

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Marcy Saturno de Menezes

**DESENVOLVIMENTO DA SOLDAGEM DE UNIÃO DO
TUBO API 5CT Q125 COM O TUBO API 5L X65 EM
JUNTA CIRCUNFERENCIAL DE GASODUTO
TERRESTRE**

Taubaté - SP

2012

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Marcy Saturno de Menezes

**DESENVOLVIMENTO DA SOLDAGEM DE UNIÃO DO
TUBO API 5CT Q125 COM O TUBO API 5L X65 EM
JUNTA CIRCUNFERENCIAL DE GASODUTO
TERRESTRE**

Dissertação apresentada para
obtenção do Título de Mestre pelo
curso de Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia
Mecânica da Universidade de
Taubaté.

Área de Concentração: Projeto
Mecânico

Orientador: Prof Dr. José Rubens
de Camargo

Taubaté - SP

2012

MARCY SATURNO DE MENEZES

**DESENVOLVIMENTO DA SOLDAGEM DE UNIÃO DO TUBO API 5CT Q125
COM O TUBO API 5L X65 EM JUNTA CIRCUNFERENCIAL DE GASODUTO
TERRESTRE**

Dissertação apresentada para
obtenção do Título de Mestre pelo
curso de Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia
Mecânica da Universidade de
Taubaté.

Área de Concentração: Projeto
Mecânico

Orientador: Prof Dr. José Rubens
de Camargo.

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Rubens de Camargo

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dr. José Antonio Peixoto Cunha

Faculdade SENAI – Félix Guisard

Assinatura _____

Prof. Dr. Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Para Célia e Luiza, razão de minha vida.

Para meus pais, meus sogros, meu irmão Marcos e meu irmão Márcio (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

À Deus por dar um norte à nossa vida.

À minha família por compreender tantas ausências e pelo apoio para a realização desse curso.

Ao Prof. Dr. José Rubens de Camargo por seus ensinamentos e parceria no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas Engenheiro de Soldagem Paulo Roberto da Silva, Consultor Manfred Ronald Richter, Engenheiro Humberto Silva Campinho, Engenheiro José Sérgio Homman e Engenheiro Henrique dos Reis pelo apoio no desenvolvimento desta dissertação.

Aos colegas do Núcleo de Gestão Tecnológica do SEQUI, Juliana Panassol Fink, Rafael Henrique da Costa Ricotta e Renata Cristina do Nascimento pelo apoio no fornecimento de toda a infra-estrutura para que esse trabalho fosse realizado.

Às gerências dos órgãos da PETROBRAS, ENGENHARIA/RH e ENGENHARIA/SL/SEQUI pelo apoio a este curso.

À PETROBRAS pelo suporte financeiro para a realização desse curso.

Acredite: a vida lhe dará poucos presentes.

Se você quer uma vida, aprenda a roubá-la!

Lou-Salomé

Desenvolvimento da soldagem de união do tubo API 5CT Q125 com o tubo API 5L X65 em junta circunferencial de gasoduto terrestre

RESUMO

O objetivo deste estudo é avaliar a soldabilidade do tubo API 5CT grau C110 com CE_{iiw} 0,76% e do tubo API 5CT grau Q125 com CE_{iiw} 0,61%. Esses tubos, em aço temperado e revenido, fabricado pelo processo de laminação, possuem pontas roscadas não sendo desenvolvidos para a união por soldagem. Quando soldados esses tubos apresentam um elevado grau de transformação na zona afetada pelo calor (ZAC), com aumento elevado da dureza nessa região. Essa elevada dureza associada aos altos valores de carbono equivalente tende a propiciar o surgimento de fissuração por hidrogênio. Após a caracterização dos dois tubos e avaliação da aplicação de amanteigamento pela técnica da meia camada depositada com eletrodo E7018-1 com posterior tratamento térmico de revenimento, optou-se pelo uso do grau Q125 para desenvolver um procedimento de soldagem de união com o tubo API 5L X65. Para desenvolver tal procedimento, foi realizado o amanteigamento na extremidade do tubo API 5CT grau Q125, utilizando o processo de soldagem *shielded metal arc weld* (SMAW), seguido de tratamento térmico localizado. Após o tratamento térmico localizado, foi realizada a soldagem de união dos tubos utilizando o processo de soldagem *gas tungsten arc weld* (GTAW). Os resultados foram avaliados segundo os critérios de aceitação da norma API 1104 (2010) e requisitos adicionais da Petrobras, onde o procedimento foi considerado aprovado.

Palavras chave: soldagem, meia camada, API 5CT, amanteigamento

Development of welding joint of pipes API 5CT Q125 and API 5L X65 on onshore pipeline

ABSTRACT

The subject of this study is to evaluate the weldability of pipes API 5CT grade C110 with CE_{iiw} 0.76% and API 5CT grade Q125 with CE_{iiw} 0.61%. These pipes, quenched and tempered steel, manufactured by the lamination process, have threaded ends and were not developed to be joined by welding. When welded, these pipes have a high degree of transformation in the heat affected zone (HAZ), with large increase of hardness in this region. This high hardness value associated with high values of carbon equivalent tends to favor the occurrence of hydrogen cracking. After its characterization and evaluation of buttering using half layer technique deposited by E7018-1 electrode with subsequent tempering heat treatment, grade Q125 was chosen to develop a welding procedure for union with API 5L X65 pipe. To develop such procedure API 5CT grade Q125 pipe end was buttered, using welding process shielded metal arc weld (SMAW), followed by localized treatment. After heat treatment this pipe was joined to API 5L X65 pipe using welding process gas tungsten arc weld (GTAW). The results were evaluated against the criteria of acceptance of the API 1104 (2010) standard and additional requirements from Petrobras. The procedure was considered approved.

Keywords: welding, half bead, API 5CT, buttering

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Construção de um gasoduto terrestre	22
Figura 2 – Soldagem circunferencial de campo na construção de um gasoduto.....	23
Figura 3 – Microestrutura típica do aço API 5CT grau C110	29
Figura 4 – Microestrutura típica do aço API 5CT grau Q125	29
Figura 5 – Fluxograma do processo UOE da fábrica da Tenaris Confab.....	30
Figura 6 – Microestrutura típica do aço API 5L X65.....	31
Figura 7 – Esquema geral do processo de soldagem SMAW	32
Figura 8 – Esquema geral do processo de soldagem GTAW	34
Figura 9 – Ilustração esquemática da diluição.....	37
Figura 10 - Ilustração esquemática da técnica de revenimento por meia camada.....	40
Figura 11 – Esquema de solubilidade do hidrogênio no metal de solda	44
Figura 12 – Mecanismo de fragilização por hidrogênio durante a soldagem.....	44
Figura 13 - Equipamento de ultrassom manual	49
Figura 14 – Princípio da técnica <i>phased array</i>	51
Figura 15 - Planilha para cálculo da incerteza expandida na medição de dureza	55
Figura 16 – Fluxograma do planejamento experimental do estudo.....	57
Figura 17 – Amostras de tubo API 5CT C110 e API 5CT Q125	60
Figura 18 – Tubos API 5L X65 com bisel usinado	60
Figura 19 – Esquema de retirada de CPs de tração, dobramento e análise química	62
Figura 20 - Esquema de retirada de CPs de impacto Charpy	62
Figura 21 – Esquema de localização de micrografias e tamanho de grãos	63
Figura 22 – Soldador realizando amanteigamento na extremidade do tubo.....	64
Figura 23 – Dez corpos de prova amanteigados.....	65
Figura 24 – Esquema de localização dos pontos de medição de dureza	67
Figura 25 – Detalhe do esquema de localização dos pontos de medição de dureza.....	67
Figura 26 – Pré-aquecimento da junta.....	68
Figura 27 – Deposição do amanteigamento	68
Figura 28 - Configuração do tubo amanteigado	69
Figura 29 - Posicionamento dos termopares no tubo	69
Figura 30 - Registro do tratamento térmico do tubo com a extremidade amanteigada.....	70
Figura 31 - Soldagem da junta.....	70
Figura 32 – Pós-aquecimento	70

Figura 33 - Configuração da junta e sequência de passes	71
Figura 34 – Realização do ensaio de ultrassom mecanizado <i>phased array</i>	71
Figura 35 - Localização da retirada dos corpos de prova	72
Figura 36 – Aspecto macrográfico os tubos API 5CT grau C100 e API 5CT grau Q125	75
Figura 37 – Microestrutura constituída de martensita revenida nos materiais API 5CT grau C110 e API 5CT grau Q125	76
Figura 38 – Fotomicrografia dos materiais API 5CT grau C110 e API 5CT grau Q125	76
Figura 39 – Corpos de prova apresentando aspecto de fratura totalmente dúctil.....	82
Figura 40 – Perfil macrográfico e regiões de análise micrográfica do CP Q-2.....	85
Figura 41 – Ponto 1, camada 2 externa e interna, respectivamente.....	85
Figura 42 – Ponto 2, interface camada 2/camada 1 externa e interna, respectivamente	85
Figura 43 – Ponto 3, camada 1 externa e interna, respectivamente.....	86
Figura 44 – Ponto 4, interface camada 1/metal base externa e interna, respectivamente	86
Figura 45 – Ponto 5, ZAC 1 externa e interna, respectivamente.....	86
Figura 46 – Ponto 6, ZAC 2 externa e interna, respectivamente.....	87
Figura 47 – Ponto 7, ZAC 3 externa e interna, respectivamente.....	87
Figura 48 – Ponto 8, ZAC 4 externa e interna, respectivamente.....	87
Figura 49 – Ponto 9, MB externa e interna, respectivamente.....	88
Figura 50 – Registro do tratamento térmico de revenimento	89
Figura 51 - Perfil macrográfico e regiões de análise micrográfica CP Q-2-T.....	91
Figura 52 – Ponto 1, camada 2 externa e interna, respectivamente.....	91
Figura 53 – Ponto 2, interface camada 2/camada 1 externa e interna, respectivamente	91
Figura 54 – Ponto 3, camada 1 externa e interna, respectivamente.....	92
Figura 55 – Ponto 4, interface camada 1/metal base externa e interna, respectivamente	92
Figura 56 – Ponto 5, ZAC 1 externa e interna, respectivamente.....	92
Figura 57 – Ponto 6, ZAC 2 externa e interna, respectivamente.....	93
Figura 58 – Ponto 7, ZAC 3 externa e interna, respectivamente.....	93
Figura 59 – Ponto 8, ZAC 4 externa e interna, respectivamente.....	93
Figura 60 – Ponto 9, MB externa e interna, respectivamente.....	94
Figura 61 – Exemplo de detecção de poro na inspeção <i>phased array</i> do CP-01	95
Figura 62 - Dispositivo para o dobramento semi-guiado	97
Figura 63 - Corpo de prova após ensaio de dobramento	93
Figura 64 - Corpos de prova Charpy após ensaio.....	99
Figura 65 – Distribuição dos pontos de medição de dureza Vickers.....	100

Figura 66 – Aspecto macrográfico da junta soldada	102
Figura 67 - Distribuição dos pontos dos ensaios metalográficos da junta soldada	103
Figura 68 - Microestrutura do metal de base API 5CT grau Q125	103
Figura 69 - Transição entre o metal base e a zona afetada pelo calor pela camada depositada por SMAW	103
Figura 70 - Transição da zona afetada pelo calor do metal base API 5CT grau Q125 e a camada depositada por SMAW	103
Figura 71 - Transição da zona afetada pelo calor do metal base API 5CT grau Q125 e a camada depositada por SMAW	103
Figura 72 - Transição entre a zona afetada pelo calor da primeira camada depositada por SMAW e a segunda camada SMAW	104
Figura 73 - Linha de fusão entre a segunda camada depositada por SMAW e o metal de solda depositado pelo processo GTAW	104
Figura 74 - Metal de solda depositado pelo processo GTAW.....	104
Figura 75 - Linha de fusão entre o metal de solda GTAW e a zona afetada pelo calor do metal base API 5L X65	104
Figura 76 - Transição entre o metal de base API 5L X65 e a zona afetada pelo calor.....	105
Figura 77 - Microestrutura do metal base API 5L X65.....	105
Figura 78 - Microestrutura do metal base API 5CT grau Q125	105
Figura 79 - Transição entre o metal base e a zona afetada pelo calor pela camada depositada por SMAW	105
Figura 80 - Transição da zona afetada pelo calor do metal base API 5CT grau Q125 e a camada depositada por SMAW	106
Figura 81 - Transição entre a primeira camada SMAW e a zona afetada pelo calor desta primeira camada	106
Figura 82 - Transição entre a zona afetada pelo calor da primeira camada depositada por SMAW e a segunda camada SMAW	106
Figura 83 - Transição entre a segunda camada depositada pelo processo SMAW e o metal de solda depositado pelo processo GTAW.....	106
Figura 84 - Metal de solda depositado pelo processo GTAW.....	107
Figura 85 - Linha de fusão entre o metal de solda GTAW e a zona afetada pelo calor do metal base API 5L X65	107
Figura 86 - Transição entre o metal de base API 5L X65 e a zona afetada pelo calor.....	107
Figura 87 - Microestrutura do metal base API 5L X65.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões de cada tubo estudado	58
Tabela 2 – Requisitos de tração	58
Tabela 3 – Requisitos de dobramento	59
Tabela 4 – Requisitos de impacto.....	59
Tabela 5 – Ensaio para caracterização dos metais de base	61
Tabela 6 – Aportes térmicos utilizados em cada um dos dez corpos de prova amanteigados	66
Tabela 7 – Parâmetros de soldagem utilizados na deposição do amanteigamento	68
Tabela 8 – Parâmetros de soldagem utilizados na soldagem de união	71
Tabela 9 – Resultado das análises químicas e carbono equivalente.....	77
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de tração.....	78
Tabela 11 – Dados e resultados dos ensaios de dobramento.....	79
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de dureza dos tubos API 5CT C110 e API 5CT Q125	82
Tabela 13 – valores de dureza do CP Q-2-T após tratamento térmico.....	89
Tabela 14 – Resultados dos dois corpos de prova de tração da junta soldada	96
Tabela 15 – Resultado do corpo de prova de tração do metal base após revenimento	96
Tabela 16 – Dados e resultados do ensaio de dobramento.....	97
Tabela 17 – Resultados dos ensaios de fratura (Nick-break)	97
Tabela 18 - Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy a 0°C.....	99
Tabela 19 - Valores de dureza medidos nos CPs M1 e M2.....	101

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação das propriedades mecânicas dos três materiais envolvidos	78
Gráfico 2 – Resultados dos ensaios de impacto Charpy “V” a 0°C do API 5CT grau C110	80
Gráfico 3 – Resultados dos ensaios de impacto Charpy “V” a 0°C do API 5CT grau Q125	81
Gráfico 4 – Perfil de dureza do amateigamento do tubo API 5CT grau C110.....	83
Gráfico 5 – Perfil de dureza do amateigamento do tubo API 5CT grau Q125.....	83
Gráfico 6 - Comparativo dos valores de dureza do CP Q-2 antes e após o tratamento térmico de revenimento	90
Gráfico 7 – Resultados ensaios tração junta soldada API 5CT grau Q125 x API 5L X65	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASME	<i>American Society for Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CEiiw	Carbono Equivalente, fórmula do <i>International Institute of Welding</i>
CEpcm	Carbono Equivalente, formula <i>Parameter Crack Measurement</i>
CP	Corpo de prova
FCAW	<i>Flux Cored Arc Welding</i>
FCAW-G	<i>Flux Cored Arc Welding</i> - com proteção gasosa adicional
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
PGMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i> – com arco pulsado
GTAW	<i>Gas Tungsten Inert Welding</i>
HSLA	<i>High Strength Low Alloy</i>
HV	<i>Hardness Vickers</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MAG-CCC	<i>Metal Active Gas</i> - Curto Circuito Controlado
MB	Metal de Base
PSL	<i>Product Specification Level</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
TIH	Trinca Induzida pelo Hidrogênio
TTAT	Tratamento Térmico de Alívio de Tensões
WHB	<i>Welding Handbook - American Welding Society</i>
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1. Gasoduto	22
2.2. Solda circunferencial	22
2.3. Contextualização da atividade soldagem na construção de dutos terrestres	23
2.4. Materiais de base envolvidos.....	28
2.4.1. Tubo API 5CT	28
2.4.2. Tubo API 5L.....	29
2.5. Processo de Soldagem SMAW.....	31
2.5.1. Fundamentos do Processo	31
2.5.2. Equipamento.....	32
2.5.3. Consumível de Soldagem	32
2.5.4. Aplicação.....	33
2.6. Processo de Soldagem GTAW	33
2.6.1. Fundamentos do processo.....	33
2.6.2. Equipamento.....	34
2.6.3. Consumíveis de Soldagem.....	35
2.6.4. Aplicação.....	35
2.7. Conceitos fundamentais de soldagem	35
2.7.1. Estrutura da zona fundida do metal de solda.....	35
2.7.2. Preaquecimento	36
2.7.3. Temperatura interpasses	36
2.7.4. Pós-aquecimento.....	37
2.7.5. Diluição	37
2.7.6. Defeitos no metal de solda.....	38
2.8. Técnica da meia camada.....	39
2.9. Trinca induzida pelo elemento hidrogênio	41
2.9.1 Trinca na zona afetada pelo calor	42
2.9.2. Mecanismos de fragilização pelo hidrogênio	42
2.9.3. Mecanismo de fragilização por hidrogênio na soldagem dos aços	43
2.9.4. Carbono equivalente	44

2.9.5. Trinca no metal de solda.....	45
2.10. Ensaio metalúrgicos	47
2.10.1. Análise química por espectrometria de emissão óptica por plasma de argônio	47
2.10.2. Análise metalográfica óptica	47
2.11. Ensaio não-destrutivos	48
2.11.1. Ensaio visual.....	48
2.11.2. Ensaio por ultrassom	49
2.12. Tratamento estatístico dos resultados	51
2.12.1. Média aritmética	51
2.12.2. Desvio padrão	52
2.12.3. Incerteza de medição	52
2.12.4. Incerteza padrão combinada	53
2.12.5. Incerteza expandida	54
2.12.6. Planilha para cálculo da incerteza expandida	54
3. PROPOSIÇÃO	56
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
4.1. Planejamento experimental.....	57
4.2. Materiais	58
4.3. Métodos	61
4.3.1. Análise comparativa da soldabilidade dos tubos API 5CT Q125 e API 5CT C110	61
4.3.2. Escolha do consumível e estudo preliminar dos parâmetros de soldagem.....	64
4.3.3. Medição de dureza dos diferentes corpos de prova de amanteigamento.....	66
4.4. Desenvolvimento do procedimento de soldagem.....	67
4.4.1. Amanteigamento das extremidades dos tubos API 5CT Q125	67
4.4.2. Usinagem do amanteigamento.....	68
4.4.3. Tratamento térmico das extremidades amanteigadas	69
4.4.4. Escolha do consumível e soldagem de união dos tubos API 5CT Q125 e API 5L X65	70
4.5. Inspeção por ultrassom <i>phased array</i> dos tubos de teste CP-01 e CP-02	71
4.6. Ensaio mecânicos para qualificação do procedimento de soldagem	72
4.7. Ensaio não previstos na norma API 1104	73
4.7.1. Ensaio de Impacto	73
4.7.2. Ensaio micrográfico.....	74
4.7.3. Ensaio macrográfico	74

4.7.4. Ensaio de tração do corpo de prova soldado	74
4.7.5. Ensaio de dureza.....	74
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
5.1. Caracterização dos tubos API 5CT Q125 e API 5CT C110.....	75
5.1.1. Ensaio macrográfico	75
5.1.2. Ensaio micrográfico.....	75
5.1.3. Medição do tamanho de grãos	76
5.1.4. Análise química	77
5.1.5. Ensaio de tração.....	78
5.1.6. Ensaio de dobramento externo e interno	79
5.1.7. Ensaio de impacto.....	80
5.1.8. Ensaio de dureza	82
5.2. Amanteigamento pela técnica da meia camada.....	82
5.2.1. Perfil de dureza dos corpos de prova amanteigados.....	82
5.2.2. Opção preliminar pelo tubo API 5CT Q125 com aporte do CP Q-2.....	84
5.2.3. Análise metalográfica do CP Q-2 antes do tratamento térmico	84
5.2.4. Tratamento térmico de revenimento do CP Q-2.....	88
5.2.5. Análise metalográfica do CP Q-2 após o tratamento térmico	90
5.3. Desenvolvimento do procedimento de soldagem.....	94
5.3.1. Inspeção visual dos tubos de teste CP-01 e CP-02.....	95
5.3.2. Inspeção por ultrassom <i>phased array</i> dos tubos de teste CP-01 e CP-02	95
5.3.3. Ensaio mecânicos e metalográficos para qualificação do procedimento de soldagem no CP-01.....	96
5.3.4. Ensaio mecânicos para qualificação do procedimento de soldagem no CP-02.....	108
6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110
6.1. Conclusões.....	110
6.2. Sugestões para trabalhos futuros	110
7. REFERÊNCIAS	111

1. INTRODUÇÃO

Com as novas descobertas de petróleo e gás em águas territoriais brasileiras, há a necessidade de gasodutos para escoamento do gás produzido nas plataformas marítimas. Novos gasodutos estão sendo construídos para atender a demanda do mercado. Na construção de um gasoduto terrestre, houve a necessidade específica da realização da união por soldagem do tubo API 5L *Specification for Line Pipe* (API, 2007) grau X65, tradicionalmente utilizado na construção de dutos terrestres, com um tubo de uso específico para poços de petróleo especificado pela norma API 5CT *Specification for Casing and Tubing* (API, 2006).

Os tubos fabricados segundo a norma API 5CT (2006), têm como uma de suas principais aplicações o revestimento (*casing*) da parede interna do poço para evitar seu desmoronamento e servir de guia para a coluna de perfuração. Esses tubos, fabricados pelo processo de laminação, e posteriormente temperados e revenidos, possuem pontas roscadas não tendo sido desenvolvidos para a união por soldagem.

No momento em que surgiu a necessidade da soldagem citada, os tubos API 5CT disponíveis para a aplicação na construção do gasoduto eram o API 5CT grau C110 de espessura 13,84 mm (0.544 polegadas), com carbono equivalente CE_{iiw} 0,76% e o API 5CT grau Q125 de espessura 20,24 mm (0.796 polegadas) com carbono equivalente CE_{iiw} 0,61%, ambos de diâmetro externo 273 mm (10,750 polegadas).

A soldagem desses tubos acarreta um elevado grau de transformação microestrutural em sua zona afetada pelo calor (ZAC), com aumento elevado da dureza nessa região. Essa elevada dureza, associada ao surgimento de fases frágeis e aos valores de carbono equivalente tende, a propiciar a ocorrência de fissuração ou trincamento induzido pelo elemento químico hidrogênio.

A pesquisa bibliográfica que antecedeu a realização deste trabalho não identificou o desenvolvimento de soldas semelhantes. Em decorrência disso, foi necessário o desenvolvimento de um método de soldagem específico para esse fim. A junta a ser desenvolvida deveria, além de amenizar os aspectos metalúrgicos citados que levariam à ocorrência do trincamento por hidrogênio, atender também aos requisitos técnicos da norma API 1104 *Welding of Pipelines and Related Facilities* (API, 2010) e à especificação técnica da Petrobras – Requisitos suplementares à norma N-464 revisão K (PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., 2008). A norma API 1104 é designada pela norma ASME B31.8 *Gas Transmission and Distribution Piping Systems* (ASME, 2007), norma

de projeto de gasodutos terrestres, para a qualificação de procedimentos de soldagem e de soldadores.

Anteriormente ao desenvolvimento do procedimento de soldagem, foi realizada a caracterização dos materiais a serem soldados ao tubo API 5L grau X65, ou seja, dos tubos API 5CT grau C110 e API 5CT grau Q125, por intermédio de ensaios mecânicos, aplicação de amanteigamento e tratamento térmico de revenimento. Essa caracterização levou à decisão pelo uso do tubo API 5CT grau Q125. Feita a opção pelo tubo API 5CT grau Q125 para a aplicação no campo, foi dado início ao desenvolvimento do procedimento de soldagem para a união necessária.

Devido à baixa soldabilidade do material API 5CT, e à consequente preocupação com os aspectos de sua zona afetada pelo calor (ZAC), com o intuito inicial da eliminação do tratamento térmico após a soldagem, foi utilizada uma variante da técnica tradicionalmente utilizada no reparo por soldagem de aços de baixa liga. Essa técnica conhecida como técnica da meia camada, consiste no preenchimento da cavidade oriunda da remoção do reparo. Tal remoção é realizada por goivagem ou esmerilhamento, com a seguinte sequência: deposição de uma primeira camada de amanteigamento, com baixo aporte térmico, em toda a superfície da cavidade; essa camada tem sua altura reduzida à metade por esmerilhamento; uma segunda camada é depositada sobre a primeira, agora com maior aporte térmico e assim toda a cavidade é preenchida. Essa técnica propicia o revenimento da ZAC, diminuindo assim, a possibilidade da ocorrência do trincamento induzido pelo hidrogênio.

Neste estudo, antes da união entre os dois tubos envolvidos pelo processo de soldagem *gas tungsten arc weld* (GTAW), também conhecido por *tungsten inert gas* (TIG), foi realizado o amanteigamento da extremidade do tubo API 5CT grau Q125. Tal amanteigamento, foi realizado por meio do processo de soldagem *shielded metal arc weld* (SMAW), também conhecido por eletrodo revestido, com a deposição de duas camadas, sendo que antes da deposição da segunda camada, a primeira camada foi esmerilhada até sua altura original ser reduzida à metade.

Além do intuito de eliminar a necessidade do tratamento térmico, outra importante intenção do amanteigamento da extremidade do tubo API 5CT grau Q125, foi que a ZAC da solda de união entre os dois tubos se localizasse no metal de solda do amanteigamento, e não no metal do tubo API 5CT grau Q125.

Após a realização do amanteigamento verificou-se, ainda, a necessidade da realização de tratamento térmico na extremidade do tubo devido às elevadas durezas, na

ordem de 520 HV10, encontradas na ZAC. Porém, conseguiu-se ainda assim obter-se com o amanteigamento, o benefício da localização da ZAC da solda de união fora do tubo API 5CT grau Q125, isto é, a ZAC da solda de união localizou-se no metal depositado pelo amanteigamento.

Com a realização do tratamento térmico, as durezas da ZAC baixaram para valores considerados seguros, quanto à prevenção do trincamento por hidrogênio, isto é, na ordem de 300 HV10. A extremidade do tubo API 5CT grau Q125 foi então soldada à extremidade do tubo API 5L grau X65.

É importante mencionar que o presente trabalho contextualiza o desenvolvimento e a aplicação para um projeto estratégico da Petrobras com aspectos qualitativos, quantitativos e, principalmente, de caráter de inovação e está estruturado conforme apresentado nos parágrafos seguintes.

No capítulo 2, é apresentado o estudo preliminar e a fundamentação teórica da dissertação, necessário para a caracterização dos materiais envolvidos, a soldabilidade dos aços temperados e revenidos, o amanteigamento pela técnica da meia camada e o desenvolvimento do método de soldagem.

No capítulo 3 é apresentada a proposição desta pesquisa, que visa os seguintes objetivos:

- definir e garantir um método de soldagem do tubo API5CT grau C110 ou API 5CT grau Q125 com o tubo API 5L X65, atendendo aos requisitos normativos para juntas circunferenciais de gasoduto terrestre;
- definir o aporte térmico mais adequado para a soldagem, levantando o perfil de dureza dos diferentes aportes térmicos utilizados no amanteigamento pela técnica da meia camada, concluindo sobre a necessidade da realização de tratamento térmico de revenimento;
- caracterizar as microestruturas de todas as regiões das juntas soldadas para a verificação de possíveis presenças de microestruturas frágeis.

