orientador, Prof. Augusto J. de A. Buschinelli, um agradecimento especial por transmitir, com simplicidade e vasto conhecimento, o prazer pelo ensino, fator motivador para o aprofundamento no estudo e pesquisa pelo aluno da pós-graduação que, por conseguinte, permite gerar produtos de fato importantes para a sociedade.

Por fim agradeço a meus colegas de turma pela deferência pessoal e companheirismo demonstrados durante o curso e a confiança depositada quando se engajaram ao mesmo.

“Uma jornada de duzentos quilômetros começa com um simples passo”

Provérbio chinês

Resumo

Durante uma parada geral para manutenção de uma planta industrial de MVC (monocloreto de vinila) foi constatada falha passante em uma solda de manutenção antiga de junção de um trecho de tubo mais novo com tubos originais do forno de EDC (dicloroetano) - todos de aço inoxidável austenítico ASME SA-213 TP 347H, estabilizável ao Nióbio.

Na análise da falha e do conjunto de seus fatores influentes foi identificada a densidade do aspecto metalúrgico no favorecimento da ocorrência da Corrosão Intergranular – CIG, fundamentalmente quanto à sua intensificação na região das soldas (causa principal da mesma).

Soldas teste executadas sob condições controladas em laboratório, porém simulando aplicação real em campo, permitiram a avaliação dos efeitos das mesmas na microestrutura e nas propriedades mecânicas e físico-químicas do aço TP 347H, particularmente sua resistência à CIG na margem da solda. Aspectos dos processos de soldagem e aporte de energia empregados e desejados foram avaliados.

Estudou-se, portanto, a fenomenologia envolvida e definiu-se então, de forma consistente, procedimentos de soldagem adequados à execução numa parada de manutenção de uma unidade industrial de grande porte e capazes de prevenir falhas resultantes de CIG localizada e intensa na região de influência das soldas (corrosão “gume de faca”) nestes materiais. Consolida-se também um aprendizado julgado importante para a comunidade técnica em geral quanto à soldagem deste material e seus similares.

Palavras chave:

1. Soldagem 2. Aços Inoxidáveis Estabilizados 3. Metalurgia da Soldagem 4. Corrosão em Soldas 5. Corrosão "knife line attack"

Abstract

During a MVC (vinyl mono-chloride) industrial plant maintenance turnaround, a cross section weld failure was evidenced in an old maintenance junction of an stretch nipple of new tube with original tubes of the EDC (dichloroethane) pyrolysis furnace - all of them in austenitic stainless steel ASME SA-213 TP 347H, Columbium (Niobium) stabilized.

During the root cause failure analysis and the set of its influential factors, it was identified the density of the metallurgic aspect in aiding the occurrence of Intergranular Corrosion - IGC, and basically its intensification in the welds neighborhood (main root cause).

Lab Test Welds were performed under controlled and monitored conditions, despite its field execution simulation, allowing the assessment of its effects on the stainless steel TP 347H microstructure and mechanical and physical-chemical properties, specially its resistance to weld margin IGC. Applied and desired welding processes and heat input aspects were carefully addressed.

The involved phenomenology was studied and adequate welding procedures were defined, in a consistent way, suitable do be performed during a maintenance turnaround of a large industrial unit and capable to prevent future localized and intense IGC in these material welds ("Knife line attack" Corrosion). As a co-product there was a relevant learning related to the welding of this material and its similar, considered to be useful for the technical community.

Key words:

- 1, Welding
2. Stabilized Stainless Steel
3. Welding Metallurgy
4. Corrosion in Welds
5. "Knife line attack" Corrosion.

SUMÁRIO

ABREVIATURAS E TERMOS UTILIZADOS	i
LISTA DE SÍMBOLOS	ii
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Descoberta do Problema	1
1.2 Abordagem Inicial	1
1.3 Objetivos do Trabalho de Dissertação	1
2 - APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	2
2.1. Posicionamento do Problema no contexto “profissionalizante”	2
2.2. O componente Problema no processo industrial	3
2.3. Os impactos do Problema a ser solucionado	3
2.4. A falha	4
2.5. Dados técnicos básicos	5
2.6. Conclusões sobre a falha	6
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1. Sensitização de Aços Inoxidáveis Austeníticos e a Corrosão Intergranular	10
3.2. Aços Inoxidáveis Austeníticos Estabilizados para prevenir a Corrosão Intergranular	14
3.3. Efeitos da Soldagem nos Aços Inoxidáveis Austeníticos Estabilizados ao Nióbio	17
4 - MATERIAIS E METODOLOGIA	19
4.1. Premissas	19
4.2. Primeiras Soldas Experimentais	21
5 - DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	27
5.1 Tubos Novos para os Testes	27
5.2 Condição dos Tubos Velhos para os Testes	31
5.3 Varetas (consumível) Utilizadas nas Soldas Teste	32
5.4 Elaboração e Qualificação do Procedimento de Soldagem	33
5.5 Verificação da Susceptibilidade à CIG das Soldas Teste	35
5.6 Avaliação Metalúrgica das Primeiras Soldas Teste	37
5.7 Soldas Experimentais Finais	41
6 - CONCLUSÕES	63
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS	65
APÊNDICE 1 - ANÁLISE DA FALHA DO TUBO DA FORNALHA	68
AP1.1. A falha	68
AP1.2. Dados técnicos básicos	69

AP1.3. Amostragem, testes e ensaios	69
AP1.4. Resultados da Análise da Falha	71
APÊNDICE 2 - PRIMEIRAS SOLDAS EXPERIMENTAIS (5 SOLDAS).....	86
APÊNDICE 3 - REGISTROS DAS 2 SOLDAS EXPERIMENTAIS FINAIS.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Forno F-1401B BRASKEM UN VINÍLICOS / AL	4
Figura 2 – Vazamento no Tubo-17 solda-1 (tubo de 150 mm de diâmetro)	5
Figura 3 – “Trinca” de 85 mm constatada por Líquido Penetrante (superfície externa).....	6
Figura 4 - Fotomicrografia do Tubo-18, solda S-3, com um detalhe da trinca.....	7
Figura 5 – Corte transversal da solda mostrando excesso de penetração na raiz.....	7
Figura 6 – Fotomicrografia: trincas de CIG, na superfície interna do tubo, na ZTA da solda..	8
Figura 7 – Fotomicrografia: pequena faixa carburizada e leve ataque intergranular, interno...9	
Figura 8 – Fotomicrografia: detalhe da faixa carburizada e resíduos de coque aderidos.....	9
Figura 9 - Ensaio potenciodinâmico de aço Fe-Cr em meio ácido	10
Figura 10 – Cinética da sensitização.	11
Figura 11 – Concentração de Cr em relação à distância do contorno do grão (Ikawa, 1977).12	
Figura 12 – Concentração de Cr e a corrosão no contorno de grão.	13
Figura 13 – Formação dos carbonetos de cromo e nióbio (Grong, 1994).....	16
Figura 14 – Precipitação de carboneto de cromo junto à interface de fusão (Ikawa, 1977). ..	18
Figura 15 – Diagrama de definição da condição inicial dos Tubos Novos para as soldas teste.	
24	
Figura 16 – Croquis do plano de corte dos corpos de prova – CP da amostra de Tubo Novo para definição da sua condição inicial para os testes.....	25
Figura 17	29
Tubo novo, sem tratamento térmico. Ataque 1,5 min conforme ASTM A- 262 – Prática “A”.	
29	
Figura 18	29
Mesmo campo da figura 17, registrado com maior aumento.	29
Figura 19	30
Tubo novo, sensitizado. Ataque 1,5 min conforme ASTM A- 262 – Prática “A”.....	30
Figura 20	30
Mesmo campo da figura 19, registrado com maior aumento.	30

Amostra analisada: TN-1M-D	30
Figura 21	31
Solda: ST-1 Metal base do tubo velho (típico para as ST-1; 4 e 5).....	31
Figura 22	32
Solda: ST-3 (tubo novo X tubo velho). Metal base do tubo velho solubilizado.	32
Figura 23 – Oscilograma típico do TIG Convencional aplicado.....	35
Figura 24 – Oscilograma típico do TIG Pulsado Térmico realizado.....	35
Figura 25 – Solda: ST-4 (tubo novo X tubo velho). Vista geral da linha de fusão do tubo velho. Amostra analisada: CP - 6	38
Figura 26 – Solda: ST-4 (tubo novo X tubo velho). Linha de fusão e ZTA do tubo velho, próximo à face (superfície externa) da solda. Amostra analisada: CP - 6.....	38
Figura 27 – Solda: ST-3 (tubo novo X tubo velho). Linha de fusão e ZTA solubilizada do tubo velho, próximo à raiz da solda. Amostra analisada: CP-5.....	39
Figura 28 – Solda: ST-5 (tubo novo X tubo velho). Vista geral da linha de fusão do tubo novo. Amostra analisada: CP-7	39
Figura 29 – Solda: ST-5 (tubo novo X tubo velho). Linha de fusão do tubo novo, próximo à face (superfície externa) da solda. Amostra analisada: CP-7	40
Figura 30 – Solda: ST-2 (tubo novo X tubo novo). Linha de Fusão, próximo à raiz da solda. 40	
Figura 31 – Solda: ST-4 (tubo novo X tubo velho). Vista da raiz da solda.	41
Figura 32 – Seqüência de Passes das Soldas (TIG Convencional, à esquerda, e TIG Pulsado) 41	
Figura 33 – Divisão da Solda em Seções (Perímetro = 485 mm / Cada Seção = 121 mm)....	42
Figura 34 – Velocidade Média em Todos os Passes, por Seção.	44
Figura 35 – Velocidade Média por Seção nos Passes de Raiz.	45
Figura 36 – TIG Convencional. Amostra analisada: CP da Seção “A”.	46
Figura 37 – TIG Pulsado. Amostra analisada: CP da Seção “A”.....	47
Figura 38 – TIG Convencional. Amostra analisada: CP da Seção “B”.....	48
Figura 39 – TIG Pulsado. Amostra analisada: CP da Seção “B”.	49
Figura 40 – TIG Convencional. Amostra analisada: CP da Seção “C”.	50
Figura 41 – TIG Pulsado. Amostra analisada: CP da Seção “C”.	51
Figura 42 – TIG Convencional. Amostra analisada: CP da Seção “D”.	52
Figura 43 – TIG Pulsado. Amostra analisada: CP da Seção “D”.	53
Figura 44 – TIG Pulsado. Amostra analisada: CP da Seção “C” – Detalhe da Raiz.....	54

Figura 45 – TIG Convencional. Amostra analisada: CP da Seção “C” – Detalhe da Raiz.....	54
Figura 46 – TIG Pulsado: Tubo Novo, na raiz da solda.....	55
Figura 47 – Dimensões medidas das ZTAs (mm).....	55
Figura 48 – Relação % das Dimensões das ZTAs do TIG Pulsado / TIG Convencional.	56
Figura 49 – Macrografias de Seções Transversais no Trecho de Início das Soldas.....	61
Figura AP1 01 - Fornalha F-1401B BRASKEM UN VINÍLICOS / AL.....	68
Figura AP1 02 – Amostras da Fornalha F-1401B Braskem UN Vinílicos / AL.....	69
Figura AP1 03 – Foto em close do Vazamento no Tubo-17 Solda-1	70
Figura AP1 04 – “Trinca” de 85 mm constatada por Líquido Penetrante (lado do tubo antigo)	71
Figura AP1 05 - Vista de 02 CP’s metalográficos removidos na região da trinca passante do tubo-17 solda S-1 (1- extremidade da trinca // 2- região central da trinca).....	76
Figura AP1 06 - Tubo-17 - vista das faces da trinca passante, solda S1.....	76
Figura AP1 07 - Vista de outros 02 CP’s metalográficos removidos do Tubo-17 solda S-2 e do Tubo-18 solda S-3	77
Figura AP1 08 - Vista dos outros dois CP’s do tubo-18 solda S-3.....	77
Figura AP1 09 - Tubo-17, solda S-1, micrografia-1, 45°.....	79
Figura AP1 10 - Tubo-17, solda S-1, Mi-1.	79
Figura AP1 11 - Tubo-17, Niple-1, posição 0°, meia espessura.	80
Figura AP1 12 - Tubo-17, solda S-1, Mi-2.	80
Figura AP1 13 - Tubo-17, solda S-1, Mi-2	81
Figura AP1 14 - Tubo-17, solda S-1, Mi-4	81
Figura AP1 15 - Tubo-17, solda S-1, Mi-4	82
Figura AP1 16 - Tubo-17, solda S-2, Mi-2, a 120°	82
Figura AP1 17 - Tubo-18, solda S-3, Mi-2 / 180°, com um detalhe.....	83
Figura AP1 18 - Tubo-17, niple-1, posição 0°, superfície interna	84
Figura AP1 19 - Tubo-18, niple-5, posição 250°, superfície interna	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dados do Forno de EDC.....	5
Tabela 2.2 – Resultados das Análises Químicas	8
Tabela 4.1 – Amostragem das Primeiras Soldas Experimentais	23
Tabela 4.2 – Resumo das Cinco Primeiras Soldas Teste (ST) Realizadas	26
Tabela 5.1 – Resultados das Análises Químicas do Tubo Novo	27
Tabela 5.2 – Resultados dos Ensaios de Susceptibilidade à CIG de Tubo Novo.....	28
Tabela 5.3 – Resultados das Análises Químicas das Varetas.....	32
Tabela 5.4 – Resumo dos Parâmetros Básicos das Cinco Primeiras Soldas Teste (ST)	34
Tabela 5.5 – Resultados dos Ensaios de Susceptibilidade à CIG das Soldas Teste	36
Tabela 5.6 – Acompanhamento da solda final com TIG Convencional.....	42
Tabela 5.7 – Acompanhamento da Solda Final com TIG Pulsado.....	43
Tabela 5.8 – Resumo dos Oscilogramas dos Passes de Raiz.....	57
Tabela 5.9 – Energias absorvidas, por seção, nos passes de raiz.....	58
Tabela 5.10 - Energia Total (soma das energias absorvidas em cada seção de cada passe) ...	59
Tabela 5.11 – Relação de Energia total em Passes Equivalentes (Pulsado / Convencional)...	60
Tabela 5.12 – Resultados das Medições de Durezas das Soldas	63
Tabela AP1.1 – Dados do Forno de EDC	69
Tabela AP1.2 – Resultados das Análises Químicas	72
Tabela AP1.3 – Resultados das Medições de Durezas das Soldas.....	73
Tabela AP1.4 – Resultados das Medições de Durezas do Metal Base.....	74
Tabela AP1.5 – Resultados dos Ensaios de Susceptibilidade à CIG (ASTM A-262).....	75

ABREVIATURAS E TERMOS UTILIZADOS

CIG	Corrosão intergranular
IGSCC	Corrosão sob tensão intergranular
ZAC	Zona Afetada pelo Calor em uma solda; o mesmo que ZTA.
ZTA	Zona Termicamente Afetada em uma solda; o mesmo que ZAC.
EDC	Dicloroetano – produto químico orgânico
MVC	Mono-cloreto de vinila – produto químico orgânico
CC	Corrente contínua
CP	Corpo de prova
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
LP	Ensaio de Líquido Penetrante
US	Ensaio de Ultrassom
TH	Teste Hidrostático

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Elemento químico Carbono
Nb	Elemento químico Nióbio
η	Rendimento / eficiência de um processo de soldagem
U	Tensão de soldagem (V) = média de pulso e base;
\bar{U}	Tensão média
I_p	Corrente de pulso (A);
I_b	Corrente de base (A);
I	Corrente de soldagem (A)
\bar{I}	Corrente média
t_p	Tempo na corrente de pico (A);
t_b	Tempo na corrente de base (A);
V_s	Velocidade de soldagem (cm/min)
T_o	Temperatura de pré-aquecimento
E	Aporte térmico de soldagem na peça (kJ/cm)
H	Energia de Soldagem absorvida na peça (KJ)
T	Temperatura (°C)
t	Tempo (s)

1 - INTRODUÇÃO

1.1 Descoberta do Problema

Em abril/03, ocorreu uma parada geral para manutenção da planta industrial de MVC (mono-cloreto de vinila) da Unidade de Negócio Vinílicos da Braskem, em Alagoas. Durante a despressurização dos tubos ao término do teste hidrostático do forno de EDC (dicloroetano) - F-1401B, foi constatado um vazamento através de uma falha passante em uma solda de manutenção antiga, de junção de um trecho de tubo mais novo com tubos originais do equipamento - todos de aço inoxidável austenítico TP 347H.

Tratava-se de um novo mecanismo de dano atuando nas fornalhas do MVC (Figura 01), desconhecido até então pelo pessoal técnico responsável por estes equipamentos em Alagoas e na Bahia (duas e três fornalhas similares existentes, respectivamente).

Mesmo desconsiderando-se outros efeitos, a falha de um destes tubos em serviço impacta direta e imediatamente na capacidade de produção destas Unidades e, portanto, influi de forma decisiva nos resultados da Empresa.

1.2 Abordagem Inicial

As primeiras ações empreendidas foram no sentido da caracterização da causa raiz da falha, estimativa da abrangência do mecanismo de dano atuante e definição da melhor solução de curto prazo que permitisse o retorno operacional da Unidade. Como decorrência dos primeiros resultados, deparou-se com a riqueza do desafio técnico que representava o aprofundamento da análise do conjunto de fatores influentes na falha e, em especial, foi identificada a densidade do aspecto metalúrgico no favorecimento da ocorrência da Corrosão Intergranular – CIG (causa principal da mesma), principalmente quanto à sua intensificação na região das soldas. Alguns autores classificam este mecanismo como IGSCC – corrosão sob tensão intergranular, devido à potencial influência de tensões residuais da soldagem.

1.3 Objetivos do Trabalho de Dissertação

Esta Dissertação de Mestrado está voltada para o estudo da soldagem do aço inoxidável austenítico TP 347H - estabilizável ao Nióbio - para prevenir a corrosão localizada "gume de

faca" ("knife line attack"). Em especial, focou-se na metalurgia e propriedades resultantes da soldagem; tanto mecânicas quanto de resistência à corrosão.

Estudou-se a dissolução e precipitação de carbonetos de Cr e Nb em situações práticas de soldagem, vislumbrando a posterior operação dos tubos nas condições constatadas nas fornalhas de EDC da Braskem.

Um dos objetivos foi, portanto, definir de forma consistente procedimentos de soldagem adequados para a prevenção de falhas por CIG nestes materiais e à execução prática numa parada de manutenção de uma unidade industrial de grande porte.

Um segundo objetivo do estudo foi buscar consolidar um aprendizado útil à comunidade técnica em geral quanto à soldagem deste material e seus similares.

Não mais como objetivo específico deste mestrado, porém como subproduto do que foi estudado para a realização desta dissertação, pôde-se contribuir na definição das melhores soluções para os outros aspectos envolvidos, a exemplo de:

- Desenvolvimento e especificação de procedimentos de soldagem mais adequados para as duas condições a serem encontradas no campo ou oficina, quais sejam:
 - a) Tubo novo com tubo novo (ou curva nova);
 - b) Tubo novo com tubo velho (ou curva velha) / ou vice-versa.
- Especificação da adequada condição de fornecimento e instalação de novos tubos que venham a ser empregados nestas fornalhas (ex.: execução ou não do tratamento térmico de estabilização, requisitos de fabricação etc);
- Definição da abrangência do problema nas fornalhas de MVC (de Alagoas e da Bahia) e da estratégia de prevenção destes danos. Permitir o domínio e/ou eliminação das conseqüências dos mesmos.

2 - APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

2.1. Posicionamento do Problema no contexto “profissionalizante”

A Braskem é a maior empresa petroquímica da América Latina e está entre as cinco maiores indústrias brasileiras de capital privado. Sua estrutura integra a primeira e segunda gerações petroquímicas, com um faturamento bruto de R\$ 14,3 bilhões em 2004. Com uma

produção total de 5 milhões de toneladas de resinas, petroquímicos básicos e intermediários, gera cerca de 3.000 empregos diretos.

A Braskem tem 13 fábricas nos pólos petroquímicos de Camaçari (BA) e Triunfo (RS), no pólo cloro-químico de Alagoas e em São Paulo (SP). Produz petroquímicos básicos como eteno, propeno, benzeno, caprolactama e DMT, além de gasolina e GLP (gás de cozinha). No segmento de resinas termoplásticas, em que é líder na América Latina, produz polietileno, polipropileno, PVC e PET.

O Policloreto de Vinila – PVC tem inúmeras aplicações, a exemplo de: fabricação de tubos e conexões, bolas, bonecas, produtos cirúrgicos, chaveiros, etiquetas, moldagem de peças técnicas, vedantes, massa automobilística (plastigel), base para carpetes, revestimento de cabos de ferramentas metálicas e frascos de vidro, impermeabilização de tecidos, esquadrias de PVC para projetos arquitetônicos, móveis de praia e piscina etc.

O equipamento objeto do estudo é vital nas Unidades de produção de PVC.

2.2. O componente Problema no processo industrial

No caso específico desta dissertação, trata-se dos tubos de aço inoxidável austenítico “estabilizável” TP 347H das Fornalhas de craqueamento térmico do EDC (dicloroetano) das Unidades de Vinílicos de Alagoas e Bahia. Estas fornalhas correspondem a uma das primeiras fases do processo de produção do PVC (policloreto de vinila). As capacidades atuais de produção são:

- Maceió (AL): 204 mil t/ano de PVC;
- Camaçari (BA): 250 mil t/ano de PVC.

2.3. Os impactos do Problema a ser solucionado

Tem-se um total de cinco fornalhas similares nas Unidades de MVC, sendo duas em Alagoas e três na Bahia.

Mesmo desconsiderando-se outros efeitos, a falha de um destes tubos em serviço impacta direta e imediatamente na capacidade de produção destas Unidades e, portanto, influi de forma decisiva nos resultados da Empresa.

2.4. A falha

O forno de EDC (dicloroetano) - F-1401B da planta industrial de MVC (mono-cloreto de vinila) da Unidade de Negócio Vinílicos da Braskem, em Alagoas é composto de uma serpentina de 22 tubos, de 16 m de comprimento cada, dispostos horizontalmente em uma caixa retangular com conjuntos de 80 queimadores dispostos em quatro diferentes elevações das duas paredes laterais. Ver desenho simplificado com a disposição dos tubos na Figura 01.

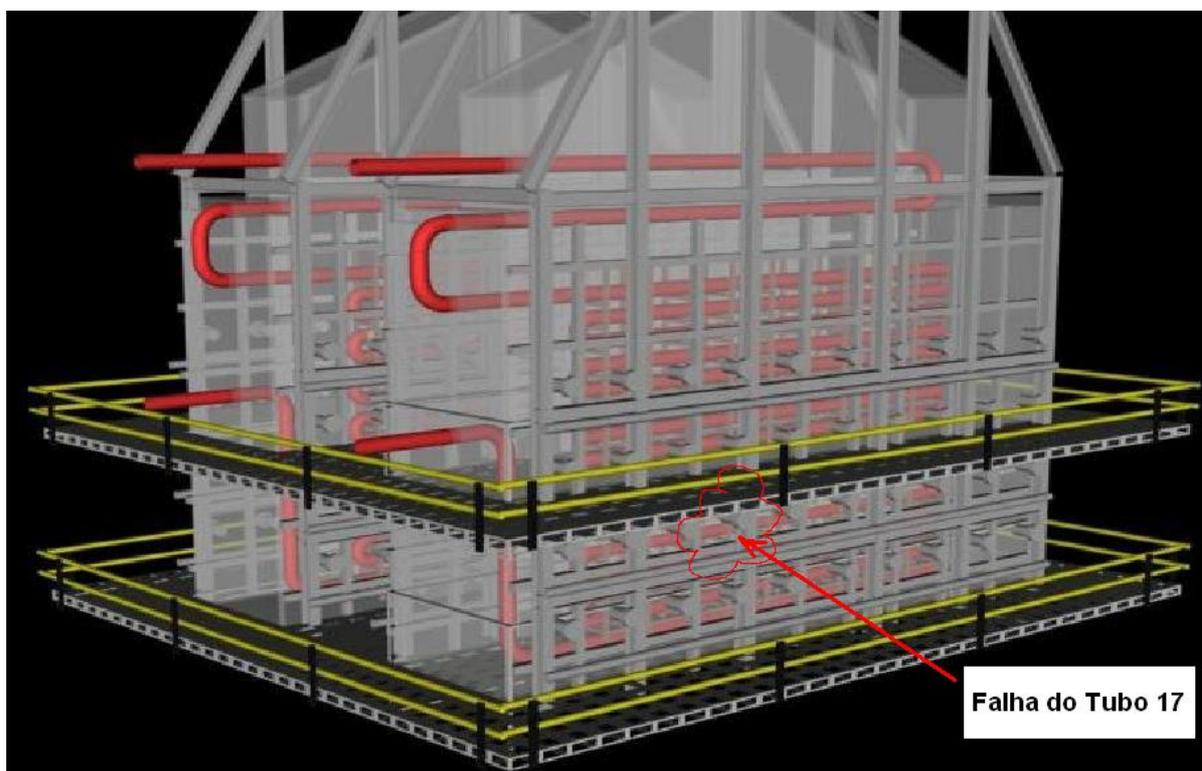


Figura 1 - Forno F-1401B BRASKEM UN VINÍLICOS / AL

Durante a despressurização dos tubos ao término do teste hidrostático realizado em abril/2003, foi constatado um vazamento através de uma falha passante no tubo-17 (fileira-17), em uma solda de manutenção antiga de junção de um trecho de tubo mais novo com tubos originais do equipamento; todos de aço inoxidável austenítico TP 347H. Ver Figuras 01 e 02.

Uma solda do tubo-18 (fileira-18) apresentou indicações de trinca no ensaio de ultra-som, sugerindo tratar-se de um dano similar ao que provocou o defeito passante na solda do tubo 17.

No Apêndice 1 está apresentada a análise detalhada desta falha e de causa raiz da mesma; sua leitura enriquece o entendimento desta dissertação. Nos itens 2.4 a 2.6 tem-se apenas um breve extrato destas análises.



Figura 2 – Vazamento no Tubo-17 solda-1 (tubo de 150 mm de diâmetro)

2.5. Dados técnicos básicos

Os dados técnicos básicos dos tubos da Fornalha (forno de pirólise) de EDC estão apresentados na Tabela.2.1

Tabela 2.1 – Dados do Forno de EDC

EQUIPAMENTO	Forno de Pirólise de EDC F-1401B
MATERIAL DOS TUBOS	Aço Inoxidável ASTM A-271, TP-347H D.E. 150 mm, espessura nominal de 9,6 mm
TEMPERATURA DE OPERAÇÃO	~ 620°C máxima contínua prevista (no metal)
PRESSÃO DE OPERAÇÃO	~ 40,0 Kgf/cm ² - máxima prevista
AMOSTRAS ANALISADAS	Trechos de tubos da fileira-17 e da fileira-18
TEMPO DE OPERAÇÃO	Tubos originais ~ 110.000h
PRODUTO/MEIO	Interno - EDC /MVC Externo - Gás de combustão

Cada forno é composto de 22 tubos de 6” de diâmetro externo (150 mm), com 16 m de comprimento cada.

2.6. Conclusões sobre a falha

A falha do Tubo 17 deveu-se ao ataque corrosivo, de forma intergranular (IGC), numa faixa bem estreita de dissolução e reprecipitação de carbonetos na vizinhança da linha de fusão da solda. Denomina-se este fenômeno de “corrosão incisiva”, “em faca”, “gume de faca”, “knife line attack” – KLA, etc (Kou, 2003). Ver Figuras 02, 03 e 04.



Figura 3 – “Trinca” de 85 mm constatada por Líquido Penetrante (superfície externa)

A corrosão e progressão da falha se deram a partir da superfície interna do tubo. Ver Figuras 04 e 06.

Devido à intensificação da corrosão na região de influência das tensões residuais de soldas, alguns autores também a classificam como corrosão sob tensão intergranular – IGSCC (ASM, 1992; Móbil, 1983).

Descontinuidades geométricas e heterogeneidades químicas e metalúrgicas identificadas (Figuras 05, 06, Tabela 2.2 e Figuras 07 e 08) favoreceram a sinergia entre os processos envolvidos na progressão do dano, quais sejam: de deposição e retenção de coque na raiz da solda, de carburização do tubo a partir de sua superfície interna, de localização e intensificação do processo corrosivo nesta região, além da provável influência de tensões residuais da soldagem. É suposta também alguma influência das tensões em serviço – especialmente daquelas resultantes dos diferentes coeficientes de dilatação térmica entre a solda realizada (inconel) e o metal base do tubo (aço inoxidável austenítico). Outra constatação, provavelmente intensificada pelo modo operacional específico deste

equipamento que falhou, é que os tubos operaram numa temperatura maximizadora da precipitação indesejável de Carbonetos de Cromo.

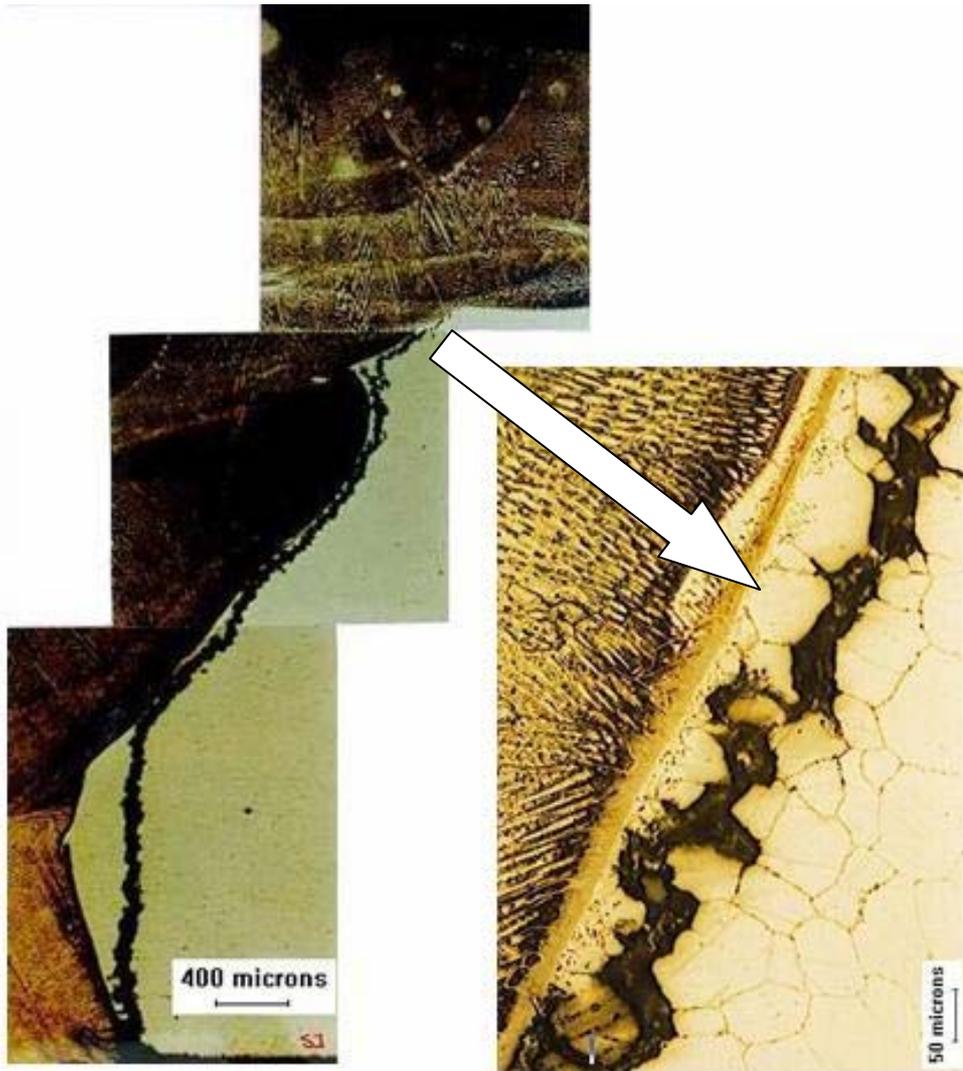


Figura 4 - Fotomicrografia do Tubo-18, solda S-3, com um detalhe da trinca.



Figura 5 – Corte transversal da solda mostrando excesso de penetração na raiz.

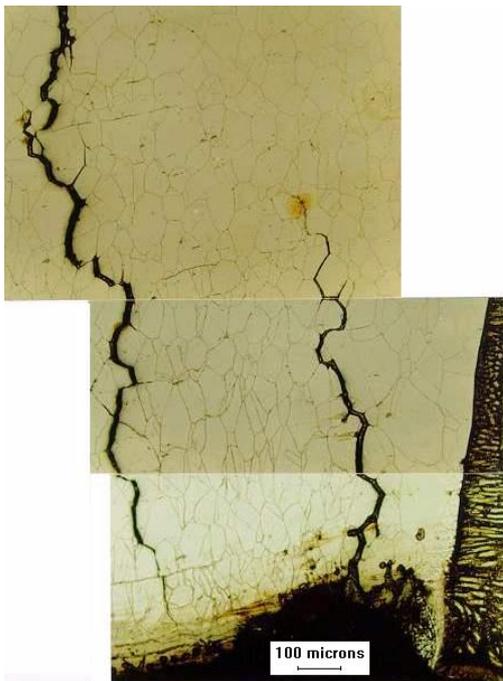


Figura 6 – Fotomicrografia: trincas de CIG, na superfície interna do tubo, na ZTA da solda.

A Tabela 2.2 registra a constatação de que a composição química do metal depositado das soldas aproxima-se mais dos requisitos das especificações para solda de ligas ricas em níquel. As soldas divergem, portanto, significativamente da especificação ASTM TP-347H gerando importante heterogeneidade de composição entre a mesma (metal de adição) e o metal base, que confere com o especificado.

Tabela 2.2 – Resultados das Análises Químicas

AMOSTRA	ELEMENTOS ANALISADOS (%)										
	C	Cu	Cr	S	P	Mn	Mo	Nb	Ni	Si	Ti
T-17/N-1	0,057	NA	18,4	0,0004	0,016	1,62	0,37	0,82	8,70	0,54	0,014
T-17/N-3	0,051	NA	18,0	ND	0,022	1,63	0,37	0,71	10,15	0,37	0,021
T-17/S-1	0,049	0,059	20,85	0,001	0,034	0,25	8,46	0,65	57,12	0,26	0,22
T-17/S-2	0,019	1,63	22,61	0,006	0,034	0,49	3,03	0,90	40,20	0,31	0,69
A-271 TP-347H (especificação)	0,04 a 0,10	NR	17,0 a 20,0	0,03 máx	0,04 máx	2,0 máx	NR	Obs: “e”	9,0 a 13,0	0,75 máx	NR

OBS:

- a) Análises por Absorção Atômica, ICP-Plasma, Volumetria e LECO
- b) NA- Não analisado.
- c) ND- Não detectado.
- d) NR- Não requerido.
- e) $[Nb + Ta]_{\text{mínimo}} = 8 \times \% C$; porém não superior a 1%.

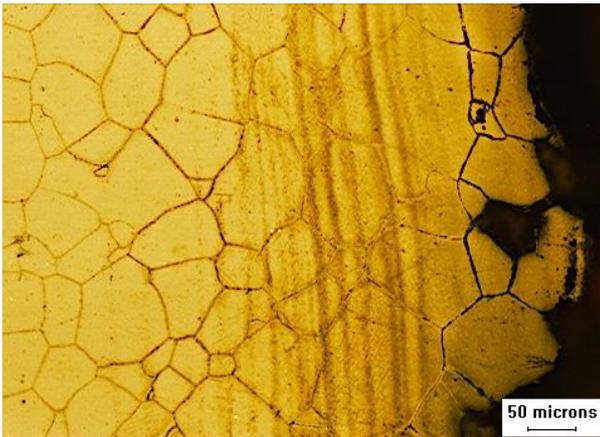


Figura 7 – Fotomicrografia: pequena faixa carburizada e leve ataque intergranular, interno.



Figura 8 – Fotomicrografia: detalhe da faixa carburizada e resíduos de coque aderidos.

Em síntese, foi constatado que os tubos de aço inoxidável austenítico TP 347H não haviam sido tratados termicamente para “estabilização” através da prévia precipitação de carbonetos de Nb (e Ta), que as soldas existentes apresentavam características químicas, metalúrgicas e geométricas potencialmente favoráveis à intensificação local dos danos e que o modo operacional do equipamento que falhou favorece a ocorrência de carburização interna dos tubos e acúmulo de eletrólito; fatores estes também agravantes da CIG.

A dissolução de carbonetos de Nióbio e reprecipitação como carbonetos de Cromo, provocadas pela soldagem, foi o fator primário para possibilitar este mecanismo de falha.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Sensitização de Aços Inoxidáveis Austeníticos e a Corrosão Intergranular

O Cromo é o elemento promotor da “inoxibilidade” ao formar a camada protetora do aço com seu óxido contínuo, aderente e estável.

Sabe-se que um teor de Cr abaixo de 12% não permite a completa passivação da liga, levando-a a uma menor resistência a corrosão. A Figura 9 apresenta curvas de ensaios potenciodinâmicos que confirmam esta afirmativa; sendo a corrosão tão maior quanto mais baixo for o teor de Cromo (Jones, 1992).

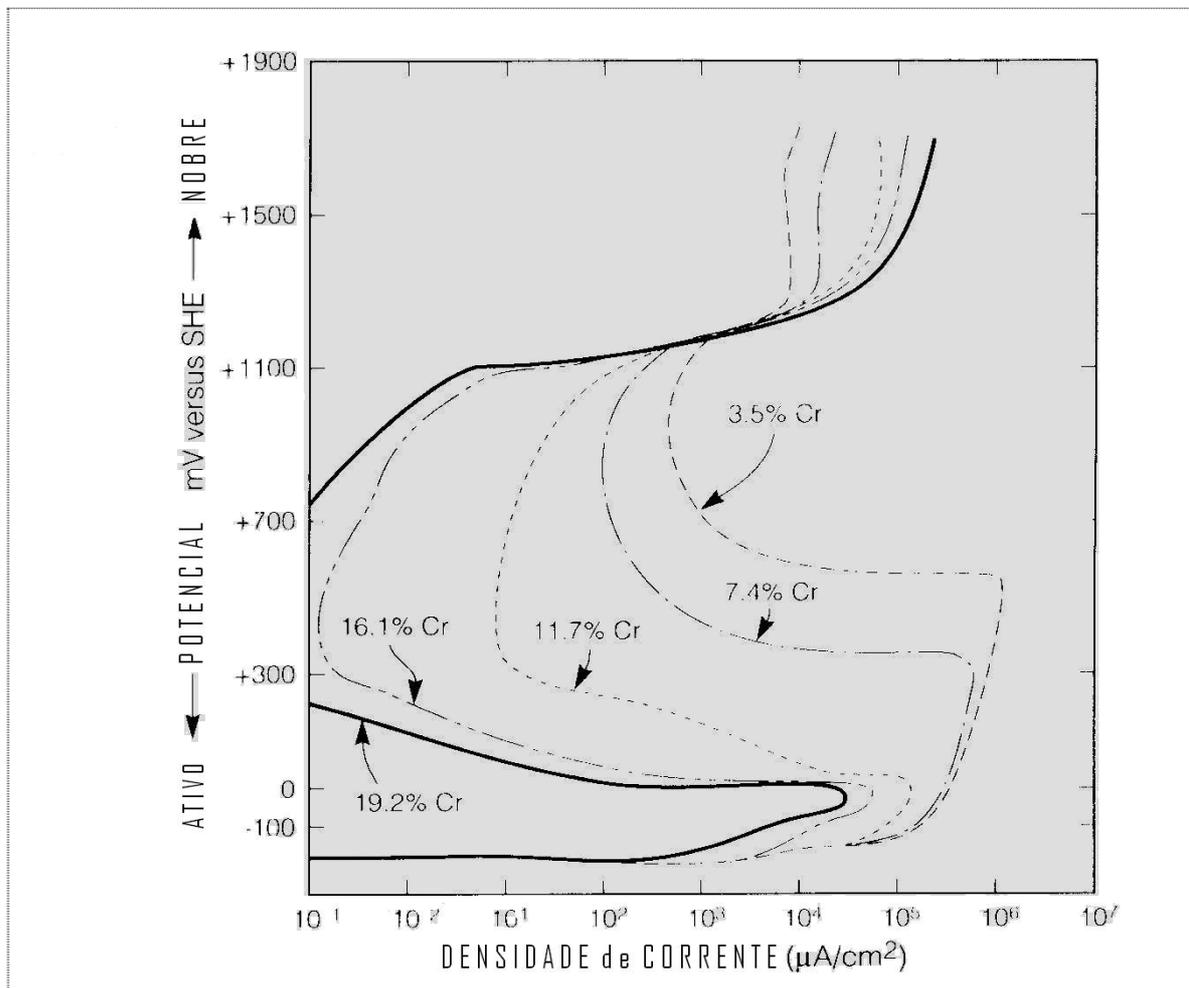


Figura 9 - Ensaios potenciodinâmicos de aço Fe-Cr em meio ácido ⁽²⁴⁾

O Carbono apresenta afinidades variadas com os demais constituintes e, portanto, para a precipitação de fases distintas na microestrutura. As fases resultantes dependem basicamente dos demais elementos químicos presentes no aço inoxidável austenítico e das temperaturas e tempos envolvidos no processamento para produção do aço, na fabricação do componente ou durante seu uso em serviço.

Uma destas fases é a dos carbonetos de cromo $(Fe,Cr)_{23}C_6$, que precipitam preferencialmente, e são insolúveis, de $425^{\circ}C$ a $815^{\circ}C$ (ASM, 1992);

Abaixo de $425^{\circ}C$ a velocidade de difusão do carbono é muito lenta para permitir a formação de carbonetos;

Acima de $815^{\circ}C$ estes carbonetos começam a ser dissolvidos e a partir de $1035^{\circ}C$ os seus constituintes são completamente solúveis na matriz austenítica.

Dá-se o nome de “sensitização”, nos aços inoxidáveis austeníticos, à precipitação de carbonetos de cromo no contorno de grão, como segue:

Quando um aço inoxidável austenítico é aquecido por um período de tempo na faixa de temperatura de precipitação do carboneto secundário $(Fe,Cr)_{23}C_6$ - de $425^{\circ}C$ a $815^{\circ}C$ - a seguinte cinética se processa (Figuras 10 e 11):

- Todo o Carbono difunde-se preferencialmente para os contornos dos grãos;
- Devido a sua lenta difusão na temperatura de sensitização, somente o Cromo das regiões vizinhas se dirige aos contornos dos grãos;
- Ocorre a precipitação de carbonetos (mesmo que carbetos) ricos em Cromo e conseqüente empobrecimento de Cromo numa zona fina adjacente aos contornos.

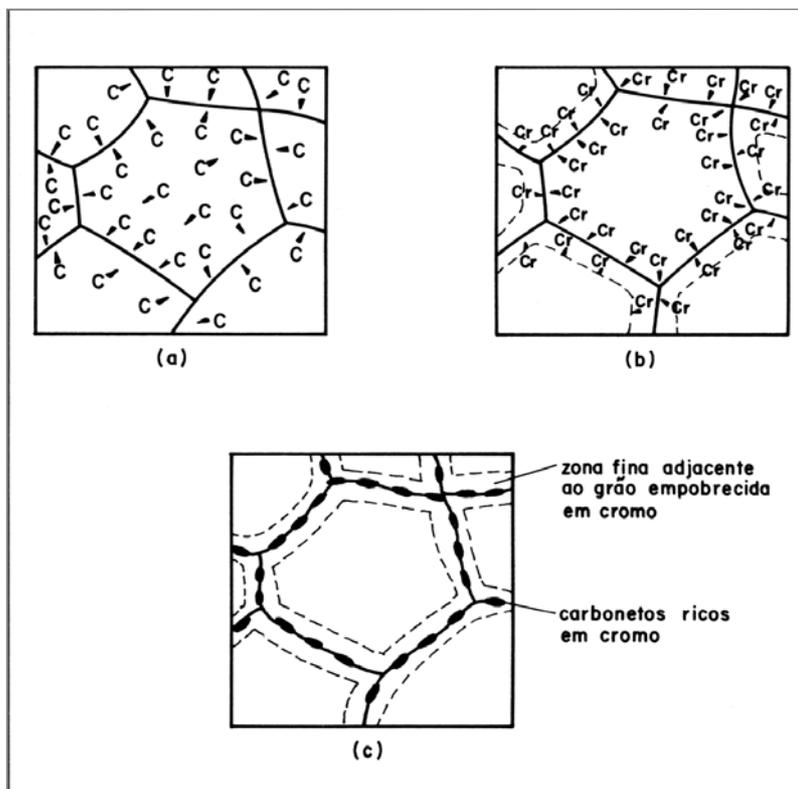


Figura 10 – Cinética da sensitização.

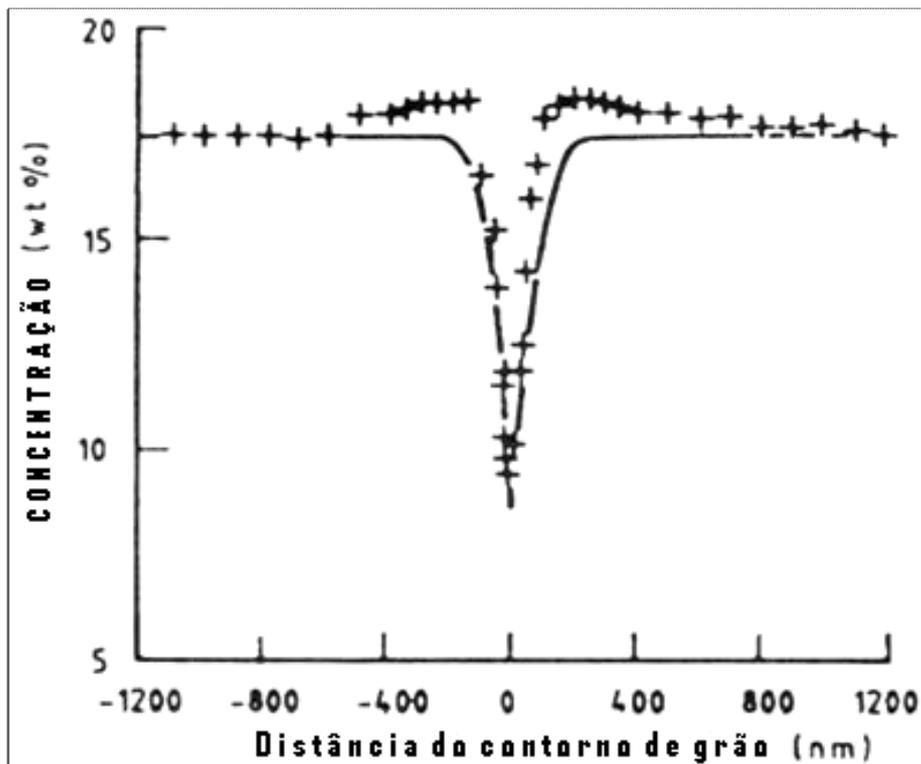


Figura 11 – Concentração de Cr em relação à distância do contorno do grão (Ikawa, 1977).

O teor de carbono em solução sólida e o tempo de permanência em determinada temperatura é que definirão a quantidade de carboneto precipitado.

Quando a precipitação é relativamente contínua, a região empobrecida de cromo deixa o aço inoxidável sujeito à corrosão intergranular, a qual corresponde à dissolução desta camada de baixo-cromo que envolve cada grão (Figura 12). A sensitização também reduz a resistência a outras formas de corrosão, como: pitting, corrosão em frestas e corrosão sob tensão.

A menor região com esgotamento de Cr é, portanto, bastante anódica em relação à bem maior região catódica do restante do grão, ocorrendo aí também o efeito galvânico na corrosão, acelerando a corrosão localizada.

A este efeito soma-se a formação de microcélulas de corrosão originadas devido à presença de outras segundas fases e de segregações nos contornos de grão.

Na presença de um meio corrosivo, um ataque eletroquímico preferencial ocorre então nas adjacências do contorno de grão. Grãos inteiros podem ser extraídos do material.

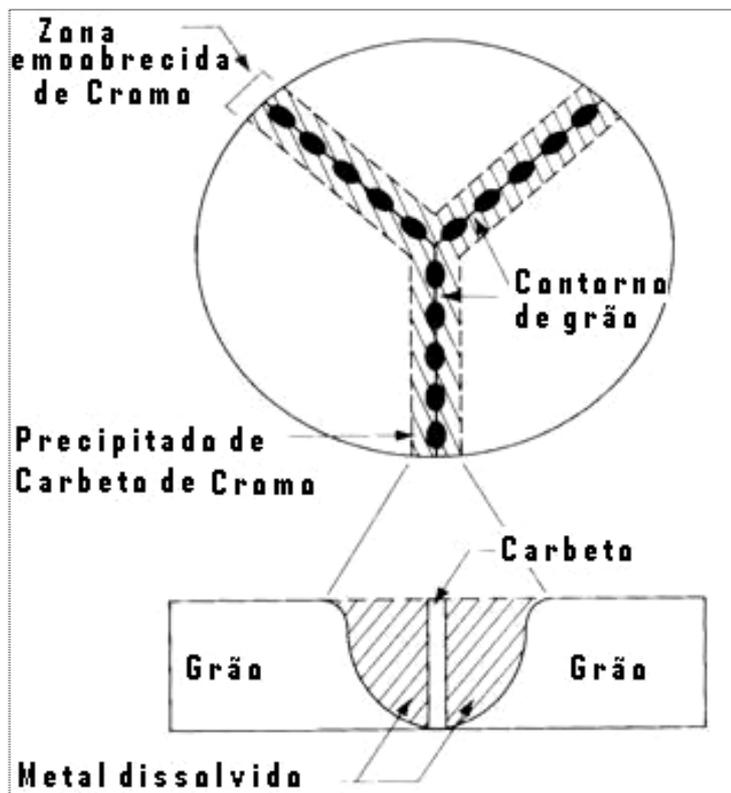


Figura 12 – Concentração de Cr e a corrosão no contorno de grão.

A distribuição de Carbono é, portanto, provavelmente a mais importante variável influenciando a susceptibilidade destas ligas à corrosão intergranular.

Convém registrar que, com o passar do tempo, as regiões inicialmente empobrecidas em cromo pela precipitação de carbonetos podem ser homogeneizadas pela difusão do cromo do interior dos grãos para a vizinhança do contorno (ASM, 1992; Costa, 2003). Quanto maior for a temperatura de trabalho e maior o tempo de exposição, mais acentuada será esta homogeneização. Chegando a esta situação, o material é pouco susceptível à corrosão intergranular, embora os contornos de grão apresentem extensiva precipitação de carbonetos. Portanto, a presença de carbonetos de cromo nos contornos de grão não significa necessariamente que o material está susceptível à corrosão intergranular. Existem testes para confirmação ou não desta propensão, a exemplo das Práticas estabelecidas na norma ASTM A 262; a “Practice E - Copper-Copper Sulfate-16% Sulfuric Acid Test for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steel” é uma das mais utilizadas. (ASM, 1992; ASTM, 2002).

Alternativas usuais para prevenir a corrosão intergranular em aços inoxidáveis austeníticos, minimizando ou evitando a sensitização, são:

- Procedimentos adequados durante o processamento para produção do aço e/ou fabricação do componente (soldagem, por exemplo);
- Uso de materiais especiais: aços inoxidáveis austeníticos da série “L” – baixo carbono - ou os aços inoxidáveis austeníticos “estabilizados”;
- Utilização de tratamentos térmicos especiais.

3.2. Aços Inoxidáveis Austeníticos Estabilizados para prevenir a Corrosão Intergranular

Os Aços Inoxidáveis Austeníticos Estabilizados têm sido a alternativa mais aplicada na prevenção da corrosão intergranular quando o componente for trabalhar aquecido na faixa de temperatura de sensitização, vista acima. Os aços mais usuais se utilizam dos elementos Ti ou Nb como fortes formadores de carbonetos MC estáveis – para prender o Carbono, deixando o Cromo em solução.

O aço inoxidável TP-347H normalmente é especificado para operação à temperatura elevada (acima de 425°C), com controle do teor de Carbono (0,04 a 0,10 %) para manutenção da resistência à fluência e com presença de Nióbio + Tântalo para evitar a ocorrência de sensitização, a qual resultaria em corrosão intergranular em presença de meio moderadamente corrosivo. O teor de $[Nb + Ta]_{\text{mínimo}}$ especificado é de $8 \times \% C$, porém, o teor máximo de Nb + Ta é limitado a 1%.

3.2.1 Fases precipitadas presentes na microestrutura do aço inoxidável ASME SA 271 ou SA 213 Gr TP 347 H:

As fases presentes na microestrutura do aço inoxidável austenítico grau TP 347H podem ser classificadas em dois grupos: primárias e secundárias. As fases primárias são aquelas que se formam durante a solidificação e as fases secundárias são aquelas que precipitam durante o tratamento térmico, operações de soldagem (na ZAC ou ZTA – zona afetada pelo calor) ou em serviço.

Neste aço, as fases precipitadas primárias são o (Nb,Ta)C e nitreto e/ou carbosulfeto de Nióbio; estas últimas em teores apenas residuais. O carboneto de Nióbio (NbC) pode ser parcialmente dissolvido em tratamentos térmicos acima de 1000 °C. Se a temperatura de solubilização for aumentada, mais carbonetos podem ser dissolvidos e a quantidade de carbono em solução sólida é aumentada.

- *Obs.:* como o Nb é o estabilizante principal (o Ta está presente em bem menor teor), doravante trataremos os carbonetos NbC e TaC apenas como NbC.

As fases secundárias que podem usualmente estar presentes na microestrutura do aço 347H são: o mesmo carboneto NbC, o carboneto rico em cromo (Cr,Fe)₂₃C₆ e uma fase intermetálica composta de ferro e cromo, denominada fase sigma (σ). Enquanto o carboneto secundário NbC pode precipitar em qualquer temperatura abaixo da temperatura de solubilização utilizada, o carboneto de cromo e a fase σ precipitam apenas abaixo de 900 °C. O carboneto de cromo (e a fase σ) precipita predominantemente nos contornos de grão, empobrecendo em cromo as vizinhanças do contorno. O carboneto de nióbio (secundário) precipita predominantemente no interior dos grãos, em discordâncias.

O cromo e o nióbio competem na formação dos respectivos carbonetos. Enquanto o carboneto de nióbio é termodinamicamente mais estável e sua formação é favorecida em temperaturas mais altas (acima de 700 °C), a formação do carboneto de cromo é favorecida cineticamente no entorno de 600 °C. Assim sendo, embora o aço 347H seja estabilizável contra a precipitação do (Cr,Fe)₂₃C₆, ela acaba ocorrendo de maneira acentuada e predominante no entorno e abaixo de 600 °C, caso ainda haja carbono em solução sólida na microestrutura. Ver Figura 13.

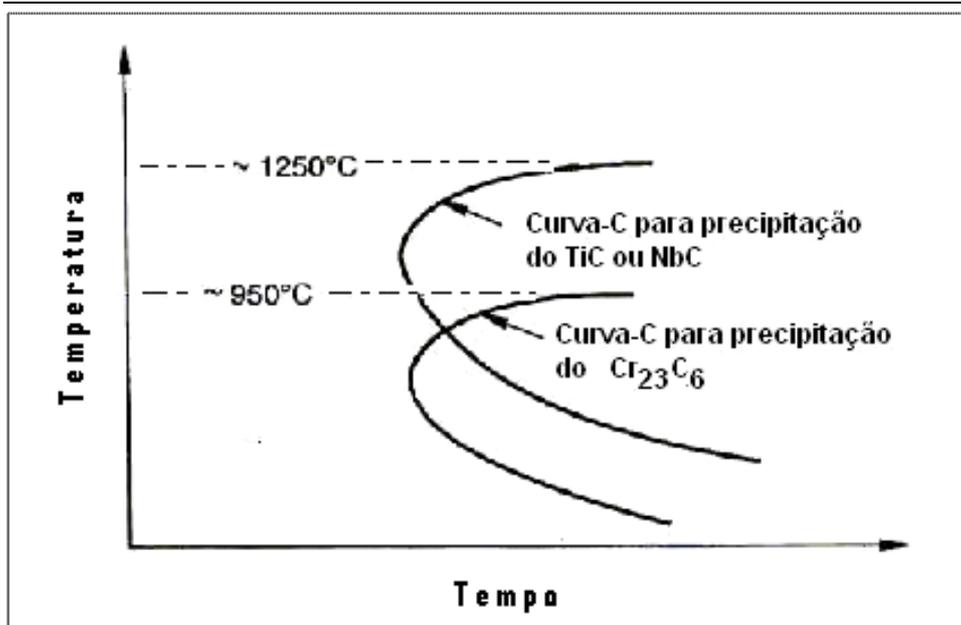


Figura 13 – Formação dos carbonetos de cromo e nióbio (Grong, 1994).