No capítulo 4, é apresentado o planejamento experimental das duas fases desta pesquisa, que são: a caracterização dos materiais envolvidos e o desenvolvimento da técnica de soldagem.

No capítulo 5, são apresentados os resultados e a discussão de todos os testes, análises e ensaios realizados no desenvolvimento desta pesquisa, assim como é confrontado com relação à revisão da literatura.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões relativas ao trabalho desenvolvido e as sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Gasoduto

Gasoduto são todas as partes de uma instalação física na qual um gás é transportado, incluindo tubos, válvulas, acessórios, flanges (com seus parafusos e elementos vedantes), reguladores, vasos de pressão, tanques pulmão, e outros elementos conectados ao gasoduto, estações de compressão, estações de medição e estações reguladoras. Incluídas nesta definição, estão as linhas de transmissão e de sistemas de distribuição, junto com seus acessórios, que são instalados *offshore* para transporte do gás das instalações de produção para instalações *onshore* e para equipamentos de armazenamento, são do tipo tubo fechado, fabricado ou forjado a partir de tubos e acessórios (ASME B31.8, 2007). A Figura 1 apresenta uma obra de construção de um gasoduto terrestre.

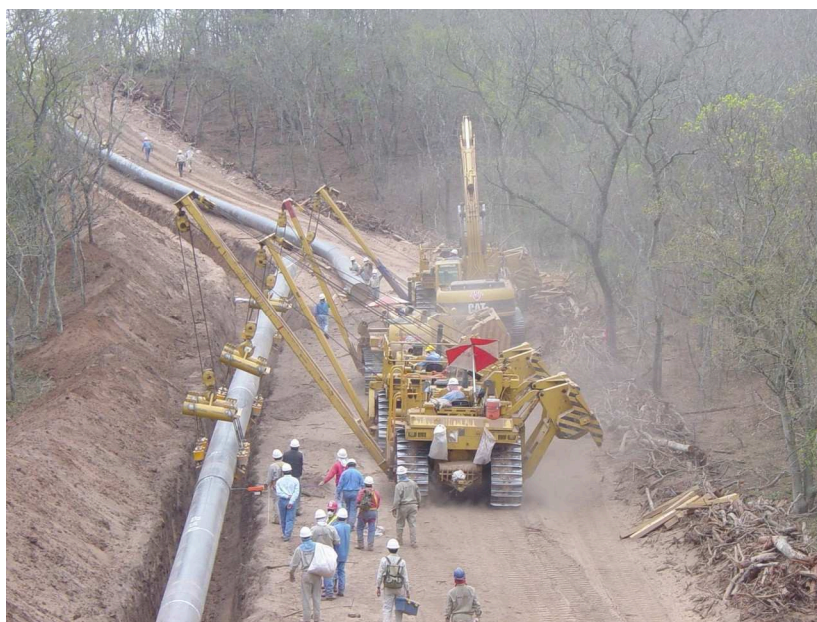


Figura 1 – Construção de um gasoduto terrestre (fonte: autor)

2.2. Solda circunferencial

A soldagem circunferencial de união de tubos realizada na construção de um gasoduto terrestre se dá pela utilização de processos de soldagem a arco elétrico. Os processos de soldagem mais comumente empregados são os processos manuais *gas tungsten arc weld* (GTAW) e *shielded metal arc weld* (SMAW); e os processos semi-

automáticos e/ou mecanizados *gas metal arc weld* (GMAW), também conhecido por *metal arc gas* (MAG); *fluxed cored arc weld* (FCAW), também conhecido por arame tubular, sendo esse último, utilizado com ou sem proteção gasosa adicional. Na soldagem pelos processos manuais e semi-automáticos, normalmente são utilizados dois soldadores ao mesmo tempo, um em cada lado do duto em construção, para deduzir as tensões e deformações. Já os processos mecanizados utilizam um ou dois operadores de soldagem ao mesmo tempo.

Para o acoplamento dos dois tubos a serem soldados, são utilizadas acopladeiras externas ou internas, sendo que a última propicia maior produtividade por permitir a conclusão do passe de raiz sem a sua remoção. A Figura 2 apresenta um exemplo de soldagem circunferencial manual na construção de um gasoduto terrestre.



Figura 2 – Soldagem circunferencial manual de campo na construção de um gasoduto (fonte: autor)

2.3. Contextualização da atividade soldagem na construção de dutos terrestres

No Brasil, os oleodutos e gasodutos terrestres são projetados segundo os requisitos das normas ASME B31.4 (2006) e ASME B31.8 (2007). Essas normas determinam que a soldagem, a qualificação dos procedimentos de soldagem, a qualificação dos soldadores e operadores de soldagem e a inspeção sejam realizadas segundo os requisitos da norma API 1104 (2010).

No país, desde o início das obras de construção de oleodutos e gasodutos, as empresas construtoras vêm utilizando, como regra geral, o processo de soldagem

manual eletrodos revestido (SMAW) na soldagem do passe de raiz das juntas para a união dos tubos. Com o decorrer dos anos foram introduzidos os processos semi-automáticos MAG (GMAW) e arame tubular, sendo o último, uma evolução do MAG (GMAW), utilizado na soldagem do enchimento e acabamento das juntas. Já a soldagem do passe de raiz continuou sendo executada pelo processo por eletrodos revestidos, visto que não se obtinham resultados satisfatórios com outros processos de soldagem. A única exceção foi uma pequena aplicação do processo MAG mecanizado, em todos os passes, porém esse não se firmou devido ao fato do relevo brasileiro apresentar topografia irregular, não adequada para este processo (ALCATRÃO, MENEZES, 2006).

Desde o início da década de 1970, as empresas construtoras vêm obtendo significativa economia de custos por meio do desenvolvimento e implementação do processo MAG mecanizado na soldagem de dutos. Mecanizada a soldagem, com o processo mecanizado, alta produtividade é obtida com intervenção mínima do operador, vantagens essas importantes, principalmente em duras condições de trabalho como no caso de curtos períodos de trabalho no ano devido a questões climáticas, particularmente nas regiões árticas como o Alasca, o Canadá ou a Sibéria (HUDSON et al. 2002).

A soldagem é o caminho crítico em uma obra de construção de um duto, e o desenvolvimento de processos de soldagem de maior produtividade é fundamental para a evolução deste tipo de construção (CARVALHO, ACUÑA, GODOY, 2011).

Segundo WIDGERY (2004), o Instituto Paton, localizado na cidade de Kiev na Ucrânia, desenvolveu o processo de soldagem *flash-butt welding*, processo de soldagem este por resistência elétrica. Com base neste desenvolvimento, uma série de modelos de equipamentos *flash-butt* foi produzida para a soldagem de tubos com diâmetro de até 1.067 mm (42 polegadas). O manual de um dos menores equipamentos desenvolvido para a soldagem de tubos de diâmetro 325 mm (12.75 polegadas) e espessura de 14 mm, informa que esse opera com corrente de 16.000 A e uma alimentação de 180 kVA. É atribuída à máquina a capacidade de realizar quinze soldas por hora. Ao maior equipamento é atribuída uma produtividade um pouco menor, ainda assim altamente competitivo. Embora essa tecnologia tenha sido licenciada para uso por empresas americanas, e conseqüentemente aceita pela norma API 1104 (2010), esta tecnologia não tem sido utilizada fora da antiga União Soviética. Tal fato se deve em parte à questões relacionadas à confiabilidade nas propriedades da junta soldada e, acima de

tudo, devido à surpreendente habilidade do processo de soldagem MAG mecanizado em atingir a produtividade prometida pelo processo *flash-butt welding*.

Segundo Alcatrão, Menezes (2006), o processo de soldagem MAG não propicia uma boa penetração na raiz, no caso de soldagem pelo lado externo da tubulação e sem o uso de cobre-junta, apresentando como descontinuidades típicas a falta de penetração e a falta de fusão. No entanto Yapp, Liratzis (2010) apresentou o desenvolvimento de técnicas para o uso do processo GMAW no passe de raiz. O desenvolvimento de modernas fontes de soldagem com controle da transferência metálica tornou possível a soldagem do passe de raiz utilizando o processo GMAW pelo lado externo sem o uso de cobre junta. Por exemplo, o processo *surface tension transfer* (STT), da empresa Lincoln Electric, pode ser utilizado com uma abertura de raiz, sem o uso de cobre junta e propicia passes de raiz de qualidade. O processo STT opera pela detecção do momento do curto circuito e do momento do desprendimento da gota líquida da ponta do arame após o curto circuito, ajustando em cada momento a corrente de soldagem, conseguindo assim uma transferência estável com baixo aporte térmico e pouco ou nenhum respingo. Mais recentemente, o processo *cold metal transfer* (CMT), da empresa Fronius, tem sido usado para a soldagem do passe de raiz de tubulações.

O estado da arte para processos de soldagem de dutos terrestres está relacionado ao processo GMAW mecanizado. Porém, é altamente provável que a próxima geração de processos de soldagem mecanizados estará relacionada à soldagem híbrida laser/arco elétrico. A tecnologia de soldagem laser híbrido combina os melhores atributos da soldagem laser com aqueles do processo GMAW. O componente laser do processo provê grande penetração com um aporte térmico muito baixo e pequena ZAC. A adição do componente GMAW aumenta significativamente a tolerância dimensional para a abertura de raiz, para as condições superficiais, e a presença de impurezas; aumenta o controle do preenchimento e o perfil do passe de raiz; e melhora o controle da metalurgia da soldagem. Enquanto a ideia vem sendo discutida por mais de uma década, esta tecnologia se tornou comercialmente disponível apenas recentemente. Tal tecnologia foi originalmente desenvolvida para prover uma maior eficiência no método de produção de estruturas de chapas de aço de alta resistência para uso na construção de navios da marinha americana (DEFALCO, 2007).

Ainda quanto aos processos híbridos de soldagem, Howse et al (2002) produziram juntas soldadas utilizando o tubo API 5L X60 nas posições plana, vertical e sobre cabeça. A influência e as inter-relações das condições de soldagem (parâmetros

utilizados) e geometria das juntas foram avaliadas por ensaios destrutivos e não destrutivos. Foi utilizada uma fonte laser de 8,9 kW, acoplada a uma fonte GMAW com corrente 200 A. O processo híbrido foi capaz de uma penetração na ordem de 12 a 14 mm. A qualidade da solda foi fortemente dependente da condição de soldagem e da geometria da junta e os requisitos na norma API 1104 (2010) foram atingidos. A microestrutura observada foi predominantemente ferrita com alguma ferrita acicular. A dureza medida ficou abaixo de 350 HV5 no metal de solda e na ZAC.

Felizardo et al (2007) obtiveram sucesso na qualificação de um procedimento de soldagem para aplicação em dutos terrestres utilizando um sistema robótico para soldagem orbital em tubulações. A soldagem é orbital, pois a tocha se movimenta ao redor do tubo enquanto esse fica parado. Nesse procedimento, encontram-se diferentes posições de soldagem: plana, vertical descendente, sobre-cabeça e vertical ascendente, sendo que para cada posição existe um conjunto ótimo de parâmetros de soldagem a serem utilizados. Com o sistema robótico é possível utilizar tanto o processo GMAW quanto o processo FCAW. Esses são altamente produtivos visto que a alimentação do arame é contínua. O sistema foi idealizado para realizar todos os passes necessários à conclusão da junta soldada: passe de raiz, de reforço, de enchimento e de acabamento, utilizando os dois processos. O ponto fundamental para executar o passe de raiz com qualidade é garantir a repetibilidade da preparação do bisel.

Faes et al (2009) apresentaram o desenvolvimento de um processo de soldagem variante do processo de soldagem por atrito, o desenvolvimento mostrou que o processo tem potencial de uso futuro. Esse processo é chamado de FRIEX (*friction with a sudden forge force*). O princípio do processo de soldagem de tubos por atrito é baseado na rotação de um dos componentes a ser soldado. Em dado momento os dois tubos são submetidos a uma compressão no sentido de seu eixo. O atrito entre as duas peças causa o aquecimento da interface. Ao se atingir a temperatura adequada a rotação é encerrada e a compressão entre as peças causará o forjamento das peças provocando uma união soldada. Como na construção de dutos há a necessidade da união de tubos de até 18 metros de comprimento, a rotação desses é impraticável. A maior diferença entre o processo variante aqui apresentado e o processo convencional é que um metal de adição na forma de um anel é usado. O anel de soldagem é colocado entre os tubos e submetido a uma rotação sob uma força axial que causa atrito e o consequente aumento da temperatura. Quando a temperatura de forjamento é atingida a rotação é instantaneamente encerrada e a força axial é aumentada para o forjamento final. Depois

da soldagem, o material remanescente do anel e o excesso de matéria interna e externa são removidos por um processo de usinagem automático.

Para a construção de dutos terrestres as normas de projeto determinam que sejam utilizados tubos fabricados segundo a norma API 5L em seus diferentes graus, cada grau está associado à determinada resistência mecânica. O comprimento nominal desses tubos é doze metros (API 5L, 2007), ou seja, para cada quilômetro construído são realizadas 84 juntas circunferenciais para união dos tubos.

Atualmente os graus mais utilizados no Brasil para a construção de novos dutos são o X65, e o X70. Há também o uso incipiente do X80. O número apresentado significa o limite de escoamento mínimo especificado expresso em Megapascal. Segundo RATINAPULI (2007), no futuro os serão utilizados os tubos de ultra alta resistência nos graus X90, X100 e X120.

Durand et al (2007) pesquisaram a qualificação de procedimento de soldagem circunferencial do tubo API 5L grau X80. Os tubos utilizados na pesquisa foram fabricados no Brasil, a partir de chapas produzidas pelo processo de laminação controlada sem resfriamento acelerado. Esta pesquisa obteve procedimentos de soldagem qualificados segundo requisitos da norma API 1104 (2005) com os processos de soldagem SMAW no passes de raiz e FCAW-G nos demais passes, e com os processos de soldagem MAG-CCC no passe de raiz e FCAW-G nos demais passes.

Hudson et al (2002) realizaram experimentos com a soldagem circunferencial de tubos grau X100 utilizando processo de soldagem PGMAW e concluíram que não existem maiores obstáculos para a soldagem desse aço. Porém, destacaram que há necessidade de precisão ao se especificar o consumível de soldagem e o controle dos parâmetros de soldagem.

Após um período de mais de quinze anos de desenvolvimento e estudos com simulações em escala real, o tubo X100 vem ganhando aceitação com várias das maiores empresas operadoras de dutos, e pode-se considerar que este material está no limiar para a sua aplicação comercial (QUINTANA, HAMMOND, 2010).

Arroyo, Ponciano, Chad (2011) desenvolveu no Brasil a soldagem longitudinal de tubos X100, utilizando o processo de soldagem SAW, a partir de chapas de aço baixa liga, obtida por meio da adequada combinação da composição química com parâmetros adequados de tratamento termo-mecânico, essa combinação permitiu um correto balanceamento entre tenacidade e soldabilidade. As chapas foram fabricadas pelo

processo de laminação controlada seguida de resfriamento acelerado. Os tubos fabricados atingiram aos requisitos especificados pela norma API 5L (2007).

Fairchild et al (2003) realizaram um extenso estudo sobre a soldagem circunferencial do tubo X120. O escopo desse estudo foi analisar a microestrutura do metal de soldada resultante de vinte e quatro diferentes formulações químicas de arames consumíveis de soldagem para o processo PGMAW.

2.4. Materiais de base envolvidos

Para garantir a qualidade e a confiabilidade dos procedimentos de soldagem envolvidos na união dos tubos, foi realizada uma detalhada análise e interpretação dos materiais envolvidos e das normas API 5CT, com seus graus C110 e Q125, e API 5L com seu grau X65.

2.4.1. Tubo API 5CT

O tubo API 5CT grau C110 (este grau será incluído na próxima revisão da norma API 5CT) fabricado pelo processo de laminação, posteriormente temperado e revenido, possui pontas roscadas, não sendo desenvolvido para a união por soldagem. Os tubos API 5CT grau C110 estudados apresentavam CE_{iiw} 0,76%. Esse tubo apresenta um elevado grau de transformação na ZAC após a operação de soldagem, com aumento elevado da dureza nessa região. Essa elevada dureza associada aos altos valores de carbono equivalente tende a propiciar a ocorrência de fissuração por hidrogênio (MENEZES; SILVA; CAMARGO, 2011). Conforme o especificado pela norma API 5CT a composição química desses tubos deve ser fornecida pelo comprador, não havendo critério estabelecido para os ensaios de dureza.

O tubo API 5CT grau Q125 fabricado pelo processo de laminação, posteriormente temperado e revenido, possui pontas roscadas, não sendo desenvolvido para a união por soldagem. Os tubos API 5CT grau Q125 estudados apresentavam CE_{iiw} 0,61%. Esse tubo apresenta um elevado grau de transformação na ZAC após a operação de soldagem, com aumento elevado da dureza nessa região. Essa elevada dureza associada aos altos valores de carbono equivalente tende a propiciar o surgimento de fissuração por hidrogênio (MENEZES; SILVA; CAMARGO, 2011).

Conforme a especificação API 5CT (2005) a composição química desses tubos deve ser fornecida pelo comprador, e não há critério estabelecido para os ensaios de dureza.

A Figura 3 apresenta a microestrutura do aço API 5CT grau C110.

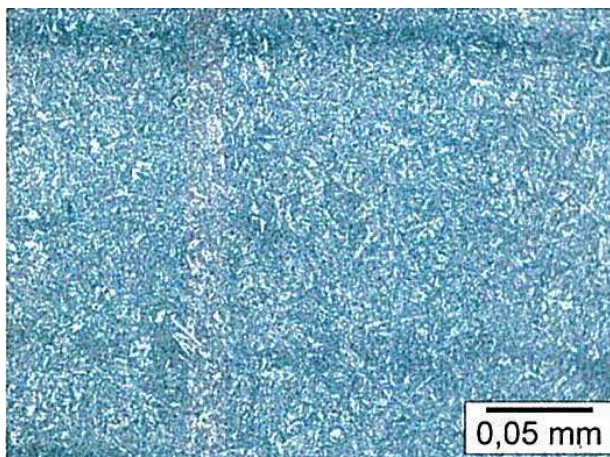


Figura 3 – Microestrutura típica do aço API 5CT grau C110
Matriz de martensita revenida (PROAQT, 2009)

A Figura 4 apresenta a microestrutura do aço API 5CT grau Q125.

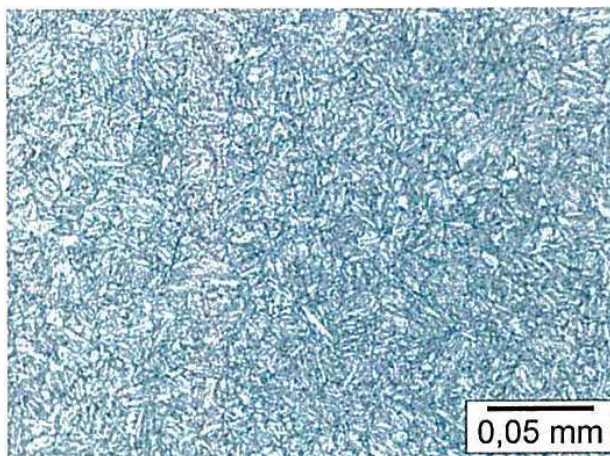


Figura 4 – Microestrutura típica do aço API 5CT grau Q125
Matriz de martensita revenida (PROAQT, 2009)

2.4.2. Tubo API 5L

O tubo API 5L X65 é fabricado pela técnica de conformação UOE de chapas laminadas, seguida da soldagem longitudinal pelo processo de soldagem arco submerso (SAW).

A técnica UOE consiste na conformação da chapa laminada em formato da letra “U” no sentido transversal de seu comprimento, seguida da conformação em formato da letra “O”, e por fim, após a soldagem longitudinal do tubo, o mesmo é submetido ao processo de expansão à frio, designado pela letra “E”.

A Figura 5 apresenta o fluxograma do processo de fabricação por meio do método de conformação e soldagem UOE.

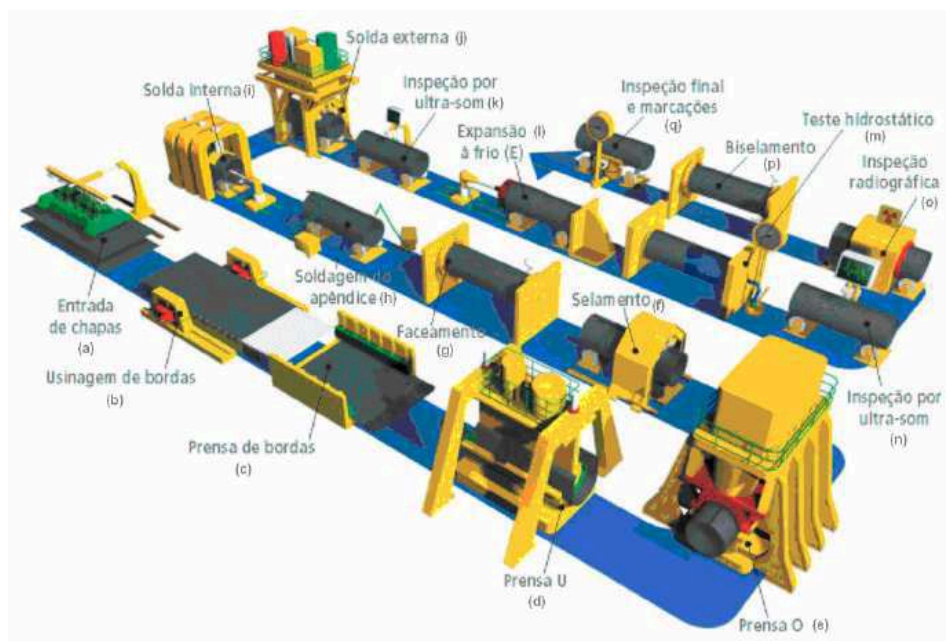


Figura 5 – Fluxograma do processo UOE da fábrica da Tenaris Confab (VASQUES, 2007)

Esse tubo é tradicionalmente utilizado na construção de dutos terrestres e apresenta excelente soldabilidade. O limite de escoamento mínimo especificado para esse material é de 448 MPa e a resistência a tração mínima especificada é de 531 MPa (API 5L, 2007).

A Figura 6 apresenta a microestrutura típica do aço API 5L X65.

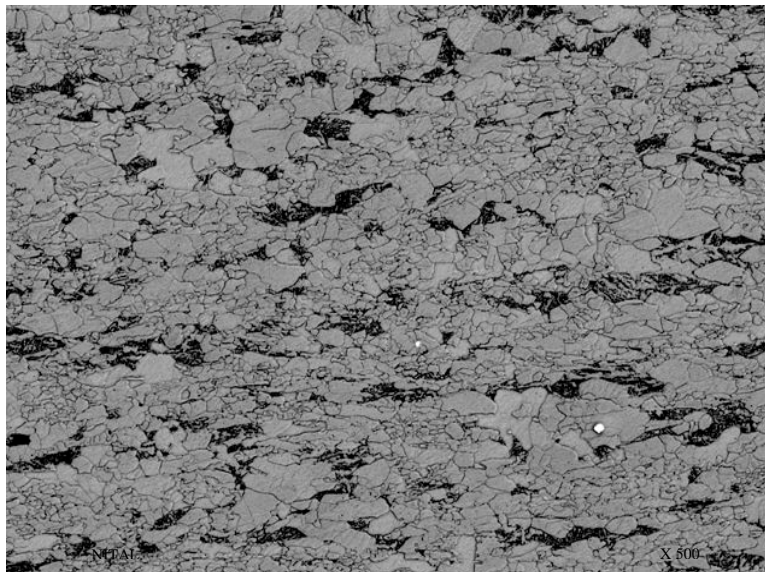


Figura 6 – Microestrutura típica do aço API 5L X65. Microestrutura predominante de ferrita acicular e perlita. Ataque Nital 2%. Aumento 500X. (GODOY, PEREIRA, CAVALHEIRO, 2007)

2.5. Processo de soldagem SMAW

2.5.1. Fundamentos do processo

O processo de soldagem eletrodo revestido é um processo de soldagem a arco elétrico no qual a coalescência dos metais é produzida pelo aquecimento oriundo de um arco elétrico que é mantido entre a ponta de um eletrodo revestido e a superfície do metal de base que está sendo soldado. A alma do eletrodo revestido pode ser uma vareta de metal maciço trefilado ou fundido, ou ainda um arame tubular que consiste de pós metálicos revestidos por um invólucro metálico. A alma conduz a corrente elétrica até o arco e fornece metal de adição para a junta. As principais funções do revestimento do eletrodo são prover estabilidade do arco e proteger o metal fundido contra a atmosfera com a geração de gases oriundos da decomposição do revestimento pelo calor do arco.

A proteção empregada, juntamente com outros ingredientes do revestimento e da alma metálica, controla as propriedades mecânicas, a composição química e a estrutura metalúrgica do metal de solda, assim como as características de arco do eletrodo. A composição do revestimento do eletrodo varia de acordo com o tipo de eletrodo (AWS HANDBOOK, 2004).

A Figura 7 apresenta esquematicamente o processo de soldagem SMAW.

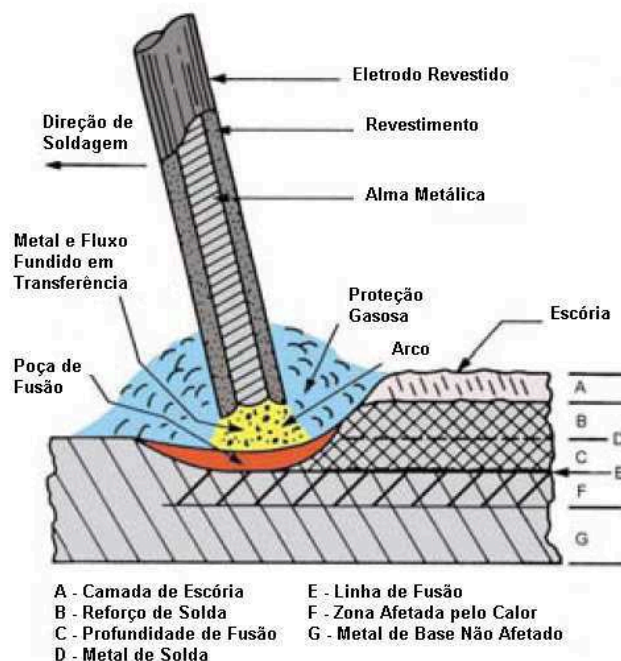


Figura 7 – Esquema geral do processo de soldagem SMAW (adaptado de AWS HANDBOOK, 2004)

2.5.2. Equipamento

Para a realização da soldagem pelo processo eletrodo revestido são utilizados três tipos de fontes: transformador, transformador-retificador e inversor. Este estudo está baseado na utilização de fonte inversora que trabalha com um transformador muito menor, o que é possível quando a frequência da corrente alternada é grandemente elevada, melhorando assim, a eficiência do transformador. Esta fonte permite uma resposta rápida, saída variável e reproduzível, estabilidade, possibilidade de multiprocessos, além da vantagem de possuir tamanho compacto (MODENESI, 2005).