A precipitação de fase σ é significativa apenas para tempos muito longos (milhares de horas) na faixa de 650°C a 850°C (ASM, 1992).

3.2.2 A susceptibilidade à corrosão intergranular no aço inoxidável 347H:

Quando previsto trabalhar em meio corrosivo e em temperaturas na faixa de sensitização, é requerida a máxima resistência à corrosão do aço austenítico estabilizado.

Para os elementos Nióbio + Tântalo tornarem-se integralmente efetivos quanto à imunização ao ataque intergranular através da precipitação de $(\text{Nb,Ta})\text{C}$, é recomendável que o material seja submetido (na condição de novo solubilizado ou após processamento em temperaturas de solubilização de carbonetos NbC) ao tratamento térmico de estabilização (“stabilizing anneal” ou “stabilization heat treatment”, requisito suplementar opcional na norma de fabricação ASTM) (ASTM, 2003; ASTM, 1988). Este tratamento consiste basicamente de manter o material solubilizado num patamar de temperatura de 845 a 910°C por até 5 horas, dependendo da espessura da seção. Pode ser seguido de um breve alívio de tensões a 705°C , sem prejuízo para precipitações de carbonetos de Cromo.

- Se o material já estiver solubilizado (novo, como fabricado, ou após soldagem seguida de resfriamento rápido), recozer a 910°C (estabilizar) e então resfriar, mesmo lentamente. O carbono em solução sólida será consumido, precipitando NbC e eliminando a possibilidade da precipitação indesejada do $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$.

-
- No caso de já haverem ocorrido precipitações indesejadas intensas, recozer a 1065 a 1120 °C, em seguida estabilizar a 910 °C e então resfriar. Promove-se a redissolução de carbonetos de cromo precipitados em contorno de grão e transforma a fase σ de volta a ferrita; seguido da estabilização.

É importante salientar que acima de 1100 °C, principalmente por volta de 1200 °C, pode ocorrer crescimento exagerado de grão ou recristalização secundária. Grãos grosseiros têm uma menor região de contorno. Apesar de geralmente não ser considerado um fator crítico em aços inoxidáveis austeníticos, a experiência deste autor é de um agravamento de danos quando neste estado.

Cabe também destacar que o tratamento térmico de estabilização tem efeito positivo na resistência à corrosão intergranular mas pode diminuir a resistência à fluência do material. Em termos de resistência à fluência é desejável que a precipitação de carbonetos ocorra em serviço, interagindo com as discordâncias e dificultando a deformação plástica.

3.3. Efeitos da Soldagem nos Aços Inoxidáveis Austeníticos Estabilizados ao Nióbio

Durante a soldagem, o aquecimento do material na faixa mais próxima à linha de ligação da solda (na ZAC – zona afetada pelo calor) ultrapassa o limite de 1150°C, com solubilização inclusive, parcial ou total, dos carbonetos de nióbio (Nb + Ta) ali localizados – tanto se partindo de material originalmente apenas solubilizado quanto de até estabilizado. Com o rápido resfriamento da solda, nesta estreita faixa resolubilizada não se formam novamente todos os carbonetos NbC, ficando esta região rica em Carbono livre e sujeita à precipitação de carbonetos de cromo $(Cr,Fe)_23C_6$ nos contornos dos grãos durante um eventual tratamento térmico pós-soldagem ou pelo efeito do ciclo térmico de passes subsequentes, no caso de solda multipasses, ou mesmo com a operação do aço na faixa de temperatura de cerca de 500°C a 870°C (ou seja, sujeita a sensitização).

Kou relembra que a baixa condutividade térmica do aço inoxidável austenítico resulta em grandes gradientes de temperatura a pequenos incrementos de distância a partir da zona de ligação de uma solda, provocando, nos aços estabilizados, a região bem estreita de dissolução e reprecipitação de carbonetos, vizinha à linha de fusão. (Kou, 2003)

O ataque corrosivo de forma intergranular nesta estreita faixa nos aços “estabilizados” na condição de resolubilizado pela soldagem e sensitizado, denomina-se “corrosão incisiva”, “em faca”, “gume de faca” etc (“knife line attack”). Ver Figura 14 e Figuras 3 e 4.

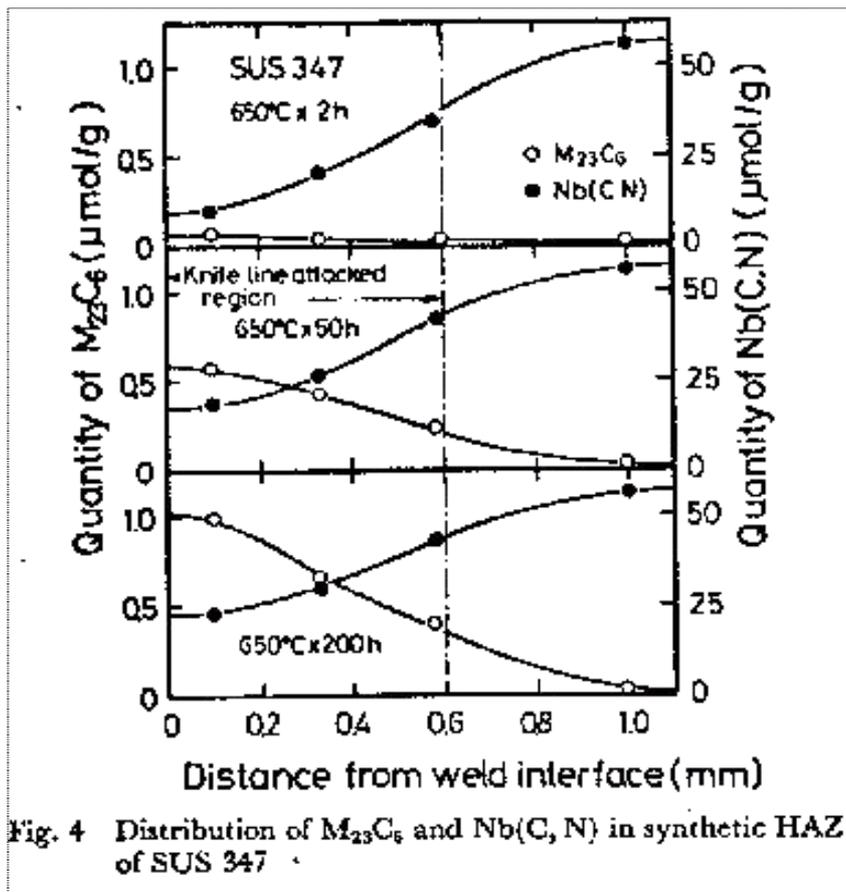


Figura 14 – Precipitação de carboneto de cromo junto à interface de fusão (Ikawa, 1977).

3.3.1 Soldagem e Tratamentos Térmicos Pós-soldagem nos Aços 347H:

Se o material foi originalmente tratado para estabilização, pode-se, em geral, evitar a corrosão “em faca” através da redução da quantidade de calor fornecida à junta. Assim, a zona de ligação da solda tende a apresentar taxas de resfriamento bastante elevadas, não permitindo a dissolução significativa dos carbonetos NbC. A solução mais completa é se utilizar o tratamento térmico de estabilização pós soldagem - aliviar a 910 °C e então resfriar (item 3.2.2).

Como também visto acima, no caso de já haver ocorrido precipitações indesejadas intensas, recozer a 1065 a 1120 °C , em seguida recozer (estabilizar) a 910 °C e então resfriar. Promove-se a redissolução de carbonetos de cromo precipitados em contorno de grão, transforma a fase σ de volta a ferrita, homogeneiza os teores de elementos passivadores e promove a reprecipitação de fases secundárias NbC que contribuem para a resistência à corrosão do material.

Cita-se também a possibilidade de um tratamento térmico pós-soldagem para homogeneizar a composição química da matriz metálica sem que haja dissolução dos precipitados. Não foram identificadas boas justificativas para a adoção desta prática.

Nesta soldagem do aço inoxidável estabilizável ao Nb SA 347H tem-se, portanto, requisitos antagônicos, quais sejam:

- (i) Utilizar a menor energia de soldagem possível, para solubilizar o mínimo de carbonetos NbC já presentes (menor tempo possível de regiões acima de 1000 °C) ;
- (ii) Assegurar que as regiões com carbonetos solubilizados possam ter a sua temperatura mantida acima de 815 °C por um tempo suficiente para a precipitação de carbonetos secundários NbC.

A menor energia de soldagem (i) favorece um resfriamento mais rápido, contrário ao desejado em (ii). Este trabalho foi focado em estudar o primeiro destes requisitos.

4 - MATERIAIS E METODOLOGIA

Como no caso estudado os tubos operam constantemente em temperaturas na faixa de sensitização e o mecanismo de falha constatado não está associado com a corrosão intergranular generalizada e sim a localizada na ZTA da solda - mais precisamente junto à linha de ligação da mesma, os esforços foram concentrados em se estudar a soldagem do aço inoxidável austenítico TP 347H - estabilizável ao Nióbio - para prevenir esta corrosão localizada "gume de faca" ("knife line attack").

A metodologia aplicada consistiu basicamente da definição, elaboração de procedimentos, execução e análise de resultados de soldas experimentais. Utilizaram-se tubos novos e outros trechos que já tinham operado, reproduzindo condições reais operacionais e de execução, passíveis, portanto, de serem aplicadas nas fornalhas de EDC da Braskem.

Este texto se concentra preferencialmente na análise da fenomenologia envolvida e resultados obtidos. Nos Apêndices está documentada a realização em si das soldas e os procedimentos que foram qualificados.

4.1. Premissas

- As falhas são localizadas, em função do procedimento de soldagem aplicado nas fornalhas e

da condição de operação destes tubos (temperatura na faixa de sensitização e presença de meio corrosivo em momentos específicos);

- A presença de coque aderente na superfície interna do tubo acelera o processo corrosivo e a falha; promove carburização gradativa a partir da superfície interna e da trinca iniciada, retem e concentra o meio corrosivo em contato com o aço;

- Como o tratamento térmico de “estabilização” (“stabilizing anneal”) não é requisito obrigatório das especificações ASME SA 271 Gr TP 347 H (tubos) nem da ASME SA 403 WP 347H (curvas), nem tampouco é prática usual de montagem e manutenção, considerou-se que todo material novo ao ser instalado na fornalha encontrava-se na condição de apenas solubilizado; portanto, com presença de NbC precipitado e C, Cr e Nb em solução sólida, e passível de precipitação de $Cr_{23}C_6$ em operação (alguma pequena precipitação já ocorrida no resfriamento da fabricação);

- O tratamento térmico de estabilização para este material deve ser executado a 910 °C, por até 4 horas;

- Por se tratar de uma solda para realização na área industrial de uma empresa petroquímica, de operação em regime contínuo, o procedimento deve apresentar as características de exequibilidade “no campo” e num tempo mínimo de execução. As soldas entre tubos novos, em oficina, admitem um menor rigor nestes dois aspectos;

- Só a visualização ao microscópio não determina que o material está de fato susceptível à CIG naquele meio. São necessários testes (eletroquímicos ou imersão), a exemplo da ASTM A-262 Practice E (Strauss Test)– que utiliza como meio o sulfato de cobre e ácido sulfúrico (ASTM, 2002);

- Buscar-se ia identificar uma prática portátil, de verificação no campo, para teste de susceptibilidade à corrosão intergranular (uma EPR – Electrochemical Potentiokinetic Reactivation Method – portátil, conforme Nishida, Nakamura e Takahashi, por exemplo) (Nishida, 1984);

- Como os níveis de tensão em serviço não são muito elevados, o histórico não registra qualquer indício do mecanismo de fluência (“creep”) nos tubos destas fornalhas e seriam executadas soldas sem tensões residuais relevantes, não se requer, necessariamente, utilizar elementos de adição (varetas) na faixa de mais alto teor de Carbono da especificação 347H nem resolubilizar os carbonetos NbC grosseiros (coalescidos) eventualmente presentes para buscar a posterior precipitação mais dispersa como carboneto secundário finamente dividido;

-
- Existem referências que uma relação Nb/C em torno de 12 apresenta uma melhor estabilidade de carbonetos NbC. Buscar-se-ia utilizar varetas com uma relação Nb/C em torno de 12 a 14, com carbono em torno do teor mínimo da especificação “H” (de 0,04 %) e com os teores de Nb + Ta \leq 1%;
 - Nb em excesso pode tornar o metal de solda mais susceptível a trincas;

4.2. Primeiras Soldas Experimentais

Nesta fase foi definida a utilização dos processos de soldagem TIG Convencional e Pulsado. Elaboraram-se então os procedimentos que foram executados e qualificados. Paralelamente cumpriu-se um plano de amostragem e análise centrado nos efeitos metalúrgicos resultantes destas soldas experimentais e seus impactos no potencial de desenvolvimento, em serviço, de corrosão localizada “gume de faca”. Ver Tabela 4.1.

Atividades:

- Corrigiram-se itens básicos referentes à qualidade em si das soldas (procedimentos e execução);
 - Eliminou-se a influência da carburização na região a ser soldada em tubos “velhos”, através da usinagem (ou desbaste) na superfície interna;
 - Usou-se como metal de adição a vareta AWS A 5.9 ER 347, resultando em solda homogênea;
 - Buscou-se utilizar varetas com uma relação Nb/C em torno de 12 a 14, com carbono em torno do teor mínimo da especificação “H” (de 0,04 %) e com os teores de Nb + Ta \leq 1%;
 - Utilizou-se a menor energia de soldagem conseguida pelos soldadores (busca de ser exequível “no campo”), para solubilizar o mínimo de carbonetos NbC já presentes (menor tempo possível de regiões acima de 1100 °C) e minimizar o crescimento de grão;
 - Nesta linha da menor energia de soldagem, utilizou-se o processo TIG por permitir a soldagem com o arco estável com baixo nível de tensão; além da sua eficiência térmica – em torno de 50 a 70 % - estar bem abaixo do processo com Eletrodo Revestido (80 a 90 %);
 - Fizeram-se inclusive opções de procedimentos com o processo TIG Pulsado (buscando ainda menor energia);
-

Barra, 2003, lembra Kou, 1987, ao afirmar que com relação à ZTA o efeito da pulsação de corrente (redução no valor do calor aportado) é visualizado através da minimização da espessura desta região e no tempo de retenção da temperatura de efetiva recristalização, devido à variação na partição e no ciclo térmico. Assim, haverá um menor decréscimo na resistência da zona afetada termicamente, em relação às propriedades originais do metal de base.

- Utilizou-se varetas de pequeno diâmetro e demais parâmetros de soldagem compatíveis também com este objetivo;
- Foram simulados Tratamentos Térmicos – TT para execução de campo, considerando particularidades dos tubos novos (originalmente só solubilizados ou até estabilizados, conforme a seguir descrito) e dos tubos velhos já sensitizados e com perda de espessura e/ou carburização interna;
- Adotaram-se parâmetros de TT compatíveis com o apresentado no item 3.3.1 e experiências já realizadas;
- Buscou-se alternativas de avaliação de resultados na execução da soldagem no próprio equipamento (em AL e na BA);
- A efetividade da estabilidade da solda, e correspondente ZTA, de cada processo testado foi verificada por métodos laboratoriais.

Relembra-se aqui que foram utilizados nestas soldas tubos novos e outros trechos que já tinham operado nas fornalhas de EDC da Braskem, portanto, em aço inoxidável austenítico estabilizável com as seguintes especificações:

- Material: ASTM A-271 (sucedida hoje pela A-213) TP347H
 - Diâmetro externo: 150 mm
 - Espessura nominal: 9,6 mm
-

Tabela 4.1 – Amostragem das Primeiras Soldas Experimentais

PLANO de AMOSTRAGEM - Corpos de Prova / CPs - MAPA de ACOMPANHAMENTO																	
Codificação Utilizada:																	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p>L L - N L - L</p> <p>↓</p> <p>Tubo Novo TN</p> <p>Tubo Velho TV</p> <p>Vareta V</p> <p>Solda Teste ST</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Sequencial num.</p> <p>↓</p> <p>E A-262 Prática E (ou "vazio" se for a Prática A)</p> <p>Q Análise Química</p> <p>M Análise Metalúrgica</p> <p>S Qualificar Soldagem</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>A Antes do Tratamento Térmico - TT</p> <p>D Depois do TT</p> <p>F Solda acabada (até tratada, se for o caso)</p> </div> </div>																	
Rev. 06 de 14.11.2005																	
ORIGEM	CÓDIGO	ASTM A262 Prática A	Análise Química	ASTM A262 Prática E	TT Prévio		Soldagem	Radiografia	TTPS	AVALIAÇÃO METALÚRGICA	Qualificar Procedimento de Soldagem						
					Solubilização	Estabilização					Estabilização	Microscopia Ótica (metalografia)	Tração	Dobramento	Durêza		
TUBO NOVO	TN-1	X															
	TN-2				X	X											
	TN-3					X											
	TN-1M-A									X							
	TN-1E			X													
	TN-2E			X													
	TN-3E			X													
	TN-4Q		X														
	TN-"1"M-D										X						
	TN-"2"M-D										X						
TN-"3"M-D										X							
TUBO VELHO	TV-1				X												
	TV-1M-A									X							
VARETAS	V-1Q		X														
SOLDAS TESTE	ST-1S						X	X				X	X	X			
	ST-4S						X	X				X	X	X			
	ST-1M-F								X	X							
	ST-2M-F						X	X	X	X							
	ST-3M-F				X		X	X	X	X							
	ST-4M-F								X	X							
	ST-5M-F						X	X		X							
	ST-1E-FA			X													
	ST-2E-FA			X													
	ST-3E-FA			X													
	ST-4E-FA			X													
	ST-1E-FD			X													
	ST-2E-FD			X													
	ST-3E-FD			X													
	ST-4E-FD			X													
	TOTAIS		1	2	11	2	2	5	5	4	10	2	2	2			
LEGENDA:																	
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 10%; text-align: center;">X</td> <td>ATIVIDADE PREVISTA PARA A AMOSTRA</td> </tr> <tr> <td style="width: 10%; text-align: center;">X</td> <td>AMOSTRA JÁ ANALISADA OU TESTADA</td> </tr> </table>														X	ATIVIDADE PREVISTA PARA A AMOSTRA	X	AMOSTRA JÁ ANALISADA OU TESTADA
X	ATIVIDADE PREVISTA PARA A AMOSTRA																
X	AMOSTRA JÁ ANALISADA OU TESTADA																

Nos itens seguintes estão apresentados os desdobramentos destas atividades. Os registros estão na ordem cronológica de suas realizações.

4.2.1 Condição Inicial dos Tubos Novos para os Testes:

A condição dos trechos de tubo novo que foram utilizados nas soldas teste seria aquela que primeiro atendesse à condição de não susceptibilidade à CIG – corrosão intergranular (avaliada pela Prática “E” da ASTM A-262, 2002), conforme diagrama e croquis das Figuras 15 e 16.

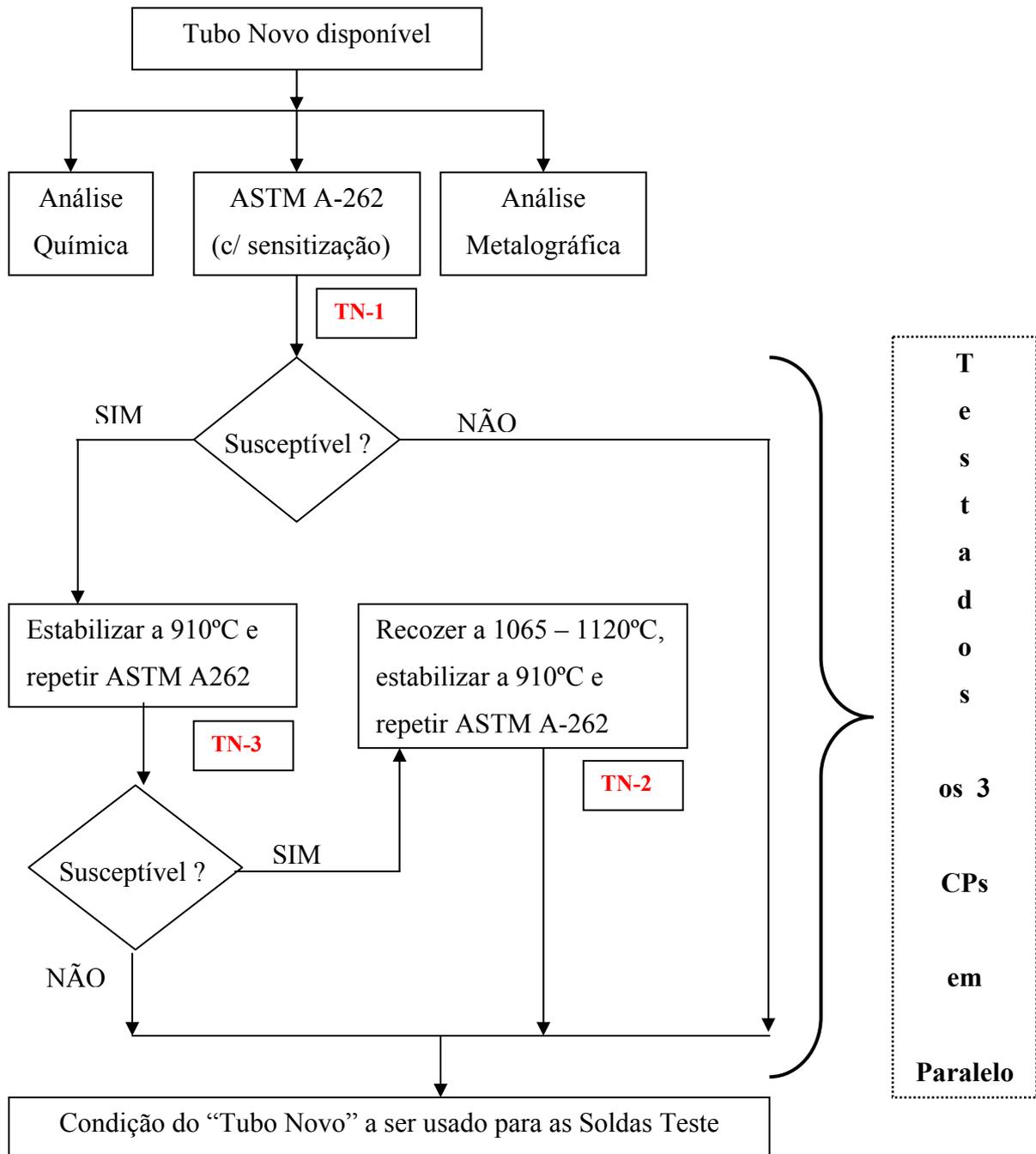


Figura 15 – Diagrama de definição da condição inicial dos Tubos Novos para as soldas teste.

A codificação empregada, apresentada nas Figuras 15 e 16, atende ao estabelecido na Tabela 4.1.

Na Figura 16 está detalhado como as amostras de tubo novo foram recortadas e utilizadas para execução da análise química, dos tratamentos térmicos previstos (amostras de tubo novo TN-2 e TN-3), dos ensaios da Prática “E” da ASTM A-262, 2002, e como estas últimas foram sub-recortadas para análise metalúrgica na UFSC e na Bahia (M-U e M-B)

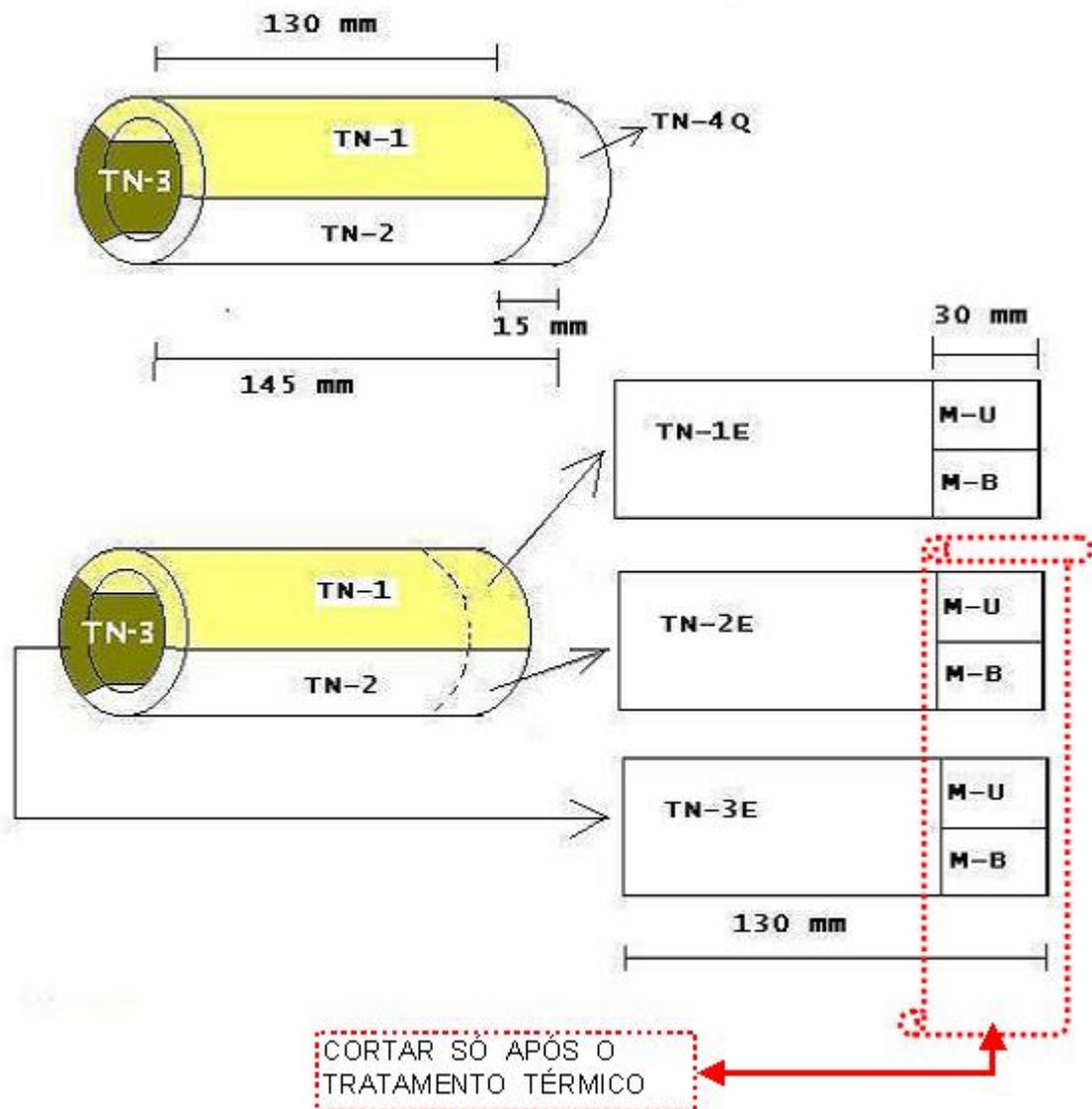
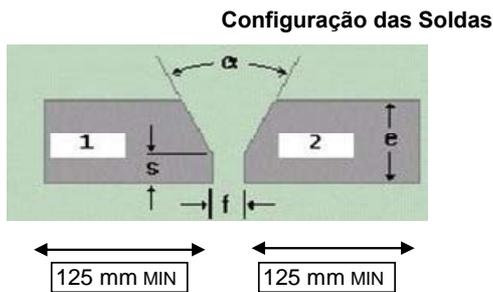


Figura 16 – Croquis do plano de corte dos corpos de prova – CP da amostra de Tubo Novo para definição da sua condição inicial para os testes.

4.2.2 Configuração das Primeiras Soldas Teste

Na tabela 4.2 estão apresentadas as Soldas Testes definidas para a primeira etapa do trabalho. Soldas adicionais seriam adotadas, a partir dos resultados então obtidos.