A seleção do tipo de corrente (corrente alternada ou corrente contínua), é baseada no tipo de solda a ser realizada e nos tipos de eletrodos que são adequados para uso (AWS HANDBOOK, 2004).

2.5.3. Consumível de soldagem

O consumível estudado e utilizado foi o de classificação E7018-1 da especificação AWS A 5.1 (AWS, 2004), com revestimento de característica básica, diâmetro 2,5 mm, cujas propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de

resistência e alongamento percentual) sejam, no mínimo, iguais aos especificados para o tubo API 5L X65 PSL2.

O eletrodo básico possui em seu revestimento uma alta proporção de carboneto de cálcio e fluorita. Esses elementos possuem elevada ação fluxante que junto com o dióxido de carbono gerado na decomposição do revestimento produz um metal de solda de alta qualidade, com teor de hidrogênio que pode chegar a 5 ml/100g após secagem. Esse eletrodo possui grande aplicação em vasos de pressão, aço estrutural e construção naval (HOULDCROFT; JOHN, 1988).

2.5.4. Aplicação

O processo a arco com eletrodo revestido pode ser aplicado em uma variedade de metais e ligas metálicas. Procedimentos e eletrodos são eficazes na soldagem de aço carbono, aço baixa-liga, aço alta-liga e aços inoxidáveis, aços para ferramentas, ferro fundido, cobs e ligas de cobre, níquel, ligas de cobalto e podem também ser utilizados em algumas aplicações de alumínio.

Este processo encontra grande aplicação em soldas curtas, finalização de produtos, reparos e construção de campo. Existem as seguintes vantagens: equipamento relativamente simples e portátil, eletrodo fornece o metal de adição e a proteção gasosa, baixa sensibilidade a ventos, e pode ser aplicado à área de acesso limitado.

Limitações: alguns metais de baixo ponto de fusão, tais como zinco e ligas de zinco, não são soldados. Metais como titânio, zircônio e nióbio também não são soldados devido a reatividade destes elementos. A taxa de deposição também é menor quando comparada ao processo GMAW ou FCAW (AWS HANDBOOK, 2004).

2.6. Processo de soldagem GTAW

2.6.1. Fundamentos do processo

Este processo de soldagem é provavelmente mais conhecido no Brasil pela sigla em inglês TIG (*Tungsten Inert Gas*). Para a execução da soldagem, utiliza-se uma tocha com eletrodo não consumível de tungstênio puro – ou composto com outros metais, ou óxidos – gera um arco elétrico com a peça, que juntamente com a poça de fusão assim

formada, é protegido da atmosfera por um gás inerte, geralmente argônio. O modo de operação do TIG é geralmente manual, mas também encontra emprego nos modos semi-automático e automático, sendo utilizado para soldar juntas pela simples fusão dos materiais base envolvidos, ou, também com a adição de consumível (MACHADO, 1996).

O processo de soldagem TIG – Tungsten Inert Gas é um processo de soldagem a arco que usa um arco entre um eletrodo de tungstênio (não consumível) e a poça de fusão. O processo é utilizado com um gás de proteção e sem a aplicação de pressão. O processo pode ser utilizado com ou sem metal de adição. O processo de soldagem TIG tornou-se indispensável como ferramenta para muitos tipos de indústrias devido à alta qualidade das soldas produzidas e ao baixo custo do equipamento (AWS HANDBOOK, 2004).

A Figura 8 apresenta esquematicamente o processo de soldagem GTAW.

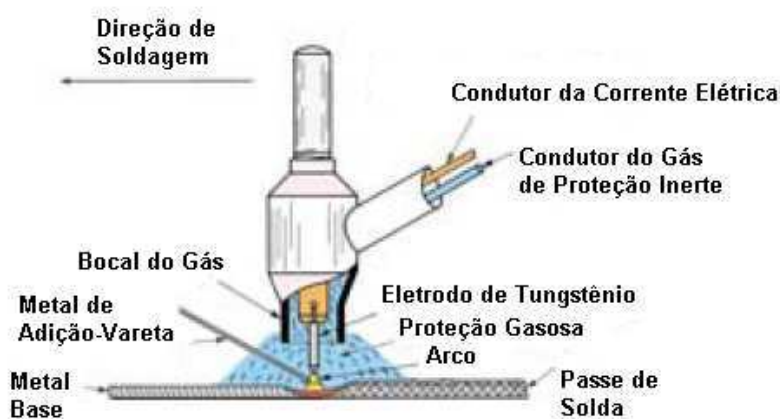


Figura 8 – Esquema geral do processo de soldagem GTAW (adaptado de AWS HANDBOOK, 2004)

2.6.2. Equipamento

O equipamento de soldagem TIG inclui tochas, eletrodo de tungstênio, gás de proteção e fonte inversora. O processo mecanizado pode ter uma combinação de controle de arco, controle de velocidade, oscilação do arco e alimentador de arame (AWS HANDBOOK, 2004).

2.6.3. Consumíveis de soldagem

O consumível utilizado foi o de classificação ER80S-G da especificação AWS A 5.28 (AWS, 2005), diâmetro 3,25mm, cujas propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência e alongamento percentual) sejam, no mínimo, iguais aos especificados para o tubo API 5L X65 PSL2 .

2.6.4. Aplicação

O processo de soldagem TIG é frequentemente selecionado quando há exigência de soldagem crítica e de alta confiabilidade. Neste processo, há um melhor controle de calor durante a soldagem.

O processo TIG pode ser utilizado em quase todos os metais. É especialmente aplicado na soldagem de alumínio, magnésio, titânio e zircônio. É importante salientar que esse processo tem uma grande aplicação na soldagem de passe de raiz em gasodutos e oleodutos (AWS HANDBOOK, 2004).

2.7. Conceitos fundamentais de soldagem

2.7.1. Estrutura da zona fundida do metal de solda

A estrutura da zona fundida do metal de solda de aços de baixo carbono e de baixa liga depende de inúmeros fatores. Apresenta aspectos macroscópicos resultantes do crescimento epitaxial e colunar e dos padrões de segregação resultantes da solidificação da solda. Estes aspectos, juntamente com o estado inicial da austenita (composição, tamanho de grão, microsegregações e estado de deformações), as características da população de inclusões e precipitados existentes e as condições de aquecimento e resfriamento influenciarão a microestrutura do cordão de solda (MODENESI, 2004).

Em uma solda em um só passe, a microestrutura da zona fundida será formada pelos produtos da decomposição da austenita em ferrita, carbonetos e martensita durante o resfriamento, sendo que a ferrita pode assumir diferentes morfologias, algumas de difícil distinção. Em soldas de vários passes, a microestrutura será ainda mais complexa, sendo formada por regiões reaquecidas e alteradas pelos ciclos térmicos dos passes

seguintes e por regiões que permaneceram basicamente inalteradas. As características desta microestrutura, tanto em escala microscópica como em escala sub-microscópica, são fundamentais na determinação das propriedades finais da zona fundida (MODENESI, 2004).

2.7.2. Preaquecimento

O preaquecimento é a aplicação de calor ao metal de base imediatamente antes da soldagem. A temperatura de preaquecimento depende de vários fatores, tais como, composição química e espessura do metal de base, temperatura ambiente e do procedimento de soldagem. O preaquecimento é usado para:

- reduzir tensões de contração na solda e no metal de base adjacente, o que é especialmente importante em juntas com alta restrição à deformação.
- prover à junta uma taxa de resfriamento mais lenta na faixa crítica de temperatura, aproximadamente de 879°C a 720°C, o que previne o endurecimento excessivo e redução da tenacidade na ZAC e no metal de solda.
- prover à junta uma taxa de resfriamento mais lenta abaixo de 205°C, fornecendo maior tempo para o hidrogênio difundir da solda e da área do metal de base adjacente à solda, evitando assim a ocorrência da trinca induzida por esse elemento (ASM HANDBOOK, 1993).

2.7.3. Temperatura interpasses

Em muitas situações, além da aplicação do preaquecimento, é também necessário o controle da temperatura interpasses. Esta temperatura é medida imediatamente antes do início do próximo passe de solda, e a temperatura mínima e máxima devem ser especificadas. Quando o preaquecimento é requerido para evitar a trinca por hidrogênio, a temperatura interpasses é mínima, e essa é no mínimo igual a temperatura de preaquecimento. Uma temperatura interpasses máxima pode ser especificada para a soldagem de aços carbono e carbono-manganês com o objetivo de minimizar o crescimento de grãos e através disso, atingir os níveis requeridos de tenacidade ao entalhe (LANCASTER, 1999).

Uma temperatura interpasses máxima pode ser requerida na soldagem de aços temperados e revenidos. Esses materiais são usados, por exemplo, em peças espessas de

veículos. As taxas de aquecimento obtidas na soldagem manual ou na soldagem a arco submerso de alta velocidade podem ser similares às aquelas taxas de resfriamento usadas na têmpera do metal de base. Assim, é possível que o metal de solda atinja a resistência do metal de base na condição como soldado (LANCASTER, 1999).

2.7.4. Pós-aquecimento

O pós-aquecimento é a aplicação de calor a uma junta soldada, imediatamente após sua conclusão e antes de seu resfriamento, de forma a manter a temperatura do preaquecimento ou temperatura mais alta, conforme especificado. Seu objetivo é aumentar a taxa de difusão do hidrogênio da junta soldada (BAILEY et al., 1973).

2.7.5. Diluição

A composição química de uma solda, não é a mesma que a composição química especificada para o metal de adição depositado, isto se deve à participação do metal de base na constituição da zona fundida. O coeficiente de diluição, ou simplesmente diluição, indica a participação do metal de base na constituição da zona fundida.

A diluição é função do processo e do procedimento de soldagem. Por exemplo, no processo de soldagem eletrodo revestido a diluição é da ordem de 10 a 30%, enquanto no processo de soldagem a arco submerso pode atingir 80%.

A Figura 9 apresenta esquematicamente a diluição.

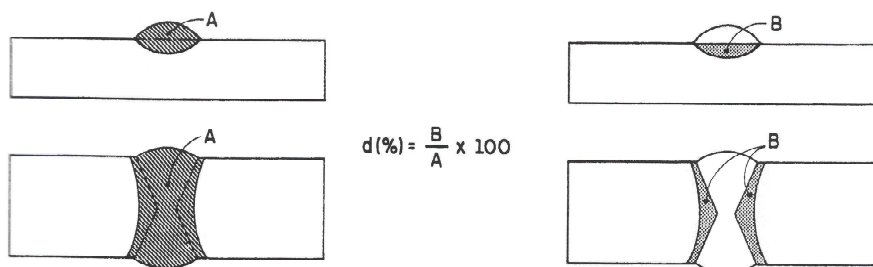


Figura 9 - Ilustração esquemática da diluição: (A) área da seção transversal da zona fundida (B) área de participação do metal de base na seção transversal da zona fundida (d) diluição (FBTS, 2009).

2.7.6. Defeitos no metal de solda

Alguns dos defeitos que podem ocorrer no metal de solda são:

- a) Trinca de solidificação ou trinca a quente
- b) Trinca a frio ou induzida por hidrogênio
- c) Porosidade
- d) Inclusões
- e) Defeito de cratera
- f) Falta de fusão

a) Trinca de solidificação ou trinca a quente: quase todos os aços podem ser soldados com metal de solda de composição similar ao metal de base. Muitos aços altamente ligados e muitas ligas não ferrosas requerem eletrodos ou metal de adição diferente do metal de base, isso porque há uma faixa extensa, na qual a solidificação ocorre. Esta faixa favorece a formação de trinca a quente e pode ser evitada com o uso de consumível adequado para reduzir a faixa de solidificação. A presença de elemento de baixo ponto de fusão, como exemplo o enxofre, pode favorecer a formação de trinca a quente (HOULDCROFT; JOHN, 1988).

A presença de um filme líquido, que pode ser um eutético, de baixo ponto de fusão, formado por impurezas como o enxofre e o fósforo, de baixa resistência mecânica, é uma causa de trinca de solidificação (LANCASTER, 1999).

b) Trinca induzida pelo hidrogênio ou trinca a frio: a trinca induzida pelo hidrogênio é também conhecida como trinca a frio, trinca atrasada ou trinca sob cordão. O termo trinca induzida pelo hidrogênio, usualmente abreviado como *hydrogen induced cracking* (HIC), tem sido introduzido para designar trincas que às vezes são encontradas em tubos de gasodutos ou vasos de pressão como um resultado do acúmulo de hidrogênio. Isto também ocorre em aços durante a fabricação e em serviço.

A trinca a frio ocorre quando simultaneamente ocorrem as seguintes condições: hidrogênio presente, tensões na solda, microestrutura favorável, baixa temperatura (BAILEY et al., 1973).

c) Porosidade: a porosidade pode ocorrer como resultado da reação química dentro da poça de fusão que pode não ser adequada e aprisionar gás monóxido de carbono dentro

do metal solidificado. A porosidade pode ocorrer durante a abertura de arco pelo fato de que neste momento não existir uma eficiente proteção do metal de solda. Pode ocorrer porosidade devido à umidade absorvida na poça de fusão com liberação de hidrogênio. Este tipo de porosidade pode ser observado na soldagem de alumínio. A porosidade pode ocorrer também devido a uma turbulência do gás de proteção (HOULDCROFT; JOHN, 1988).

d) Inclusões: os processos de soldagem que usam fluxo podem reter escória no cordão de solda ou entre a face do chanfro e o cordão de solda. A causa é geralmente a limpeza inadequada entre passes de solda e técnica de soldagem inadequada. Proteção gasosa ineficiente pode ocorrer inclusões de óxidos e elevada corrente de soldagem pode introduzir inclusão de tungstênio (HOULDCROFT; JOHN, 1988).

e) Defeito de cratera: a estrutura dos grãos do metal de solda é geralmente colunar, e estes tendem crescer originados nos grãos presentes na interface líquido-metal de base. Se a fonte de calor é rapidamente removida, a poça de fusão resfria formando uma superfície côncava denominada cratera. A cratera favorece a formação de trinca de solidificação com formato de estrela. A correta técnica de extinguir o arco pode evitar a formação de defeito de cratera (HOULDCROFT; JOHN, 1988).

f) Falta de fusão: são defeitos que podem ser facilmente evitados. A causa pode ser a baixa corrente de soldagem ou uma inadequada velocidade de soldagem (HOULDCROFT; JOHN, 1988).

2.8. Técnica da meia camada

A técnica da meia camada é utilizada para evitar-se a realização do tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) após o reparo por soldagem em metais de baixa liga. A não realização do TTAT traz ganhos relacionados à economia de recursos financeiros e ao prazo mais curto para a conclusão dos trabalhos.

A técnica da meia camada tem sido largamente utilizada por diferentes indústrias, para reparo de diferentes ligas, assim como, o aço 2,25Cr-1Mo. Nesta técnica, uma cavidade é feita por goivagem com eletrodo de carbono ou por esmerilhamento na região a ser reparada. Em seguida, é realizado um preaquecimento a

temperatura na ordem de 177°C . Uma camada de amanteigamento de passes estreitos (retilíneos) com eletrodo revestido de diâmetro de 3 mm é então depositada. O uso de eletrodo de pequeno diâmetro com baixo aporte térmico tem o objetivo de reduzir a dureza da ZAC. Uma sobreposição de 50% entre passes adjacentes é mantida para revenir parcialmente os passes previamente depositados. A metade da primeira camada é então removida por esmerilhamento, desse fato o nome “meia camada” é derivado. Uma nova camada de passes estreitos (retilíneos) é depositada sobre a primeira camada esmerilhada, utilizando agora eletrodo revestido de diâmetro maior, tal como 4mm, sem oscilação, com maior aporte térmico para refinar a região de grãos grosseiros da ZAC.

O próximo passo é preencher a cavidade com eletrodos de diâmetro 4 mm, com o objetivo de revenir a camada anteriormente depositada. O reforço da última camada é então removido por esmerilhamento. A temperatura interpasses máxima de 230°C deve ser controlada até a conclusão da soldagem. Um pós-aquecimento na ordem de 290°C deve ser realizado para auxiliar na difusão do hidrogênio. Os passos da técnica de revenimento por meia camada são esquematicamente ilustrados na Figura 10 (ALORAIER et al., 2010).

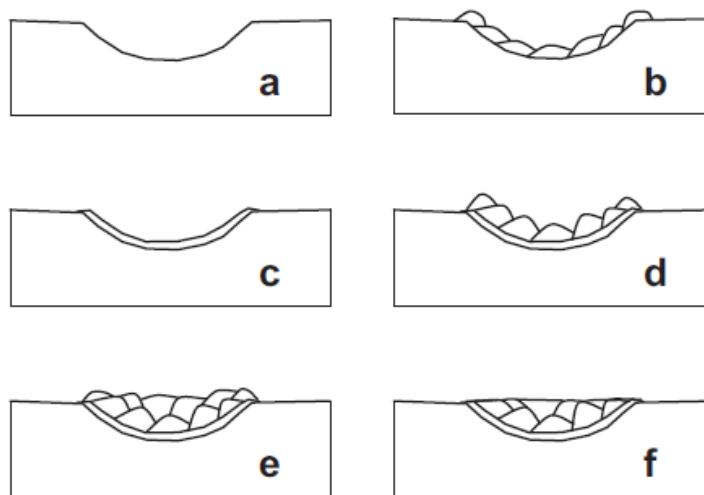


Figura 10 - Ilustração esquemática da técnica de revenimento por meia camada (a) goivagem e esmerilhamento, (b) deposição da camada de amanteigamento, (c) remoção da metade da camada de amanteigamento, (d) deposição da camada de revenimento, (e) preenchimento total da cavidade e (f) remoção do reforço (ALORAIER et al., 2010).

Uma técnica alternativa de reparo, conhecida como técnica da meia camada, envolve o esmerilhamento da metade da altura dos passes da primeira camada, depositando então a segunda camada. Porém, esse método parece ser mais

inconveniente para atingir tenacidade e refinamento de grãos da ZAC do que a técnica da dupla camada (BAILEY, 1994).

Higuchi, Sakamoto, Tanioka (1980) apud (SILVA, MARQUES, BRACARENSE, 2000), discutiram esta técnica e discordaram da remoção de 50% da primeira camada, não importando a espessura de reforço dos cordões, que para um mesmo diâmetro de eletrodo pode variar largamente. Segundo o autor, a primeira camada deve ser removida de modo a deixar uma espessura residual entre 2,0 e 2,5 mm, para que a zona de grãos grosseiros da primeira camada seja revenida pela segunda camada.

Marinho et al (2008) utilizaram a técnica da dupla camada para reparo do pino de fixação da base do queimador de plataforma marítima. O pino foi fabricado em material AISI 4140, trincado devido ao inadequado procedimento de soldagem, e teve suas trincas esmerilhadas. Após o esmerilhamento, a superfície da cavidade foi revestida por duas camadas depositadas com o eletrodo revestido E11018, utilizando-se a técnica da dupla camada. Após o amanteigamento, a cavidade foi preenchida com o mesmo eletrodo revestido. O procedimento testado demonstrou, para a situação estudada, a possibilidade da não realização do tratamento térmico de alívio de tensões.

Menezes, Silva, Camargo (2011) utilizaram a técnica da meia camada para a soldagem de união de tubos API 5CT grau P110, temperado e revenido, com CEiiw de 0,48%, em uma instalação de gasoduto terrestre. A técnica obteve sucesso na aplicação em procedimento de soldagem que atendeu aos requisitos da norma API 1104 (2010) e aos requisitos da especificação técnica Petrobras.

2.9. Trinca induzida pelo elemento hidrogênio

A trinca induzida pelo hidrogênio é também conhecida como trinca a frio, trinca atrasada ou trinca sob cordão. O termo “trinca induzida pelo hidrogênio”, usualmente abreviado como TIH, tem sido utilizado para designar trincas algumas vezes encontradas em dutos ou vasos de pressão como o resultado da difusão do hidrogênio em serviço; mas o termo “trinca de hidrogênio na fabricação” é preferido. Essa trinca ocorre nos aços durante a sua manufatura, durante a fabricação e em serviço. Esta não é exclusiva da soldagem, porém quando ela ocorre como consequência da soldagem as trincas são localizadas na zona afetada pelo calor do metal de base ou no próprio metal de solda (BAILEY et al., 1973).

2.9.1 Trinca na zona afetada pelo calor

A trinca induzida pelo hidrogênio ocorre quando as quatro condições abaixo citadas acontecem simultaneamente (BAILEY et al., 1973):

a) O hidrogênio está presente em grau suficiente: a presença do hidrogênio é inevitável, deriva da umidade presente nos fluxos usados na soldagem e de outras fontes, tais como, proteção inadequada da poça de fusão e presença de óxidos na superfície. É absorvido pela poça de fusão e sendo parte deste, transferido para a ZAC por difusão.

b) Tensão residual atuando na solda: esta aumenta inevitavelmente devido a contração térmica durante o resfriamento e pode ser suplementada por outras tensões originadas como resultado da rigidez das peças a serem unidas por soldagem.

c) Presença de microestrutura susceptível na ZAC: a região da ZAC que foi submetida à temperatura alta o suficiente para transformar rapidamente o metal de base de ferrita para austenita, voltando rapidamente à baixa temperatura, produz microestrutura que é usualmente de maior dureza e mais susceptível a fragilização pelo hidrogênio. Trincas por hidrogênio, quando presentes, são invariavelmente localizadas nesta região de transformação.

d) Uma baixa temperatura é atingida: o maior risco de trincamento ocorre quando, no resfriamento, temperaturas próximas a do ambiente são atingidas e as trincas podem ocorrer horas após o término da soldagem. É improvável que a trinca ocorra em aços estruturais acima de aproximadamente 150°C, e em qualquer outro aço acima de aproximadamente 250°C.

2.9.2. Mecanismos de fragilização pelo hidrogênio

São basicamente três mecanismos: de Zappfe (ou de pressão); de Petch; e de Troino-Oriani. O mecanismo de Zappfe foi desenvolvido para explicar a formação de *blisters* carregadas com hidrogênio. A ideia é que o hidrogênio atômico se combinaria formando um gás em microtrincas ou microcavidades no interior do material. Tal gás

aumentaria a pressão interna na microtrinca ou microcavidade, causando sua expansão, ou por deformação ou clivagem, levando-a ao coalescimento e à falha do material. O mecanismo de Petch leva em conta que o hidrogênio absorvido abaixa a energia livre superficial do metal, resultando a diminuição da tensão de fratura dada pelo critério de Griffith. O mecanismo de Troiano-Oriani propõe que o hidrogênio diminui a energia de coesão entre os átomos do reticulado nos contornos ou interfaces. Essa energia de coesão é diminuída nos locais onde o hidrogênio está mais concentrado. Para Troiano, isso ocorre onde há triaxialidade de tensões; para Oriani na zona deformada plasticamente, na ponta da trinca (BRANDI, 2002).

2.9.3. Mecanismo de fragilização por hidrogênio na soldagem dos aços

O hidrogênio é introduzido pela atmosfera do arco para a poça de fusão que, ao solidificar, transforma-se em austenita e perde um pouco de hidrogênio para a atmosfera. A solubilidade do hidrogênio no metal de solda diminui com a queda da temperatura, como pode ser visto esquematicamente na Figura 11, na qual observa-se que existe um acréscimo da solubilidade do hidrogênio na austenita. Um modelo de fragilização por hidrogênio durante a soldagem foi proposto por Granjon (1972) e pode ser visto esquematicamente na Figura 12. No metal base existe uma faixa que também está austenitizada. A partir do momento em que ocorre a decomposição da austenita em ferrita+cementita, a solubilidade do hidrogênio cai, e este se difunde para a região austenitizada do metal base. No resfriamento, essa região com maior teor de hidrogênio pode temperar, dando em resultado a martensita. Consegue-se dessa forma ter hidrogênio associado a uma microestrutura frágil (BRANDI, 2002).

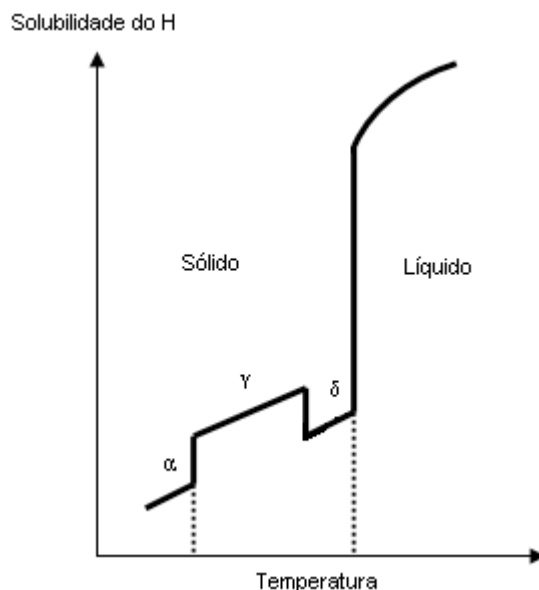


Figura 11 – Esquema de solubilidade do hidrogênio no metal de solda (BRANDI, 2002)

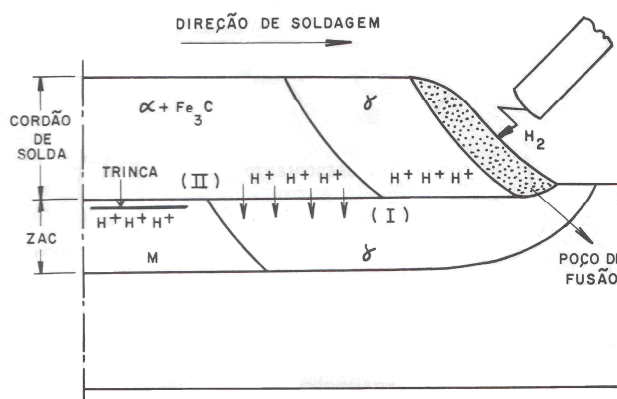


Figura 12 – Mecanismo de fragilização por hidrogênio durante a soldagem (BRANDI, 2002)

2.9.4 Carbono equivalente

A susceptibilidade de um aço, de uma dada composição, em elevar a dureza na ZAC devido ao ciclo térmico submetido durante a soldagem é frequentemente caracterizada pela equação do carbono equivalente. Esta prescreve o efeito da composição química do aço em formar martensita e, quando combinada com informações como processos de soldagem, energia de soldagem, espessura de parede do tubo e taxa de resfriamento, pode ser usada para estimar as condições de soldagem que resultam em uma microestrutura não susceptível à trinca induzida pelo elemento hidrogênio. Há diversas fórmulas de carbono equivalente utilizadas para medir a soldabilidade, porém a mais utilizada é a provida pelo IIW – *International Institute of Welding*. O CE_{iiw} é considerado como mais eficiente para avaliar a soldabilidade de

aços mais antigos, tais como os produzidos antes da utilização do processamento termomecanicamente controlado, com percentuais de carbono de 0,15 a 0,30%. Outra fórmula muito utilizada, o CE_{pcm} – *Parameter Cracking Measurement*, leva mais em conta o efeito do carbono do que outros elementos, e é considerada mais adequada para os aços mais modernos (KÜCHLER, 2009). As Eq. 1 e 2 apresentam as fórmulas de CE_{iiw} e CE_{pcm} citadas por Küchler (2009).

$$CE_{iiw} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \quad [1]$$

$$CE_{pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad [2]$$

Talaş (2010), em revisão de literatura, identificou dezoito diferentes fórmulas de carbono equivalente e exemplificou os benefícios das mesmas.