Tabela 4.2 – Resumo das Cinco Primeiras Soldas Teste (ST) Realizadas



Solda Teste ST	Corpo de Prova	Lado 1	Lado 2	TT prévio	Processo de Soldagem	TTPS (final)	OBS
1	CP 3-1	Tubo Novo	Tubo Velho	Nenhum	TIG Convencional	Nenhum	
	CP 3-2					Estabilização	Est.: 910°C
	CP 3-3						
	CP 3-4						
2	CP 4-1	Tubo Novo	Tubo Novo	Nenhum	TIG Convencional	Nenhum	
	CP 4-2					Estabilização	Est.: 910°C
	CP 4-3						
	CP 4-4						
3	CP 5-1	Tubo Novo	Tubo Velho	Solubilizar o Tubo Velho	TIG Pulsado	Nenhum	Solubilizar = 1065 – 1120°C
	CP 5-2					Estabilização	Est.: 910°C
	CP 5-3						
	CP 5-4						
4	CP 6-1	Tubo Novo	Tubo Velho	Nenhum	TIG Pulsado	Nenhum	
	CP 6-2					Estabilização	Est.: 910°C
	CP 6-3						
	CP 6-4						
5	CP 7	Tubo Novo	Tubo Velho	Nenhum	TIG Pulsado	Nenhum	

Objetivos das soldas realizadas:

- *Todas as soldas*: estudar e corrigir a predisposição à CIG localizada na margem das mesmas.
- *Todas as soldas*: desenvolver procedimentos de soldagem compatíveis com execuções reais nas fornalhas (campo).
- *Soldas Teste 1; 2; 3 e 4*: Comparar TIG convencional com TIG pulsado em soldas homogêneas.
- *Solda Teste 3*: Verificar efeito da solubilização prévia do Tubo Velho (já operado).
- *Solda Teste 5*: Avaliar o "TIG pulsado" com uma corrente de pico mínima.
- *Soldas Teste 1, 2 e 4*: qualificar os procedimentos de soldagem para TIG convencional e TIG pulsado em soldas homogêneas, respectivamente. Também qualificar os soldadores para os procedimentos definidos.

5 - DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Neste item estão apresentadas as execuções e análises decorrentes das etapas previstas do trabalho, desde a definição da condição de aplicação dos tubos novos nas soldas teste (conforme item 4.2.1) até as avaliações das duas soldas experimentais finais, também previstas no item 4.2. As identificações e codificações seguem o apresentado na Tabela 4.1.

5.1 Tubos Novos para os Testes

A primeira etapa foi definir a condição inicial dos tubos novos a serem empregados nos testes. Foram realizados: a caracterização química, os testes de susceptibilidade à corrosão intergranular e a caracterização metalúrgica prevista (item 4.2.1).

5.1.1 Análise Química do Tubo Novo

A Tabela 5.1 mostra os resultados das análises químicas realizadas, que confirmaram o atendimento do material de teste às especificações previstas: aço inoxidável austenítico ASTM A-213 TP-347H, que incorporou a antiga A-271.

Tabela 5.1 – Resultados das Análises Químicas do Tubo Novo

AMOSTRA	ELEMENTOS ANALISADOS (%)									
	C	Cu	Cr	S	P	Mn	Mo	Nb	Ni	Si
TN-4Q	0,049	NA	17,3	ND	0,010	1,73	0,32	0,51	10,14	0,29
A-213 TP-347H (especificação)	0,04 a 0,10	NR	17,0 a 20,0	0,03 máx	0,04 máx	2,0 máx	NR	Obs: “e”	9,0 a 13,0	0,75 Máx

OBS:

- a) Análises por Absorção Atômica, ICP-Plasma, Volumetria e LECO
- b) NA- Não analisado.
- c) ND- Não detectado.
- d) NR- Não requerido.
- e) $[\text{Nb} + \text{Ta}]_{\text{mínimo}} = 8 \times \% \text{C}$; porém não superior a 1%. Obs.: Nb = Cb.
- f) A especificação ASTM A 271 foi extinta e incorporada pela A 213 (dez 1999).

5.1.2 Susceptibilidade à Corrosão Intergranular - CIG

Os seis corpos de prova de tubo novo, nas três condições de tratamento térmico previstas no item 4.2.1 (dois CPs de como fornecido, dois outros estabilizados previamente e os outros dois recozidos e estabilizados previamente), foram submetidos ao ensaio de susceptibilidade à CIG conforme a norma ASTM A-262, Prática “E”, com o requisito de tratamento de sensitização prévio (ASTM, 2002). Todos os resultados foram de “aceitos” (não susceptíveis à CIG), conforme Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados dos Ensaio de Susceptibilidade à CIG de Tubo Novo

TUBO	CORPO DE PROVA	POSIÇÃO DE DOBRAMENTO	TRATAMENTO TÉRMICO	LAUDO	OBSERVAÇÕES
Novo	TN-1E1	Tração na superfície interna	Como fornecido (a)	Aceitável	Imersão por 24h na solução
	TN-1E2	Tração na superfície interna	Como fornecido (a)	Aceitável	Imersão por 24h na solução
	TN-2E1	Tração na superfície interna	Solubilizado e Estabilizado	Aceitável	Imersão por 24h na solução
	TN-2E2	Tração na superfície interna	Solubilizado e Estabilizado	Aceitável	Imersão por 24h na solução
	TN-3E1	Tração na superfície interna	Estabilizado	Aceitável	Imersão por 24h na solução
	TN-3E2	Tração na superfície interna	Estabilizado	Aceitável	Imersão por 24h na solução

OBS:

- a) Os tubos são fornecidos na condição de solubilizados a um mínimo de 1050 °C, se laminado a quente (nosso caso), ou de 1100 °C, se trabalhado a frio.
- b) Os corpos de prova são submetidos a um tratamento térmico de sensitização, imersos em solução específica, dobrados e avaliados.
- c) Solução de ensaio conforme a norma ASTM A-262 (de cobre - sulfato de cobre - ácido sulfúrico, em ebulição por 24 horas)

Definiu-se, portanto, pela utilização do tubo novo na condição de fornecimento padrão da norma: apenas solubilizado quando da fabricação. Esta é uma condição favorável em termos práticos industriais, pois evita que na fabricação destes tubos sejam necessários tratamentos térmicos de estabilização, que representam alto custo e maior prazo para execução.

5.1.3 Aspectos Metalúrgicos / Metalográficos do Tubo Novo

Da avaliação metalográfica (conforme ASTM A- 262 – Prática “A”) do corpo de prova correspondente ao tubo novo no estado de “como fornecido”, constatou-se que este fornecimento foi de fato no padrão de “solubilizado”; conforme evidenciado nas fotomicrografias apresentadas nas Figuras 17 e 18, que não indicam precipitações relevantes de carbonetos de cromo nos contornos de grão.

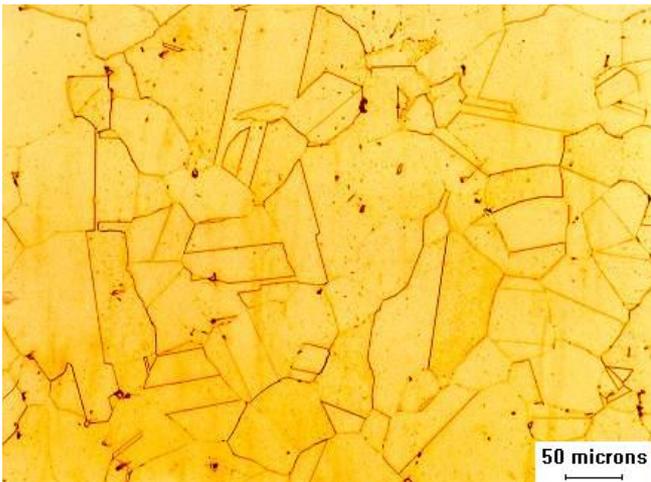


Figura 17

Tubo novo, sem tratamento térmico. Ataque 1,5 min conforme ASTM A- 262 – Prática “A”.
Amostra analisada: TN-1M-A

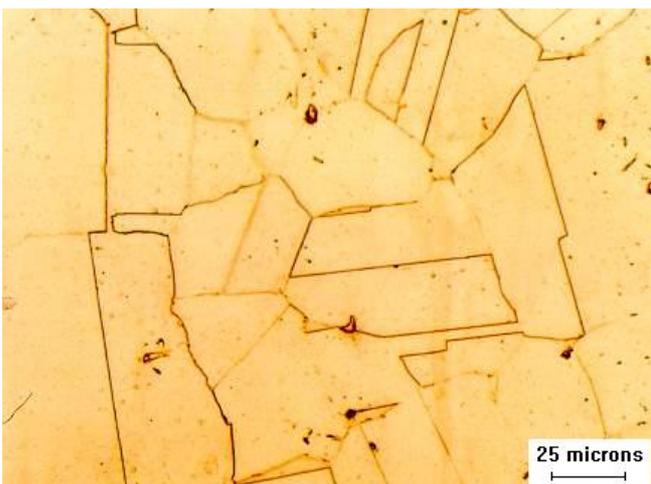


Figura 18

Mesmo campo da figura 17, registrado com maior aumento.
Amostra analisada: TN-1M-A

Procedeu-se então um tratamento térmico de sensitização acelerada deste tubo novo. Na avaliação metalográfica dos correspondentes corpos de prova constatou-se significativo grau de precipitação de carbonetos de Cromo nos contornos de grão (Figuras 19 e 20), caracterizando que este tubo de fato não foi submetido ao tratamento térmico de estabilização quando do fornecimento. Na norma ASTM A 213 (como também o era na A 271), o tratamento térmico de estabilização é um requisito suplementar opcional na fabricação destes tubos.

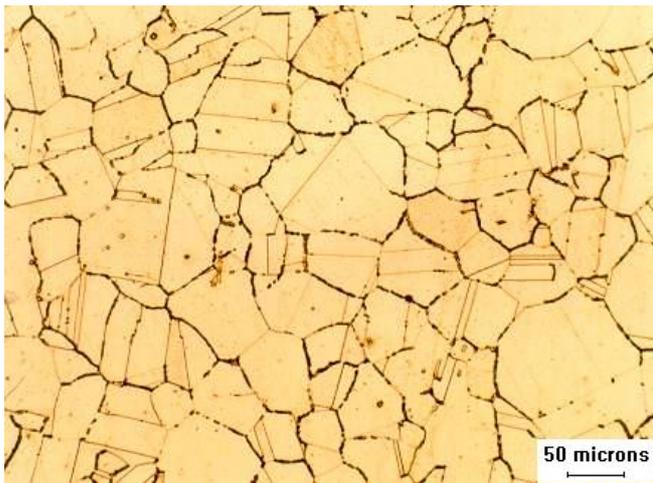


Figura 19

Tubo novo, sensitizado. Ataque 1,5 min conforme ASTM A- 262 – Prática “A”.
Amostra analisada: TN-1M-D

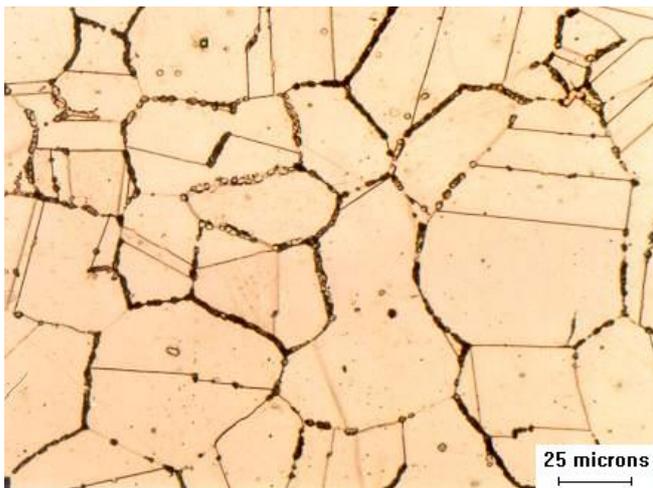


Figura 20

Mesmo campo da figura 19, registrado com maior aumento.
Amostra analisada: TN-1M-D

Conforme visto no item 5.1.2, esta condição de sensitização acentuada do material não foi suficiente para torná-lo susceptível à CIG, segundo o método da Prática “E” da ASTM A-262.

Na condição de estabilizado apenas (TN-3), as características do material são idênticas ao metal base apresentado nas discussões da solda teste 2 (ST-2) adiante. A condição solubilizado e estabilizado (TN-2) é idêntica ao TN-3, uma vez que foi confirmado o estado de solubilizado no TN-1. Ver Figura 15 e Tabela 4.2.

5.2 Condição dos Tubos Velhos para os Testes

Os trechos de “tubo velho” que foram utilizados nas soldas teste foram oriundos do niple N3 do Tubo 17 (item AP1.3 do Apêndice 1), portanto, já sensitizado em operação na fornalha de EDC e potencialmente susceptível à CIG generalizada – conforme registrado quando da análise da falha apresentada no Apêndice 1 deste trabalho. Dada à impossibilidade prática de tratar termicamente os tubos velhos nas fornalhas da Braskem (estão em serviço – montados e operando) e ao atenuante de que a CIG generalizada não tem sido o mecanismo de dano limitante da operação destes fornos de pirólise de EDC, decidiu-se tratar termicamente (solubilizar) apenas um dos trechos e o utilizar em uma das soldas teste (ST 3).

Ver fotomicrografias apresentadas nas Figuras 21 e 22. A Tabela 4.2 traz as referências de identificação das soldas e respectivos corpos de prova – CPs (tratados nos itens adiante).

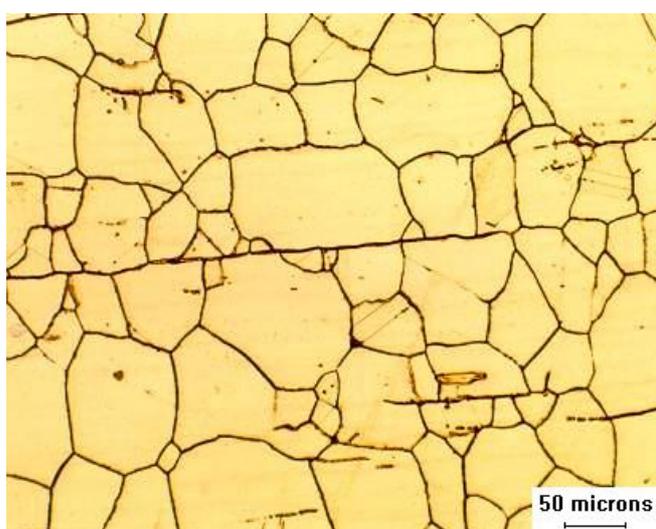


Figura 21

Solda: ST-1 Metal base do tubo velho (típico para as ST-1; 4 e 5)

Amostra analisada: CP-3

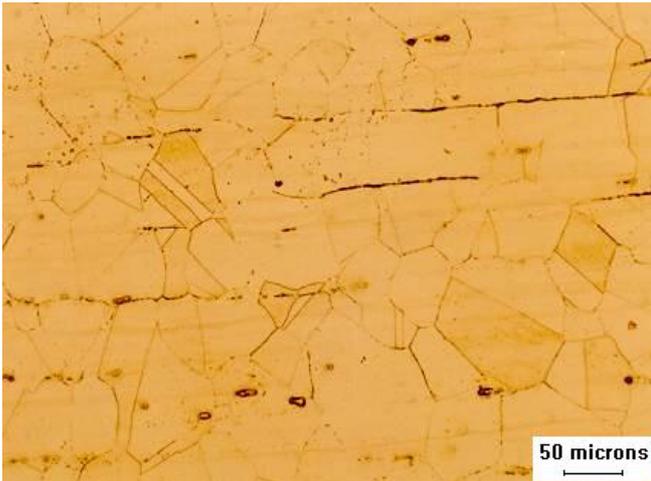


Figura 22

Solda: ST-3 (tubo novo X tubo velho). Metal base do tubo velho solubilizado.

Amostra analisada: CP-5

5.3 Varetas (consumível) Utilizadas nas Soldas Teste

Na busca do menor aporte de calor nas soldas, de uma relação Nb/C em torno de 12 a 14, de um teor de carbono em torno do teor mínimo da especificação “H” (de 0,04 %) e de garantir os teores de Nb + Ta \leq 1% da especificação para o grau 347, selecionou-se uma vareta AWS A5.9 ER 347 de $\varnothing = 2,4$ mm, de um fornecedor nacional, e verificou-se a sua composição química.

5.3.1 Análise Química das Varetas

A Tabela 5.3, comparativa da amostra das varetas fornecidas com a correspondente especificação da AWS, mostra os resultados das análises químicas realizadas, que confirmaram ser aceitável o atendimento do material de teste às especificações previstas.

Tabela 5.3 – Resultados das Análises Químicas das Varetas

AMOSTRA	ELEMENTOS ANALISADOS (%)									
	C	Cu	Cr	S	P	Mn	Mo	Nb	Ni	Si
V-1Q	0,031	0,072	18,63	ND	0,010	1,58	0,078	0,54	9,28	0,30
SFA 5.9 ER 347 (AWS)	0,08 max.	0,75 max.	19,0 a 21,5	0,03 máx	0,03 máx	1,00 a 2,50	0,75 max.	Obs: “c”	9,0 a 11,0	0,30 a 0,65

OBS:

- a) Análises por Absorção Atômica, ICP-Plasma, Volumetria e LECO
 - b) ND – Não detectado.
 - c) $[Nb + Ta]_{\text{mínimo}} = 10 \times \% C \text{ min}$; porém não superior a 1%. Obs.: Nb = Cb.
 - d) Não atende precisamente ao especificado quanto ao teor mínimo de Cromo.
 - e) A relação Nb/C de 17,4 ficou um pouco acima do que se pretendia, porém dentro do especificado.
 - f) O teor de Carbono um pouco abaixo de 0,04 % está em conformidade com a especificação AWS.
-

Foi definido utilizar estas varetas nos testes.

Entendeu-se ser uma possibilidade real de disponibilidade momentânea de mercado e que os desvios em relação ao desejado são absorvíveis. O teor de Cromo 0,37% abaixo do limite inferior especificado (desvio de 1,95 % em relação ao mínimo especificado) atua para um lado conservador destes testes (teoricamente ter-se-ia juntas sutilmente mais susceptíveis à corrosão no metal adicionado pela vareta).

O teor de Carbono um pouco abaixo de 0,04 % está em conformidade com a especificação AWS, atende a busca de menos C formador de $Cr_{23}C_6$, sem comprometer propriedades mecânicas, conforme será visto adiante nas análises das soldas teste. Lembrar que o mecanismo de fluência não é uma preocupação nestas fornalhas.

5.4 Elaboração e Qualificação do Procedimento de Soldagem

Como o objetivo maior deste estudo não era o de aprofundarmos no conhecimento dos processos de soldagem envolvidos em si e sim nas conseqüências metalúrgicas e de propriedades das soldas deles resultantes, pesquisou-se parâmetros de baixa energia na aplicação dos processos TIG Convencional e TIG Pulsado de baixa frequência (“térmico”) em aços da série AISI 300 e fizeram-se simulações de abertura e estabilidade do arco. Por fim foram estabelecidos os parâmetros básicos apresentados na Tabela 5.4 , utilizados para o desenvolvimento das qualificações das respectivas especificações dos procedimentos de soldagem e dos soldadores que participaram de todas estas cinco primeiras soldas realizadas (posição 6G).

Tabela 5.4 – Resumo dos Parâmetros Básicos das Cinco Primeiras Soldas Teste (ST)

TIG Pulsado				
Parâmetros	Raiz		Enchimento / Acabamento	
Polaridade	(CC -)		(CC -)	
Observações - Corrente de pulso (Ip): 140 a 160 A; Corrente de base (Ib): 40 a 60 A Tempo de pulso (tp): 0,5 s; Tempo de base (tb): 0,3 s; Frequência de pulsação (fp): fp = 1,25 Hz Pulsação de baixa frequência (fp = 1/(tp+tb) entre 1 e 10 Hz) ; chamada de “Pulsação Térmica”				
TIG Convencional				
Parâmetros	Raiz		Enchimento / Acabamento	
Polaridade	(CC -)		(CC -)	
Corrente (A)	100 a 130		100 a 130	
Tensão (V)	10 a 15		10 a 15	
Vazão de gás				
Parâmetros	Raiz		Enchimento / Acabamento	
	Purga	Tocha	Purga	Tocha
Tipo de Gás	Argônio	Argônio	N/A	Argônio
Composição (%)	99,9	99,9	N/A	99,9
Vazão (l/min.)	13 a 18	8 a 10	N/A	8 a 10

As Especificações de Procedimentos de Soldagem – EPS correspondentes e mais informações das qualificações compõem o Apêndice 2 deste documento.

Estes procedimentos já foram, inclusive, aplicados com sucesso em soldas de campo nos equipamentos da Braskem objeto deste estudo.

Nas Figuras 23 e 24 estão apresentados os oscilogramas reais da aplicação destes dois processos de soldagem nestas soldas experimentais (estes são especificamente das duas soldas finais, apresentadas no item 5.7, porém são típicos para todas as sete soldas).

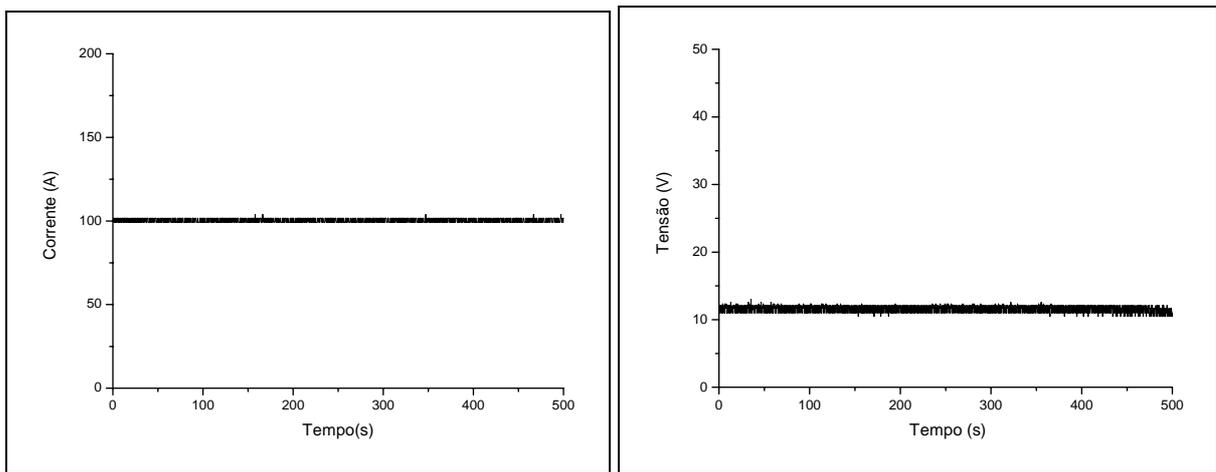


Figura 23 – Oscilograma típico do TIG Convencional aplicado.

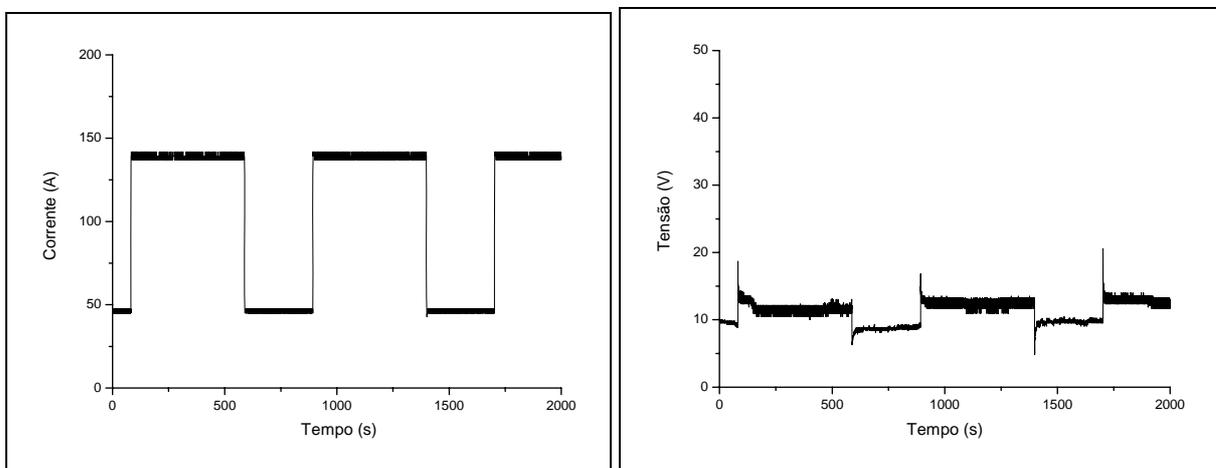


Figura 24 – Oscilograma típico do TIG Pulsado Térmico realizado.

5.5 Verificação da Susceptibilidade à CIG das Soldas Teste

Como definido nas Tabelas 4.1 e 4.2, foram removidos e testados corpos de prova das Soldas Teste 1, 2, 3 e 4, tanto antes como após a realização de seus respectivos tratamentos térmicos de estabilização, e testados para verificar sua resistência ou não a uma corrosão intergranular quando em serviço. Aplicou-se aqui também a Prática “E” (Copper-Copper Sulfate-16% Sulfuric Acid Test for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steel) da norma ASTM A-262, 2002, com o requisito de tratamento de sensitização prévio.

Os resultados destes testes compõem a Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Resultados dos Ensaios de Susceptibilidade à CIG das Soldas Teste

SOLDA TESTE	CORPO DE PROVA	POSIÇÃO DE DOBRAMENTO	TRATAMENTO TÉRMICO	LAUDO	OBSERVAÇÕES
ST-1	CP 3-1	Tração na Raiz da Solda	-	Aceitável	Imersão por 24h na solução
	CP 3-2	Tração na Raiz da Solda	-	Aceitável	Imersão por 24h na solução
	CP 3-3	Tração na Raiz da Solda	Estabilizado	Aceitável ^[*]	Pequena falta de fusão ^[*]
	CP 3-4	Tração na Raiz da Solda	Estabilizado	Aceitável	Imersão por 24h na solução
ST-2	CP 4-1	Tração na Raiz da Solda	-	Aceitável	Imersão por 24h na solução
	CP 4-2	Tração na Raiz da Solda	-	Aceitável	Imersão por 24h na solução
	CP 4-3	Tração na Raiz da Solda	Estabilizado	Aceitável	Imersão por 24h na solução
	CP 4-4	Tração na Raiz da Solda	Estabilizado	Aceitável	Imersão por 24h na solução
ST-3	CP 5-1	Tração na Raiz da Solda	-	Aceitável	Imersão por 24h na solução
	CP 5-2	Tração na Raiz da Solda	-	Aceitável	Imersão por 24h na solução
	CP 5-3	Tração na Raiz da Solda	Estabilizado	Aceitável	Imersão por 24h na solução
	CP 5-4	Tração na Raiz da Solda	Estabilizado	Aceitável	Imersão por 24h na solução
ST-4	CP 6-1	Tração na Raiz da Solda	-	Aceitável	Imersão por 24h na solução
	CP 6-2	Tração na Raiz da Solda	-	Aceitável	Imersão por 24h na solução
	CP 6-3	Tração na Raiz da Solda	Estabilizado	Aceitável	Imersão por 24h na solução
	CP 6-4	Tração na Raiz da Solda	Estabilizado	Aceitável	Imersão por 24h na solução

OBS:

- a) A pequena falta de fusão identificada^[*] no corpo de prova CP 3-3 foi uma descontinuidade da solda e não tem correlação com corrosão, motivo deste ensaio. A amostra também não está susceptível à CIG.

Constata-se mais uma vez a não susceptibilidade à CIG deste material (inox TP 347H), de acordo com a Prática “E” da norma ASTM A-262, desta feita já na condição de pós-soldado, sem e com a realização do tratamento térmico de estabilização.

5.6 Avaliação Metalúrgica das Primeiras Soldas Teste

Conforme o Mapa de Amostras da Tabela 4.1, utilizou-se a metalografia ótica para caracterizar e analisar as microestruturas dos corpos de prova (CPs) removidos das cinco soldas realizadas (Tabela 4.2).