2.9.5. Trinca no metal de solda

O trincamento por hidrogênio no metal de solda é menos comum que na ZAC. Nesse contexto, a dureza do metal de solda é menos importante que a dureza da ZAC, a possibilidade de variação da dureza nesse é geralmente menor, devido ao teor de carbono no metal de solda ser usualmente menor. Porém, com nível elevado de hidrogênio, o trincamento é possível em metais de solda com dureza máxima ligeiramente abaixo de 200 HV, na qual, em circunstâncias similares, a dureza crítica para a ZAC seria em torno de 350 HV. Existem três regimes nos quais a trinca por hidrogênio é possível. O primeiro caso é quando estão sendo soldados aços C e C-Mn de alta espessura sem o emprego de pré-aquecimento e com eletrodos que forneçam alto nível de hidrogênio, isto é, eletrodos de revestimento rutílicos e celulósicos; essas trincas têm a forma de uma microtrinca fina. Essas trincas hoje são raras, devido ao difundido uso de eletrodos de revestimento básico para a soldagem de espessuras elevadas, particularmente se precauções são tomadas utilizando diagramas, tais como os fornecidos por BAILEY et al (1973). O segundo caso provável do regime de trincamento se dá quando é requerido ao metal de solda um elevado teor de elementos de liga, sendo esse necessário para atingir resistência a fluência; a oxidação a alta

temperatura; ao ataque pelo hidrogênio ou para atingir a resistência mecânica requerida. No último caso, o desenvolvimento dos aços baixa liga de baixos níveis de carbono (abaixo de 0,05%C, chamados aços *high strength low alloy* - HSLA) para evitar o risco de trincamento na ZAC, tornou o trincamento no metal de solda um problema maior, particularmente quando há a necessidade do metal de solda atingir elevada resistência mecânica. Nesses casos o metal de solda terá carbono equivalente consideravelmente maior que o do metal base. Com os aços para alta temperatura soldáveis, as discrepâncias não são tão grandes, cujos aços usualmente não possuem carbonos equivalentes abaixo daqueles de seus metais de solda. Em todos esses casos, é provável que qualquer trincamento no metal de solda seja transversal ao comprimento da solda e perpendicular à superfície, embora trincas longitudinais possam ocorrer em algumas circunstâncias. Muitos desses aços possuem temperaturas de pré-aquecimento mandatórias para suas aplicações convencionais, nas quais cuidados com o trincamento por hidrogênio devem ser tomados. O terceiro tipo de trincamento por hidrogênio no metal de solda é o chamado “*chevron cracking*”, o qual é transversal à linha de solda, porém a 45° da superfície. Tais trincas são mais comuns em chapas de aços C-Mn em soldas relativamente espessas, soldadas com processos de alto aporte térmico, assim como o arco submerso. Embora a trinca a 45° tenha sido encontrada em soldas de dois passes (em chapas de 40 mm de espessura), esta é mais comum em soldas multipasses. Uma característica importante da trinca transversal a 45° é que na soldagem com passes largos resultantes de aportes térmicos elevados, a distância para a difusão do hidrogênio pode ser tão grande que não há tempo suficiente disponível para permitir que uma quantidade suficiente de hidrogênio escape antes de a solda estar suficientemente fria para trincar. No entanto, tais trincas não são exclusivas de soldagens com alto aporte térmico. Pode-se mostrar que, embora o aumento do aporte térmico diminua a taxa de resfriamento e forneça maior tempo para a difusão do hidrogênio, este efeito benéfico é menor que o efeito danoso das grandes distâncias para a difusão do hidrogênio resultantes dos passes de soldas mais largos. A trinca transversal a 45° em soldas de aços C-Mn pode ser largamente evitada pelo uso de metais depositados com níveis de hidrogênio muito baixos, isto é, ≤ 5 ml/100g (BAILEY, 1994).

2.10. Ensaios metalúrgicos

2.10.1. Análise química por espectrometria de emissão óptica por plasma de argônio

Esta técnica engloba uma série de métodos que se baseiam na emissão de radiação característica de elementos químicos em contato com fontes térmicas ou elétricas. Estas fontes excitam os átomos a níveis maiores de energia que a energia do estado fundamental. Quando, do estado excitado retornam ao fundamental, emitem uma radiação característica de comprimento de onda específica para cada elemento. O gás utilizado no processo é o argônio. A função do argônio é a de formar uma atmosfera inerte na câmara onde ocorre a excitação dos elétrons da amostra. Dependendo do consumo do argônio, o fornecimento poderá ser realizado na forma liquefeita, em recipiente criogênico (WHITE MARTINS, 2011).

2.10.2. Análise metalográfica óptica

A análise metalográfica é dividida em dois processos: macrografia e micrografia.

A) Macrografia

A macrografia consiste na preparação de uma superfície plana, por meio de lixamento sucessivo da amostra e do ataque desta superfície por um reativo adequado, na interpretação dos resultados e na obtenção de documentos que reproduzam os resultados dos exames. O exame da superfície atacada é feito a olho nu, com o auxílio de uma lupa, com aumento de até cerca de 50 vezes, ou com o uso de estereoscópio.

As morfologias que podem ser observadas neste exame são: formato do cordão de solda, formato da ZAC, falta de penetração, processo de fabricação, etc.

A técnica macrográfica pode ser dividida nas seguintes etapas:

- I) corte longitudinal ou transversal;
- II) lixamento (180, 220 e 320 mesh);
- III) ataque químico da superfície com reativo específico;
- IV) exame, interpretação ou análise macroestrutural;

V) elaboração de documentos de exame ou relatório técnico (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2004)

B) Micrografia

O exame micrográfico da superfície da amostra é preparada de forma similar a da macrografia. Porém, o lixamento deverá ser conduzido até uma lixa mais fina (600 mesh). Em seguida, a amostra deverá ser polida de forma especular e então, atacada pelo reativo. O exame micrográfico é realizado utilizando o microscópio metalográfico, cujas ampliações variam de 50 a 2.000 vezes. As morfologias que podem ser observadas neste exame são: tamanho de grão da solda e do metal de base, fases e constituintes, inclusões não metálicas, microporosidades, microtrincas, precipitação, produtos de corrosão, etc.

A técnica micrográfica consiste nas seguintes etapas:

- I) corte longitudinal ou transversal;
- II) embutimento em baquelite ou resina;
- III) lixamento (180, 220, 320 e 600 mesh);
- IV) polimento com pasta de diamante, alumina ou sílica coloidal;
- V) ataque químico da superfície com reagente específico;
- VI) exame, interpretação ou análise microestrutural;
- VII) elaboração de documento que reproduza os resultados do exame ou relatório técnico (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2004).

2.11. Ensaios não-destrutivos

2.11.1. Ensaio visual

O ensaio visual é o ensaio não-destrutivo básico. Todos os outros ensaios não-destrutivos devem ser executados após a inspeção visual, que pode ser feita à vista desarmada, com auxílio de lupa ou com aparelhos ou instrumentos para inspeção remota por meio de endoscópios. Após a operação de soldagem, o ensaio visual tem por finalidade detectar possíveis descontinuidades induzidas na soldagem. Além de suas aplicações na soldagem, o ensaio se aplica, de maneira geral, na detecção de irregularidades superficiais de vários tipos, tais como: dobras de laminação de chapas,

pontos e estados de corrosão, evidências de vazamento, acabamento de peças usinadas ou forjadas e identificação de estado da superfície (CUNHA, 2010).

O ensaio visual realizado nesta pesquisa foi o ensaio visual direto, utilizando os critérios de aceitação na norma API 1104 (2010).

2.11.2. Ensaio por ultrassom

A) Conceito da técnica

O ensaio por ultrassom caracteriza-se em um método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou formas de materiais, metais ferrosos, não ferrosos e não metálicos. A detecção de defeitos se dá pela reflexão de ondas sônicas impostas ao metal a ser inspecionado. Um exemplo de equipamento é apresentado na Figura 13. O gerador das ondas sônicas são cristais piezoelétricos localizados no interior de transdutores. A frequência das ondas sônicas emitidas pelos transdutores está situada na faixa ultrassônica, entre 20 Hz e 20 kHz, fato esse que nomeia o ensaio não destrutivo.



Figura 13 – Equipamento de ultrassom manual (KRAUTKRAMER, 2011)

Os feixes sônicos, cujas características devem ser compatíveis com a estrutura do material a ser ensaiado, quando introduzido em um ângulo favorável em relação a

uma descontinuidade, encontram uma interface sendo refletido pela mesma. A reflexão será então registrada na tela do aparelho com um pico (eco).

B) Técnica *phased array*

A técnica *phased array* utiliza um cabeçote composto por um mosaico de transdutores, que por meio de um *software*, são ativados de maneiras diversas, de modo a produzir um feixe sônico com as características desejadas. Os resultados obtidos com esta técnica otimizam as inspeções, aumentando a eficácia e produtividade, uma vez que é possível focalizar o feixe sônico ao longo do volume da solda sob inspeção em intervalos de 1 grau, conferindo à inspeção, além de maior exatidão e grande confiabilidade, conforme apresentado na Figura 14. A técnica por ultrassom *phased array* é uma nova forma de gerar e receber ondas ultrassônicas. Ao invés de utilizar um simples transdutor com um feixe sônico, o ultrassom *phased array* utiliza transdutores com múltiplos cristais pulsados em intervalos de tempo diferentes, para criar feixes sônicos com interferências construtivas e destrutivas, controlando a forma (feixe invertido, focado), os ângulos (-85° a $+85^{\circ}$) e o movimento dos mesmos (varredura eletrônica linear ou setorial). Desta forma, o ultrassom *phased array* oferece vantagens técnicas significativas para a inspeção de juntas soldadas, quando comparado ao ultrassom com cabeçotes convencionais, pois os ângulos e as áreas a serem inspecionadas podem ser controlados eletronicamente. A programação dos ângulos a serem utilizados, por exemplo, permite que os mesmos possam ser o mais perpendicular possível a uma descontinuidade, por exemplo falta de fusão em soldas executadas por processo automatizado, melhorando sua detectabilidade. A varredura linear eletrônica permite rápida cobertura das regiões de interesse em todo o volume da solda, superior ao ultrassom manual com cabeçote convencional, que se limita a um feixe de cada vez. A inspeção utilizando ângulos múltiplos de forma simultânea pode ser a varredura eletrônica setorial ou a varredura azimutal (CAMPINHO, 2007).

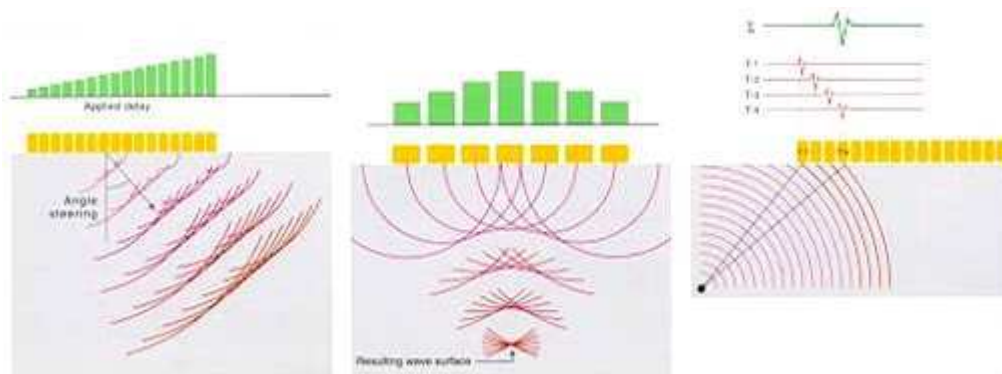


Figura 14 – Princípio da técnica *phased array* (DUBÉ, 2004)

O foco eletrônico permite aperfeiçoar o formato e o tamanho do feixe sônico na região em que existe probabilidade de ocorrer a descontinuidade, e detectá-la. Esta técnica também utiliza sistemas de ultrassom automatizados, definindo zonas de discriminação para inspeção de juntas soldadas circunferenciais, e reduzindo significativamente o número de cabeçotes em relação a outros sistemas.

A utilização do ultrassom *phased array* otimiza a detectabilidade das descontinuidades, aumentando assim a confiabilidade dos ensaios, minimizando o prazo de inspeção.

2.12. Tratamento estatístico dos resultados

2.12.1. Média aritmética

Valor típico ou representativo de um conjunto de dados que tendem a se localizar em um ponto central, segundo as suas grandezas (medidas de tendência central). A Eq. 3 apresenta a fórmula para seu cálculo (HOMANN, 2009).

$$x_m = 1/n \sum_{i=1}^N x_i \quad [3]$$

Onde: x_i = valor obtido; x_m = média obtida; n = número de medições

2.12.2. Desvio padrão

Grau segundo o qual os dados obtidos tendem a dispersar em torno de um valor médio. A Eq. 4 apresenta a fórmula para seu cálculo.

$$S = \sqrt{(1/n \sum_{i=1}^N (xi - xm)^2)} \quad [4]$$

Onde: xi = valor obtido, xm = média obtida, n = número de medições

3.12.3. Incerteza de medição

A incerteza de medição é um parâmetro associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. A incerteza da medição associada às estimativas de entrada é avaliada de acordo com os métodos de avaliação do tipo A ou tipo B.

A avaliação do tipo A da incerteza padrão é o método de avaliação da incerteza pela análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a incerteza padrão é o desvio padrão experimental da média que se obtêm de um procedimento de cálculo da média aritmética ou de uma análise de regressão adequada.

A avaliação do tipo B da incerteza padrão é o método de avaliação da incerteza por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a avaliação da incerteza padrão é baseada em algum outro conhecimento científico (HOMANN, 2009).

A) Avaliação tipo A

A incerteza padrão $u(xi)$ tipo A é obtida por meios que envolvem a análise estatística de observações repetitivas do mensurando. A incerteza padrão $u(xi)$ tipo A pode ser obtida estatisticamente de duas maneiras (HOMANN, 2009):

- Calculando o desvio padrão experimental: a partir de n medidas obtidas sob condições de repetitividade, calcular o desvio padrão experimental, e dividir pela raiz quadrada do número n de medições. A Eq. 5 apresenta a fórmula para seu cálculo.

$$U(x) = s(xm) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad [5]$$

Onde: xm = média obtida, n = número de medições, s = desvio padrão

B) Avaliação tipo B

A incerteza padrão $u(xi)$ tipo B é obtida por meios que não envolvem análise estatística, e sim outras informações. São exemplos deste tipo de avaliação: certificados de calibração, especificações dos instrumentos e padrões, dados técnicos de fabricantes, livros e manuais técnicos, e estimativas baseadas na experiência.

A incerteza citada em certificados de calibração. A incerteza expandida (Up) informada em certificados de calibração deverá ser transformada em incerteza padrão $u(xi)$, dividindo Up/k . A Eq. 6 apresenta a fórmula para seu cálculo (HOMANN, 2009).

$$u(xi) = \frac{Up}{K} \quad [6]$$

Onde:

$K=2$ para probabilidade (P) de 95%

$K=3$ para probabilidade (P) de 99%

3.12.4. Incerteza padrão combinada

A determinação da incerteza padrão combinada de medições diretas é obtida como sendo a raiz quadrada da soma quadrática das diversas incertezas padrão (ui), não correlacionadas, envolvidas no processo de medição. A Eq. 7 apresenta a fórmula para seu cálculo (HOMANN, 2009).

$$Uc = \sqrt{[(u1)^2 + (u2)^2 + (u3)^2 + (u4)^2 + \dots + (un)^2]} \quad [7]$$

Onde: u = incerteza padrão

A medição direta é aquela cuja indicação resulta da aplicação do instrumento de medição sobre o mensurando, informando um valor diretamente na unidade da grandeza

medida. São exemplos de grandezas de medição direta: comprimento, força, pressão, temperatura e tensão elétrica.

3.12.5. Incerteza expandida

É a grandeza que define um intervalo em torno do resultado de uma medição que pode ser esperado em englobar uma grande fração da distribuição de valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. A Eq. 8 apresenta a fórmula para seu cálculo.

$$U = k.uc \quad [8]$$

Onde: uc = incerteza combinada, k = fator de abrangência

Assumindo a incerteza combinada calculada como sendo uma distribuição normal com 1 desvio padrão recomenda-se usar $k = 2$, que define um intervalo com nível de confiança de aproximadamente 95% para casos gerais; e usar $k = 3$, que define um intervalo com nível de confiança de aproximadamente 99% para aplicações críticas (HOMANN, 2009).

3.12.6. Planilha para cálculo da incerteza expandida

Este estudo da incerteza de medição deve ser utilizado pelos laboratórios para dar maior confiabilidade em seus resultados de medição dos ensaios e calibração. A Figura 15 apresenta a planilha, em Excel, desenvolvida com base no documento NIT-DICLA-021 (INMETRO, 2012) utilizada para cálculo da incerteza expandida quando aplicável.

3. PROPOSIÇÃO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um estudo aplicado a soldagem de junta soldada não convencional necessária na construção de um gasoduto terrestre. A junta soldada pesquisada é a união circunferencial de topo do tubo API 5L grau X65 com o tubo API 5CT grau Q125.

Trata-se de uma pesquisa descritiva, com uma abordagem quantitativa. Neste estudo serão testados e quantificados os diversos aspectos que afetam a viabilidade técnica da pesquisa “Desenvolvimento da soldagem de união do tubo API 5CT grau Q125 com o tubo API 5L X65 em junta circunferencial de gasoduto terrestre”.

A utilização de diferentes aportes térmicos, o uso do amanteigamento pela técnica da meia camada pelo processo de soldagem SMAW, a soldagem de união pelo processo de soldagem GTAW e a avaliação metalúrgica e física fornecerão os meios para se concluir sobre a viabilidade técnica da execução no campo da junta soldada pesquisada.

Os resultados deste trabalho já foram aplicados de forma pontual e estratégica na construção de um gasoduto da Petrobras.

Pretende-se utilizar os resultados deste trabalho em outras situações específicas de características semelhantes, nas quais a união entre os dois tubos citados venham a ser necessárias.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Planejamento experimental

A Figura 16 apresenta a metodologia aplicada para atender os objetivos do trabalho, desde a caracterização dos materiais utilizados para a avaliação de sua microestrutura e soldabilidade, até o desenvolvimento da técnica de soldagem mais apropriada, respeitando as características de cada um dos materiais, para posterior análise dos dados e discussão.

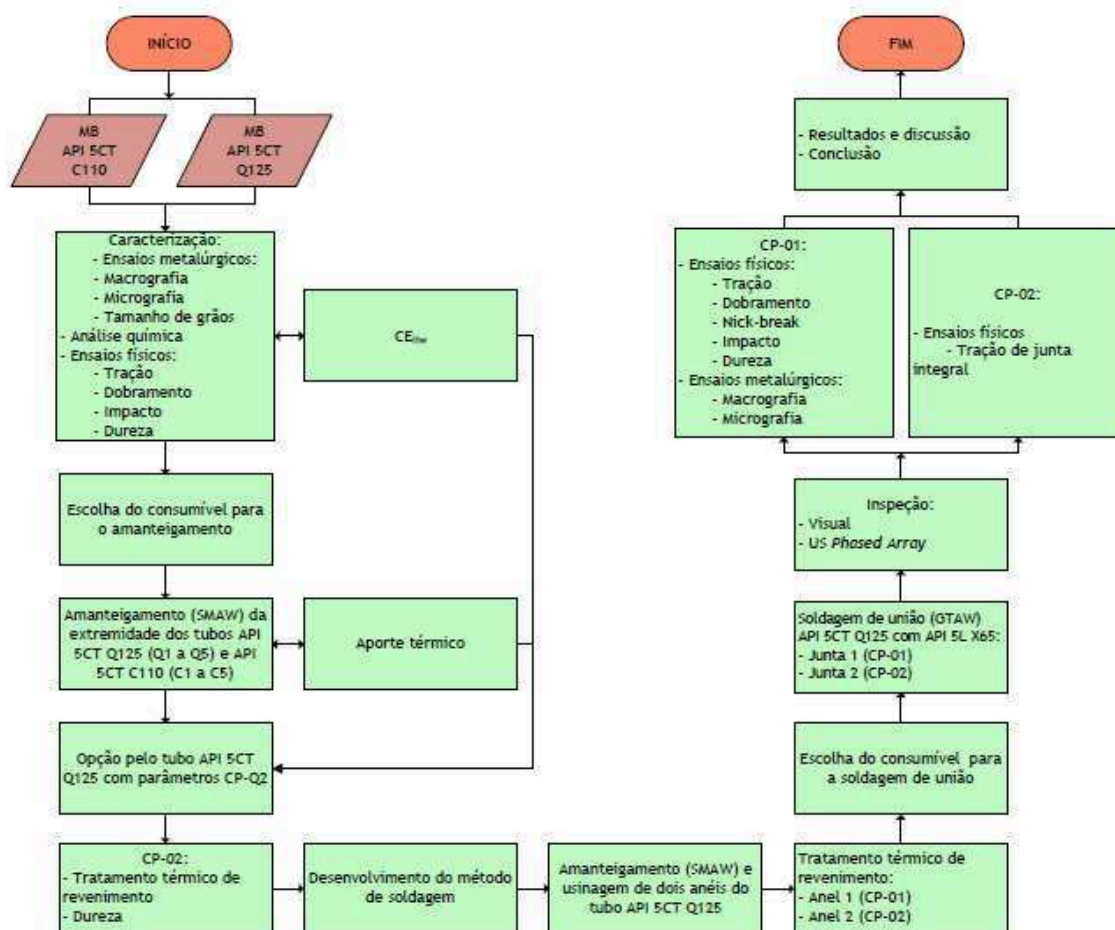


Figura 16 – Fluxograma do planejamento experimental do estudo (fonte: autor)

4.2. Materiais

Os materiais utilizados neste estudo foram os tubos API 5CT grau Q125, API 5CT grau C110 e API 5L X65; e os consumíveis de soldagem, por processo, eletrodo revestido E7018-1 e vareta GTAW ER80S-G.

Para a correta definição dos requisitos dos ensaios físicos para cada material analisado, é necessário que as dimensões de cada material sejam informadas. A Tabela 1 apresenta as dimensões de cada tubo.

Tabela 1 – Dimensões de cada tubo estudado

Tubo	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)
API 5CT C110	273,1	13,84
API 5CT Q125	273,1	20,24
API 5L X65	273,1	7,80

A) Requisitos de resistência mecânica

A Tabela 2 apresenta os requisitos de resistência mecânica para os três materiais estudados.

Tabela 2 – Requisitos de tração

Tubo	Lim. escoamento (MPa)	Res. Tração (MPa)	Alongamento 50mm (%)
API 5CT C110	758 – 965	860	Marca proprietária não especificado
API 5CT Q125	862 – 1034	931	11
API 5L X65	450 – 600	535 – 760	23,4

B) Requisitos de ductilidade

A Tabela 3 apresenta os requisitos de ductilidade para os três materiais estudados.

Tabela 3 – Requisitos de dobramento

Tubo	Diâmetro cutelo (mm)	Distância roletes (mm)	Ângulo
API 5CT C110	Marca proprietária, não especificado		
API 5CT Q125	Não há requisito especificado		
API 5L X65	68,8	87,6	180°

C) Requisitos de dureza

API 5CT grau C110: a norma não especifica valores de dureza, marca proprietária.

API 5CT grau Q125: não há requisitos para valores máximos ou mínimos de dureza para este material, porém há um requisito para variação de dureza entre durezas medidas dentro de um mesmo quadrante do tubo que é de 5,0 HRC para a espessura 20,24 mm, utilizada nesta pesquisa. Este requisito é para o corpo do tubo não sendo aplicável para corpos de prova.

API 5L X65 PSL2: *Hard spots* (região com dureza elevada): qualquer comprimento maior que 50 mm, medido em qualquer direção, será considerado um defeito se a dureza exceder a 345 HV10.

D) Requisitos de impacto

A Tabela 4 apresenta os requisitos de impacto Charpy para os três materiais estudados.

Tabela 4 – Requisitos de impacto

Tubo	Energia absorvida média três CPs (J)		Temperatura de teste (°C)
API 5CT C110	Marca proprietária, não especificado		
API 5CT Q125	75		0
API 5L X65	MS – 27	Área dúctil mínima 85%	
	ZAC – 27		

A Figura 17 apresenta as duas amostras dos tubos preparados para a retirada dos corpos de prova.

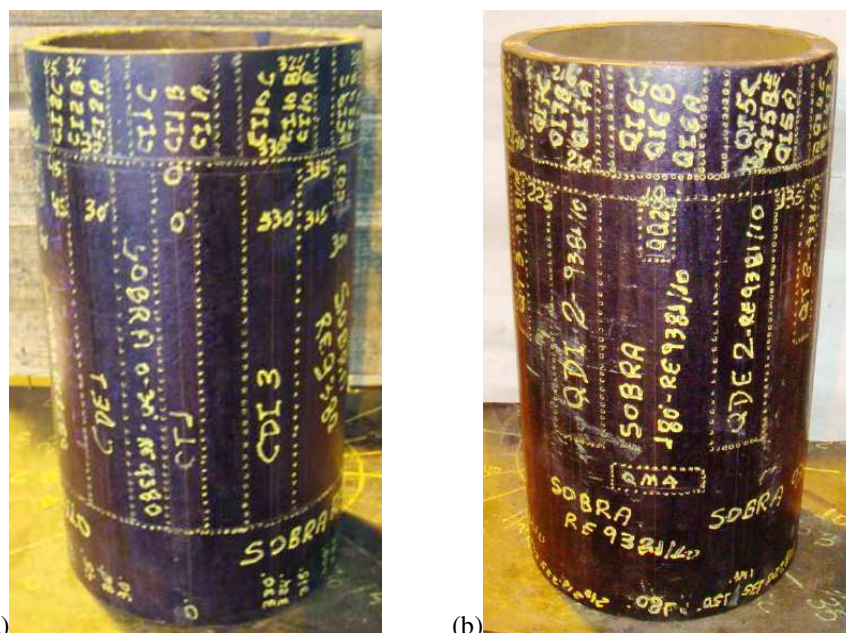


Figura 17 – Amostras de tubo (a) API 5CT grau C110 e (b) API 5CT grau Q125 (fonte: autor)

A Figura 18 apresenta três amostras de tubo API 5L X65 com os biseis usinados.



Figura 18 - Tubos API 5L X65 com biseis usinados (fonte: autor)

Quanto aos consumíveis de soldagem, foram escolhidos o eletrodo revestido E7018-1 de diâmetro 2,5 mm e a vareta GTAW ER80S-G de diâmetro 3,2 mm por serem essas classificações as mais adequadas quando se considerou as propriedades mecânicas dos três metais de base envolvidos.

4.3. Métodos

4.3.1. Análise comparativa da soldabilidade dos tubos API 5CT grau Q125 e API 5CT grau C110

A Tabela 5 apresenta as técnicas de caracterização para cada um dos dois metais de base, assim como a quantidade de corpos de prova e normas de referência, conforme definido no planejamento experimental.