A exceção da solda teste ST-2, os corpos de prova foram avaliados na condição de solda acabada e não tratada termicamente, mesmo quando o tratamento pós-soldagem era também previsto e foi executado (ST-1, 3 e 4). Buscou-se maior fidelidade à condição de soldagem no campo - onde estes tratamentos seriam de muito difícil execução – e evitar prejuízo à análise dos lados de “tubo velho” das soldas, devido à solubilização parcial dos carbonetos de Cromo precipitados em operação, que ocorrem com estes tratamentos das soldas.

De uma forma geral, todas as soldas apresentaram aspectos metalúrgicos similares e compatíveis com uma execução de boa qualidade: sem descontinuidades geométricas, textura uniforme da zona fundida, tamanho de grão da ZTA uniforme e razoavelmente similar ao do metal base etc. Constatou-se também a não intensificação relevante de deposição de carbonetos nas ZTAs das soldas e a eficácia da remoção das regiões carburizadas na superfície interna dos tubos velhos.

As Figuras 25 a 31 a seguir foram selecionadas para esta caracterização.

Nas figuras 25, 26 e 27 visualizamos o lado de tubo velho de soldas, onde se vê alguns dos aspectos positivos citados; ressalta-se a solubilização dos carbonetos $(Cr,Fe)_{23}C_6$ do tubo velho e a suavidade da raiz da solda.

Todas estas figuras correspondem a fotomicrografias das seções transversais das soldas realizadas, obtidas através de microscopia ótica em corpos de prova preparados para visualização e análise através de técnicas metalográficas adequadas à caracterização de suas microestruturas. Composição (montagem) de fotografias se fez necessária devido ao campo de abrangência das fotos para a dimensão do trecho de corpo de prova observado relativo ao aumento ótico utilizado no microscópio quando destes registros.

Os resultados dos ensaios de susceptibilidade à CIG vistos no item anterior também reforçam a constatação, nesta fase, de uma solubilização controlada de carbonetos na ZTA, provavelmente restrita aos $(Cr,Fe)_{23}C_6$ e sem a indesejável dissolução significativa dos carbonetos NbC.

As avaliações mais pormenorizadas foram executadas nas duas novas soldas experimentais finais e compõe o item 5.7 deste trabalho.



Figura 25 – Solda: ST-4 (tubo novo X tubo velho). Vista geral da linha de fusão do tubo velho. Amostra analisada: CP - 6



Figura 26 – Solda: ST-4 (tubo novo X tubo velho). Linha de fusão e ZTA do tubo velho, próximo à face (superfície externa) da solda. Amostra analisada: CP - 6

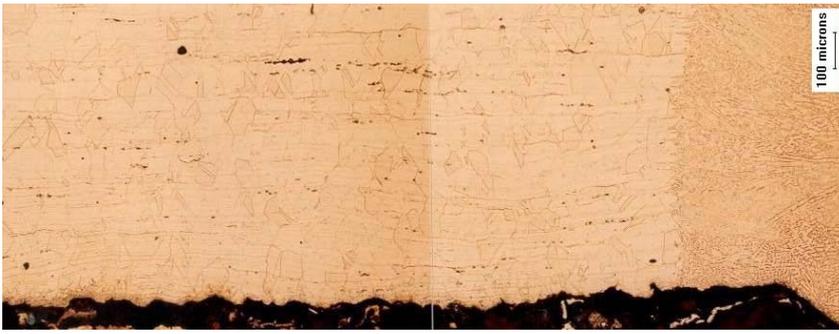


Figura 27 – Solda: ST-3 (tubo novo X tubo velho). Linha de fusão e ZTA solubilizada do tubo velho, próximo à raiz da solda. Amostra analisada: CP-5

Similarmente aos registros dos lados de soldas correspondentes a tubos velhos, acima, registra-se nas figuras 28, 29 e 30 aspectos dos lados de tubos novos; ressalta-se a impossibilidade de clara identificação da ZTA, dada à quase inexistência de carbonetos $(Cr,Fe)_{23}C_6$ precipitados no tubo de origem (que fossem visualmente perceptíveis) para solubilização pelo processo de soldagem, bem como o não crescimento do tamanho de grão.



Figura 28 – Solda: ST-5 (tubo novo X tubo velho). Vista geral da linha de fusão do tubo novo. Amostra analisada: CP-7



Figura 29 – Solda: ST-5 (tubo novo X tubo velho). Linha de fusão do tubo novo, próximo à face (superfície externa) da solda. Amostra analisada: CP-7

Na figura 30 observa-se que o tratamento térmico de estabilização pode ter provocado a precipitação de alguns carbonetos de Cromo nos contornos de grão. Os ensaios relatados no item anterior comprovam, no entanto, o esperado não comprometimento da resistência à CIG desta solda.



Figura 30 – Solda: ST-2 (tubo novo X tubo novo). Linha de Fusão, próximo à raiz da solda. Amostra analisada: CP-4

Na Figura 31 está registrada uma microestrutura típica da zona fundida destas soldas.



Figura 31 – Solda: ST-4 (tubo novo X tubo velho). Vista da raiz da solda.
Amostra analisada: CP - 6

Definiu-se então a realização de duas soldas experimentais adicionais (finais), apresentadas no item a seguir, quando foram melhor exploradas as relações entre os parâmetros dos procedimentos aplicados com as conseqüências na metalurgia das soldas.

5.7 Soldas Experimentais Finais

Nesta fase foram executadas mais duas Soldas Teste utilizando os procedimentos de soldagem TIG Convencional e Pulsado qualificados na etapa anterior, desta feita posicionando os tubos na posição 5G, portanto, de forma similar à condição real de execução no campo (nas fornalhas). Cumpriu-se então um acompanhamento rigoroso dos parâmetros de execução destas soldas e um plano de amostragem e análise particularmente voltado para um comparativo dos efeitos metalúrgicos resultantes. No Apêndice 3 estão os registros das 2 soldas experimentais finais; ambas executadas pelo mesmo soldador.

Buscava-se uma validação definitiva da adequação dos procedimentos selecionados à sua aplicação nas fornalhas da Braskem e uma consolidação do aprendizado até então.

Os Parâmetros básicos dos procedimentos atenderam ao apresentado na Tabela 5.4.

A seqüência de passes em cada solda se deu conforme a Figura 32 e o acompanhamento realizado seguiu a divisão das soldas em seções apresentada na Figura 33.

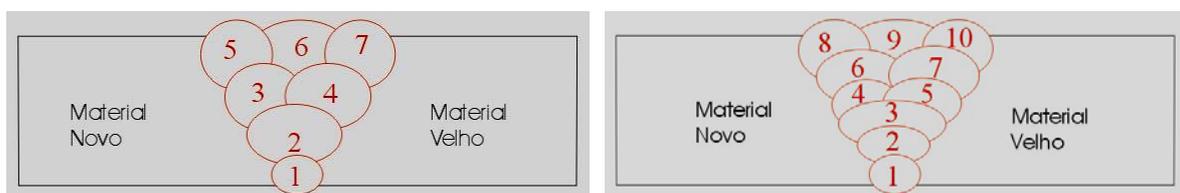


Figura 32 – Seqüência de Passes das Soldas (TIG Convencional, à esquerda, e TIG Pulsado)

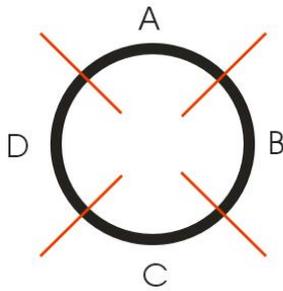


Figura 33 – Divisão da Solda em Seções (Perímetro = 485 mm / Cada Seção = 121 mm)

5.7.1 Acompanhamento das Velocidades de Soldagem

Realizou-se o acompanhamento das soldas em cada seção de cada passe. Os resultados para a solda realizada com o procedimento de TIG Convencional constam da Tabela 5.6 e o de TIG pulsado na Tabela 5.7.

Tabela 5.6 – Acompanhamento da solda final com TIG Convencional

Passe	Tipo	Tempo Efetivo de Soldagem (arco aberto)				Tempo por Passe	Tempo Médio (seções)
		Posição					
		Plana A	Ascendente B	Sobrecabeça C	Ascendente D		
1	Raiz	00:05:05	00:05:40	00:03:50	00:05:05	00:19:40	00:04:55
2	Enchimento	00:04:00	00:03:00	00:03:25	00:03:44	00:14:09	00:03:32
3	Enchimento	00:02:15	00:02:07	00:02:06	00:03:12	00:09:40	00:02:25
4	Enchimento	00:02:11	00:02:27	00:02:16	00:02:30	00:09:24	00:02:21
5	Acabamento	00:01:53	00:01:20	00:02:00	00:01:45	00:06:58	00:01:45
6	Acabamento	00:02:40	00:02:00	00:03:00	00:02:10	00:09:50	00:02:27
7	Acabamento	00:02:00	00:03:00	00:02:25	00:01:58	00:09:23	00:02:21
Tempo Efetivo Total		00:20:04	00:19:34	00:19:02	00:20:24	01:19:04	

Passe	Tipo	Velocidade de Soldagem (mm/min)				Velocidade Média (por passe)	Média das Velocidades
		Posição					
		Plana A	Ascendente B	Sobrecabeça C	Ascendente D		
1	Raiz	23,85	21,40	31,63	23,85	24,66	25,18
2	Enchimento	30,31	40,42	35,49	32,48	34,28	34,67
3	Enchimento	53,89	57,28	57,74	37,89	50,17	51,70
4	Enchimento	55,53	49,49	53,49	48,50	51,60	51,75
5	Acabamento	64,38	90,94	60,63	69,29	69,62	71,31
6	Acabamento	45,47	60,63	40,42	55,96	49,32	50,62
7	Acabamento	60,63	40,42	50,17	61,65	51,69	53,22
Velocidade Média		42,30	43,38	44,59	41,61		

Velocidade Média Total (Soma dos Perímetros/Tempo Total) (mm/min)	42,94
--	--------------

Tabela 5.7 – Acompanhamento da Solda Final com TIG Pulsado

Tempo Efetivo de Soldagem (arco aberto)							
Passe	Tipo	Posição				Tempo por Passe	Tempo Médio (seções)
		Plana	Ascendente	Sobrecabeça	Ascendente		
		A	B	C	D		
1	Raiz	00:03:43	00:04:00	00:03:15	00:05:00	00:15:58	00:04:00
2	Enchimento	00:03:34	00:02:32	00:02:30	00:02:30	00:11:06	00:02:46
3	Enchimento	00:02:41	00:03:58	00:02:49	00:04:23	00:13:51	00:03:28
4	Enchimento	00:02:00	00:02:28	00:02:40	00:03:45	00:10:53	00:02:43
5	Enchimento	00:01:35	00:02:15	00:03:28	00:02:10	00:09:28	00:02:22
6	Enchimento	00:02:15	00:02:30	00:02:08	00:02:11	00:09:04	00:02:16
7	Enchimento	00:02:00	00:02:59	00:01:48	00:02:58	00:09:45	00:02:26
8	Acabamento	00:01:30	00:02:00	00:02:00	00:03:50	00:09:20	00:02:20
9	Acabamento	00:02:24	00:02:15	00:02:10	00:03:50	00:10:39	00:02:40
10	Acabamento	00:02:30	00:03:50	00:02:00	00:03:10	00:11:30	00:02:53
Tempo Efetivo Total		00:24:12	00:28:47	00:24:48	00:33:47	01:51:34	

Velocidade de Soldagem (mm/min)							
Passe	Tipo	Posição				Velocidade Média (por passe)	Média das Velocidades
		Plana	Ascendente	Sobrecabeça	Ascendente		
		A	B	C	D		
1	Raiz	32,62	30,31	37,31	24,25	30,38	31,12
2	Enchimento	34,00	47,86	48,50	48,50	43,69	44,71
3	Enchimento	45,19	30,57	43,05	27,66	35,02	36,62
4	Enchimento	60,63	49,16	45,47	32,33	44,56	46,90
5	Enchimento	76,58	53,89	34,98	55,96	51,23	55,35
6	Enchimento	53,89	48,50	56,84	55,53	53,49	53,69
7	Enchimento	60,63	40,64	67,36	40,87	49,74	52,37
8	Acabamento	80,83	60,63	60,63	31,63	51,96	58,43
9	Acabamento	50,52	53,89	55,96	31,63	45,54	48,00
10	Acabamento	48,50	31,63	60,63	38,29	42,17	44,76
Velocidade Média		50,10	42,13	48,89	35,89		

Velocidade Média Total (Soma dos Perímetros/Tempo Total) (mm/min)	43,47
--	--------------

A primeira constatação básica foi que todo o aparato utilizado para a monitoração e acompanhamento das soldas influenciou psicologicamente o soldador. As velocidades de soldagem obtidas ficaram abaixo do usual e aspectos de composição das soldas, como o número de passes e camadas com a variante pulsada, acabaram sendo atípicos. Oportunamente, nos itens adiante, as influências destes fatos são comentadas.

Comparando, a Velocidade Média para todos os passes foi praticamente a mesma nos dois processos, no entanto, com o TIG Pulsado soldaram-se 43 % mais passes, portanto, mais comprimento de solda. Como consequência, o tempo de soldagem efetiva do TIG Pulsado foi 41% maior (32 min mais demorado) que na solda com o TIG Convencional.

Correlacionando-se diretamente o tempo de execução como uma medição do grau de dificuldade para o soldador, confirmou-se ser a raiz da solda o passe que apresenta a maior dificuldade geral de execução. Identificou-se ser a Seção D (ascendente) a que apresentou o maior grau de dificuldade por passe (esta última, em comparação com a Seção B – posição similar e também ascendente); acredita-se que mais em função de características individuais do soldador e do posicionamento em bancada dos tubos para as soldagens em 5G.

Analisando então a Velocidade Média de todos os passes em cada seção de solda, confirmou-se a maior dificuldade na Seção D (menor velocidade média). Ver Figura 34.

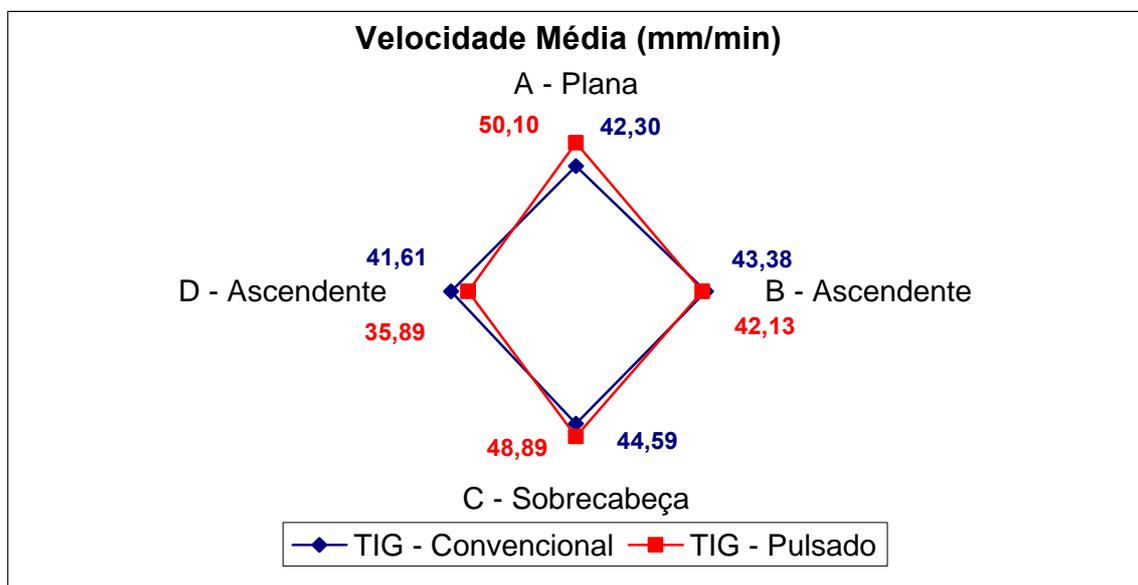


Figura 34 – Velocidade Média em Todos os Passes, por Seção.

Particularizando a avaliação para a velocidade média em cada seção apenas nos passes de raiz, verificou-se uma consistente maior velocidade com o TIG Pulsado. A Figura 35 mostra os valores para cada seção e será útil para considerações quanto à dimensão das ZTAs, avaliadas adiante.

Outras análises se valerão dos resultados apresentados até este ponto.

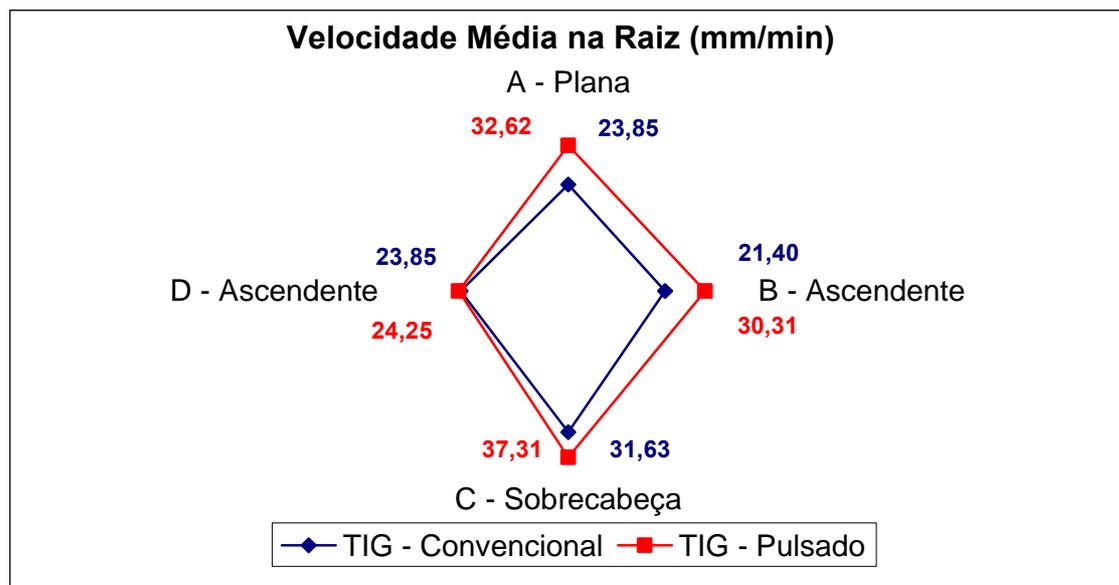


Figura 35 – Velocidade Média por Seção nos Passes de Raiz.

5.7.2 Avaliação Metalúrgica das Duas Soldas Teste Finais

Dada à similaridade total destas duas soldas com as correspondentes da etapa anterior, *são válidas as análises e conclusões vistas no item 5.6*. O foco foi então concentrado na confirmação da boa qualidade das soldas resultantes dos procedimentos qualificados anteriormente e, especialmente, na caracterização das ZTAs obtidas. Mais particularmente ainda, estudou-se a região das raízes das soldas. *Estes registros serão referenciados adiante*.

Mais uma vez fez-se útil a excelente informação explicitada pela solubilização (no “tubo velho” de cada solda) dos carbonetos de Cromo originalmente precipitados nos contornos de grão durante a operação deste material na fornalha da Braskem.

Nota: Passamos doravante a, simplificadamente, considerar a largura da ZTA como sendo a região correspondente à de solubilização destes carbonetos visivelmente identificada através das observações metalográficas dos corpos de prova removidos; através de microscopia ótica e registro fotográfico (Figuras 36 a 45 adiante).

Estas duas soldas foram executadas com o mesmo soldador, buscando minimizar os efeitos desta variável importante do processo; apesar da maior prática do mesmo na utilização da variante convencional do TIG.

As Figuras 36 até 46 trazem o registro fotográfico da metalografia ótica aplicada nesta avaliação. Até a 45 visualiza-se o lado do “tubo velho” das soldas. Comparar ao item 5.6.

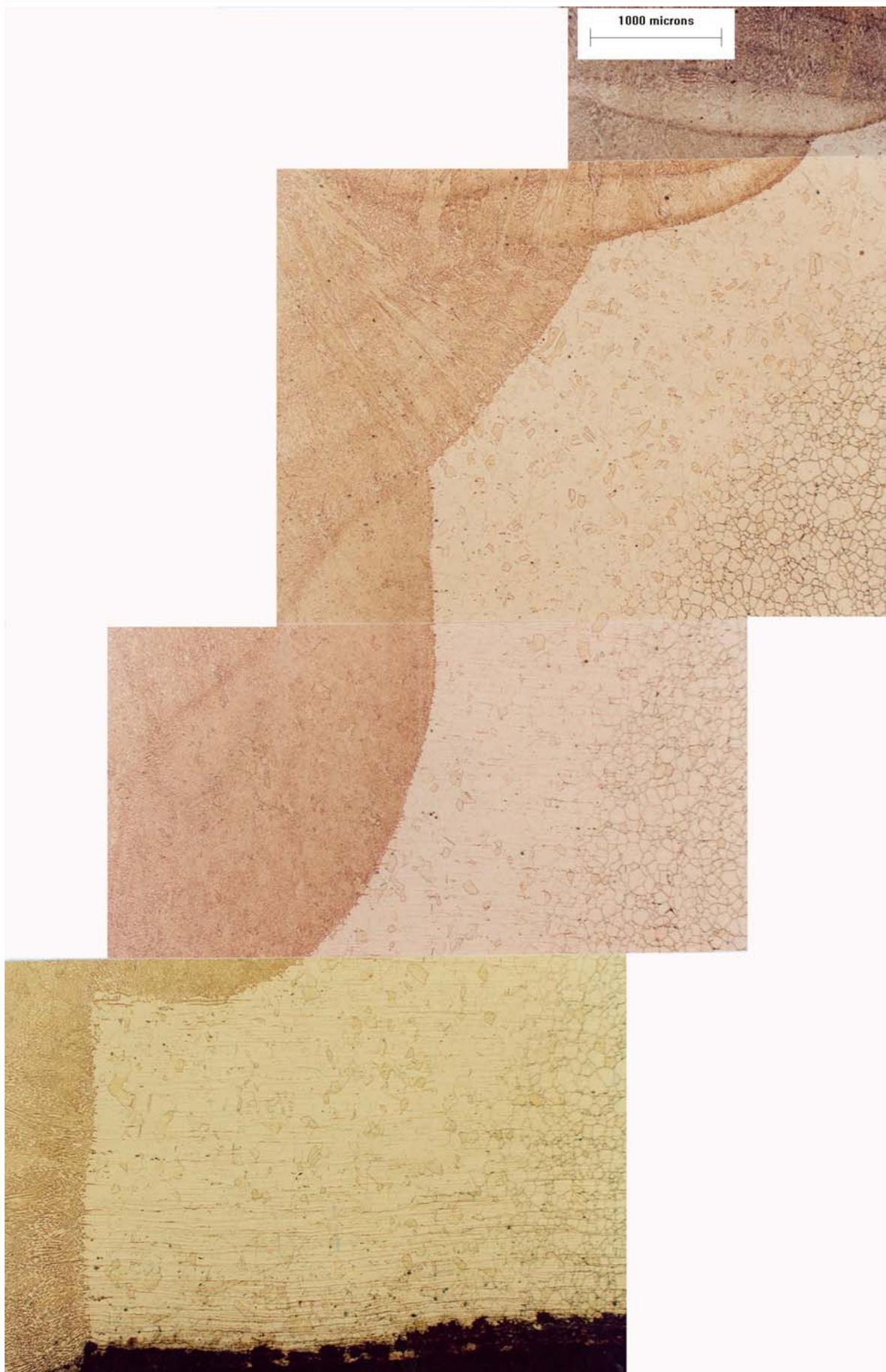


Figura 36 – TIG Convencional. Amostra analisada: CP da Seção “A”.



Figura 37 – TIG Pulsado. Amostra analisada: CP da Seção “A”.



Figura 38 – TIG Convencional. Amostra analisada: CP da Seção “B”.



Figura 39 – TIG Pulsado. Amostra analisada: CP da Seção “B”.



Figura 40 – TIG Convencional. Amostra analisada: CP da Seção “C”.



Figura 41 – TIG Pulsado. Amostra analisada: CP da Seção “C”.

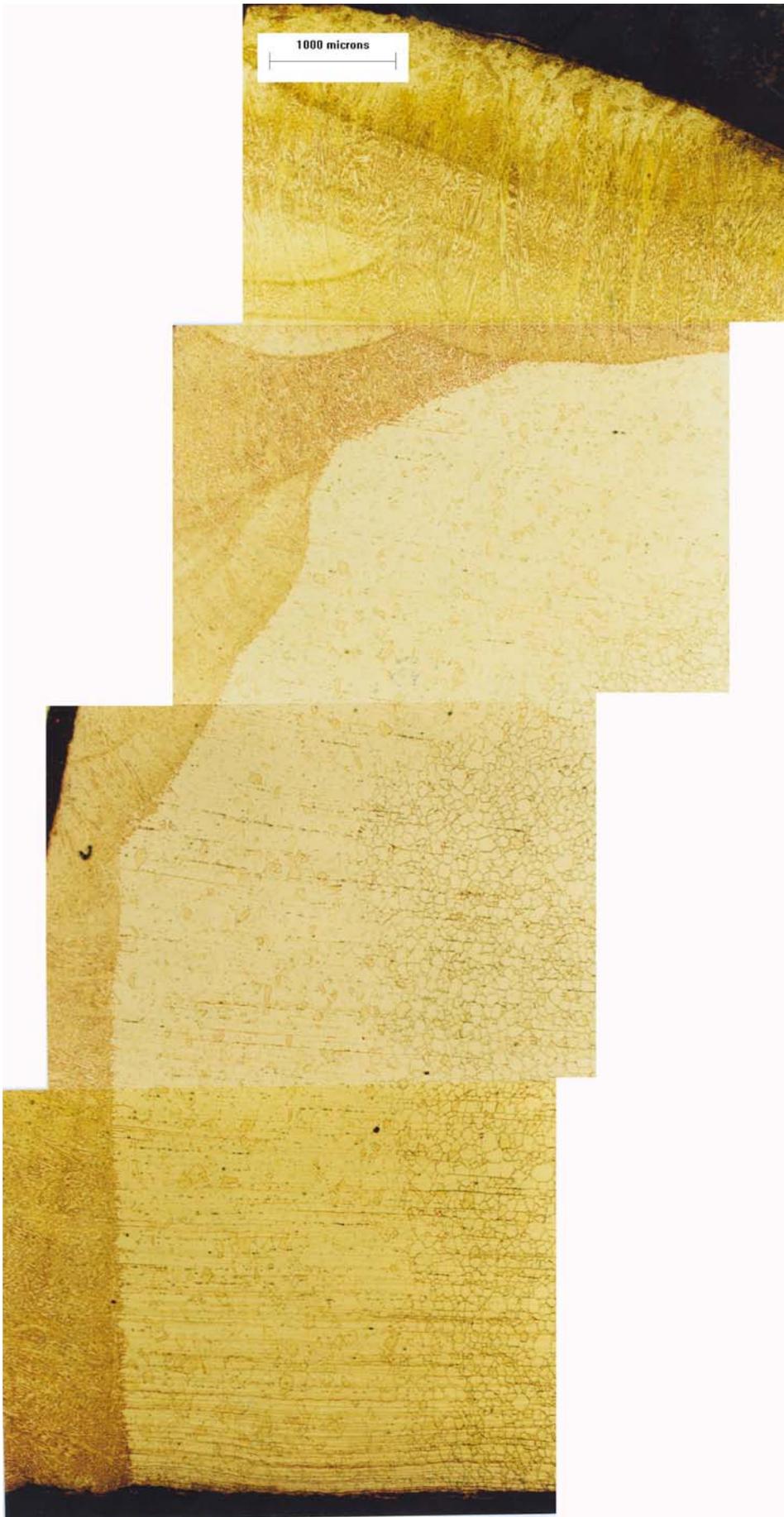


Figura 42 – TIG Convencional. Amostra analisada: CP da Seção “D”.



Figura 43 – TIG Pulsado. Amostra analisada: CP da Seção “D”.



Figura 44 – TIG Pulsado. Amostra analisada: CP da Seção “C” – Detalhe da Raiz.



Figura 45 – TIG Convencional. Amostra analisada: CP da Seção “C” – Detalhe da Raiz.

Na Figura 46 vê-se mais uma vez que os efeitos térmicos destes procedimentos de soldagem na ZTA de um tubo novo, originalmente solubilizado, são praticamente imperceptíveis. Pelo já analisado, estes efeitos são também desprezíveis quanto a um significativo favorecimento à corrosão intergranular “gume de faca”.