Tabela 5 – Ensaios para caracterização dos metais de base e respectiva norma de referência

Quantidade	Descrição
01	Macrografia da espessura do tubo com corte no sentido longitudinal ao tubo ASTM E 381 (ASTM, 2006)
04	Micrografias para caracterização da microestrutura do material ASTM E7 (ASTM, 2003)
04	Micrografias para determinação do tamanho de grãos ASTM E7 (ASTM, 2003) e ASTM E112 (ASTM, 1996)
03	Análise química por espectrômetro de emissão ótica - três queimas por análise ASTM E415 (ASTM, 2008)
03	Tração ASTM A370 (ASTM, 2009)
03	Dobramento da face externa ASTM A370 (ASTM, 2009) e ASTM E190 (ASTM, 2008)
03	Dobramento da face interna ASTM A370 (ASTM, 2009) e ASTM E190 (ASTM, 2008)
10	Impacto Charpy a 0°C ASTM A370 (ASTM, 2009)
16	Dureza HV10 ASTM E92 (ASTM, 2003)

A Figura 19 apresenta o esquema de localização e retirada dos corpos de prova de dobramento da face externa, dobramento da face interna, tração e amostras para análise química. A Figura 20 apresenta o esquema de localização e retirada dos corpos de prova de impacto Charpy. Cada corpo de prova tem a identificação apresentada nas Figuras 18 e 19, precedida pela letra “C” ou “Q” significando que trata-se do tubo API 5CT grau C110 ou API 5CT grau Q125, respectivamente.

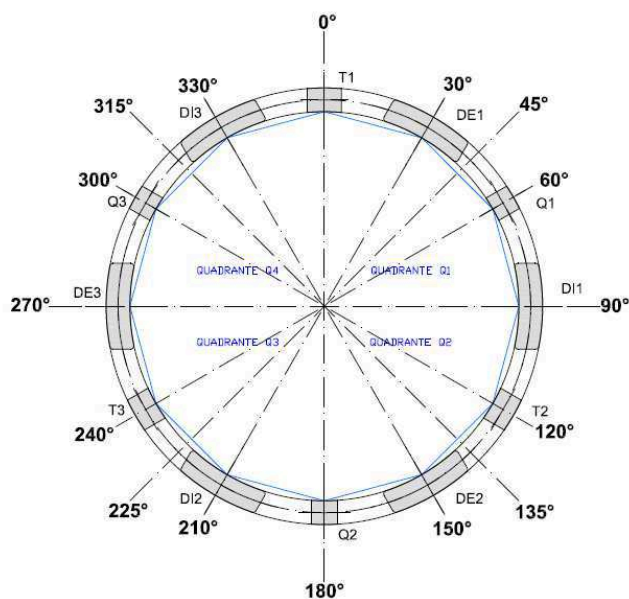


Figura 19 – Esquema de retirada de CPs de tração, dobramento e análise química (T) tração, (DE) dobramento externo, (DI) dobramento interno, (Q) análise química (fonte: autor)

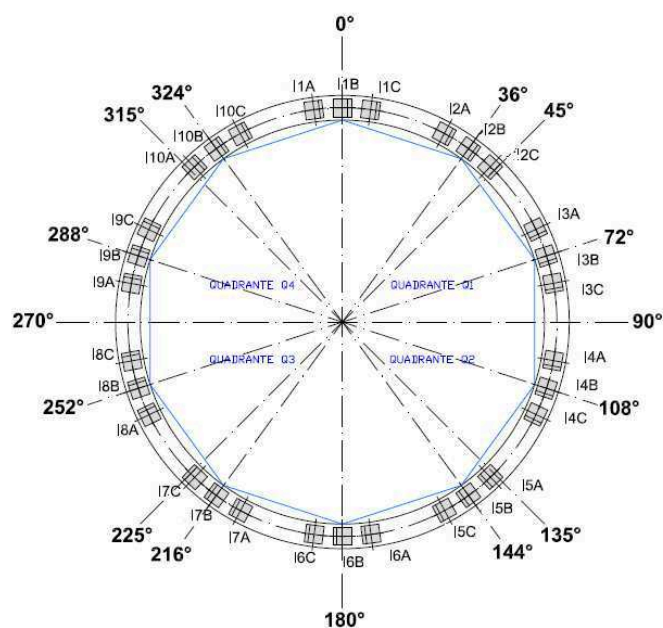


Figura 20 - Esquema de retirada de CPs de impacto Charpy (I) impacto (fonte: autor)

Os ensaios de tração do tubo API 5CT grau C110 foram realizados em corpos de prova prismáticos com dimensões nominais 13,5 mm x 12,5 mm na máquina universal de ensaios Tinius Olsen, escala 60 toneladas, na temperatura ambiente de 24°C. Os ensaios de tração do tubo API 5CT grau Q125 foram realizados em corpos de prova cilíndricos, com diâmetro nominal de 12,7 mm, na mesma máquina e na mesma temperatura.

Os ensaios de dobramento externo e interno dos corpos de prova dos dois tubos testados foram realizados na máquina universal de ensaio Riehle, escala 30 toneladas, na temperatura ambiente de 24°C.

As análises químicas dos corpos de prova dos dois tubos testados foram realizadas por meio do aparelho espectrômetro de emissão ótica, marca ARL modelo 2460, na temperatura ambiente de 24°C e umidade relativa do ar de 60%.

Os ensaios de impacto Charpy com entalhe “V”, de dimensões nominais 10 mm x 10 mm, foram realizados na máquina de ensaio de impacto marca WPM Veb 406/61/5 30 Kpm, na temperatura de 0°C.

A Figura 21 apresenta o esquema de localização e retirada dos corpos de prova de macrografia da espessura do tubo, micrografia para caracterização da microestrutura do material e micrografia para determinação do tamanho de grãos.

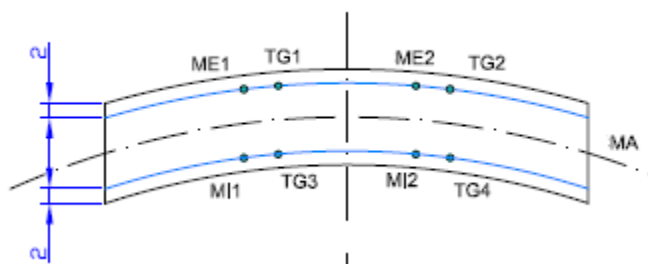


Figura 21 – Esquema de localização de micrografias e tamanho de grãos (ME) metalografia externa, (MI) metalografia interna, (TG) tamanho de grãos e dureza em pontos aleatórios

Os ensaios metalográficos dos corpos de prova dos dois tubos testados foram realizados pelo método ASTM E7 (2003), ataque com reagente nital 2% e aumento 500X.

As medições dos tamanhos de grãos dos corpos de prova dos dois tubos testados foram realizadas pelo método ASTM E7 (2003), ataque com reagente HCL+H2O e aumento 100X e 500X.

Os ensaios de dureza Vickers, com carga 10 kgf, dos corpos de prova dos dois tubos testados foram realizados no durômetro HVS 10, na temperatura ambiente de 24°C. Dez medições foram realizadas em pontos da superfície, aleatoriamente escolhidos pelo operador.

4.3.2. Escolha do consumível e estudo preliminar dos parâmetros de soldagem

Com base nos resultados obtidos na caracterização dos tubos API 5CT grau C110 e API 5CT grau Q125, concluiu-se sobre a baixa soldabilidade de ambos os materiais. Assim, optou-se por testar o uso do amanteigamento pela técnica da meia camada, com o objetivo de que a ZAC da soldagem de união dos tubos não se localizasse no metal de base, isto é, no tubo API 5CT.

O amanteigamento foi realizado em duas camadas, utilizando o eletrodo revestido E7018-1 de diâmetro 2,5 mm, por ser essa classificação a mais adequada considerando-se as propriedades mecânicas dos metais de base envolvidos.

A Figura 22 apresenta soldador realizando o amanteigamento.



Figura 22 – Soldador realizando amanteigamento na extremidade do tubo (fonte: autor)

Após o depósito da primeira camada, essa tinha aproximadamente metade de sua espessura removida por esmerilhamento. A redução de espessura da primeira camada teve o objetivo de incrementar o efeito do calor da segunda camada sobre a ZAC do metal de base.

Foram confeccionados dez corpos de prova conforme apresentado na Figura 23, cinco de cada material de base com a técnica da meia camada, utilizando-se diferentes aportes térmicos. Os corpos de prova são CPs C-1, C-2, C-3, C-4 e C-5 para o API 5CT grau C110 e, CPs Q-1, Q-2, Q-3, Q-4 e Q-5 para o API 5CT grau Q125.

A Tabela 6 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados, e seus aportes térmicos, para os tubos API 5CT grau C110 e API 5CT grau Q125. Para o cálculo do aporte térmico não foi utilizado o coeficiente de rendimento térmico.

Na deposição das duas camadas, para os dois materiais, os seguintes parâmetros de soldagem mantiveram-se constantes: preaquecimento de 150 a 170°C; temperatura interpasses de 150 a 170°C e pós-aquecimento de 250°C por 15 minutos.

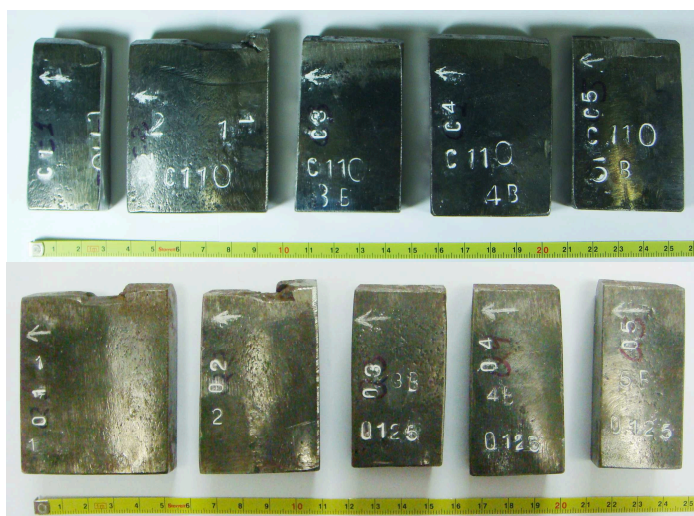


Figura 23 – Dez corpos de prova amanteigados (fonte: autor)

Tabela 6 – Aportes térmicos utilizados em capa um dos dez corpos de prova amanteigados

CP	Camada	Tensão (V)	Corrente (A)	Comprimento (mm)	Tempo médio (s)	Aporte (kJ/mm)
C-1	1 ^a	21 a 25	75 a 80	100	59	1,058
	2 ^a				67	1,194
C-2	1 ^a	21 a 25	75 a 80		58	1,028
	2 ^a				59	1,028
C-3	1 ^a	23 a 26	77 a 82		51	1,000
	2 ^a				57	1,000
C-4	1 ^a	23 a 26	77 a 82		47	0,922
	2 ^a				49	0,942
C-5	1 ^a	23 a 26	77 a 82		38	0,747
	2 ^a				40	0,779
Q-1	1 ^a	22 a 25	77 a 82		54	1,009
	2 ^a				69	1,284
Q-2	1 ^a	22 a 25	77 a 82		53	0,995
	2 ^a				52	0,976
Q-3	1 ^a	22 a 25	77 a 82		60	1,116
	2 ^a				63	1,168
Q-4	1 ^a	22 a 25	77 a 82	42	0,785	
	2 ^a			60	1,116	
Q-5	1 ^a	22 a 25	77 a 82	43	0,803	
	2 ^a			44	0,827	

4.3.3. Medição de dureza dos diferentes corpos de prova de amanteigamento

Depois da soldagem dos dez corpos de prova apresentados na Tabela 6, os mesmos foram submetidos a ensaio de dureza. Em cada peça foi medida a dureza HV10 em duas linhas de referência, uma a 1,5 mm de distância da face externa do tubo e outra linha a 1,5 mm de distância da face interna do tubo. As diferentes regiões do amanteigamento tiveram suas durezas medidas conforme apresentado nas Figuras 24 e 25.

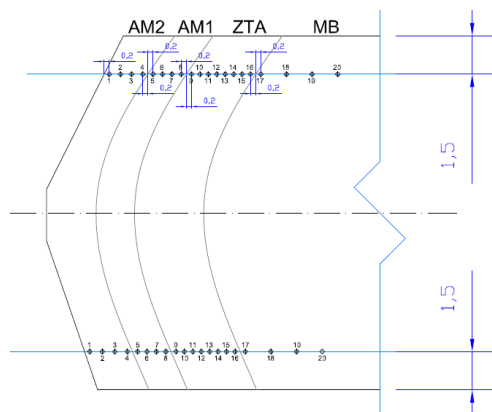


Figura 24 – Esquema de localização dos pontos de medição de dureza (fonte: autor)

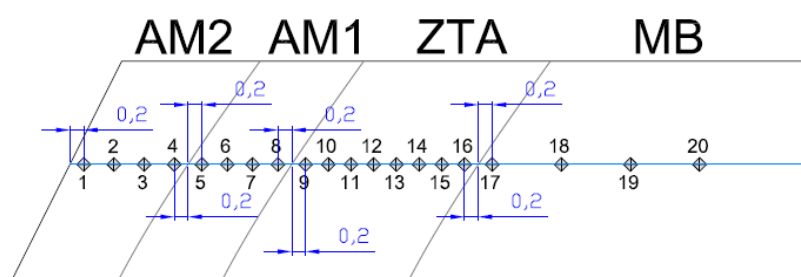


Figura 25 – Detalhe do esquema de localização dos pontos de medição de dureza (AM2) camada de amanteigamento 2, (AM1) camada de amanteigamento 1, (ZTA) zona termicamente afetada, (MB) metal base (fonte: autor)

4.4. Desenvolvimento do procedimento de soldagem

Foi realizada a soldagem dos tubos de teste CP-01 e CP-02 para a qualificação do procedimento de soldagem.

A soldagem do corpo de prova para o procedimento ocorreu em campo seguindo os parâmetros de soldagem definidos pelos estudos preliminares.

4.4.1. Amanteigamento das extremidades dos tubos API 5CT grau Q125

Para a execução da técnica do amanteigamento nas extremidades dos tubos API 5CT grau Q125, os mesmos foram posicionados na posição vertical e a soldagem realizada na posição plana. Após a deposição da primeira camada, foi realizada a remoção de aproximadamente metade da espessura do metal depositado com o objetivo de atingir o máximo de eficiência da camada de revenimento. Quanto à segunda

camada, foi retirado apenas material suficiente para a configuração do bisel. As Figuras 26 e 27 apresentam o pré-aquecimento do corpo de prova e a deposição do amanteigamento com o processo de soldagem eletrodo revestido.



Figura 26 – Pré-aquecimento da junta
(MENEZES et al., 2010)



Figura 27 – Deposição do amanteigamento
(MENEZES et al., 2010)

A Tabela 7 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados para a deposição do amanteigamento.

Tabela 7 – Parâmetros de soldagem utilizados na deposição do amanteigamento

Camada SMAW	Consumível / diâmetro (mm)	Passes	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (mm/s)	Aporte (kJ/mm)
1ª e 2ª	E7018-1 / 2,5	1° ao 14°	78 a 80	22 a 24	1,7 a 1,9	0,8 a 1,1
Preaquecimento: 150 a 170°C						
Interpasses: 150 a 170°C						
Pós-aquecimento: 250°C/15 minutos						

4.4.2. Usinagem do amanteigamento

Posterior a deposição do amanteigamento, foi realizada a usinagem do bisel conforme a geometria especificada pela norma ASME B31.8 (ASME, 2007).

Durante a usinagem por torneamento houve a necessidade do controle térmico com o uso do instrumento pirômetro de contato a fim de evitar o aquecimento da superfície usinada. A temperatura máxima atingida foi de 48°C medida a 10 mm do ponto de corte, isso devido ao fluido de corte que teve ação refrigerante e lubrificante evitando o encruamento da superfície usinada e o aumento da temperatura.

O ângulo de ataque da ferramenta de 20° , associado ao raio da ponta da ferramenta de 2 mm, também contribuiu para reduzir o atrito e propiciar acabamento livre de ranhuras.

A Figura 28 apresenta a configuração da extremidade do tubo amanteigado após usinagem.

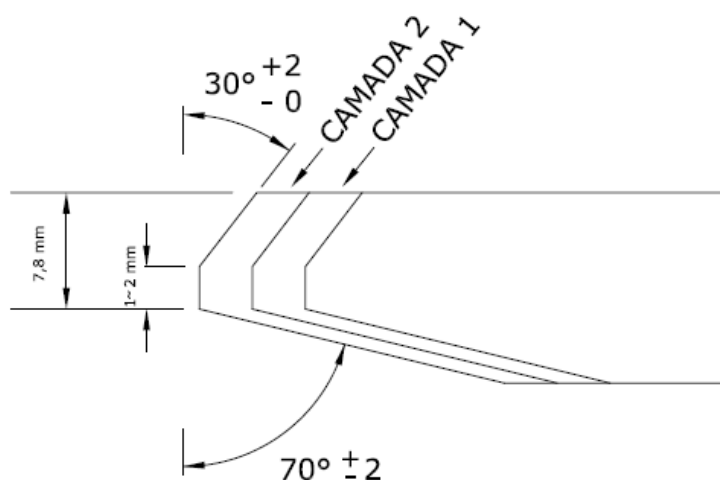


Figura 28 - Configuração do tubo amanteigado (MENEZES et al., 2010)

4.4.3. Tratamento térmico das extremidades amanteigadas

Os parâmetros de tratamento térmico do tubo amanteigado, 650°C por 75 minutos, assim como o posicionamento dos termopares, foram definidos por meio de estudos preliminares para que fosse atingida a maior eficiência de tratamento na região soldada. A Figura 29 apresenta a montagem para o tratamento térmico, e a Figura 30 apresenta o registro do tratamento térmico do tubo com a extremidade amanteigada.



Figura 29 - Posicionamento dos termopares no tubo (fonte: autor)

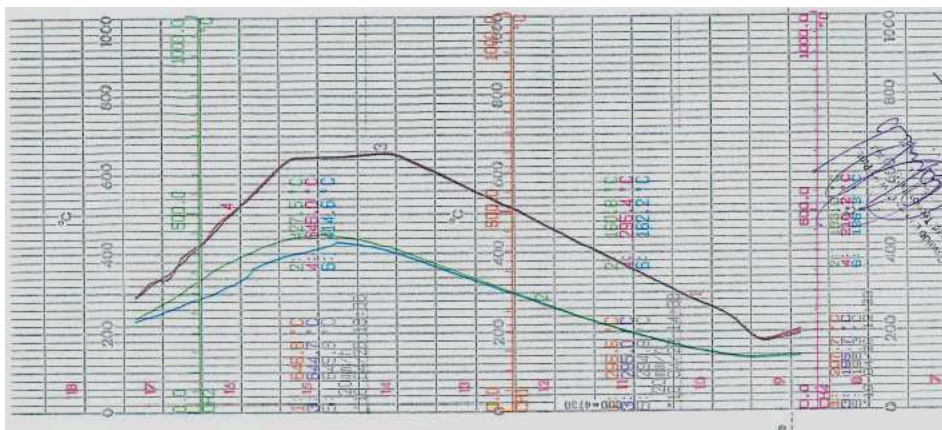


Figura 30 - Registro do tratamento térmico do tubo com a extremidade amanteigada (fonte: autor)

4.4.4. Escolha do consumível e soldagem de união dos tubos API 5CT grau Q125 e API 5L X65

Para soldagem da junta de união dos tubos, foi utilizado o processo GTAW na seguinte sequência: pré-aquecimento, ponteamto, soldagem, controle da temperatura interpasses e pós-aquecimento.

A soldagem foi realizada utilizando a vareta ER80S-G de diâmetro 3,25 mm, por ser essa classificação a mais adequada, considerando as propriedades mecânicas dos metais de base envolvidos.

A Figura 31 apresenta a soldagem da junta e a Figura 32 apresenta a aplicação do pós-aquecimento na junta. A Figura 33 apresenta a configuração final da junta onde aparece o amanteigamento do tubo API 5CT grau Q125 e a sequência de passes GTAW da soldagem de união.



Figura 31 - Soldagem da junta (fonte: autor)



Figura 32 – Pós-aquecimento (fonte: autor)

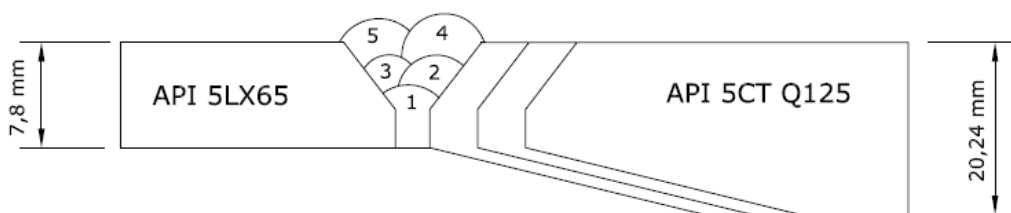


Figura 33 - Configuração da junta e sequência de passes (fonte: autor)

A Tabela 8 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados na soldagem de união do tubo API5CT grau Q125 com o tubo API 5L X65.

Tabela 8 – Parâmetros de soldagem utilizados na soldagem de união

Processo	Consumível / diâmetro (mm)	Passes	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (mm/s)	Aporte (kJ/mm)
GTAW	ER80S-G / 3,25	1° ao 5°	135 a 170	10 a 13	1,09	1,6
Preaquecimento: 150 a 170°C						
Interpasses: 150 a 170°C						
Pós-aquecimento: 250°C/15minutos						

4.5. Inspeção por ultrassom *phased array* dos tubos de teste CP-01 e CP-02

As juntas foram inspecionadas pelo ensaio visual/dimensional e ultrassom mecanizado *phased array*. O ensaio ultrassônico foi realizado transcorridas 48 horas após o término da soldagem para detecção de possíveis trincas induzidas pelo elemento hidrogênio. O critério de aceitação adotado foi o estabelecido na norma API 1104 (2010). A Figura 34 apresenta a realização do ultrassom mecanizado *phased array*.

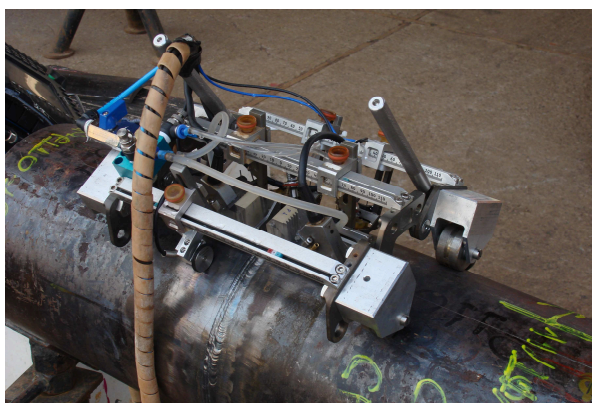


Figura 34 – Realização do ensaio de ultrassom mecanizado *phased array* (fonte: autor)

4.6. Ensaios mecânicos para qualificação do procedimento de soldagem

A Figura 35 apresenta a localização da retirada dos corpos de prova, conforme a norma API 1104 (2010). A quantidade de corpos de prova, segundo a norma API 1104 (2010) foi: 02 ensaios de tração; 02 dobramentos de face; 02 dobramentos de raiz e 02 ensaio de fratura (Nick-break).

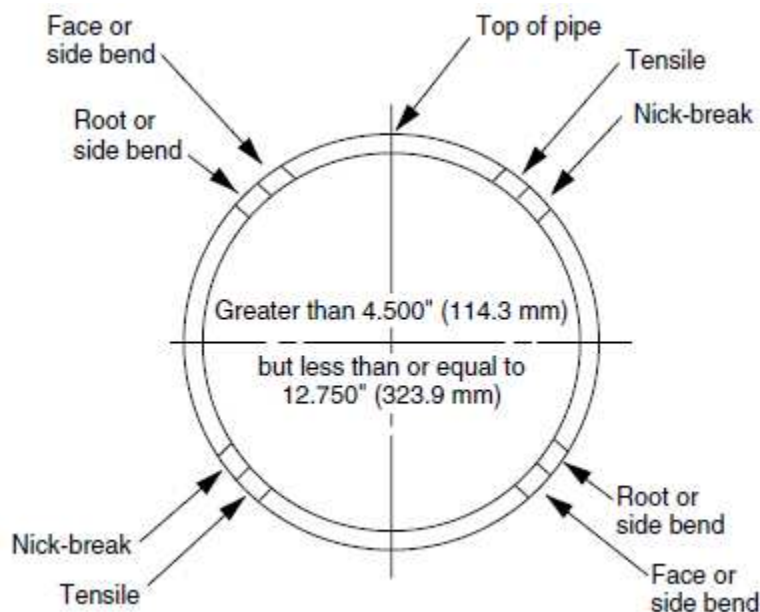


Figura 35 - Localização da retirada dos corpos de prova (API 1104, 2010)

Os ensaios de tração da junta soldada foram realizados em dois corpos de prova prismáticos com dimensões na norma API 1104 (2010) na máquina universal de ensaios marca WPM, escala 20 toneladas, na temperatura ambiente de 24°C.

Os ensaios de dobramento da junta soldada, dois corpos de prova de dobramento de face e dois corpos de prova de dobramento de raiz, foram realizados em dispositivo especialmente desenvolvido para esse fim, conforme apresentado na Figura 62. O desenvolvimento deste dispositivo foi necessário devido ao fato de que o dispositivo comumente utilizado não é eficiente para o dobramento de uma junta soldada composta por metais de base de resistências mecânicas tão significativamente diferentes entre si. Caso o dispositivo normal fosse utilizado apenas o metal de base de menor resistência mecânica, isto é, o tubo API 5L X65, seria dobrado invalidando assim o teste que requer que o metal de solda e as duas ZACs estejam contidos na porção dobrada do corpo de prova.

Os ensaios de fatura (Nick-break), dois corpos de prova, não requerem um equipamento específico para a sua realização. Após a confecção de entalhes, um em cada lateral do corpo de prova, com o objetivo de concentrar tensões para direcionar o local do rompimento, o mesmo pode ser rompido por martelamento lateral, dobramento ou tracionado, neste caso foi utilizada a máquina universal de ensaios marca WPM, escala 20 toneladas, na temperatura ambiente de 24°C.

4.7. Ensaios não previstos na norma API 1104

Ensaios adicionais, não previstos na norma API 1104 (2010), foram realizados com o objetivo de obter-se maior conhecimento das propriedades da junta soldada.

4.7.1. Ensaio de Impacto

Foi realizado o ensaio de impacto Charpy com entalhe “V”, com dimensões nominais 10 mm x 5 mm, utilizando a máquina de ensaio de impacto marca Shimadzu, escala 30 kgf.m, conforme a norma ASTM A370 (2011) na temperatura de 0°C, visto ser essa a temperatura de teste especificada pela especificação técnica da Petrobras – Requisitos suplementares à norma N-464 revisão K (PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., 2008). A temperatura de 0°C foi obtida por meio da imersão dos corpos de prova em solução de álcool isopropílico e nitrogênio líquido, atingida a temperatura aguardou-se cinco minutos para a realização do ensaio para a uniformização da temperatura por todo o volume dos corpos de prova. Os conjuntos dos corpos de prova foram retirados de duas regiões diametralmente opostas, regiões essas denominadas de “A” e “B”. De cada uma dessas regiões foram retirados três conjuntos de corpos de prova, cada conjunto é composto de três peças. A localização do conjunto de cada corpo de prova foi no centro de solda, ZAC do lado API 5L X65, no centro do amanteigamento e na ZAC do amanteigamento. Além desses conjuntos, foi realizado também em um conjunto do metal de base API 5CT grau Q125 em ponto distante da junta soldada. No total foram realizados nove testes.

4.7.2. Ensaio micrográfico

O ensaio micrográfico foi realizado conforme a norma ASTM E7 (2003) em dois corpos de prova diametralmente opostos, mostrando todas as regiões da junta soldada, com o objetivo de avaliar a homogeneidade das microestruturas. Foi realizado ataque com reagente nital 3% e aumento 500X.