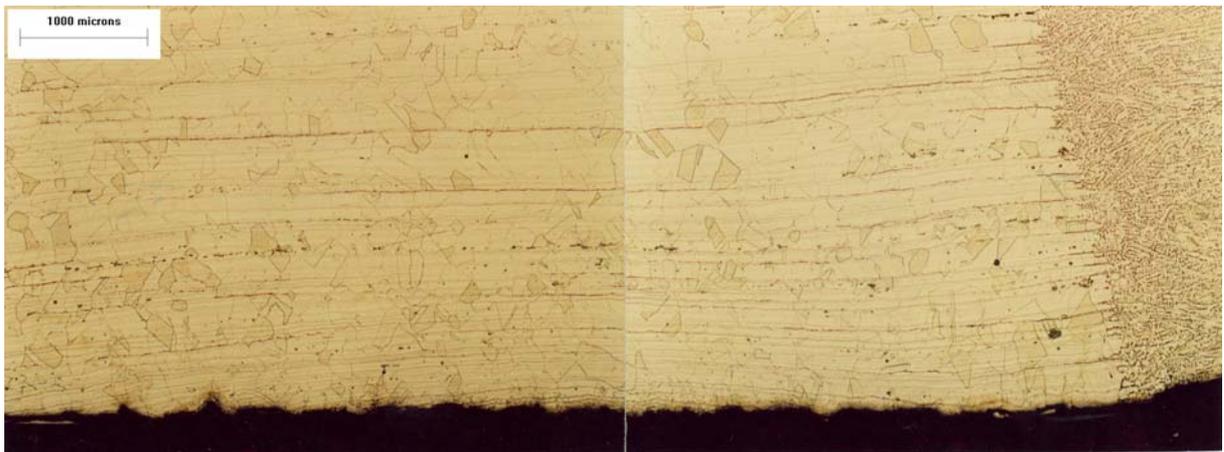


Figura 46 – TIG Pulsado: Tubo Novo, na raiz da solda.

Amostra analisada: CP da Seção “C”

5.7.2.a Dimensão Medida da ZTA – Zona Termicamente Afetada

Na análise metalográfica acima, pôde-se medir com o “image analyzer” a largura das ZTAs das duas soldas nas suas quatro Seções definidas (Figuras 36 a 46). Adotou-se aqui a ZTA conforme a Nota do item 5.7.2 (região correspondente à de solubilização de carbonetos visivelmente identificada nos lados dos tubos velhos nas micrografias dos CPs das soldas).

A Figura 47 traz de forma gráfica estes resultados quanto aos seus valores máximos e mínimos, ao longo da seção transversal à solda, e as dimensões em cada raiz.

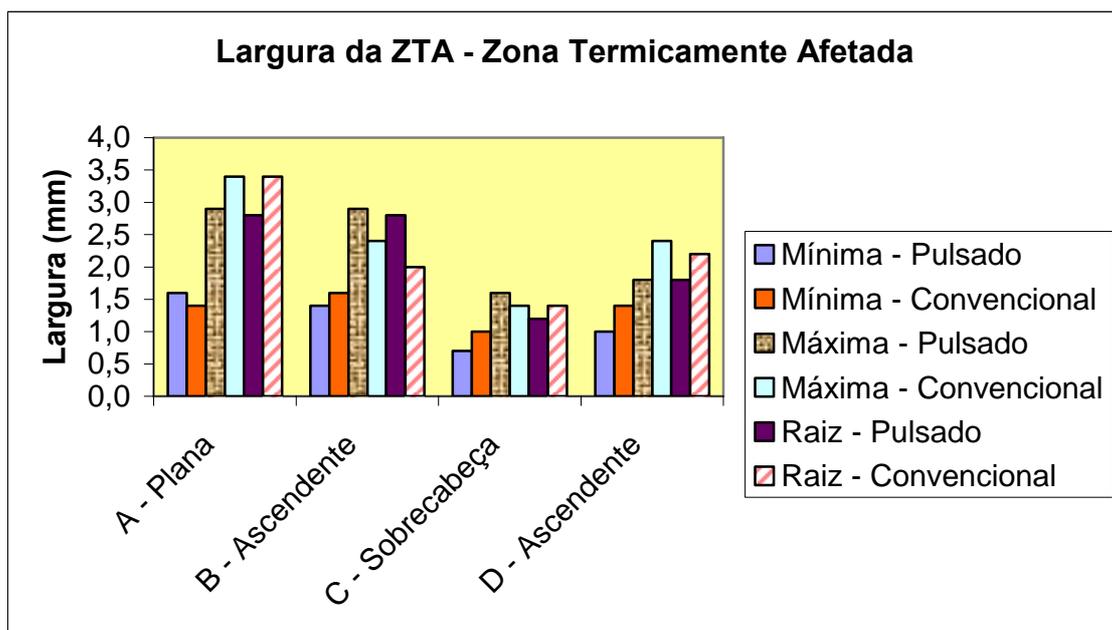


Figura 47 – Dimensões medidas das ZTAs (mm)

Correlacionando as dimensões das ZTAs nas raízes das soldas com as velocidades média de soldagem da Figura 35, vê-se que a solda com TIG Convencional apresentou resultados perfeitamente coerentes, com as menores velocidades nas seções A, B e D e a maior velocidade na seção C correspondendo de fato às suas respectivas maiores e menor larguras da ZTA. Na solda com TIG Pulsado a significativa maior velocidade em C corresponde também à menor ZTA, no entanto, a menor velocidade em D não se reflete consistentemente numa máxima ZTA (provavelmente a pouca prática do soldador com a variante pulsada influenciou em variações na soldagem da raiz, mesmo apenas numa seção – a raiz corresponde ao início da soldagem).

Verificando a relação % das dimensões das ZTAs das raízes das solda realizadas com os dois procedimentos, constata-se o esperado indicativo de um menor aporte térmico / energia proporcionado pelo procedimento de soldagem com a aplicação do TIG Pulsado (devido à proporcionalidade direta entre o aporte térmico e a dimensão da ZTA): confirmaram-se nas seções A, C e D larguras menores da ZTA na solda TIG Pulsado (provável menor energia) em relação à TIG Convencional. Apenas a seção B mostra um número curiosamente desviado dos demais, no entanto, restrito apenas à região da raiz da solda, visto que no restante da mesma se restabelece a lógica anterior. Ver a Figura 48.

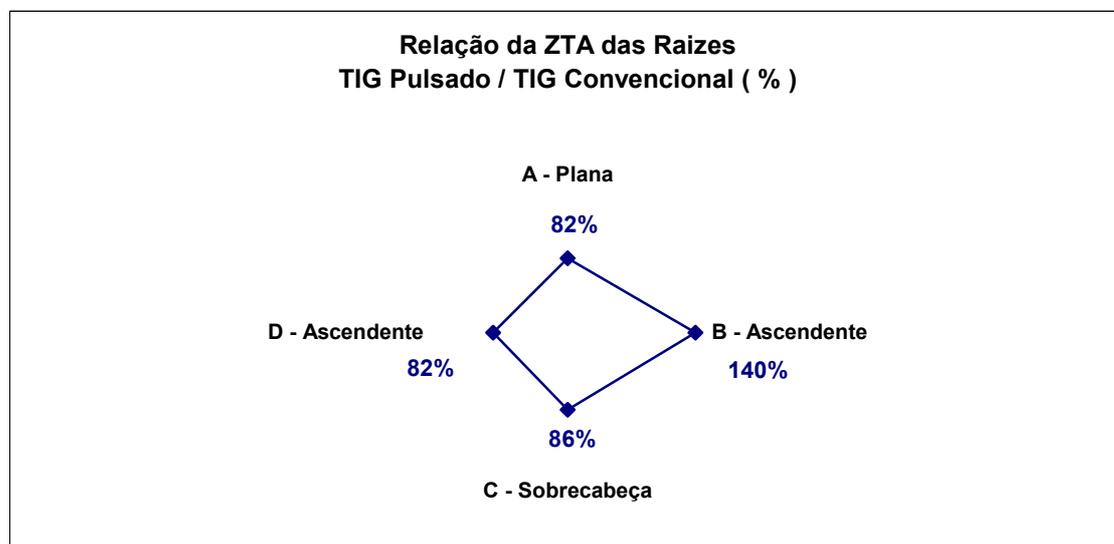


Figura 48 – Relação % das Dimensões das ZTAs do TIG Pulsado / TIG Convencional.

O indicativo de menor aporte térmico no procedimento com TIG Pulsado, auferido a partir das larguras das ZTAs observadas acima, foi então estudado com o suporte do equacionamento teórico e tratamento dos dados obtidos durante a execução das soldas.

5.7.3 Equacionamento Teórico das Energias Envolvidas nas Soldas

Como já registrado, no geral observou-se na solda realizada com o procedimento de TIG Pulsado faixas menos largas de carbonetos de Cromo solubilizados (em relação à de TIG Convencional). Este é um indicativo coerente, visto ser o pulsado uma variante deste processo de soldagem que possibilita um menor aporte de calor na peça e que nesta aplicação de ambos os procedimentos qualificados anteriormente buscou-se utilizar os menores ajustes que permitissem uma execução de soldagem estável pelo soldador executante das mesmas.

Realizou-se então uma análise das energias efetivamente envolvidas nestas soldas e seus impactos nas ZTAs resultantes. Particularizou-se inicialmente o passe de raiz.

Os dados das soldas executadas foram obtidos pelo monitoramento contínuo das variáveis; o resumo do passe de raiz está registrado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Resumo dos Oscilogramas dos Passes de Raiz

	Posição			
	A - Plana	B - Ascendente	C - Sobrecabeça	D - Ascendente
TIG Convencional				
Energia (J)	1165	1174	1117	1355
Potência (W)	1165	1174	1117	1355
Corrente (A)	115	115	115	115
Tensão (V)	12	10	12	13

	Posição			
	A - Plana	B - Ascendente	C - Sobrecabeça	D - Ascendente
TIG Pulsado				
Energia (J)	1036	897	975	1018
Potência (W)	1295	1121	1219	1273
Corrente de Pulso (A)	150	150	150	150
Corrente de Base (A)	50	55	50	50
Tensão de Pulso (V)	12	11	11	12
Tensão de Base (V)	9	8	9	9
Tempo de Pulso (s)	0,5	0,5	0,5	0,5
Tempo de Base (s)	0,3	0,3	0,3	0,3
$I_p = I_{média} = \bar{I}$ (A)	100	103	100	100
$U_p = U_{média} = \bar{U}$ (V)	10,5	9,5	10	10,5

Realizou-se o cálculo do aporte de calor efetivo na peça E (energia de soldagem = energia absorvida = “heat input”), em J/cm , considerando a eficiência do processo TIG como sendo de 0,70. Para tal foram utilizadas as equações 5.1 e 5.2 correspondentes ao processo TIG Convencional e Pulsado, respectivamente.

TIG Convencional:

$$E_c = \eta \cdot 60 \cdot I \cdot U / V_s \quad (5.1)$$

η = eficiência térmica do processo de soldagem;

I = corrente de soldagem (A);

U = tensão de soldagem (V);

V_s = velocidade de soldagem (cm/min)

TIG Pulsado:

$$E_p = \eta \cdot 60 \cdot (U_p \cdot I_p \cdot t_p + U_b \cdot I_b \cdot t_b) / V_s \cdot (t_p + t_b) \quad (5.2)$$

η = eficiência térmica do processo de soldagem;

I_p = corrente de pulso (A);

I_b = corrente de base (A);

t_p = tempo na corrente de pulso (A);

t_b = tempo na corrente de base (A);

U_p = tensão de soldagem (V) no pulso;

U_b = tensão de soldagem (V) na base;

V_s = velocidade de soldagem (cm/min)

Para a velocidade de soldagem (V_s) considerou-se as velocidades médias por seção de cada passe, para cada procedimento, vistas nas Tabelas 5.6 e 5.7.

As energias de soldagem absorvidas, por unidade de comprimento, em cada seção dos passes de raiz dos dois procedimentos utilizados estão apresentadas na Tabela 5.9. A Figura 33 indica a divisão das soldas nas seções A, B, C e D.

Na Tabela 5.9 estão também registradas as relações destas energias, por seção da solda.

Tabela 5.9 – Energias absorvidas, por seção, nos passes de raiz

	Posição			
	A - Plana	B - Ascendente	C - Sobrecabeça	D - Ascendente
TIG Convencional				
E_c = Energia de Soldagem absorvida na peça (KJ/cm)	24,3	22,6	18,3	26,3
TIG Pulsado				
E_p = Energia de Soldagem absorvida na peça (KJ/cm)	16,7	16,6	13,5	22,4
Relação E_p / E_c (%)	69	73	74	85

Obs: O rendimento do processo TIG (η) foi considerado de 0,7.

Estas relações de aporte de energia nas raízes das duas soldas comprovam ter sido o TIG Pulsado de menor energia que o Convencional, em todas as seções soldadas.

Os comparativos de dimensão de ZTA vistos até aqui consideraram cada passe como único, ou seja, sem levar em consideração os efeitos dos múltiplos ciclos térmicos que ocorrem nesta região devido à soldagem multipasses.

Sem a pretensão de exaurir este tema, que por si só já resultou em teses e certamente ainda influenciará outros trabalhos de pós-graduação, mas para reforçar o porquê da largura de ZTA ter sido no geral um pouco menor com o procedimento de TIG Pulsado em relação ao de TIG Convencional mesmo considerando o efeito multipasses, foi feito o cálculo e análise do total de energia aportado nas duas diferentes soldas, por passe e no total. Os dados reais do monitoramento das execuções em laboratório foram também aqui utilizados e os resultados constam da Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Energia Total (soma das energias absorvidas em cada seção de cada passe)

TIG Convencional						
Hc = Energia de Soldagem absorvida na peça (KJ)						
Passe	Tipo	Posição				Energia Total (por passe)
		Plana	Ascendente	Sobrecabeça	Ascendente	
		A	B	C	D	
1	Raiz	295	328	222	295	1140
2	Enchimento	232	174	198	216	820
3	Enchimento	130	123	122	185	560
4	Enchimento	127	142	131	145	545
5	Acabamento	109	77	116	101	404
6	Acabamento	155	116	174	126	570
7	Acabamento	116	174	140	114	544
Energia absorvida, por Seção		1163	1134	1103	1182	
Energia Total (Soma das Energias absorvidas em cada Seção de cada Passe) (KJ)						4583
TIG Pulsado						
Hp = Energia de Soldagem absorvida na peça (KJ)						
Passe	Tipo	Posição				Energia Total (por passe)
		Plana	Ascendente	Sobrecabeça	Ascendente	
		A	B	C	D	
1	Raiz	202	201	164	272	838
2	Enchimento	194	127	126	136	583
3	Enchimento	146	199	142	238	725
4	Enchimento	109	124	134	204	571
5	Enchimento	86	113	175	118	492
6	Enchimento	122	126	108	119	474
7	Enchimento	109	150	91	161	510
8	Acabamento	82	100	101	208	491
9	Acabamento	130	113	109	208	561
10	Acabamento	136	193	101	172	601
Energia absorvida, por Seção		1315	1446	1250	1836	
Energia Total (Soma das Energias absorvidas em cada Seção de cada Passe) (KJ)						5847
Relação entre as Energias Totais do TIG Pulsado para o TIG Convencional						128%

O aporte total de energia para a peça soldada com o processo Pulsado foi, portanto, 28% maior que para a peça soldada com TIG Convencional. No entanto, como visto no item 5.7, a solda com o procedimento TIG Pulsado demandou três passes a mais que no TIG Convencional, o que representou um adicional de 43% no comprimento total soldado, diluindo este aporte a cada instante.

Analisando-se as energias totais por cada passe (Figura 32 e Tabela 5.10), constata-se que a média do TIG Pulsado é de 89 % da do TIG Convencional e que seu passe de maior energia absorvida representou 74 % da deste último (ambos na raiz da solda).

Avaliando-se a variação de energia na execução das diferentes seções de cada passe com as duas variantes do processo TIG, ambas apresentaram diferenças de cerca de 100% entre seus correspondentes valores mínimo e máximo na raiz. Na solda com o TIG Pulsado as variações foram relevantes e freqüentes na maioria dos passes, chegando a 127 % num dos passes de acabamento. A solda com o TIG Convencional apresentou maior estabilidade dos valores de energia, refletindo a maior prática do soldador nesta variante.

Particularizando a análise para cada seção de passe soldado (Figuras 32 e 33) e, em especial correlacionando passes de efeitos equivalentes na ZTA pelo processo em múltiplos passes (Tabela 5.11), vê-se pelas relações de energias absorvidas que 61 % das seções da solda com a aplicação da variante pulsado apresentaram menor energia absorvida que na convencional, sendo que na grande maioria das seções A e C dos diferentes passes se manteve uma proporcionalidade similar. As maiores variações de proporção energética ocorreram nas seções D e B, nesta ordem; novamente reflexo da prática do soldador.

Tabela 5.11 – Relação de Energia total em Passes Equivalentes (Pulsado / Convencional)

Ep / Ec = Relação das Energias de Soldagem absorvidas nas peças								
TIG Pul.	TIG Conv.	Tipo	Posição				Energia Total (por passe)	Quantidade de Seções TIGp < TIGc
			Plana A	Ascend. B	Sobrec. C	Ascend. D		
Passes								
1	1	Raiz	0,69	0,61	0,74	0,92	0,74	4
2	2	Enchimento	0,84	0,73	0,64	0,63	0,71	4
3	2	Enchimento	0,63	1,15	0,72	1,10	0,88	2
4	3	Enchimento	0,83	1,01	1,10	1,10	1,02	1
6	3	Enchimento	0,94	1,02	0,88	0,64	0,85	3
5	4	Enchimento	0,68	0,80	1,33	0,81	0,90	3
7	4	Enchimento	0,86	1,06	0,69	1,11	0,94	2
8	5	Acabamento	0,75	1,30	0,87	2,05	1,22	2
10	7	Acabamento	1,17	1,11	0,72	1,51	1,11	1
Seções com TIGp < TIGc			89%	33%	78%	44%	67%	61%

Excetuando-se os passes de acabamento (influenciados por cuidados estéticos), o TIG Pulsado resultou em ocorrências de maior energia em 57 % das seções B de passes equivalentes. Nas demais seções (A, C e D) o Pulsado apresentou sempre ocorrências de menor energia por seções equivalentes na seguinte proporção: A = 100 %, C = 71 % e na D = 57 %.

Constatou-se, portanto, que a variante Pulsado do TIG resultou de fato em menor aporte de energia na ZTA da peça soldada.

Uma breve caracterização da menor prática do soldador com o TIG na sua variante Pulsado pode ser observada na Figura 49, que traz macrografias de seções transversais das soldas nas regiões em que as mesmas foram iniciadas; observa-se inclusive a falta de fusão / penetração na raiz da solda com a variante do TIG Pulsado (ocorrida apenas nesta região selecionada para o corte transversal da solda e remoção do corpo de prova).



Figura 49 – Macrografias de Seções Transversais no Trecho de Início das Soldas

Esta outra constatação indica que na necessidade de soldagem com o TIG Pulsado, caso o soldador não venha frequentemente executando soldas com esta variante do TIG o mesmo deve realizar práticas com o procedimento qualificado antes da execução das soldas definitivas (mesmo estando qualificado para tal). Nestas práticas buscar os parâmetros de menor energia que o soldador consiga estabilidade na soldagem.

A mudança de processo de eletrodo revestido - ER para TIG, se justifica, porém, no caso da aplicação aqui estudada os parâmetros do TIG Pulsado não foram otimizados (Imedia alta). Tal fato indica a possibilidade de se obter soldas ainda mais estáveis quanto à minimização de solubilizações de carbonetos de Níbio e, portanto, também mais favoráveis à operarem em condições similares aos fornos de pirólise de EDC da Braskem.

O aporte de energia resultou elevado nas soldas também pela Velocidade de soldagem bastante baixa.

5.7.4 Cálculo da ZTA pela Energia Absorvida

Feitos os cálculos para estimar a largura da ZTA (ZAC) usando o software “metsolda” (baseado nas equações de Rosenthal e Adams) chega-se a valores compatíveis com o que foi medido nos corpos de prova das Figuras 36 a 45 e tratados neste item 7.2, mais explicitamente na Figura 47. Por exemplo:

- assumindo o aporte de 20 kJ/cm como representativo (Tabela 5.9);
- eficiência de 0,70 para o TIG;
- chanfro em Y;

Chega-se a largura da ZTA de 2,3 mm (supondo carbetos dissolvendo para Típico acima de 800°C).

5.7.5 Propriedades Mecânicas das Soldas Teste

O atendimento às propriedades mecânicas requeridas deste material e suas soldas foi verificado no processo de qualificação dos procedimentos conforme o ASME IX (item 5.4) e comprovado nestas duas últimas soldas através das medições de dureza apresentadas na Tabela 5.12.

Cabe aqui registrar as diferenças destes resultados com os obtidos da solda que falhou (motivadora deste estudo) e apresentados nas Tabelas AP1.3 e AP1.4 do Apêndice 1. Naquele caso constatarem-se níveis de dureza muito elevados, atingindo um máximo de de 285 HB na região central da solda e 378 HV-1 junto à linha de fusão. Nas soldas deste trabalho as

durezas máximas se apresentaram no entorno de 200 HB, o que é compatível com soldas qualificadas de aços inoxidáveis austeníticos desta composição.

Tabela 5.12 – Resultados das Medições de Durezas das Soldas

AMOSTRA	DUREZA BRINELL (HB)				Especificação A 213 (MB max.)
	SOLDA	ZTA Tubo Velho	MB Tubo Velho	MB Tubo Novo	
TIG Pulsado / CP-A	207	197	193	184	192 HB 200 HV
TIG Pulsado / CP-B	187	191	187		
TIG Pulsado / CP-C	193	193	187		
TIG Pulsado / CP-D	197	179	179		
TIG Convencional / CP-A	204	187	182	179	
TIG Convencional / CP-B	187	197	187		
TIG Convencional / CP-C	202	197	200		
TIG Convencional / CP-D	207	200	195		

OBS: a) Medida dureza Brinell, com carga de 30 kgf e esfera de 1,0 mm;

b) MB : metal base do tubo.

6 - CONCLUSÕES

Com as análises das cinco primeiras Soldas Teste pôde-se constatar que:

(i) Utilizando-se soldas de boa qualidade com o processo TIG (quer convencional ou pulsado), os efeitos metalúrgicos e nas propriedades mecânicas e físico-químicas do aço inoxidável austenítico TP 347H não o torna menos resistente que no seu estado de “como fornecido - padrão”, ou seja, apenas solubilizado.

(ii) O aço ASME SA 213 TP 347H apresenta adequada resistência à corrosão intergranular – CIG, de acordo com a Prática “E” da norma ASTM A-262, tanto na condição de fornecimento só solubilizado quanto de adequadamente soldado, não sendo usualmente necessário o tratamento, prévio e pós-solda, de estabilização. Este é um requisito suplementar opcional da especificação de fabricação destes tubos.

As duas Soldas Teste finais reforçam as conclusões anteriores e mostraram que a aplicação do procedimento de soldagem qualificado com o TIG Convencional apresentou a vantagem de execução mais rápida, sem comprometer o nível de aporte térmico adequado à não solubilização significativa dos carbonetos de Nióbio no aço estudado que chegasse a promover a sua rejeição no teste de suscetibilidade à corrosão intergranular da ASTM. Por outro lado, a menor energia do procedimento com o TIG Pulsado traz embutida uma maior

certeza de mínima solubilização destes carbonetos de Nióbio, objetivo maior para o caso de tubos que venham a operar em condições de sensibilização e meio corrosivo. O maior tempo de soldagem com TIG Pulsado pode ter se dado por influência da menor prática do soldador com esta mais recente variante deste processo de soldagem; este fator pode ser facilmente eliminado com a execução de soldas simuladas antes das definitivas (já comprovado com as aplicações nas fornalhas da Braskem).

De todo o estudo, conclui-se que:

- (i) A ocorrência de CIG generalizada nos tubos da fornalha de EDC da Braskem foi primariamente decorrente do processo de carburização interna dos mesmos, em razão das condições do processo operacional formador de coque em alta temperatura e esta temperatura ser suficiente para a difusão de carbono e precipitação intensa de carbonetos de cromo. Este mecanismo de dano tem tido progressão lenta e pode ter sua convivência gerenciada pelos especialistas em integridade de equipamentos.
 - (ii) A ocorrência de CIG localizada e intensa na região de influência das soldas (“em faca”, “gume de faca” ou “knife line attack”) nos tubos da fornalha da Braskem foi basicamente decorrente da qualidade inadequada e excessiva energia das soldas de manutenção utilizadas.
 - (iii) A aplicação do tratamento de estabilização na origem do material (requisito suplementar e opcional da especificação de fabricação de tubos de aços inoxidáveis estabilizados do tipo TP347H) deve ser motivo de avaliações particularizadas, por especialistas, quanto aos processos operacionais em que o produto vá ser aplicado. Usualmente não é requerido.
 - (iv) A soldagem de aços inoxidáveis estabilizados requer cuidados compatíveis com as “melhores práticas” de engenharia, especialmente se for operar em temperaturas promotoras de sensibilização e sujeito a um meio corrosivo. Por outro lado, procedimentos qualificados utilizando o processo de soldagem TIG com baixa energia, convencional ou pulsado, atendem naturalmente a estes requisitos; devendo ser a variante Pulsado a preferida quando o meio ao qual o componente for ficar exposto tenha características de alta corrosividade e este componente tenha sido ou venha a estar sujeito a temperaturas na faixa de sensibilização.
-

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS

- ALESSANDRIA, A.V.; Jaggard, N..Refiners Report New Cases of Stainless Steel Failures. In. Petroleum Refiner, Vol. 39, No. 5, May, 1960.
 - ASM. Austenitic Stainless Steels Corrosion. Metals Handbook, 4th edition, Vol. 13. 1992.
 - ASM. Heat Treating, Cleaning and Finishing in the Section Heat Treatment of Stainless Steels and Heat-Resisting Alloys. Metals Handbook, 5th edition, Vol. 4. 1995.
 - ASTM. Standard Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Boiler, Superheater, and Heat-Exchanger Tubes. Norm. A 213/A 213M - 03a. June 2003.
 - ASTM. Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels. Norm. A 262-02a. December 2002.
 - ASTM. Standard Specification for Seamless Austenitic Chromium-Nickel Steel Still Tubes for Refinery Service. Norm. A 271 - 88 (superseded by ASTM A 213/A 213M). September 1988.
 - BARRA, S. R.. Influência do Processo MIG/MAG Térmico sobre a Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida. Tese de Doutorado, UFSC. Agosto. 2003.
 - BOLINGER, S.R. et al. Unusual Stabilization Behavior in Type 347H SS Tubulars for a Refinery Heater. In: NACE - Corrosion. 1998.
 - BROPHY, A.J. Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels in Refinery Environments. In: Materials Performance - NACE. May. 1974.
 - BROWN, M.H. The Relationship of Heat Treatment to the Corrosion Resistance of Stainless Alloys. In. NACE - Corrosion, Vol. 25, No. 10. October. 1969.
 - BUSCHINELLI, A.J.A. Metalurgia da Soldagem. In. Material Didático de Fontes Distintas. 2003.
 - BUSSINGER, E.R. Soldagem dos Aços inoxidáveis. Petrobrás. 1978.
 - COSTA, E. C.; Sales, A.A. Análise da Falha e Avaliação Metalúrgica de Duas Amostras das Serpentinhas do Forno F-1401B. In. Relatório Técnico, Junho. 2003.
 - CRAGNOLINO, G.; Macdonald, D. D. Intergranular Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steel at Temperatures Below 100 °C - A Review. In: NACE - Corrosion. Vol. 38, No. 8, August. 1982.
 - FEDELE, R. A. Noções de Corrosão Intergranular em Juntas Soldadas. In: Revista Soldagem e Inspeção. pesquisa@btwbr.com.br.
 - FOLKHARD, E. Welding Metallurgy of Stainless Steel. Book, Springer-Verlag Wien. NY. 1988.
-

-
- FRANCO, C.V. et al. Study of the Influence of Welding Parameters on the Stress Corrosion Resistance of AISI 304 Steel. In: *Materials and Corrosion* 49, 496-504. 1998.
 - GRANJON, H.; "Bases Métallurgiques du Soudage. Book. Paris. 1993.
 - GRONG, O. Metallurgical Modelling of Welding. Book, 1st Edition, The Institute of Materials. Norway. 1994.
 - HELLER, J.J.. Cracking of Stainless Steels in Wet Sulfidric Environments in Refinery Units.
 - HUSEN, C.; Samans, C. H.. Avoiding the Problems of Stainless Steels. In: *Chemical Engineering*, January 27. 1969.
 - IKAWA et al. Study on The Knife Line Attack Phenomenon in Stabilized Austenitic Stainless Steels. *Japan Welding Society*, Vol. 8, No. 1, April. 1977.
 - JONES, D. A.. Principles and Prevention of Corrosion. Book, Macmillan Publishing Company; NJ; USA; 1^a Edition; 568p. 1992.
 - KASS, J.N. et al. Stress Corrosion Cracking of Welded Type 304 and 304L Stainless Steel Under Cycling Loading. In: *NACE - Corrosion*, Vol. 36, No. 6, June. 1980.
 - KOU, S.. *Welding Metallurgy*. Book, Wiley - Interscience, NY; USA; 466p. 2003.
 - KOWAKA, M.. *Metal Corrosion Damage and Protection Technology*. Book, Allerton Press, Inc.; 539p. 1990.
 - MALDONADO, J. Introduction Sigma Phase Formation: An Overview. In: *Effects of Sigma Phase on Properties of Stainless Steels*. www.corrosionsource.com.
 - MIGNONE, A. et al. The Electrochemical Potentiokinetic Reactivation Method - An Analysis of Different Treatments of Experimental Data. In: *NACE - Corrosion*; Vol. 38, No. 7, July. 1982.
 - MOBIL Research and Development Corp. The Effect of Heat Treatments in the Prevention of Intergranular Corrosion Failures of AISI 321 Stainless Steel. Voluntary paper. In: *Materials Performance - NACE*, September. 1983.
 - NISHIDA, H. et al. Intergranular Stress Corrosion Cracking of sensitized 321 SS Tube Exposed to Polythionic Acid. In: *Materials Performance - NACE*. 1984.
 - NOKAV et al. Testing the Susceptibility of Stainless Steel to Intergranular Corrosion by a Reactivation Method. In: *NACE - Corrosion*, Vol. 31, No. 10, October. 1975.
 - PADILHA, A.F.; Guedes, L.C.. *Aços Inoxidáveis Austeníticos - Microestrutura e Propriedades*. Book, Hemus Editora Limitada. 1994.
 - PARK, J.Y.; Daanyluk, S.. An Intergranular Fracturing Technique for Grain Boundary Segregation Studies of Austenitic Stainless Steel. In: *NACE - Corrosion*; Vol. 33, No. 8, August. 1977.
-

-
- SAMANS, C.H. et al. Further Observations on Sensitization of Chemically Stabilized Stainless Steels. In: NACE - Corrosion, Vol. 33, No. 8, August. 1977.
 - SILVA, P.S.C.P et al. Tubos do Superaquecedor Terciário da Caldeira GV 5301D - Copene. Relatório. 1996.
 - SZKLARSKA-SMIALOWSKA, S.; Gragnolino, G. . Stress Corrosion Cracking of Sensitized Type 304 Stainless Steel in Oxygenated Pure Water at Elevated Temperatures (Review). In: NACE - Corrosion; Vol. 36, No. 12, December. 1980.
-

APÊNDICE 1 - ANÁLISE DA FALHA DO TUBO DA FORNALHA**AP1.1. A falha**

O forno de EDC (dicloroetano) - F-1401B da planta industrial de MVC (mono-cloreto de vinila) da Unidade de Negócio Vinílicos da Braskem, em Alagoas é composto de uma serpentina de 22 tubos, de 16 m de comprimento cada, dispostos horizontalmente em uma caixa retangular com conjuntos de 80 queimadores dispostos em quatro diferentes elevações das duas paredes laterais. Ver croquis da disposição dos tubos na Figura AP1 01.