4.7.3. Ensaio macrográfico

Foi efetuado o ensaio macrográfico em uma seção transversal da junta soldada de acordo com a norma ASTM E381 (2006) com o objetivo de avaliar a morfologia, zona afetada pelo calor da junta soldada. Foi realizado ataque com reagente nital 10% e aumento 10X.

4.7.4. Ensaio de tração do corpo de prova soldado

Foram realizados dez ensaios de tração transversais à junta soldada, distribuídos uniformemente pela circunferência do tubo. Esses corpos de prova foram obtidos pelo corte longitudinal do tubo em tiras de largura nominal de 20 mm, preservando-se a seção transversal da junta soldada. Foi utilizada a máquina universal de ensaios Tinius Olsen, escala 60 toneladas, na temperatura ambiente de 24°C.

4.7.5. Ensaio de dureza

Foi realizado o levantamento do perfil de dureza Vickers de todas as regiões da junta soldada, com carga 10 kgf, em dois corpos de prova diametralmente opostos. Em cada corpo de prova foram medidas durezas em uma linha próxima a face externa do tubo e em uma linha próxima a face interna do tubo. Foi utilizado o método previsto na norma ASTM E92 (2003), e utilizado o durômetro marca WPM.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização dos tubos API 5CT grau Q125 e API 5CT grau C110

5.1.1. Ensaio macrografico

A Figura 36 apresenta o aspecto macrográfico os tubos API 5CT grau C110 e API 5CT grau Q125, respectivamente.



Figura 36 – Aspecto macrográfico os tubos API 5CT grau C110 e API 5CT grau Q125, respectivamente
(fonte: autor)

Os corpos de prova de macrografia apresentaram uma textura típica de material fabricado por laminação, apresentando também linhas de segregação no sentido do comprimento do tubo para os tubos API 5CT grau C110 e API 5CT grau Q125. Os corpos de prova foram preparados conforme norma de preparação ASTM E381 (2006). O ataque químico foi realizado com HCl + H₂O (1:1).

5.1.2. Ensaio micrográfico

A Figura 37 apresenta o aspecto metalográfico dos materiais API 5CT grau C110 e API 5CT grau Q125, respectivamente. A amostra foi preparada e analisada conforme as normas ASTM E3 (2007) e ASTM E7 (2003).

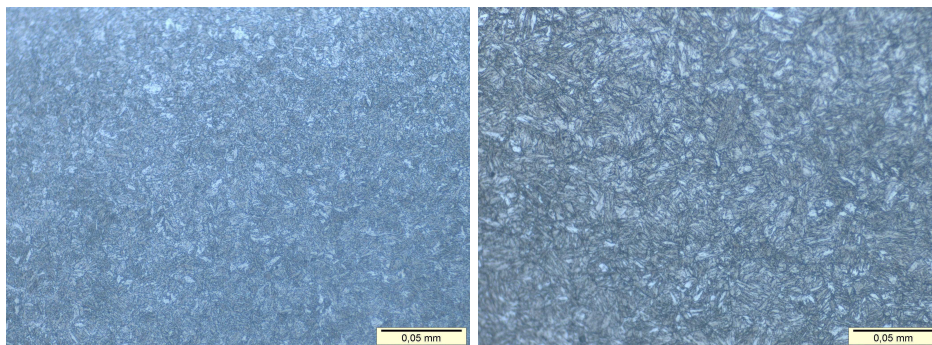


Figura 37 – Microestrutura constituída de martensita revenida em ambos materiais API 5CT grau C110 e API 5CT grau Q125, respectivamente. Aumento 500X. Ataque Nital 2% (fonte: autor)

A caracterização metalográfica concluiu que a microestrutura dos dois materiais consiste em uma matriz de martensita revenida, compatível com materiais temperados e revenidos.

5.1.3. Medição do tamanho de grãos

A Figura 38 apresenta a análise do tamanho de grão conforme ASTM E112 (1996), analisado com aumento 100X e registrado com aumento 500X.

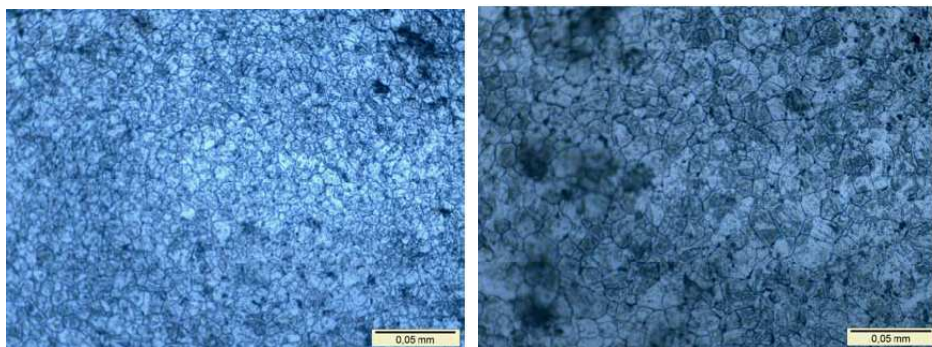


Figura 38 – Tamanho de grão 8 em ambos materiais API 5CT grau C110 e API 5CT grau Q125, respectivamente. Aumento 500X. Ataque HCl + H₂O (1:1) (fonte: autor)

Os tamanhos dos grãos dos dois materiais são de número 8 conforme ASTM E112 (1996) plate I. Foi observado que em ambos os materiais os grãos são homogêneos, com pequena variação no ataque químico, assim como na iluminação do microscópio.

5.1.4. Análise química

A Tabela 9 apresenta os resultados das três análises químicas do tubo API 5CT grau C110 e API 5CT grau Q125 respectivamente, assim como seus respectivos carbonos equivalentes CE_{iiw}.

Tabela 9 – Resultados das análises químicas e carbono equivalente

CP	C	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	P	S	CE _{iiw}
CQ1	0,339	0,454	0,920	0,826	0,045	0,021	0,032	0,011	0,002	0,776
CQ2	0,332	0,449	0,993	0,808	0,044	0,021	0,032	0,011	0,002	0,767
CQ3	0,330	0,447	0,934	0,801	0,044	0,020	0,031	0,011	0,002	0,763
QQ1	0,250	0,517	0,833	0,498	0,005	0,015	0,023	0,012	0,005	0,605
QQ2	0,250	0,516	0,843	0,498	0,004	0,015	0,023	0,012	0,005	0,607
QQ3	0,252	0,519	0,867	0,506	0,004	0,015	0,022	0,012	0,005	0,618

Legenda: (CQ) análise química C110, (QQ) análise química Q125

Para a determinação da composição química de cada um dos metais de base, foram realizadas três análises químicas. Cada análise química é composta por três queimas de amostras no equipamento espectrômetro de emissão ótica, e o resultado de cada análise é apresentado como a média entre as três queimas.

A análise química é um aspecto importante desse estudo considerando que a norma API 5CT possui requisitos bastante flexíveis para essa composição. Uma informação importante fornecida pela análise química é o carbono equivalente (CE_{iiw}), O carbono equivalente é um fator de determinação da probabilidade de ocorrência do trincamento induzido pelo hidrogênio em juntas soldadas em aços carbono e baixa liga.

A literatura considera que o carbono equivalente de até 0,40% propicia uma soldabilidade boa quanto ao aspecto do trincamento induzido pelo hidrogênio. Nesse estudo, concluiu-se que os carbonos equivalentes dos materiais eram de CE_{iiw} 0,76% para o API 5CT grau C110 e de CE_{iiw} 0,61% para o API 5CT grau Q125. Esses resultados determinaram a opção pelo uso do tubo API 5CT grau Q125.

5.1.5. Ensaio de tração

A Tabela 10 apresenta os valores obtidos nos dois materiais testados. Todos os ensaios apresentaram valores superiores aos especificados para o tubo API 5L X65.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de tração

CP	Dimensões (mm)	Seção (mm ²)	Lim. escoamento		Res. Tração		Alongamento % em 50mm	Redução área (%)
			(N)	(MPa)	(N)	(MPa)		
CT1	13,46 x 12,49	168,12	127.761	760	135.018	803	26	64
CT2	13,82 x 12,47	172,34	131.320	762	140.304	814	26	64
CT3	13,56 x 12,46	168,96	126.299	747	137.322	813	27	64
QT1	Ø 12,68	126,28	125.888	997	136.175	1078	18	63
QT2	Ø 12,66	125,88	125.299	995	135.665	1078	18	63
QT3	Ø 12,66	125,88	126.447	1004	136.665	1086	18	63

Legenda: (CT) tração C110, (QT) tração Q125

O Gráfico 1 faz uma comparação entre o limite de escoamento e resistência a tração dos três materiais estudados.

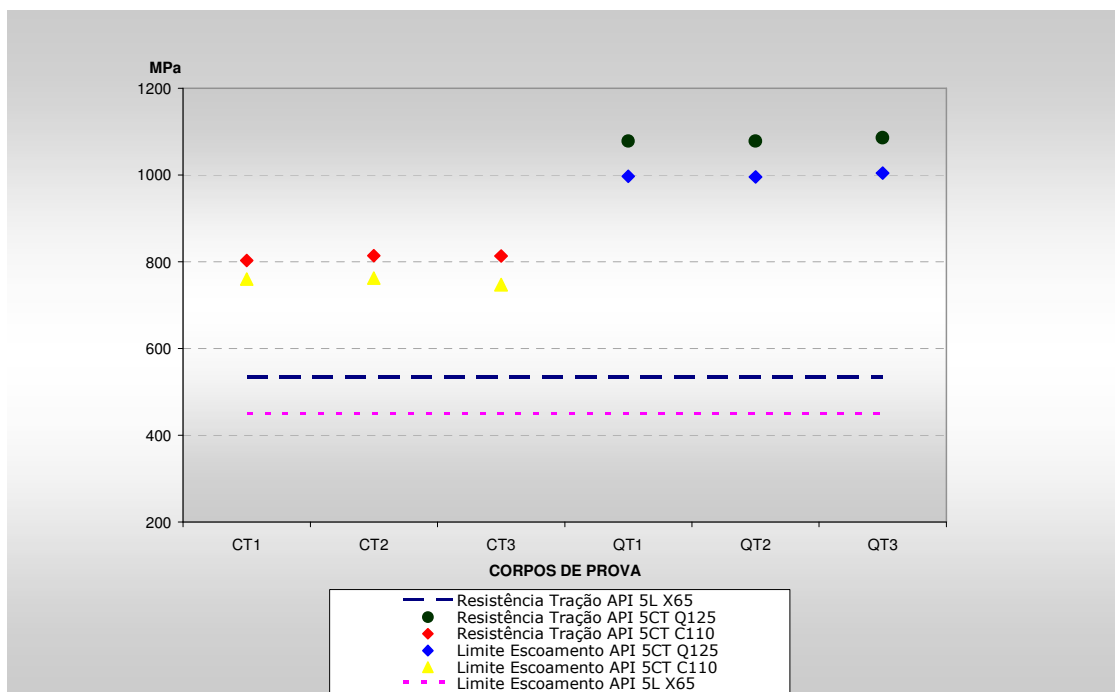


Gráfico 1 – Comparação das propriedades mecânicas dos três materiais envolvidos (fonte: autor)

Os seis corpos de prova de tração apresentaram valores de limite de escoamento e resistência à tração superiores aos mínimos especificados para o tubo API 5L X65 quais são: limite de escoamento 450 MPa, resistência à tração 535 MPa. Quanto ao alongamento percentual, o grau C110 apresentou maior ductilidade, enquanto o grau Q125 apresentou menor ductilidade quando comparadas com o alongamento mínimo especificado para o tubo API 5L X65 que é de 23,4%. O Gráfico 1 apresenta os resultados encontrados e os compara quanto as propriedades de resistência mecânica especificadas para o aço API 5L X65. Todos os corpos de prova apresentaram aparência da fratura totalmente dúctil.

5.1.6. Ensaio de dobramento externo e interno

A Tabela 11 apresenta os valores utilizados para o diâmetro do cutelo e a distância entre roletes para os testes dos metais API 5CT grau C110 e API 5CT grau Q125 respectivamente, assim como os resultados desses testes.

Tabela 11 – Dados e resultados dos ensaios de dobramento

CP	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Ø cutelo (mm)	Distância roletes (mm)	Ângulo	Resultado
CDE1	13,00	38,00	210,0	39,0	68,0	180°	Isentos de Descontinuidades
CDE2							
CDI1							
CDI2							
QDE1	22,00	38,00	210,0	66,0	113,0	180°	
QDE2							
QDI1							
QDI2							

Legenda: (CDE) dobramento externo C110, (CDI) dobramento interno C110, (QDE) dobramento externo Q125, (QDI) dobramento interno Q125

Os oito corpos de prova de dobramento testados foram aprovados. Os ensaios assim realizados são mais rigorosos que os que serão futuramente utilizados na qualificação do procedimento de soldagem segundo a norma API 1104 (2010). O maior rigor do teste realizado, se deve ao fato que no momento da qualificação do procedimento de soldagem o diâmetro do cutelo será de 90 mm e a distância entre

roletes de 120 mm, enquanto o ensaio de dobramento aqui citado utilizou o diâmetro do cutelo de 39 mm e distância entre roletes de 68 mm para o grau C110 e diâmetro do cutelo de 66 mm e distância entre roletes de 113 mm para o grau Q125. Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que os graus testados tem ductilidade compatível com a requerida pela norma de qualificação do procedimento de soldagem.

5.1.7. Ensaio de impacto

O Gráfico 2 apresenta a variabilidade da energia absorvida no ensaio de impacto Charpy V a 0°C do API 5CT grau C110 comparado com o valor mínimo especificado para energia absorvida de 38 J para o API 5L X65.

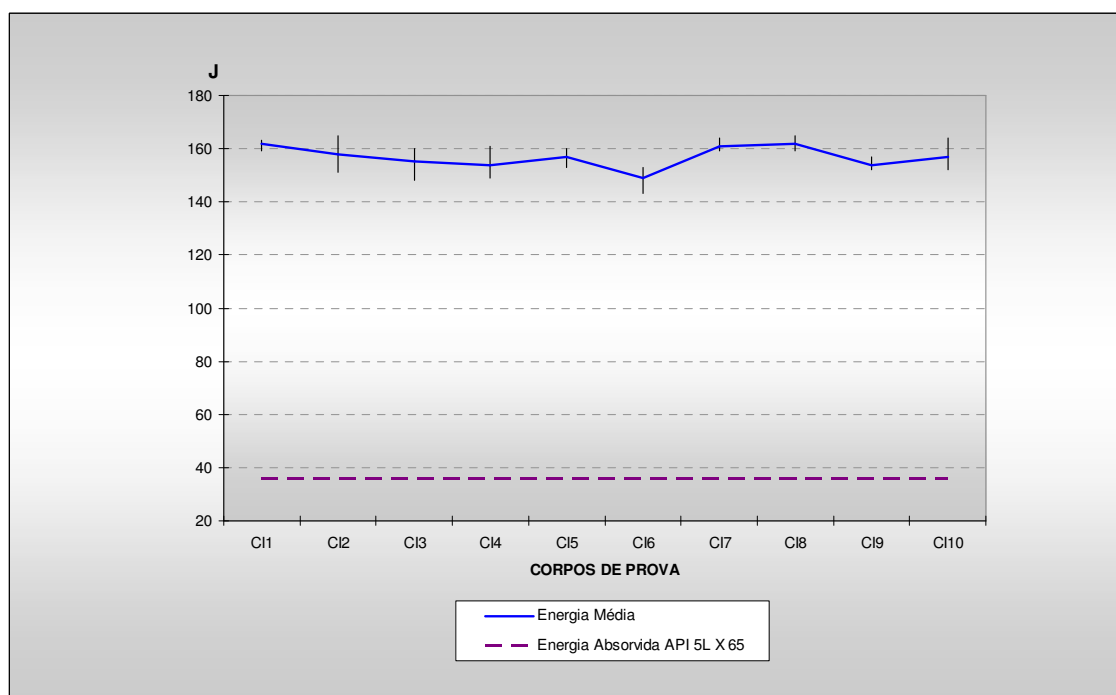


Gráfico 2 – Resultados dos ensaios de impacto Charpy “V” a 0°C do API 5CT grau C110 (fonte: autor)

O Gráfico 3 apresenta a variabilidade da energia absorvida no ensaio de impacto Charpy V a 0°C do API 5CT grau Q125 comparado com o valor mínimo especificado para energia absorvida de 38 J do API 5L X65.

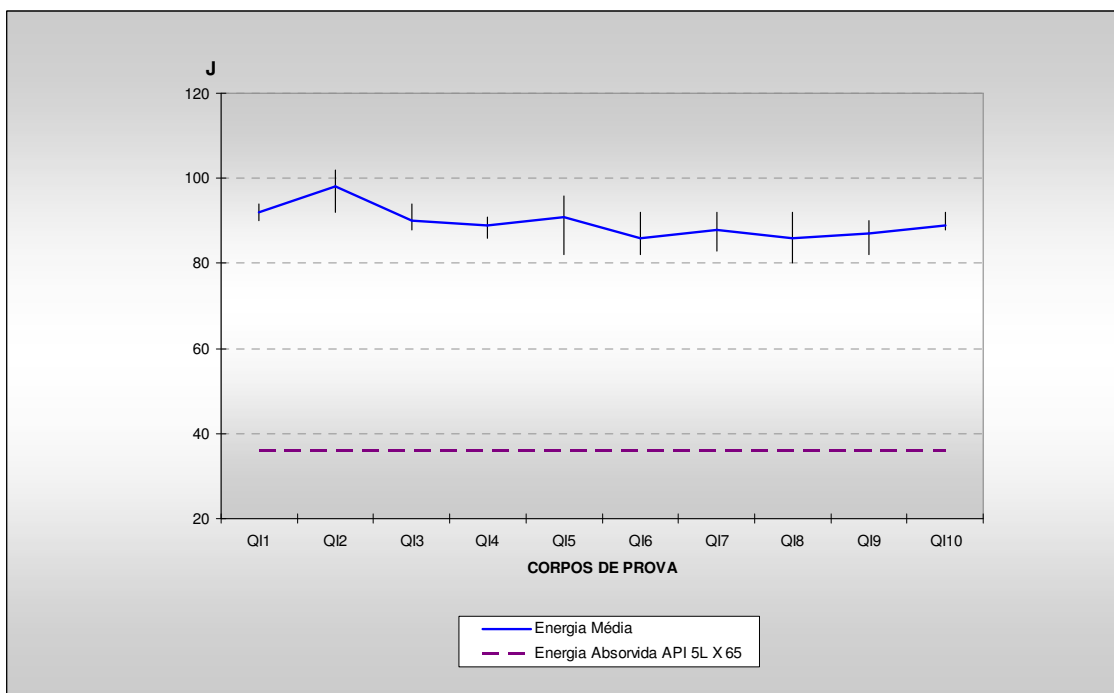


Gráfico 3 – Resultados do ensaio de impacto Charpy “V” a 0°C do API 5CT grau Q125 (fonte: autor)

Foram ensaiados dez conjuntos de impacto Charpy, onde cada conjunto contendo três corpos de prova de espessura 10 mm, testados a 0°C, de cada material apresentou valores de energia absorvida superiores àquelas indicadas pela especificação técnica da Petrobras – Requisitos suplementares à norma N-464 revisão K (PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., 2008) para juntas soldadas com o tubo API 5L X65 que são 36 J para o valor médio e 29 J para o valor mínimo individual. Este ensaio não é requerido pela norma API 1104 (2010), porém é muito importante no contexto deste estudo, devido ao fato deste ensaio fornecer uma análise quantitativa da tenacidade da junta soldada. Tal tenacidade mostra que em casos como deslocamento do solo, impacto causado por máquina e despressurização abrupta a junta não apresentará fratura frágil, isto é, terá ductilidade suficiente para suportar deformações sem rompimento. Todos os corpos de prova apresentaram fratura totalmente dúctil exemplificado por meio das fraturas do conjunto de corpos de prova, denominado CII, apresentadas na Figura 39.



Figura 39 – Corpos de prova apresentando aspecto de fratura totalmente dúctil (fonte: autor)

5.1.8. Ensaio de dureza

A Tabela 12 apresenta o resultado da medição dos dez pontos de dureza HV10 para os materiais API 5CT grau C110 e API 5CT grau Q125.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de dureza dos tubos API 5CT grau C110 e API 5CT grau Q125

HV10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MÉDIA	D.P.	U e
C110	272	268	268	265	265	267	268	268	271	267	267,9	2,23	2,1
Q125	338	343	339	339	339	339	333	335	334	349	338,8	4,64	3,6

Conforme esperado para aços temperados e revenidos, todos os resultados de tração e dureza apresentaram resultados significativamente superiores ao especificado para o tubo API 5L X65, valor esse 250 HV10. Os valores de dureza elevados do metal de base levam a supor que a dureza na ZAC, após a soldagem, possa vir a apresentar valores acima do máximo aceitável pelo projetista, de 300 HV10.

5.2. Amanteigamento pela técnica da meia camada

5.2.1. Perfil de dureza dos corpos de prova amanteigados

Os Gráficos 4 e 5 apresentam os resultados de dureza dos dez corpos de prova amanteigados. Os pontos 1 a 20 são aqueles apresentados nas Figuras 23 e 24.

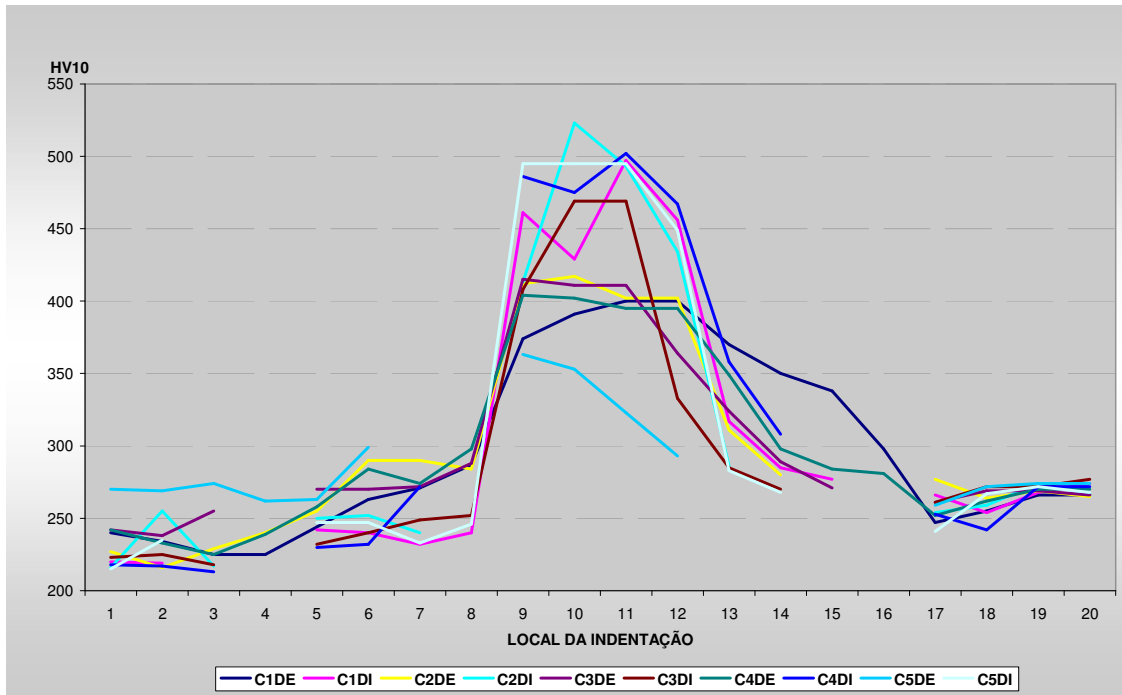


Gráfico 4 – Perfil de dureza do amanteigamento do tubo API 5CT grau C110. (CDE) dureza próxima à superfície externa, (CDI) dureza próxima à superfície interna (fonte: autor)

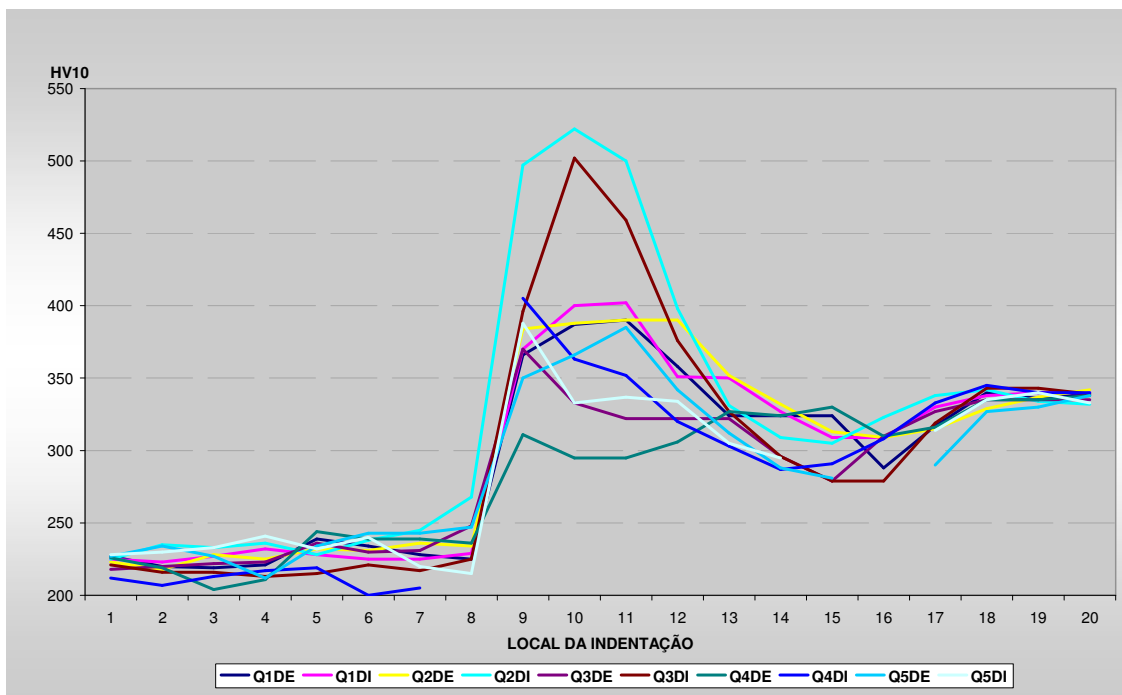


Gráfico 5 – Perfil de dureza do amanteigamento do tubo API 5CT grau Q125. (QDE) dureza próxima à superfície externa, (QDI) dureza próxima à superfície interna (fonte: autor)

Os corpos de prova amanteigados C-1, C-2, C-3, C-4 e C-5 para o API 5CT grau C110 e, os corpos de prova Q-1, Q-2, Q-3, Q-4 e Q-5 para o API 5CT grau Q125, tiveram a deposição das duas camadas com diferentes aportes térmicos. Os resultados das durezas na ZAC dos dois metais de base foram elevados, entre os pontos 8 e 13 dos Gráficos 4 e 5, sendo o maior valor obtido de 523 HV10 para o material C110 e de 522 HV10 para o material Q125. Esses dois valores são significativamente superiores à dureza máxima admissível pelo projetista, que é de 300 HV10 para esse caso. Conclui-se que a técnica da meia camada não foi suficiente para reduzir a dureza para os valores desejados.