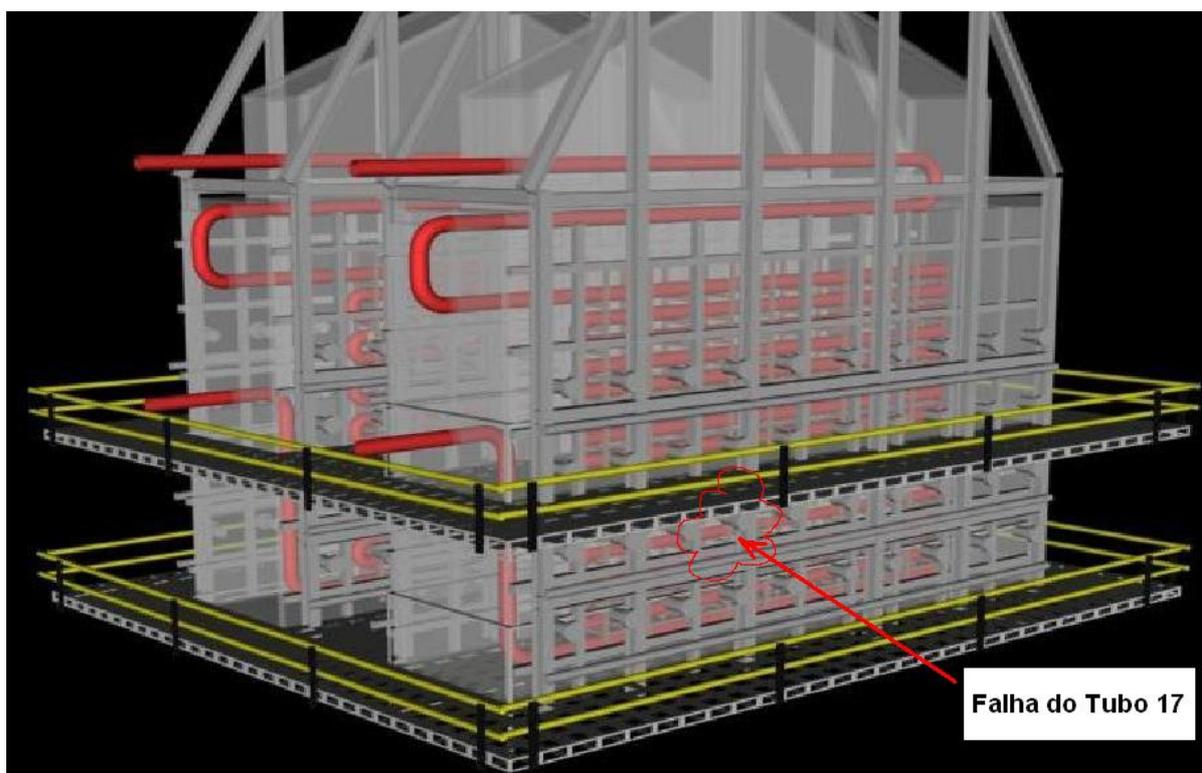


Figura AP1 01 - Fornalha F-1401B BRASKEM UN VINÍLICOS / AL

Durante a depressurização dos tubos ao término do teste hidrostático realizado em abril/2003, foi constatado um vazamento através de uma falha passante no tubo-17 (fileira-17), em uma solda de manutenção antiga de junção de um trecho de tubo mais novo com tubos originais do equipamento; todos de aço inoxidável austenítico TP 347H de 150 mm de diâmetro externo. Ver Figuras AP1 01 e 03.

Uma solda do tubo-18 (fileira-18) apresentou indicações de trinca no ensaio de ultra-som, sugerindo tratar-se de um dano similar ao que provocou o defeito passante na solda do tubo 17.

Estas amostras foram identificadas segundo a seguinte codificação (ver Figura AP1 02):

- T-17/S-1: Tubo-17 solda-1, solda com trinca passante durante o TH (Figura AP1 03).
- T-17/S-2: Tubo-17 solda-2, solda da outra extremidade do niple mais novo.
- T-17/Niple-1: Niple do tubo original lado da solda com trinca passante (Figuras AP1 03 e 04).
- T-17/Niple-2: Niple do tubo original lado da solda da outra extremidade da amostra.
- T-17/Niple-3: Niple mais novo entre as duas soldas S1 e S2.
- T-18/S-3: Solda do tubo-18 (fileira-18) com indicações de trinca no ensaio de US.
- T-18/Niple-4: Niple do tubo-18, lado da L.F. com indicações de trinca no ensaio de US.
- T-18/Niple-5: Outro Niple do tubo-18.

Ainda durante a parada de manutenção deste forno, foi realizado um conjunto de ensaios não destrutivos (líquido penetrante – LP e ultra-som - US [tipo A-Scan e B-Scan]), especialmente localizados nas soldas dos tubos supostamente sujeitos às maiores temperaturas em regime contínuo, no trecho inferior da fornalha.



Figura AP1 03 – Foto em close do Vazamento no Tubo-17 Solda-1



Figura AP1 04 – “Trinca” de 85 mm constatada por Líquido Penetrante (lado do tubo antigo)

Em Junho/03 realizou-se uma inspeção similar nos Fornos da Planta de MVC da Unidade de Vinílicos de Camaçari-BA. No F-1401A obteve-se indicações de trincas no US de duas soldas. Amostras foram removidas e constatou-se apenas falta de fusão localizada na meia espessura, sem qualquer correlação com a falha de Alagoas; remetendo nossa análise de volta aos procedimentos de manutenção nas fornalhas da planta deste último estado.

AP1.4. Resultados da Análise da Falha

Das amostras da fornalha F-1401B de Alagoas, referidas acima e listadas na Tabela AP1.2, chegou-se aos seguintes resultados:

AP1.4.1 Análises Químicas:

As análises químicas foram realizadas pelo laboratório Falcão Bauer – SP e os resultados estão apresentados na Tabela AP1.2.

A composição química do material base dos tubos (nipples) analisados atende, portanto, aos requisitos da especificação ASTM A-271, TP-347H.

A composição química do metal depositado da solda S-1 aproxima-se mais dos requisitos da especificação AWS ENiCrMo-2, enquanto que a solda S-2 apresentou composição mais próxima das especificações AWS ENiCrMo-1, ENiCrMo-9 e ENiCrMo-11. Ambas as soldas divergem, portanto, significativamente da especificação ASTM TP-347H. A heterogeneidade de composição entre a solda (metal de adição) e o metal base potencialmente favorece uma localização da corrosão.

Tabela AP1.2 – Resultados das Análises Químicas

AMOSTRA	ELEMENTOS ANALISADOS (%)										
	C	Cu	Cr	S	P	Mn	Mo	Nb	Ni	Si	Ti
T-17/N-1	0,057	NA	18,4	0,0004	0,016	1,62	0,37	0,82	8,70	0,54	0,014
T-17/N-3	0,051	NA	18,0	ND	0,022	1,63	0,37	0,71	10,15	0,37	0,021
T-17/S-1	0,049	0,059	20,85	0,001	0,034	0,25	8,46	0,65	57,12	0,26	0,22
T-17/S-2	0,019	1,63	22,61	0,006	0,034	0,49	3,03	0,90	40,20	0,31	0,69
A-271 TP-347H (especificação)	0,04 a 0,10	NR	17,0 a 20,0	0,03 máx	0,04 máx	2,0 máx	NR	Obs: “e”	9,0 a 13,0	0,75 máx	NR

OBS:

- f) Análises por Absorção Atômica, ICP-Plasma, Volumetria e LECO
- g) NA- Não analisado.
- h) ND- Não detectado.
- i) NR- Não requerido.
- j) $[Nb + Ta]_{\text{mínimo}} = 8 \times \% C$; porém não superior a 1%.

AP1.4.2 Ensaios de Dureza:

As medições das durezas apresentaram os resultados vistos nas Tabelas AP1.3 e 4.

Constataram-se níveis de dureza muito elevados, atingindo um máximo 285 HB na região central da solda e 378 HV-1 junto à linha de fusão, incomuns em soldas qualificadas de aços inoxidáveis austeníticos desta composição (durezas em torno de 200 HB).

AP1.4.2.1 Região da Solda/ZTA (ou ZAC – zona termicamente afetada):

Dureza Brinell: carga de 30 kgf, esfera de 1,0 mm.

Dureza Vickers: carga de 1,0 kgf.

Tabela AP1.3 – Resultados das Medições de Durezas das Soldas

AMOSTRA	POSICÃO do Corte Mi	DUREZA BRINELL				DUREZA VICKERS - HV-1	
		ADIÇÃO	RAIZ	ZTA-1	ZTA-2	LF-1	LF-2
T-17/S1-Mi1	45°	202	229	207	----	230	----
T-17/S1-Mi2	330°	255	255	207	----	378	----
T-17/S1-Mi3	entre 350° e 30°	255	230	----	207	330	----
T-17/S1-Mi4	entre 350° e 30°	229	249	----	----	378	----
T-17/S1-Mi5	entre 350° e 30°	246	236	200	----	----	----
T-17/S1-Mi6	180°	207	255	202	197	290	290
T-17/S2-Mi1	0°	207	236	207	207	229	205
T-17/S2-Mi2	120°	241	241	187	217	229	229
T-17/S2-Mi3	240°	255	241	207	207	229	251
T-18/S3-Mi1	0°	207	255	200	200	----	----
T-18/S3-Mi2	160°	229	241	207	197	290	229
T-18/S3-Mi3	180°	207	229	217	207	371	229
T-18/S3-Mi4	220°	285	275	211	207	257	229

OBS: a) ZTA-1/LF-1 ==> ZTA/LF do lado trincado;

ZTA- 2/LF-2 ==> ZTA/LF do lado não trincado.

- b) A dureza Vickers HV-1 foi efetuada mais próxima à linha de fusão - LF, no lado do metal depositado, procurando a pequena faixa com aspecto de zona fundida não diluída e de precipitação preferencial de carbonetos. As durezas com valores mais elevados, encontradas nas soldas S1 e S3, situaram-se nestas regiões.
- c) As localizações Mi“x” das identificações correspondem à cada superfície de corte da amostra onde processamos a avaliação metalúrgica / metalográfica (corpo de prova metalográfico – CP).
- d) As indicações de “POSICÃO do Corte Mi” são relativas à região central da trinca passante (vazou a 0°).

AP1.4.2.2 Região do Metal Base (de cada tubo):

Dureza Brinell carga de 30 kgf, esfera de 1,0 mm.

Tabela AP1.4 – Resultados das Medições de Durezas do Metal Base

AMOSTRA	POSIÇÃO	DUREZA BRINELL/REGIÃO		
		SI	SE	ME
T-17/N-1	0°	224	205	197
T-17/N-1	120°	217	197	187
T-17/N-1	240°	215	217	193
T-17/N-2	0°	224	197	191
T-17/N-2	120°	224	200	197
T-17/N-2	240°	217	200	191
T-17/N-3	0°	149	197	149
T-17/N-3	120°	156	170	156
T-17/N-3	240°	156	187	152
T-18/N-4	80°	229	207	187
T-18/N-4	250°	220	187	187
T-18/N-5	80°	179	207	170
T-18/N-5	250°	187	197	170

OBS:

- a) SI/SE- Superfície interna/superfície externa. Medições efetuadas aproximadamente a 0,5 mm da superfície.
- b) ME- Meia espessura, seção longitudinal.
- c) As durezas mais elevadas identificadas nas SI's devem-se à carburização, enquanto que o maior endurecimento registrado nas SE's em relação à meia espessura, deve-se ao leve encruamento nesta superfície quando da fabricação do tubo.

AP1.4.3 Ensaios de Susceptibilidade à Corrosão Intergranular – CIG

Com os resultados dos ensaios listados na tabela AP1.5, ficou evidenciada a sensitização generalizada das amostras dos tubos e niples T17 e T18 (e suas susceptibilidades à CIG), tanto nos trechos mais antigos quanto dos substituídos recentemente (em 2000) – com a rejeição de 93% dos corpos de prova submetidos ao ensaio. Esta e as demais evidências caracterizam, ou pelo menos fortemente evidenciam, a não execução do tratamento térmico de estabilização dos tubos antes de sua aplicação nas fornalhas.

Tabela AP1.5 – Resultados dos Ensaios de Susceptibilidade à CIG (ASTM A-262).

TUBO	CORPO DE PROVA	POSIÇÃO DE DOBRAMENTO	RESULTADO	LAUDO	OBSERVAÇÕES
T-17	S1-1	Raiz da solda	Apresentou várias trincas	Não aceitável	Sem imersão na solução (a)
	S1-2	Face da solda	Apresentou várias trincas	Não aceitável	Imersão por 24h na solução (b)
	N1-1	Superfície interna	Apresentou várias trincas	Não aceitável	Imersão por 24h na solução (b)
	N1-2	Superfície externa	Apresentou várias trincas	Não aceitável	Imersão por 24h na solução (b)
T-17	S2-1	Raiz da solda	Apresentou várias trincas	Não aceitável	Sem imersão na solução (a)
	S2-2	Face da solda	Apresentou várias trincas	Não aceitável	Imersão por 24h na solução (b)
	N2-1	Superfície interna	Apresentou várias trincas	Não aceitável	Sem imersão na solução (a)
	N2-2	Superfície externa	Apresentou várias trincas	Não aceitável	Imersão por 24h na solução (b)
T-18	S3-1	Raiz da solda	Apresentou várias trincas	Não aceitável	Imersão por 24h na solução (b)
	S3-2	Face da solda	Apresentou várias trincas	Não aceitável	Imersão por 24h na solução (b)
	N4-1	Superfície interna	Apresentou várias trincas	Não aceitável	Imersão por 24h na solução (b)
	N4-2	Superfície externa	Apresentou várias trincas	Não aceitável	Imersão por 24h na solução (b)
T-18	N5-1	Superfície interna	Apresentou várias trincas	Não aceitável	Sem imersão na solução (a)
	N5-2	Superfície externa	Ausência de trincas	Aceitável	Imersão por 24h na solução (b)

OBS:

- a) Estes corpos de prova apresentaram pequenas trincas visuais durante a preparação, sendo por este motivo recomendado o dobramento dos mesmos, conforme a norma A-262, eliminando a etapa de imersão na solução de ensaio; são indicações de ataque intergranular em operação, sem necessidade de maior evidenciamento.
- b) Solução de ensaio conforme a norma ASTM A-262 Prática E (cobre - sulfato de cobre - ácido sulfúrico, com a solução em ebulição por 24 horas).
- c) Não foi executada a etapa de tratamento de sensibilização a 675°C por 1 h (item 35.3.1 da A-262). As amostras já haviam sido sensibilizadas em operação.

AP1.4.4 Exame Visual e Ensaio de Líquido Penetrante:

O ensaio de L.P. não registrou outras trincas além da trinca passante detectada durante a depressurização do Teste Hidrostático (**Tubo 17 – Solda S1**). Ver Figuras AP1 03, 04 e 05. Esta última contém 02 CP's metalográficos removidos na região da trinca passante do tubo-17

solda S-1 (seções transversais do tubo de 9,6 mm de espessura), mostrando progressão da trinca na ZTA da solda e na linha de ligação. Na amostra à direita da foto registrou-se também pequena trinca progredida a partir da superfície externa.



Figura AP1 05 - Vista de 02 CP's metalográficos removidos na região da trinca passante do tubo-17 solda S-1 (1- extremidade da trinca // 2- região central da trinca).

Esta trinca foi medida após o ensaio de L.P. tendo externamente cerca de 90 mm de comprimento e na superfície interna por volta de 120 mm (Figuras AP1 03 e 04 anteriores), caracterizando a progressão do defeito de dentro para fora do tubo.

A Figura AP1 06 mostra as faces desta trinca, após corte e abertura da mesma, registrando faces bastante oxidadas, caracterizando “trincamento” relativamente antigo.



Figura AP1 06 - Tubo-17 - vista das faces da trinca passante, solda S1

Já na **solda S2** deste **TUBO 17**, só durante o corte para remoção dos corpos de prova para metalografia é que foi identificada trinca visual, atingindo profundidade de aproximadamente 4,0mm a partir da superfície interna, localizada na ZTA do niple-2 (tubo original), porém bastante próximas à linha de fusão – Como mostrado na Figura AP1 07.

No **Tubo 18, solda S3**, também durante o corte dos corpos de prova para os demais ensaios, registrou-se uma trinca progredida a partir da superfície interna (na região com registro de indicações de trinca no ensaio de US), posição a 180°, com extensão de 70 mm e penetração de aproximadamente 8,0 mm – ver Figura AP1 07.

Nesta solda, registrou-se também excesso de penetração, com a raiz da solda atingindo cerca de 3,5 mm além da superfície do tubo (Figuras AP1 07 e 08).



Figura AP1 07 - Vista de outros 02 CP's metalográficos removidos do Tubo-17 solda S-2 e do Tubo-18 solda S-3



Figura AP1 08 - Vista dos outros dois CP's do tubo-18 solda S-3.

AP1.4.5 Análise Metalográfica – Microscopia Ótica:

Nas amostras analisadas, tanto na região das soldas (S1, S2 e S3) como no material base dos niples N1, N2, N3, N4 e N5, registrou-se evidências muito típicas de processo de sensitização em operação (rede de carbonetos bastante fina e contornando totalmente os grãos austeníticos), como também de ataque corrosivo intergranular bastante severo, com ocorrência de trincas em operação.

Esta condição das amostras é bastante indicativa de ausência de tratamento térmico de estabilização destes tubos, visto que, o material base das duas amostras analisadas (N1 e N3) atende plenamente aos requisitos de composição química do aço grau TP-347H.

Registrou-se também leve faixa carburizada a partir da superfície interna dos tubos, atingindo penetração máxima de 0,4 mm, a qual, no entanto, não é considerada como causa raiz da falha ocorrida nestes tubos.

O material depositado das três soldas analisadas apresentou microestrutura dendrítica predominantemente colunar e grosseira, níveis de dureza bastante elevados (Tabela AP1 4) e com indicações de alta intensidade de tensões, como a sensibilidade muito forte ao ataque micrográfico – utilizou-se o método eletrolítico no ataque das amostras (reagente de ácido oxálico a 10%) e foram bastantes apenas 5 a 15 segundos para revelar a microestrutura.

Registrou-se também excesso de penetração bastante significativo das soldas e a ocorrência de ataque corrosivo/oxidação junto à linha de ligação destas na região da raiz. Formaram-se entalhes (sulcos) que atuaram como pontos de nucleação das trincas registradas nos três tubos (S1, S2 e S3). Esta geometria contribui para o acúmulo de coque e, conseqüentemente, do meio corrosivo que se forma durante as operações de decoque e nas paradas destes equipamentos.

As Figuras AP1 de 09 à 15, a seguir, são características e representativas do resumido acima. As identificações das amostras estão conforme o item AP1.3 e as localizações Mi“x” correspondem à cada superfície de corte da amostra onde processamos a avaliação metalúrgica / metalográfica (corpo de prova metalográfico – CP).

A Figura AP1 9 apresenta uma vista do perfil da trinca do Tubo 17 solda S-1: nucleada na superfície interna, progredida na ZTA até cerca da meia espessura e, a partir deste ponto, na linha de ligação da solda.



Figura AP1 09 - Tubo-17, solda S-1, micrografia-1, 45°.

A Figura AP1 10 traz uma vista com maior aumento do mesmo campo da Figura 9, superfície interna, evidenciando a trinca nucleada na ZTA, porém muito próxima à linha de fusão da solda, pelo mecanismo de corrosão intergranular.

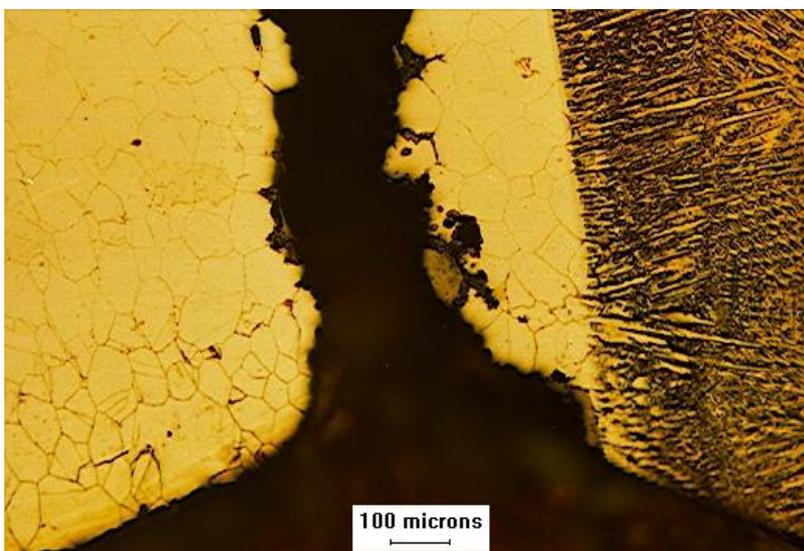


Figura AP1 10 - Tubo-17, solda S-1, Mi-1.

Na Figura AP1 11 vemos a matriz austenítica com granulação equiaxial uniforme, porém com fina rede contínua de carbonetos precipitados nos contornos dos grãos, indicativa de material sensitizado.

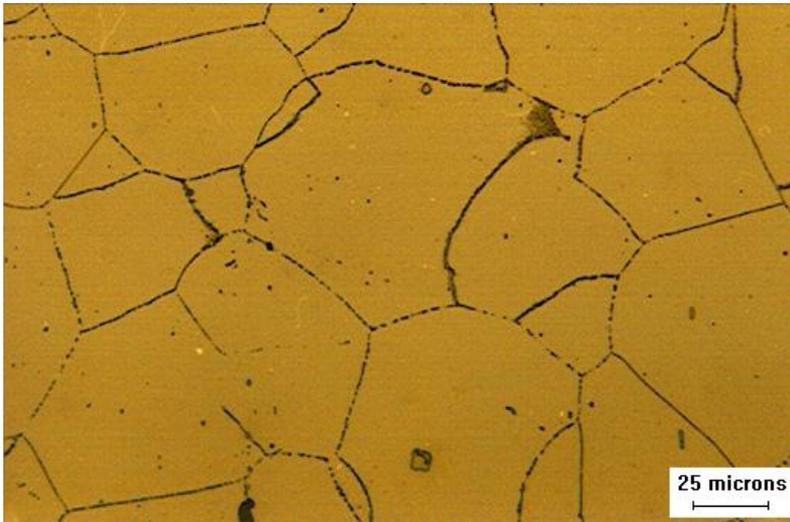


Figura AP1 11 - Tubo-17, Niple-1, posição 0°, meia espessura.

A Figura AP1 12 apresenta outra seção (próxima à da Figura AP1 09), porém com outra trinca menor nucleada na superfície interna do tubo mais próxima à linha de fusão, mostrando as duas trincas progredidas de forma intergranular.

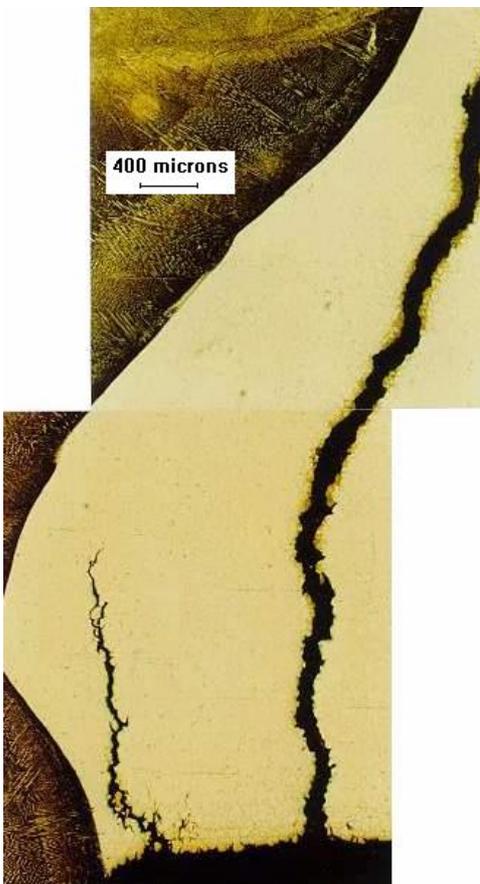


Figura AP1 12 - Tubo-17, solda S-1, Mi-2.

A Figura AP1 13 traz o mesmo campo da Figura AP1 12, com maior aumento, evidenciando o mecanismo de corrosão intergranular.

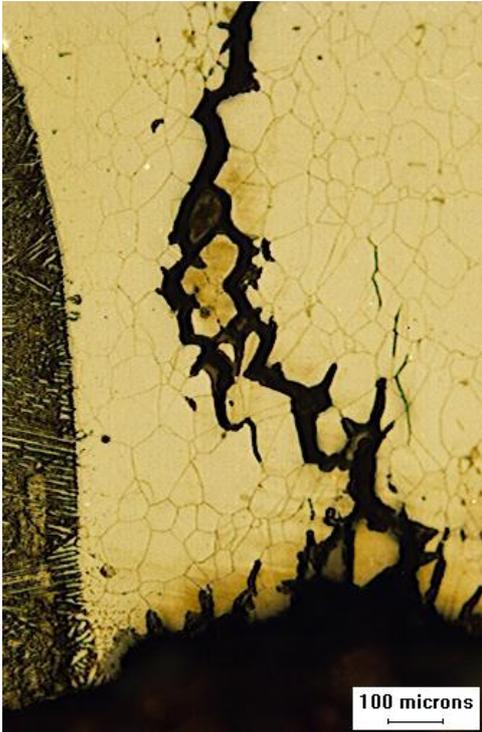


Figura AP1 13 - Tubo-17, solda S-1, Mi-2.

A Figura AP1 14 mostra a trinca / fratura progredida de forma intergranular: na ZTA, em uma pequena extensão junto à superfície interna, e ao longo da linha de fusão da solda, na meia espessura do tubo.



Figura AP1 14 - Tubo-17, solda S-1, Mi-4.

Na Figura AP1 15 tem-se um detalhe da Figura AP1 14, com maior aumento. Mostra a camada de óxido na face da trinca e com penetração intergranular, caracterizando trincamento relativamente antigo, como também a fina rede de carbonetos nos contornos dos grãos, indicativa de material sensitizado.

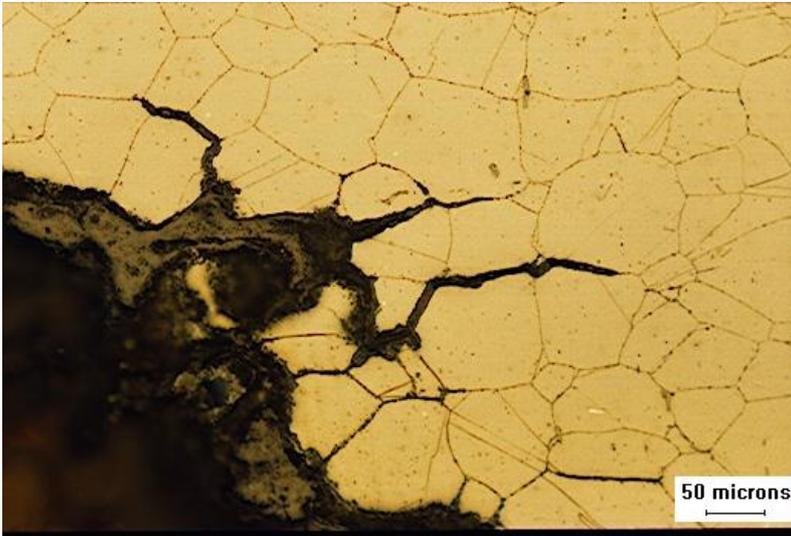


Figura AP1 15 - Tubo-17, solda S-1, Mi-4

Na Figura AP1 16 vê-se trincas típicas de corrosão intergranular em material sensitizado, nucleadas na superfície interna do tubo, na região da ZTA da solda, no lado do Niple-2 (tubo original). Percebe-se a textura da solda bastante grosseira, o entalhe de nucleação do dano na raiz e a presença de carburização na superfície interna.

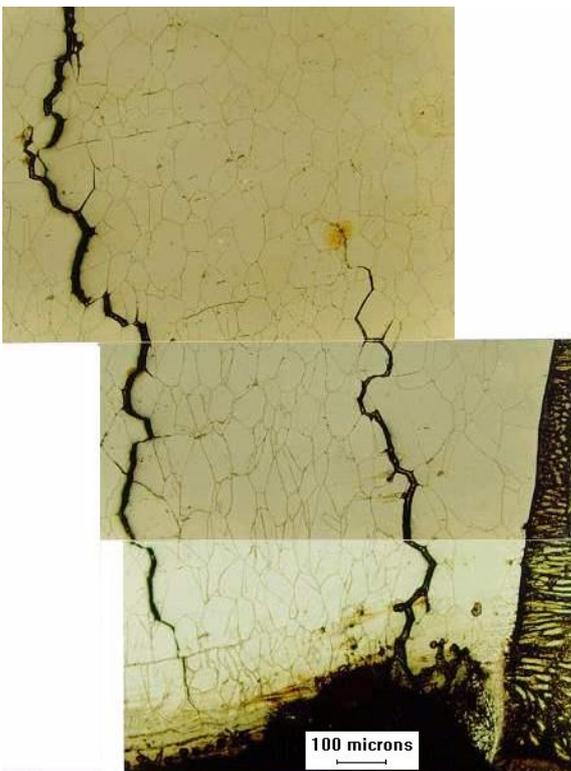


Figura AP1 16 - Tubo-17, solda S-2, Mi-2, a 120°

Na Figura AP1 17 está apresentada a trinca no Tubo 18, solda S-3, tipicamente intergranular (CIG com 8,0 mm de altura, logo $> 2/3$ da espessura do tubo), progredida junto à linha de fusão, porém na ZTA, a partir da superfície interna do tubo no lado do Niple-4 (original).

Num detalhe colocado nesta mesma figura, é mostrada uma fina faixa de carbonetos de Cromo (muito provavelmente) na L.F, decorrente de segregação de Carbono para esta região durante a soldagem. A zona fundida muito rica em Níquel e pobre em Carbono ativa este sentido de difusão deste último elemento, que por sua vez teria sido colocado em solução pela elevada energia de soldagem.

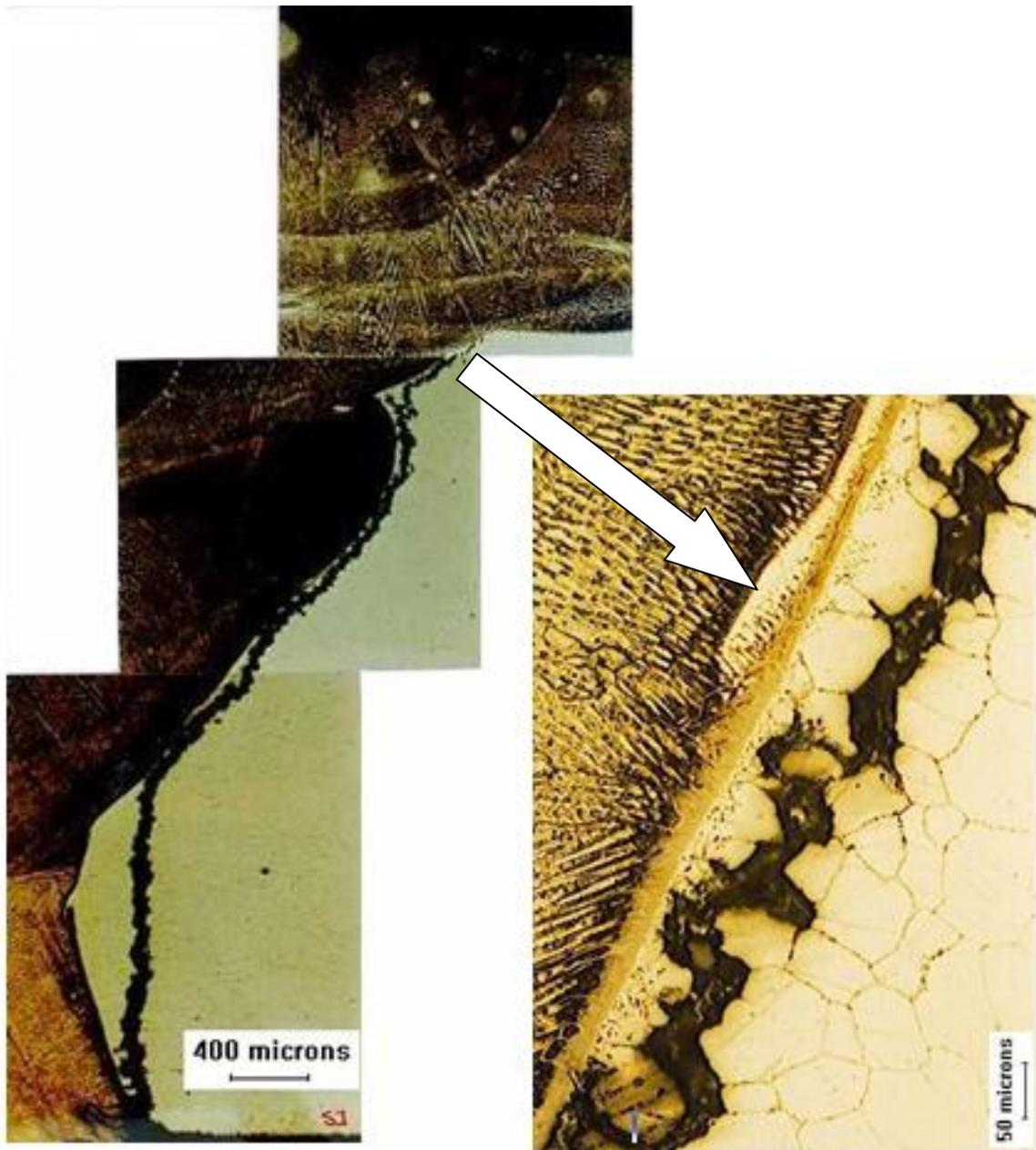


Figura AP1 17 - Tubo-18, solda S-3, Mi-2 / 180°, com um detalhe

A Figura AP1 18 registra a pequena faixa carburizada (cerca de 0,35 mm) e o leve ataque intergranular, com arrancamento de grãos, e a Figura AP1 19 o detalhe da faixa carburizada atingindo cerca de 0,25 mm; destacando a faixa carburizada e resíduos de coque aderidos.

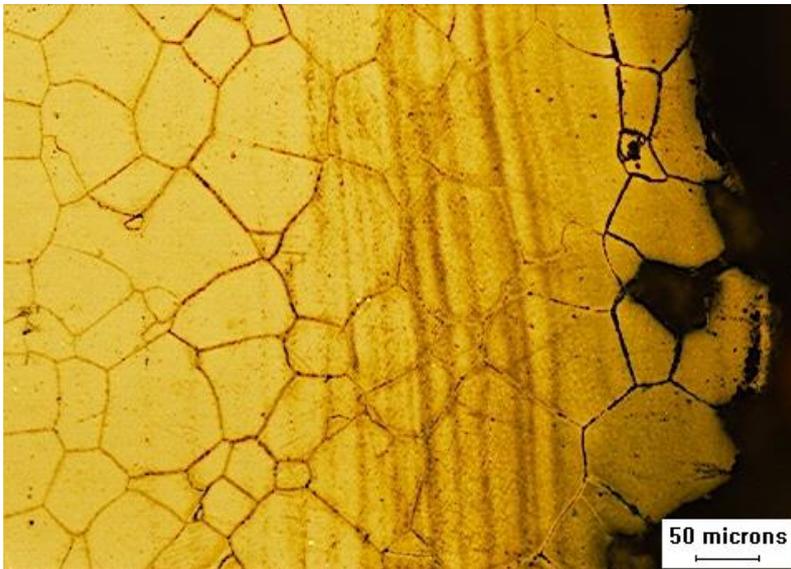


Figura AP1 18 - Tubo-17, niple-1, posição 0°, superfície interna.



Figura AP1 19 - Tubo-18, niple-5, posição 250°, superfície interna.

API.4.6 Conclusões sobre a falha:

A falha do Tubo 17 deveu-se ao ataque corrosivo, de forma intergranular (IGC), numa faixa bem estreita de dissolução e reprecipitação de carbonetos na vizinhança da linha de fusão da solda. Denomina-se este fenômeno de “corrosão incisiva”, “em faca”, “gume de faca” etc (“knife line attack” - KLA)⁽²⁶⁾.

Devido à intensificação da corrosão na região de influência das tensões residuais de soldas, alguns autores ⁽²⁾ ⁽³⁰⁾ também a classificam como corrosão sob tensão intergranular - IGSCC.

Descontinuidades geométricas e heterogeneidades químicas e metalúrgicas identificadas, favoreceram a sinergia entre os processos envolvidos na progressão do dano, quais sejam: de deposição e retenção de coque na raiz da solda, de carburização do tubo a partir de sua superfície interna, de localização e intensificação do processo corrosivo nesta região, além da provável influência de tensões residuais da soldagem. É suposta também alguma influência das tensões em serviço – especialmente daquelas resultantes dos diferentes coeficientes de dilatação térmica entre a solda realizada (inconel) e o metal base do tubo (aço inoxidável austenítico). Outra constatação, provavelmente intensificada pelo modo operacional específico deste equipamento que falhou, é que os tubos operaram numa temperatura maximizadora da precipitação indesejável de Carbonetos de Cromo.

A dissolução de carbonetos de Nióbio e reprecipitação como carbonetos de Cromo, provocadas pela soldagem e a condição de operação posterior destes tubos, foi o fator primário para possibilitar este mecanismo de falha.

APÊNDICE 2 - PRIMEIRAS SOLDAS EXPERIMENTAIS (5 SOLDAS)

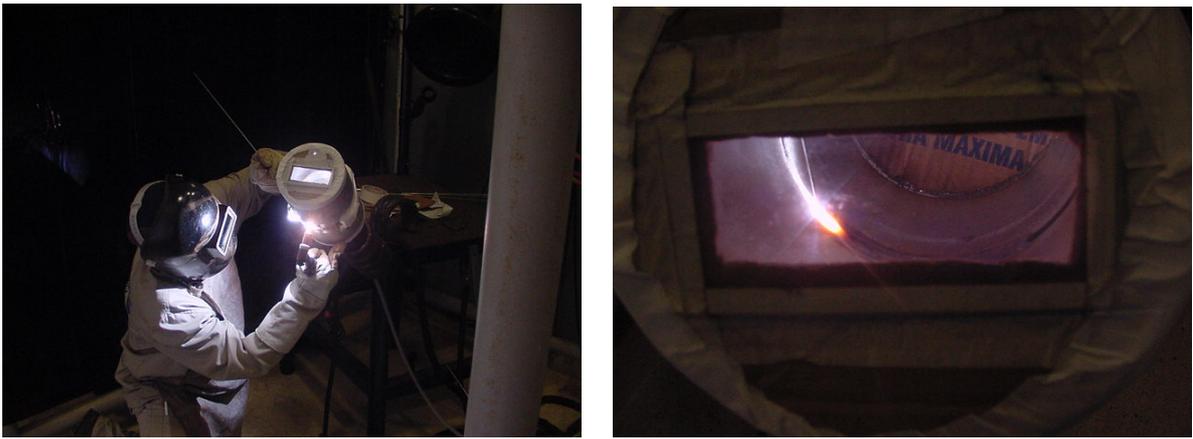
Nesta fase qualificamos os procedimentos de soldagem e os soldadores nas duas variantes do processo TIG, o convencional e o Pulsado. Os procedimentos estão anexos ao final deste apêndice, as soldas de referência estão apresentadas no item 5.4 e o equipamento utilizado está especificado a seguir. Em seguida a estas especificações da máquina de solda registra-se por fotografias alguns detalhes deste processo.

Equipamento utilizado:

FABRICANTE	MERKLE
MODÉLO	PU 400 DW
TIPO de CORRENTE	CC ou CP
Imax.	400 A
Uo	80 V
FATOR de POTÊNCIA	0,95
FATOR de TRABALHO	60% a 400A 100% A 330A



Cabine de Solda e posicionamento dos tubos na posição 6G.



Detalhe do visor para acompanhamento da raiz da solda



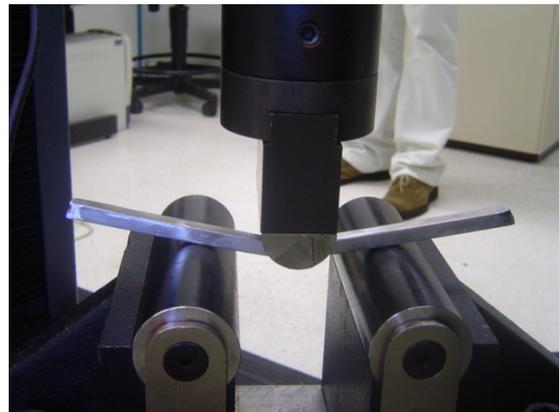
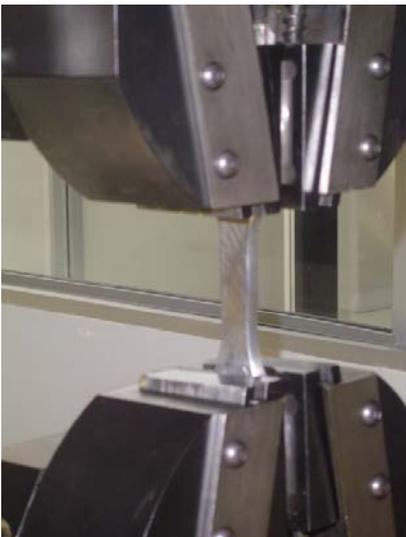
Detalhe da soldagem e do acompanhamento computadorizado contínuo



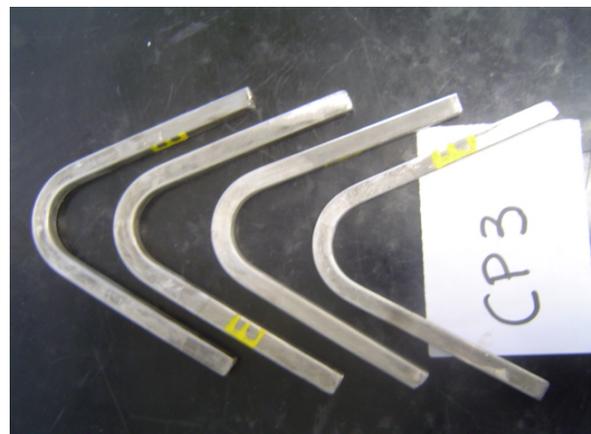
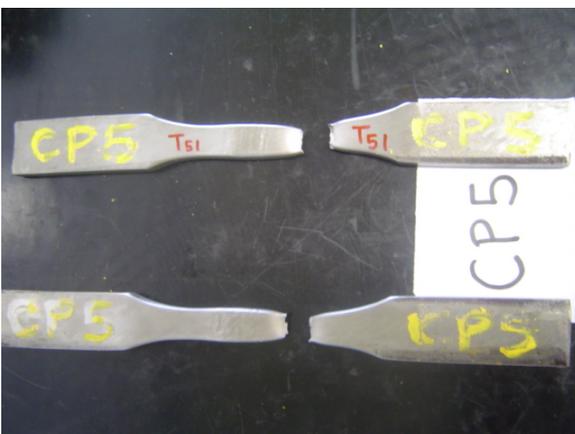
Detalhe de uma camada de enchimento da solda e do acompanhamento de temperatura



Máquina de ensaio de tração e dobramento do SENAI – CIMATEC (BA) onde foram executadas as qualificações.



Ensaio de tração e dobramento em execução



Detalhes de corpos de prova de tração e dobramento após os testes.



PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DA EXECUTANTE

CIMATEC

Código: 001
Folha: 01/ 02
Revisão: 00
Cliente: Braskem

Dados do Procedimento de Soldagem

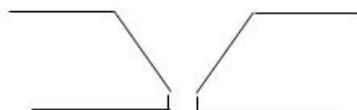
Processo (s) de Soldagem - Raiz: TIG (Convencional) **Enchimento:** TIG (Convencional)

N° RQPS de Cobertura: TC 001

Faixa de Espessura Qualificada - Metal de Base: 4,8 à 22,0 mm

Faixa de Espessura Qualificada - Metal de Solda: 22,0 mm

Detalhes da Junta



Ângulo do chanfro: $70^\circ \pm 5^\circ$

Abertura de raiz: 3 à 4,0 mm

Face da raiz (nariz): 1,0 à 1,5 mm

Metais de Base

	Metal 1	Metal 2
Espec.	Tp 347H	Tp 347H
P N°	8	8
Gr. N°	1	1
UNS N°	N/A	N/A
OUTROS	N/A	N/A
Esp. (mm)	11	11

Obs.:

Gases

	Purga	Bocal
<i>Vazão (l/min.)</i>	13 à 18	8 à 10
<i>Tipo</i>	Argônio	Argônio
<i>Pureza (%)</i>	99,90%	99,90%

Técnicas de Soldagem

<i>Velocidade (cm/min.)</i>	N/A
<i>Energia max. (J)</i>	N/A
<i>Progressão</i>	Ascendente
<i>Oscilação:</i>	2 X Diâmetro da vareta

Metais de Adição

	Raiz	Enchimento
<i>Espec.</i>	SFA 5.9	SFA 5.9
<i>Class. (AWS)</i>	ER 347	ER 347
<i>Outros</i>	N/A	N/A
<i>F N°</i>	8	8
<i>A N°</i>	8	8
<i>Diâm.</i>	2,5, 3,25 mm	2,5, 3,25 mm
<i>Fabricante</i>	Ver obs	Ver obs
<i>Marc. Com.</i>	Ver obs	Ver obs

Limpeza entre passes: Disco abrasivo com alma de nylon, para aço inoxidável.

Guiagem da raiz: N/A

Características Elétricas

PASSE N°	PROCESSO	METAL DE ADIÇÃO		CORRENTE		TENSÃO (V)	VELOC. AVANÇO	OBS
		CLASSIF.	DIÂM.	TIPO/POL.	Valor (A)			
1 - N	Tig (convencional)	ER 347	2,5, 3,25	CC -	100-130	10 - 15	N/A	

RESPONSÁVEL

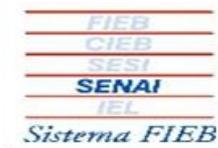
APROVAÇÃO

CLIENTE

ASSINATURA / / /

ASSINATURA / / /

ASSINATURA / / /



**PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM
DA EXECUTANTE**
CIMATEC

Código: 001
Folha: 02/ 02
Revisão: 00
Cliente: Braskem

Ciclo Térmico

Pré-aquecimento	Temperatura Interpasse
Temperatura (min.) (°C): N/A	Temperatura (máx.) (°C): 150
Método Aquec.: N/A	Método Aquec.: N/A
Método de Controle: N/A	Método de Controle: Pirômetro

Pós-aquecimento

Temperatura (°C): N/A
Tempo: N/A
Método Aquecimento: N/A
Método de Controle: N/A

Tratamento Térmico

Taxa de Aquecimento: N/A
Taxa de Resfriamento: N/A
Temperatura Patamar: N/A
Tempo Patamar: N/A

Observações

- 1 - Eletrodo de tungstênio EWTh-2
- 2 - Executar ensaio de L.P. após o passe de raiz e no acabamento da solda.
- 3 - Todas as ferramentas e acessórios de montagem devem ser de aço inoxidável ou revestidas com o consumível especificado neste procedimento.
- 4 - A marca comercial do consumível especificado deve ser certificada pela FBTS.

RESPONSÁVEL	APROVAÇÃO	CLIENTE
_____ ASSINATURA / /	_____ ASSINATURA / /	_____ ASSINATURA / /



**PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM
DA EXECUTANTE**

CIMATEC

Código: 002
Folha: 01/ 02
Revisão: 00
Cliente: Braskem

Dados do Procedimento de Soldagem

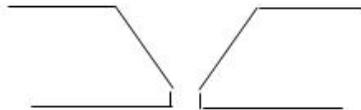
Processo (s) de Soldagem - Raiz: TIG (Pulsado) Enchimento: TIG (Pulsado)

Nº RQPS de Cobertura: TP 001

Faixa de Espessura Qualificada - Metal de Base: 4,8 à 22,0 mm

Faixa de Espessura Qualificada - Metal de Solda: 22,0 mm

Detalhes da Junta



Ângulo do chanfro: $70^\circ \pm 5^\circ$

Abertura de raiz: 3 à 4,0 mm

Face da raiz (nariz): 1,0 à 1,5 mm

Metais de Base

	Metal 1	Metal 2
Espec.	Tp 347H	Tp 347H
P Nº	8	8
Gr. Nº	1	1
UNS Nº	N/A	N/A
OUTROS	N/A	N/A
Esp. (mm)	11	11

Obs.:

Gases

	Purga	Bocal
Vazão (l/min.)	13 à 18	8 à 10
Tipo	Argônio	Argônio
Pureza (%)	99,90%	99,90%

Metais de Adição

	Raiz	Enchimento
Espec.	SFA 5.9	SFA 5.9
Class. (AWS)	ER 347	ER 347
Outros	N/A	N/A
F Nº	8	8
A Nº	8	8
Diâm.	2,5; 3,25 mm	2,5; 3,25 mm
Fabricante	Ver obs	Ver obs
Marc. Com.	Ver obs	Ver obs

Técnicas de Soldagem

Velocidade (cm/min.)	N/A
Energia max. (J)	N/A
Progressão	Ascendente
Oscilação:	2 X Diâmetro da vareta
Limpeza entre passes:	Disco abrasivo com alma de nylon, para aço inoxidável.
Goivagem da raiz	N/A

Características Elétricas

PASSE Nº	PROCESSO	METAL DE ADIÇÃO		CORRENTE		TENSÃO (V)	VELOC. AVANÇO	OBS
		CLASSIF.	DIÂM.	TIPO/POL.	Valor (A)			
1 - N	Tig (pulsado)	ER 347	2,5; 3,25	CC -	Ver obs	Ver obs.	N/A	

RESPONSÁVEL

APROVAÇÃO

CLIENTE

ASSINATURA / /

ASSINATURA / /

ASSINATURA / /



**PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM
DA EXECUTANTE**
CIMATEC

Código: 002
Folha: 02/ 02
Revisão: 00
Cliente: Braskem

Ciclo Térmico

Pré-aquecimento	Temperatura Interpasse
Temperatura (min.) (°C): N/A	Temperatura (máx.) (°C): 150
Método Aquec.: N/A	Método Aquec.: N/A
Método de Controle: N/A	Método de Controle: Pirômetro

Pós-aquecimento

Temperatura (°C): N/A
Tempo: N/A
Método Aquecimento: N/A
Método de Controle: N/A

Tratamento Térmico

Taxa de Aquecimento: N/A
Taxa de Resfriamento: N/A
Temperatura Patamar: N/A
Tempo Patamar: N/A

Observações

- 1 - Eletrodo de tungstênio EWTh-2
- 2 - Executar ensaio de L.P. após o passe de raiz e no acabamento da solda.
- 3 - Todas as ferramentas e acessórios de montagem devem ser de aço inoxidável ou revestidas com o consumível especificado neste procedimento.
- 4 - A marca comercial do consumível especificado deve ser certificada pela FBTS.
- 5 - Corrente de base: 40 à 60 A; Corrente de pulso: 140 à 160 A; Tempo de base: 0,3 s; Tempo de pulso: 0,5 s; a tensão é função da variação da corrente.

RESPONSÁVEL	APROVAÇÃO	CLIENTE
_____ ASSINATURA / /	_____ ASSINATURA / /	_____ ASSINATURA / /

APÊNDICE 3 - REGISTROS DAS 2 SOLDAS EXPERIMENTAIS FINAIS

Nesta fase aplicou-se os procedimentos de soldagem qualificados nas duas variantes do processo TIG, o convencional e o Pulsado. As soldas de referência estão apresentadas no item 5.7 e o equipamento utilizado está especificado a seguir. Em seguida a estas especificações da máquina de solda registra-se por fotografias alguns detalhes desta fase.

Equipamento utilizado:

FABRICANTE	IMC
MODÉLO	INVERSAL 450 / 600
TIPO de CORRENTE	CC (constante ou pulsada) ou CA
Imax.	450 A / 600A
Uo	68 V
FATOR de POTÊNCIA	0,95
FATOR de TRABALHO	100% a 280A e 35V (450)
	100% a 320A e 30V (600)



Maquina IMC e o equipamento de monitoramento computadorizado contínuo das soldas



Visita do orientador (Prof. Buschinelli) quando da execução das soldas. Atentar para o posicionamento do tubo para soldagem na posição 5G (similar à condição de campo).



Visualização da posição 5G e do “pontamento” da raiz para início da soldagem.



Execução da soldagem