5.2.2. Opção preliminar pelo tubo API 5CT grau Q125 com aporte do CP Q-2

Baseado no fato de que o carbono equivalente do tubo API 5CT grau C110 ser o mais elevado (CE iiv 0,76%), esse material foi descartado. Sendo assim, foi requerida a opção por um dos cinco corpos de prova amanteigados do material API 5CT grau Q125. Foi feita a opção pelo CP Q-02 pelo fato de na soldagem deste corpo de prova terem sido utilizados na primeira e na segunda camada os aportes térmicos de 0,995 e 0,976 kJ/mm, respectivamente. Esses aportes térmicos foram os escolhidos por serem os mais naturais para o soldador, diminuindo assim a probabilidade de descontinuidades de soldagem como falta de fusão e porosidade. Como esse corpo de prova, assim como os demais corpos de prova amanteigados do material API 5CT grau Q125, apresentou dureza elevada na ZAC, com valor máximo de 522 HV10, sendo necessária a realização de tratamento térmico de revenimento.

5.2.3. Análise metalográfica do CP Q-2 antes do tratamento térmico

A Figura 40 apresenta as regiões, as dimensões e os pontos das análises metalográficas, com aumento de 10X, ataque com Nital 2%, normas ASTM E3 (2007) e ASTM E7 (2003), enquanto as Figuras 41 a 49 apresentam cada ponto analisado com aumento de 500X.

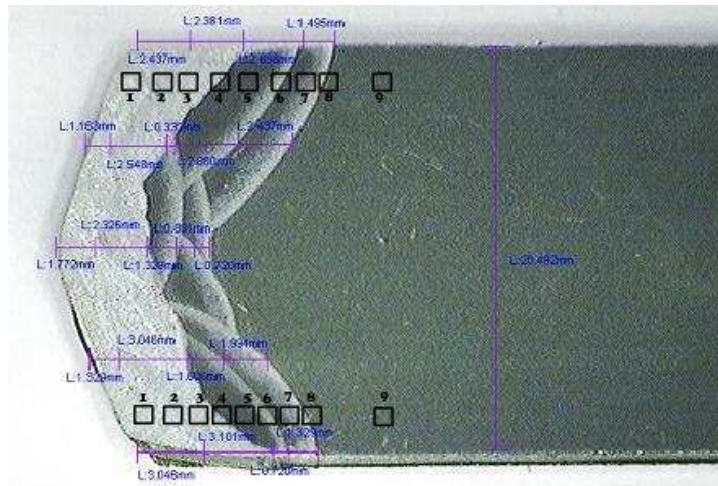


Figura 40 – Perfil macrográfico e regiões de análise micrográfica CP Q-2. Linha superior lado externo do tubo e linha inferior lado interno do tubo. Aumento 10X. (fonte: autor)

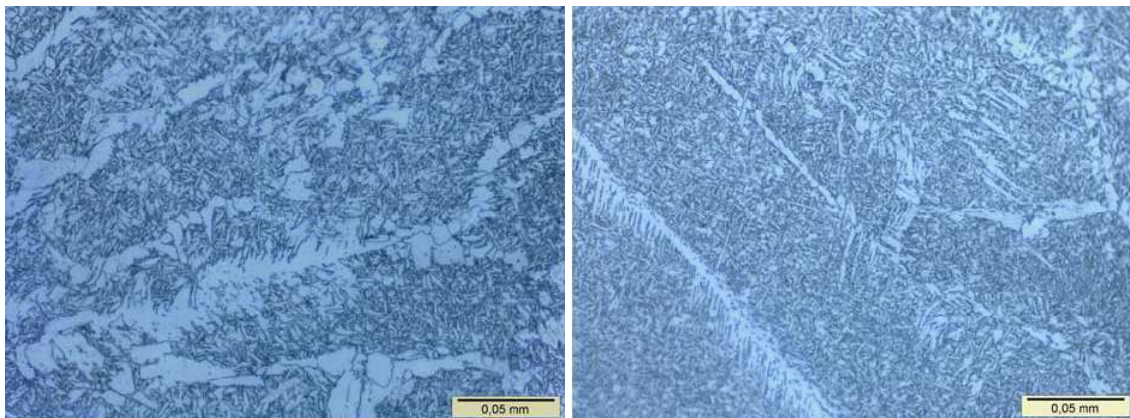


Figura 41 – Ponto 1, camada 2 externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.

Externo - Matriz com estrutura de bainita, ferrita em contorno de grão e acicular

Interno - Matriz com estrutura de bainita, ferrita com segunda fase alinhada, ferrita em contorno de grão e acicular

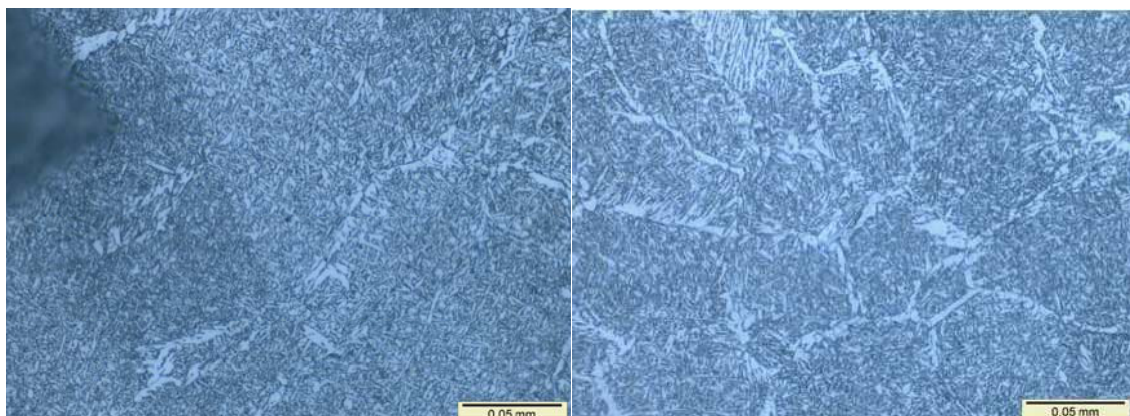


Figura 42 – Ponto 2, interface camada 2/camada 1 externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.

Externo - Matriz com estrutura de bainita, ferrita em contorno de grão e acicular

Interno - Matriz com estrutura de bainita, ferrita em contorno de grão, ferrita poligonal intragranular e acicular

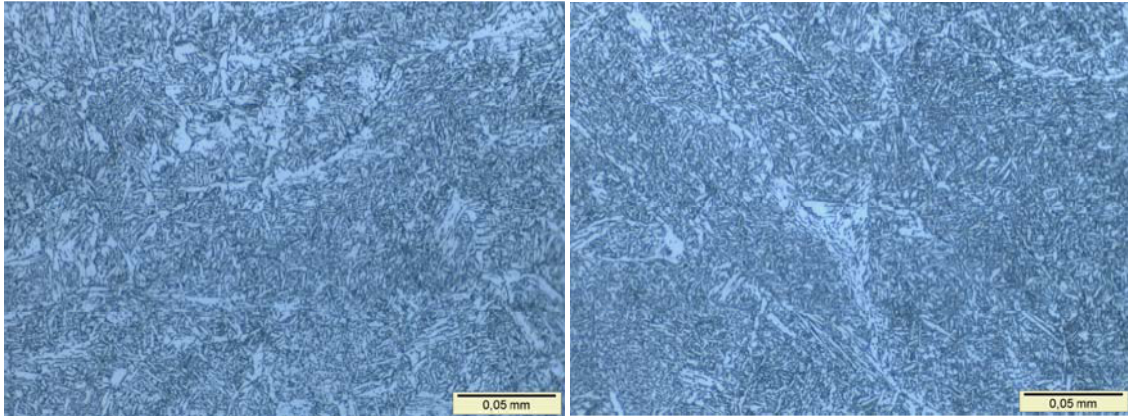


Figura 43 – Ponto 3, camada 1 externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.
 Externo - Matriz com estrutura de bainita, ferrita poligonal intragranular e acicular
 Interno - Matriz com estrutura de bainita, ferrita com segunda fase não alinhada e acicular

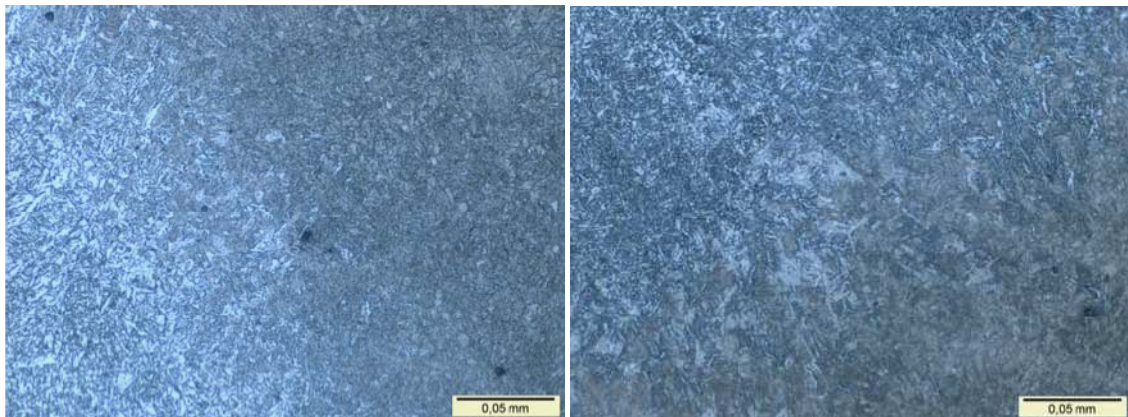


Figura 44 – Ponto 4, interface camada 1/metal base externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.
 Externo e Interno - Matriz com estrutura de bainita, ferrita acicular e martensita revenida

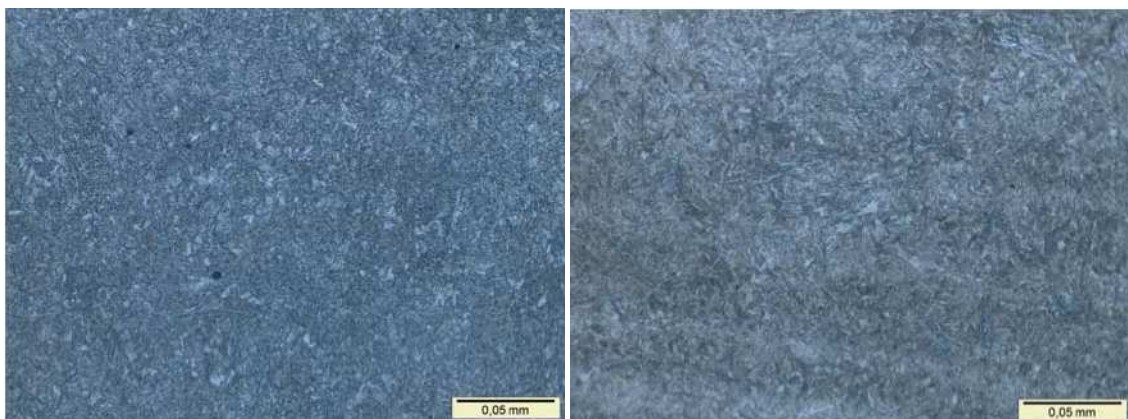


Figura 45 – Ponto 5, ZAC 1 externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.
 Externo - Matriz com estrutura de martensita revenida
 Interno - Matriz com estrutura de martensita revenida

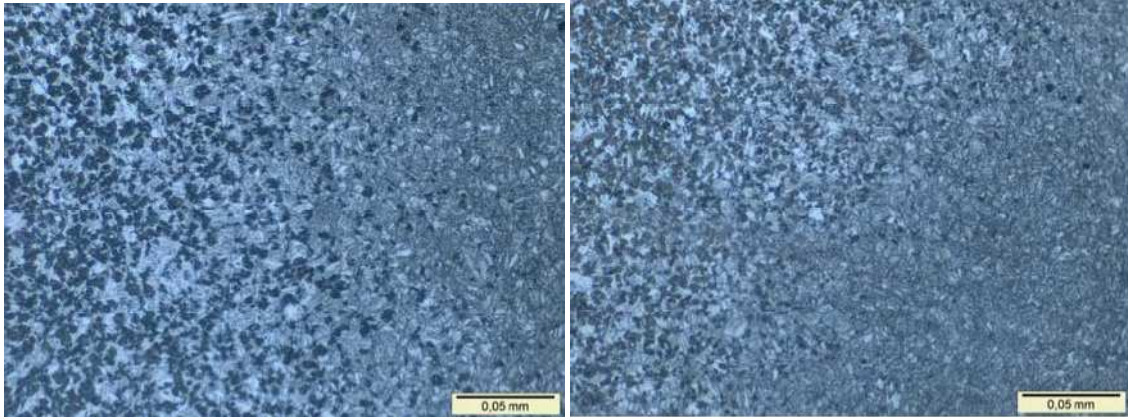


Figura 46 – Ponto 6, ZAC 2 externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.
Externo e Interno - Matriz com estrutura de perlita, ferrita acicular e martensita

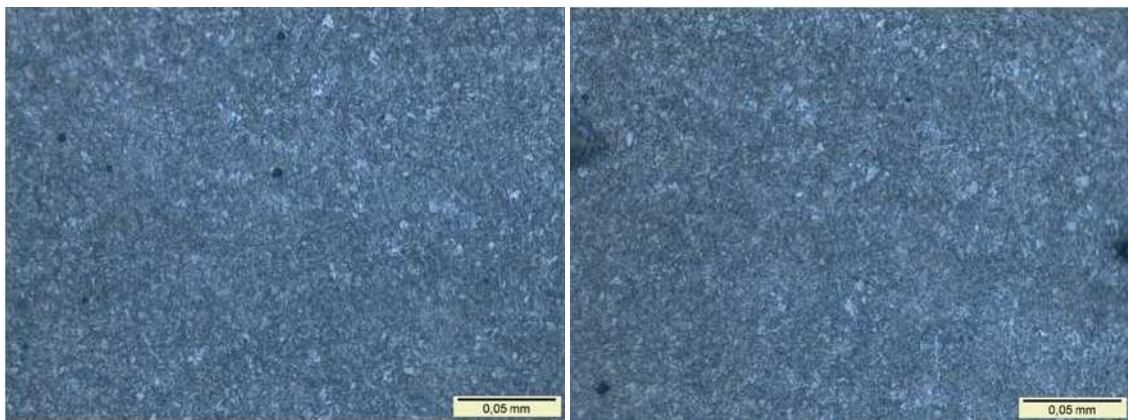


Figura 47 – Ponto 7, ZAC 3 externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.
Externo e Interno - Matriz com estrutura de martensita revenida

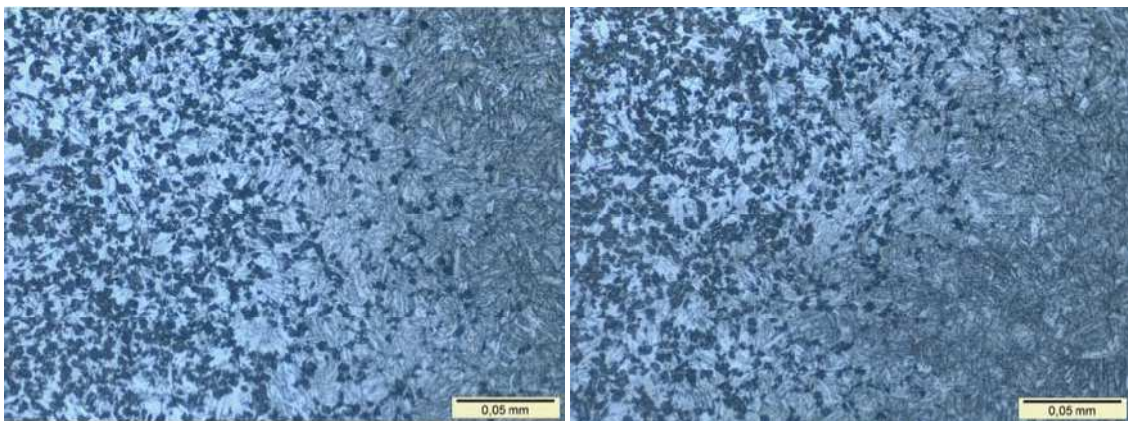


Figura 48 – Ponto 8, ZAC 4 externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.
Externo - Matriz com estrutura de perlita, ferrita acicular e martensita revenida
Interno - Matriz com estrutura de perlita, ferrita acicular, martensita revenida

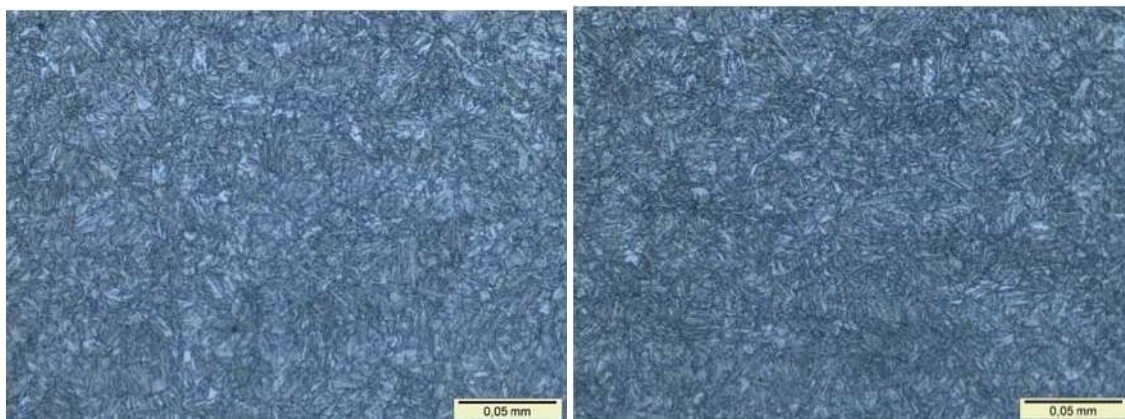


Figura 49 – Ponto 9, MB externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.
Externo e Interno - Matriz com estrutura de martensita revenida

A microestrutura do metal de base possui uma matriz com estrutura de martensita revenida. Após a deposição das duas camadas de amanteigamento, com os aportes térmicos controlados, obtiveram-se diferentes microestruturas. Antes da realização do amanteigamento, as regiões próximas à superfície externa e interna do tubo API 5CT grau Q125 apresentavam a mesma microestrutura, ou seja, matriz de martensita revenida. Com a realização do amanteigamento utilizando-se a técnica da meia camada houve a criação de uma ZAC caracterizada por duas bandas de transformação, sendo que cada banda está relacionada a cada uma das duas camadas depositadas no amanteigamento. Essas bandas de transformação apresentaram a formação de perlita, possivelmente causada pela permanência dessas bandas em tempo e temperatura que propiciaram um segundo revenimento visto ser o metal de base temperado e revenido. Observa-se que a primeira banda, mais próxima da linha de fusão, apresenta perlita de maior tamanho quando comparada com a perlita da segunda banda.

5.2.4. Tratamento térmico de revenimento do CP Q-2

O tratamento térmico de revenimento realizado consistiu de temperatura de patamar de 650°C por um período de 75 minutos, com taxa de aquecimento de 90°C/h a partir de 280°C a taxa de resfriamento de 120°C/h até 280°C, conforme mostra a Figura 50.

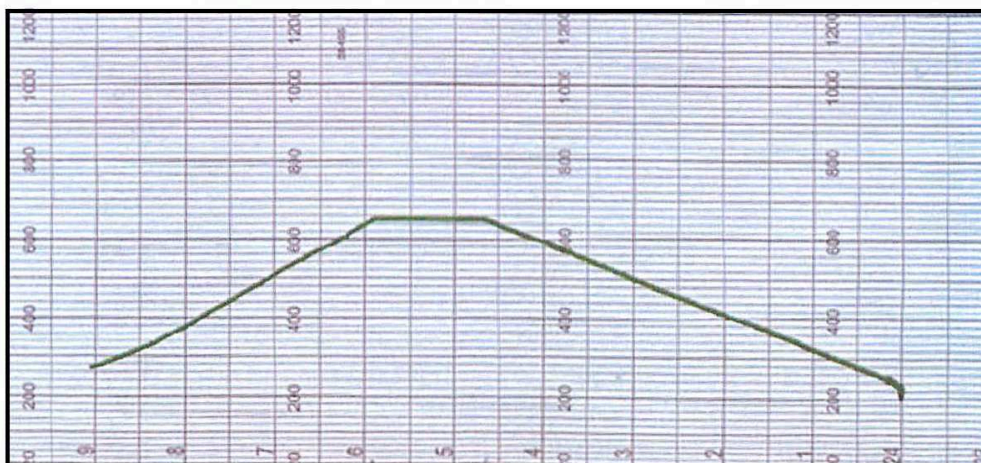


Figura 50 – Registro do tratamento térmico de revenimento (fonte: autor)

A Tabela 13 apresenta os valores de dureza do CP Q-2 após o tratamento térmico, agora denominado de CP Q-2-T.

Tabela 13 – Valores de dureza do CP Q-2-T após tratamento térmico

CP	Regiões							
	Camada 2				Camada 1			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Q2TDE	213	238	232	222	221	225	220	226
Q2TDI	203	192	210	213	204	201	201	215
	ZAC							
	9	10	11	12	13	14	15	16
Q2TDE	324	322	322	322	322	319	265	252
Q2TDI	303	314	314	309	279	251	281	281
	Metal base							
	17	18	19	20				
Q2TDE	289	289	296	296				
Q2TDI	296	296	296	294				

Legenda: (Q2TDE) dureza do CP Q-02-T próximo à superfície externa, (Q2TDI) dureza do CP Q-02-T próximo à superfície interna

O Gráfico 6 compara os valores de dureza do CP Q-2 antes e após o tratamento térmico de revenimento.

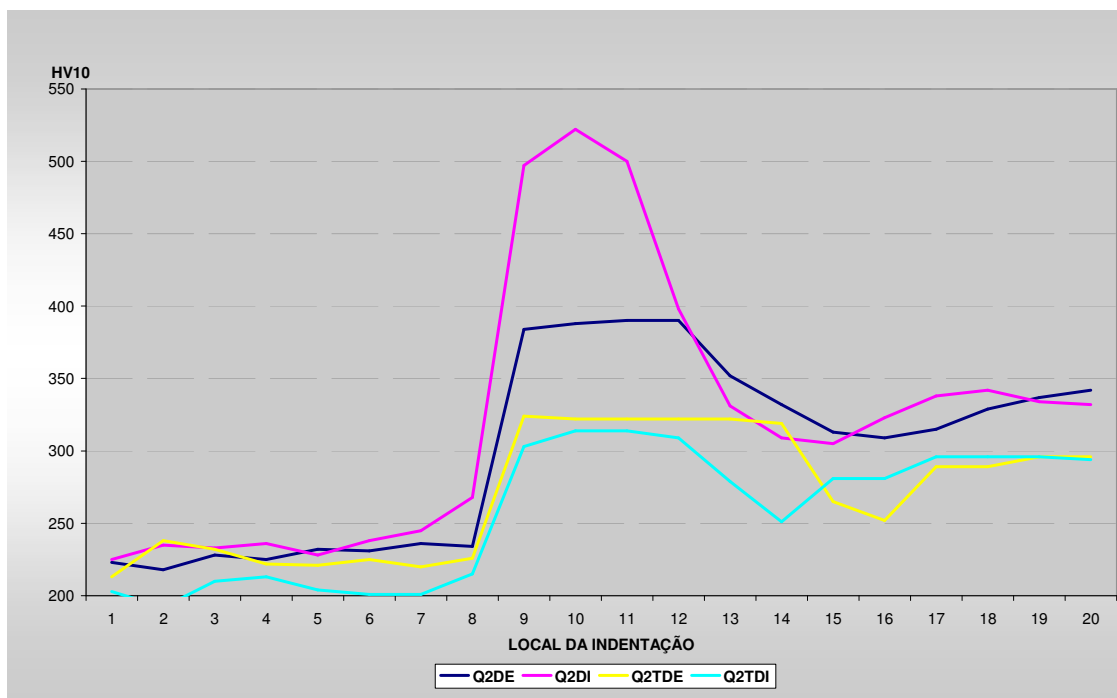


Gráfico 6 - Comparativo dos valores de dureza do CP Q-2 antes e após o tratamento térmico de revenimento (fonte: autor)

O tratamento térmico de revenimento reduziu significativamente os valores de dureza na ZAC do CP Q-2, agora denominado de CP Q-2-T, para valores máximos de 324 HV10 na região dos pontos entre 8 e 13, local de endentação na ZAC.

Após o tratamento térmico o valor máximo de dureza no perfil externo reduziu de 390 HV10 para 324 HV10, ou seja, redução de 17%. Para o perfil interno o valor máximo de dureza no pondo de indentação 10, reduziu de 522 HV10 para 314 HV10, ou seja, redução de 40%.

5.2.5. Análise metalográfica do CP Q-2 após o tratamento térmico

A Figura 51 apresenta as regiões, as dimensões e os pontos das análises metalográficas, com aumento de 10X, ataque com Nital 2%, normas ASTM E3 (2007) e ASTM E7 (2003), enquanto as Figuras 52 a 60 apresentam cada ponto analisado com aumento de 500X.

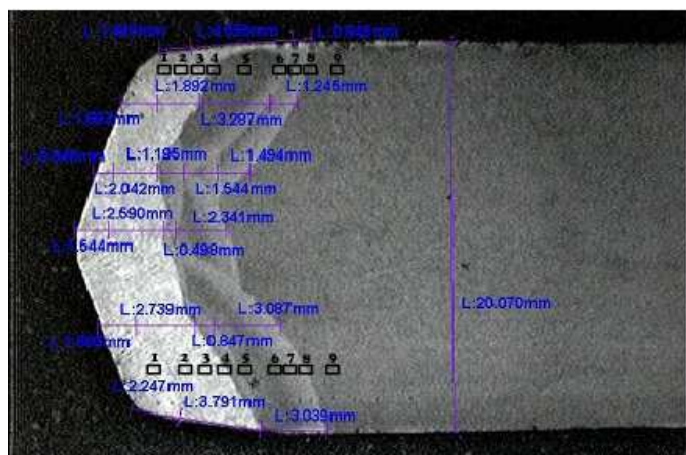


Figura 51 - Perfil macrográfico e regiões de análise micrográfica CP Q-2-T. Linha superior lado externo do tubo e linha inferior lado interno do tubo. Aumento 10X. (fonte: autor)

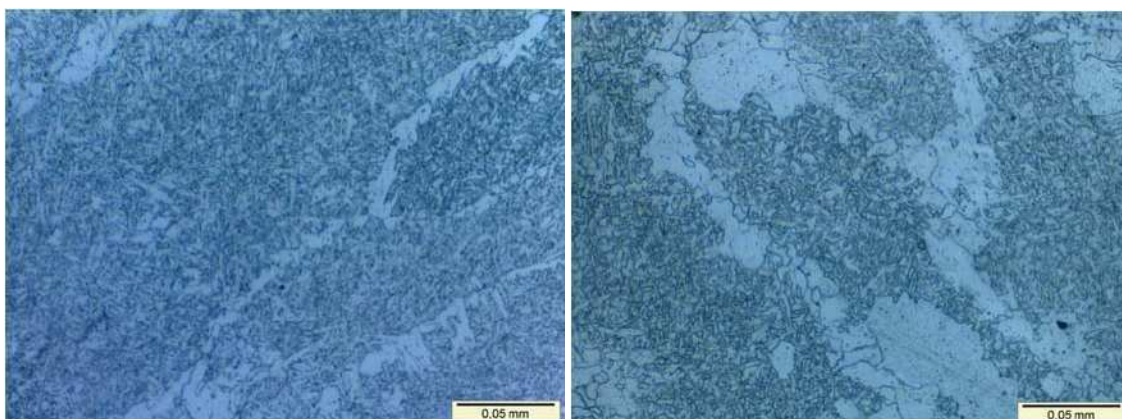


Figura 52 – Ponto 1, camada 2 externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.
Externo e Interno - Matriz consiste em estrutura de bainita revenida, ferrita com segunda fase não alinhada e acicular

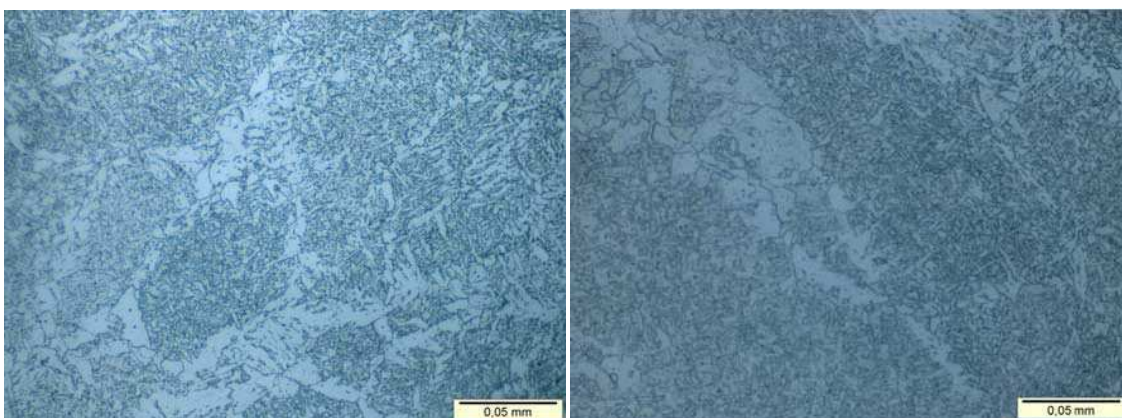


Figura 53 – Ponto 2, interface camada 2/camada 1 externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.
Externo e Interno - Matriz consiste em estrutura de bainita revenida, ferrita com segunda fase não alinhada e acicular

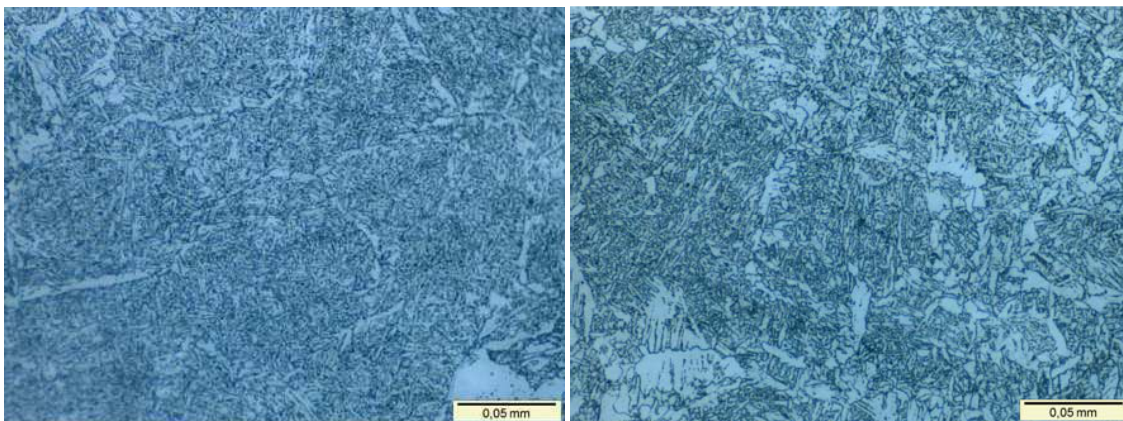


Figura 54 – Ponto 3, camada 1 externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.

Externo - Matriz consiste em estrutura de bainita revenida, ferrita em contorno de grão e acicular
 Interno - Matriz consiste em estrutura de bainita revenida, ferrita com segunda fase não alinhada, ferrita intragranular e acicular

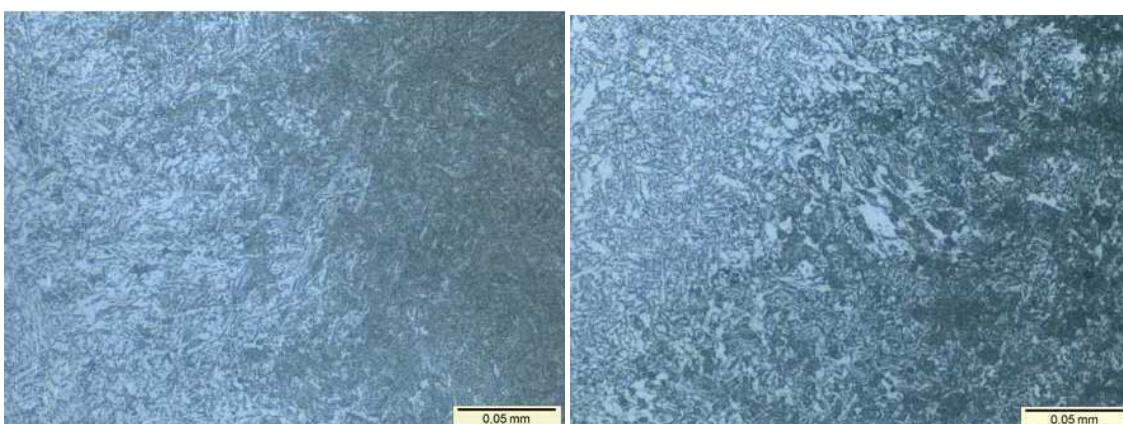


Figura 55 – Ponto 4, interface camada 1/metal base externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.

Externo - Matriz consiste em estrutura de bainita, ferrita acicular e martensita revenida
 Interno - Matriz consiste em estrutura de bainita revenida, ferrita poligonal intragranular, ferrita acicular e martensita ou bainita revenida

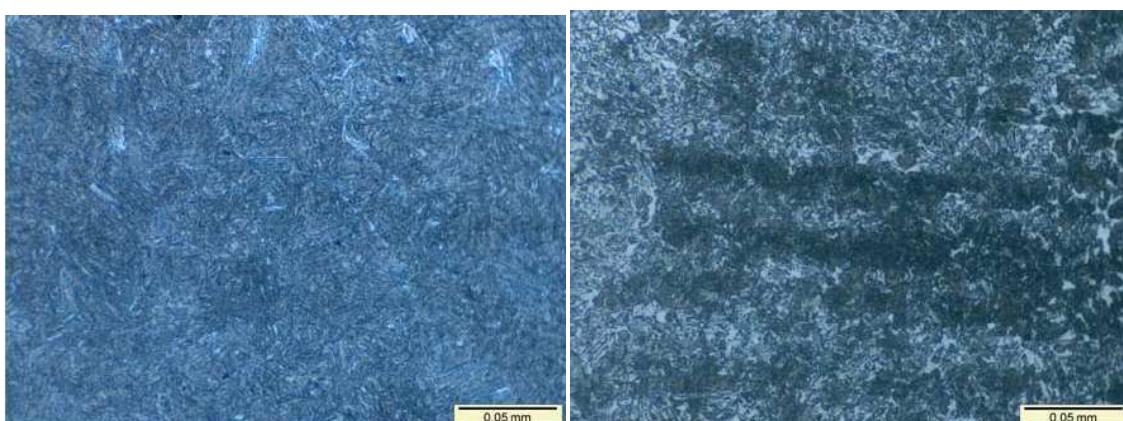


Figura 56 – Ponto 5, ZAC 1 externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.

Externo - Matriz consiste em estrutura de martensita revenida e ferrita acicular residual
 Interno - Matriz consiste em estrutura de martensita revenida, possivelmente bainita, ferrita poligonal intragranular e acicular

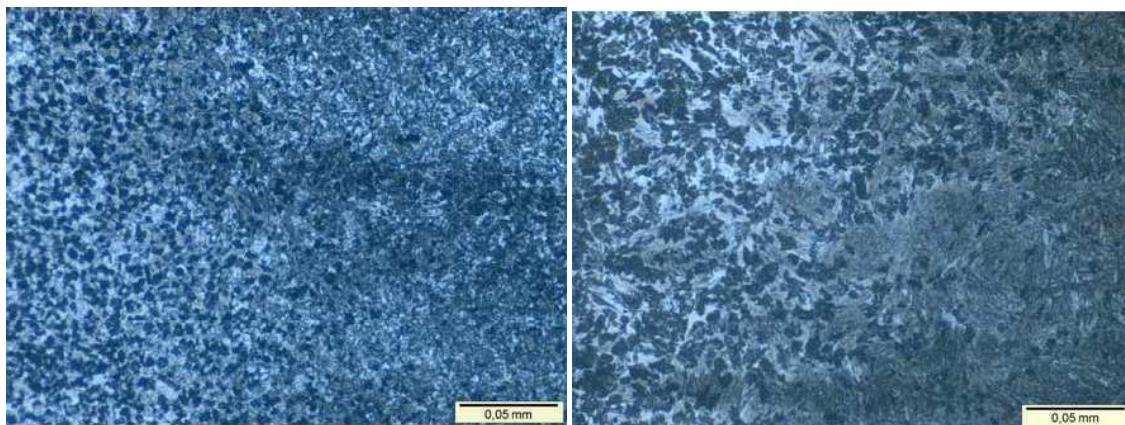


Figura 57 – Ponto 6, ZAC 2 externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.
Externo e Interno - Matriz consiste em estrutura de perlita, ferrita acicular e martensita revenida

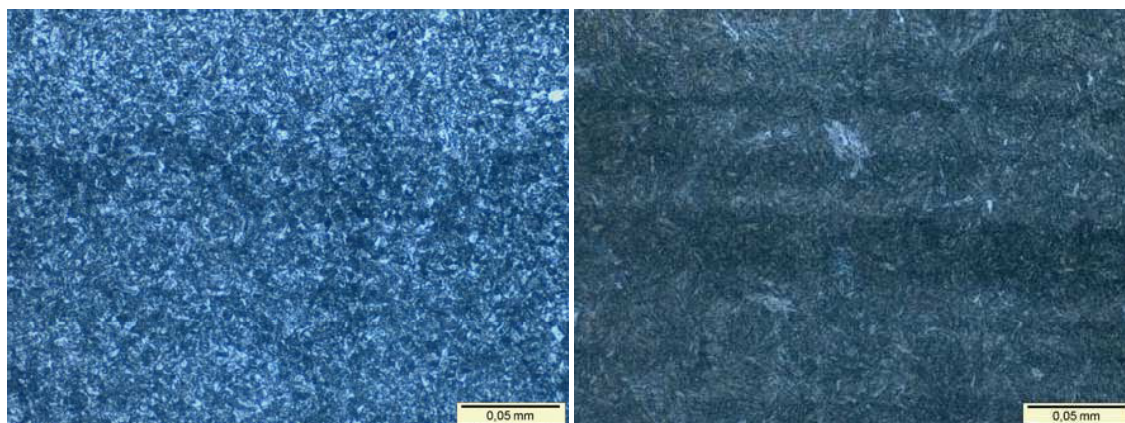


Figura 58 – Ponto 7, ZAC 3 externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.
Externo – Matriz consiste em estrutura de martensita revenida ou bainita e ferrita acicular
Interno - Matriz consiste em estrutura de martensita revenida e ferrita acicular residual

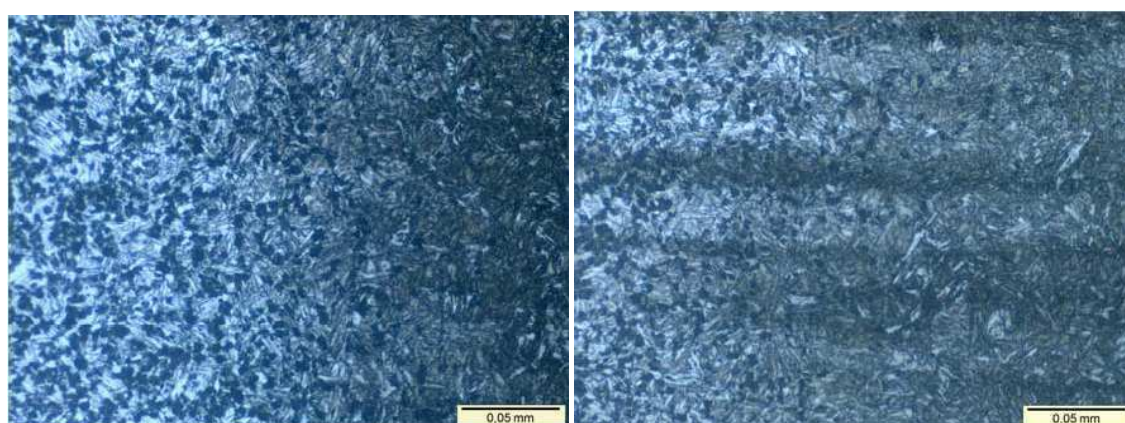


Figura 59 – Ponto 8, ZAC 4 externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.
Externo e Interno - Matriz consiste em estrutura de perlita, ferrita acicular e martensita revenida

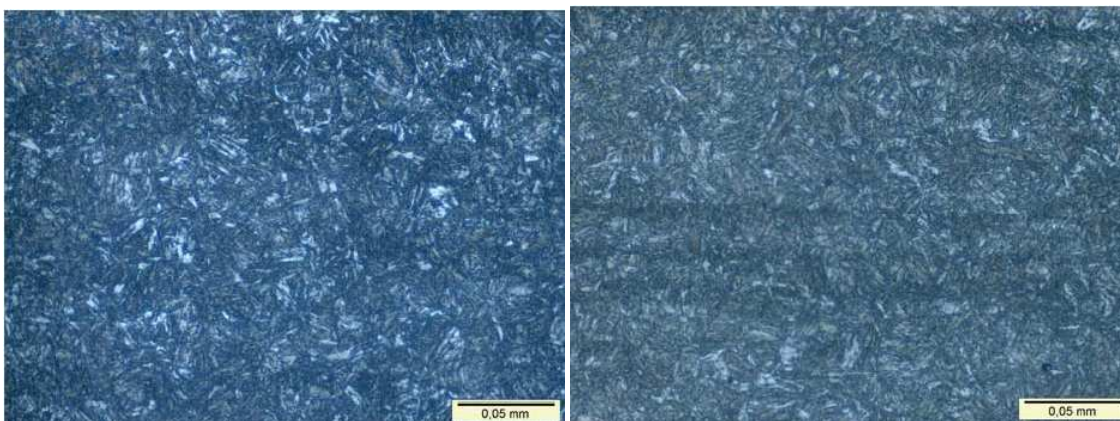


Figura 60 – Ponto 9, MB externa e interna, respectivamente. Aumento 500X.
 Externo - Matriz consiste em estrutura de martensita revenida e ferrita acicular residual
 Interno – Matriz consiste em estrutura de martensita revenida

Após a realização do tratamento térmico, observaram-se algumas mudanças na microestrutura de algumas regiões. No metal de solda, depositado pelo eletrodo revestido E7018-1, observou-se o revenimento da bainita e a poligonização da ferrita acicular, principalmente na região interna do tubo. Na ZAC houve o aparecimento de fases, tais como: bainita revenida, ferrita acicular e perlita. Quanto à primeira banda da ZAC, observou-se um significativo aumento do tamanho da perlita, principalmente na região interna do tubo.

Já na segunda banda da ZAC não houve mudança significativa. No metal de base houve o aparecimento de ferrita acicular.

Quanto às modificações microestruturais mais significativas na região interna do tubo, pode-se atribuir tal fato ao resfriamento mais lento nesta região, devido ao tubo, no momento da soldagem, ter suas extremidades fechadas, evitando assim a circulação de ar e a conseqüente permanência por maior tempo em temperaturas mais elevadas e à diminuição da velocidade de resfriamento.

5.3. Desenvolvimento do procedimento de soldagem

Para o desenvolvimento e caracterização da união dos tubos API 5CT grau Q125 amanteigado, com o processo de soldagem SMAW, com o tubo API 5L X65, utilizando o processo de soldagem GTAW, foi desenvolvido um procedimento de soldagem. É importante ressaltar que pelo fato dos dois processos de soldagem serem processos manuais, existe uma variável interveniente que é a habilidade do soldador.

Todas as fases para o desenvolvimento deste procedimento de soldagem estão descritas a seguir.

5.3.1. Inspeção visual dos tubos de teste CP-01 e CP-02

O ensaio de inspeção visual teve como base requisitos da norma API 1104 (2010). Os dois corpos de prova não apresentaram descontinuidades superficiais, tais como, mordeduras, trincas, porosidades, etc.

5.3.2. Inspeção por ultrassom *phased array* dos tubos de teste CP-01 e CP-02

As juntas soldadas apresentaram pequenos poros uniformemente distribuídos. Todas as descontinuidades encontradas estavam em conformidade com o critério de aceitação da norma API 1104 (2010), aprovando assim o procedimento de soldagem proposto segundo os requisitos deste ensaio não destrutivo.

A Figura 61 apresenta um ponto de detecção de poro na inspeção por ultrassom *phased array* do corpo de prova CP-01.

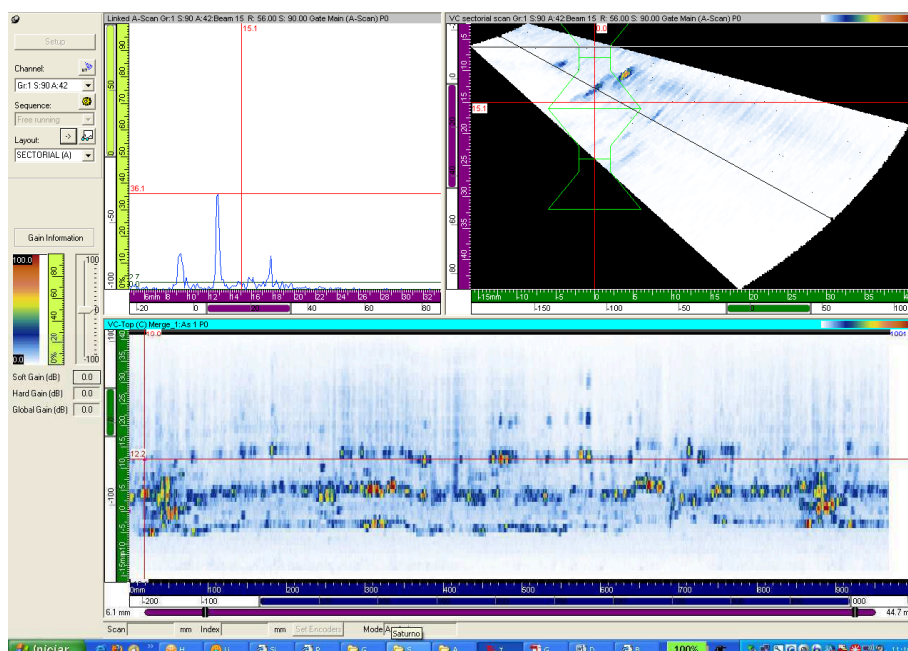


Figura 61 – Exemplo de detecção de poro na inspeção *phased array* do CP-01 (fonte:autor)

5.3.3. Ensaios mecânicos e metalográficos para qualificação do procedimento de soldagem no CP-01

A) Ensaios de tração

Foram testados dois corpos de prova de tração da junta soldada, de acordo com a norma API 1104 (2010), conforme apresentado na Tabela 14, e um corpo de prova do metal de base conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 14 – Resultados dos dois corpos de prova de tração da junta soldada

CP	Dimensões (mm)	Seção (mm ²)	Lim. Resistência		Local da ruptura
			(N)	(MPa)	
T1	25,32 X 7,82	198,00	119.641	605	Fora da solda – lado amanteigado
T2	25,73 X 7,84	201,72	120.622	600	Fora da solda – lado amanteigado

Tabela 15 – Resultado do corpo de prova de tração do MB após revenimento

CP	Dimensões (mm)	Seção (mm ²)	Lim. escoamento		Lim. Resistência		Along. % 50mm	Estricção %
			(N)	(MPa)	(N)	(MPa)		
Q125	Ø 12,66	125,88	106.530	845	115.718	920	20	66

Os dois corpos de prova da junta soldada romperam fora da solda, do lado do aço API 5CT fora da região amanteigada, e com resistência superior ao do tubo API 5L X65. O corpo de prova do metal base mostrou que o tratamento térmico de revenimento diminuiu o limite de escoamento de 997 a 1004 MPa para 845 MPa; e o limite de resistência de 1078 a 1086 MPa para 920 MPa. Os resultados foram considerados satisfatórios.

B) Ensaios de dobramento

Devido à elevada diferença de propriedades mecânicas entre o tubo API 5CT grau Q125 e API 5L X65, foi realizado o dobramento semi-guiado de face e de raiz. O diâmetro da roldana que representa o cutelo foi de 90 mm com ângulo de dobramento de 180°. A Figura 62 ilustra o dispositivo utilizado para o ensaio de dobramento semi-guiado e a Figura 63 apresenta um corpo de prova depois de ensaiado. A Tabela 16

apresenta os dados e resultados para os dois ensaios de dobramento de face e dos dois ensaios de dobramento de raiz.



Figura 62 - Dispositivo para o dobramento semi-guiado (fonte: autor)



Figura 63 – Corpo de prova após ensaio de dobramento (fonte: autor)

Tabela 16 – Dados e resultados do ensaio de dobramento

CP	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Ø cutelo (mm)	Distância roletes (mm)	Ângulo	Resultado
DF1	7,12	25,29	400,0	90,0	108,0	180°	Isentos de descontinuidades
DR1	7,35	25,34					
DF2	6,18	25,59					
DR2	6,82	26,60					

Legenda: (DF) dobramento de face, (DR) dobramento de raiz

As superfícies tracionadas dos corpos de prova não apresentaram descontinuidades e o ensaio foi considerado aprovado.

C) Ensaios de fratura (Nick-break)

A Tabela 17 apresenta os resultados dos ensaios de fratura para os dois corpos de prova.

Tabela 17 – Resultados dos ensaios de fratura (Nick-break)

CP	Aparência da fratura da solda
NB1	Não apresentou descontinuidades
NB2	Não apresentou descontinuidades

Os dois corpos de prova utilizados para o ensaio de fratura não apresentaram descontinuidades nas superfícies expostas e o ensaio foi considerado aprovado.

D) Ensaio de impacto Charpy V

A Tabela 18 apresenta os resultados dos ensaios de impacto e a Figura 64 apresenta os corpos de prova após ensaio. Como os corpos de prova foram retirados de duas posições diametralmente opostas, cada uma das posições foi identificada pelas letras A e B. Exceção é feita ao metal base API 5CT Q125 que teve apenas uma posição testada.

Tabela 18 - Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy a 0°C

Temperatura (°C)	Tipo de entalhe	Região	CP	Energia absorvida (J)	
				Individual	Média ± DP
0	V2 x10x5 (mm)	MB API 5CT	1	64	60 ± 3,60
			2	59	
			3	57	
0	V2 x10x5 (mm)	A Centro da solda	1	89	93 ± 5,85
			2	91	
			3	100	
0	V2 x10x5 (mm)	A ZAC Lado API 5L X65	1	91	91 ± 2,51
			2	89	
			3	94	
0	V2 x10x5 (mm)	A Centro da solda Amanteigamento	1	86	89 ± 4,61
			2	94	
			3	86	
0	V2 x10x5 (mm)	A ZAC Amanteigamento	1	83	88 ± 18,44
			2	108	
			3	72	
0	V2 x10x5 (mm)	B Centro da solda	1	111	100 ± 9,81
			2	94	
			3	94	
0	V2 x10x5 (mm)	B ZAC Lado API 5L X65	1	97	96 ± 1,73
			2	94	
			3	97	
0	V2 x10x5 (mm)	B Centro da solda Amanteigamento	1	94	89 ± 5,68
			2	83	
			3	91	
0	V2 x10x5 (mm)	B ZAC Amanteigamento	1	94	89 ± 9,23
			2	78	
			3	94	



Figura 64 - Corpos de prova Charpy após ensaio (fonte: autor)

A temperatura do ensaio de impacto foi de 0°C, visto ser essa a temperatura mínima de projeto na construção de dutos terrestres no Brasil. As energias absorvidas obtidas ficaram acima da média mínima requerida pela especificação técnica da Petrobras – Requisitos suplementares à norma N-464 revisão K (PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., 2008) que é 36 J.

Como os ensaios de impacto Charpy foram executados em regiões diferenciadas, ou seja, no metal base, centro da solda, ZAC e região do amanteigamento, é esperada uma grande variabilidade de valores nas médias e nos desvios padrão.

E) Ensaios de dureza

A Figura 65 apresenta a distribuição dos pontos de medição de dureza nos corpos de prova de dureza M1 e M2, diametralmente opostos, e a Tabela 19 apresenta os valores medidos.

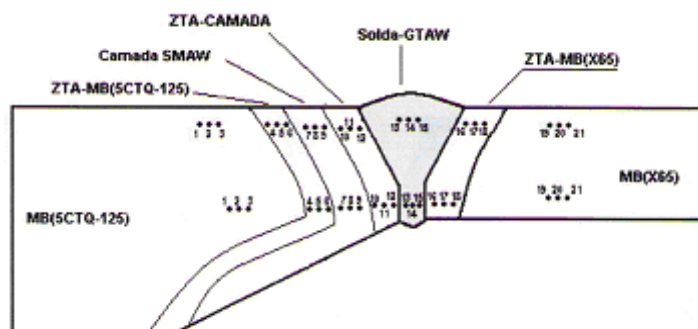


Figura 65 – Distribuição dos pontos de medição de dureza Vickers (HV10) (fonte: autor)

Tabela 19 - Valores de dureza medidos nos CPs M1 e M2

	CP LOCAL			
	M1		M2	
	Raiz	Face	Raiz	Face
1	299	297	297	302
2	306	292	304	297
3	294	292	302	294
4	297	249	251	309
5	270	299	260	309
6	266	274	252	268
7	182	193	207	180
8	186	207	198	189
9	186	199	203	174
10	179	188	171	183
11	178	185	163	173
12	177	193	159	174
13	166	176	156	163
14	170	181	164	183
15	169	197	161	205
16	171	171	179	176
17	171	168	155	165
18	173	168	156	164
19	199	202	205	209
20	202	207	205	206
21	199	205	201	206

Dentre todas as 72 medições realizadas foram encontrados seis pontos com dureza acima de 300 HV10, porém as durezas dos pontos 2 e 3 devem ser desconsideradas, pois estão localizadas no metal de base API 5CT grau Q125 que possui dureza superior, conforme verificado neste estudo. Na região de interesse, ou seja, no metal de solda e na ZAC, apenas dois pontos apresentaram dureza 309 HV10, o que pode ser atribuído a variações no aporte térmico devido ao fato da soldagem ser manual, com isso os resultados foram considerados satisfatórios. Os resultados de dureza demonstraram que a técnica do amanteigamento, seguida do tratamento térmico, atingiu o objetivo de baixar os valores de dureza nas diferentes regiões da ZAC, principalmente em sua região de grãos grosseiros.

O objetivo de avaliar o perfil de dureza na face e na raiz da solda foi verificar se a dureza poderia atingir o valor máximo aceitável de 300 HV10.

F) Ensaio macrográfico

A Figura 66 apresenta o corpo de prova do ensaio macrográfico da junta soldada.

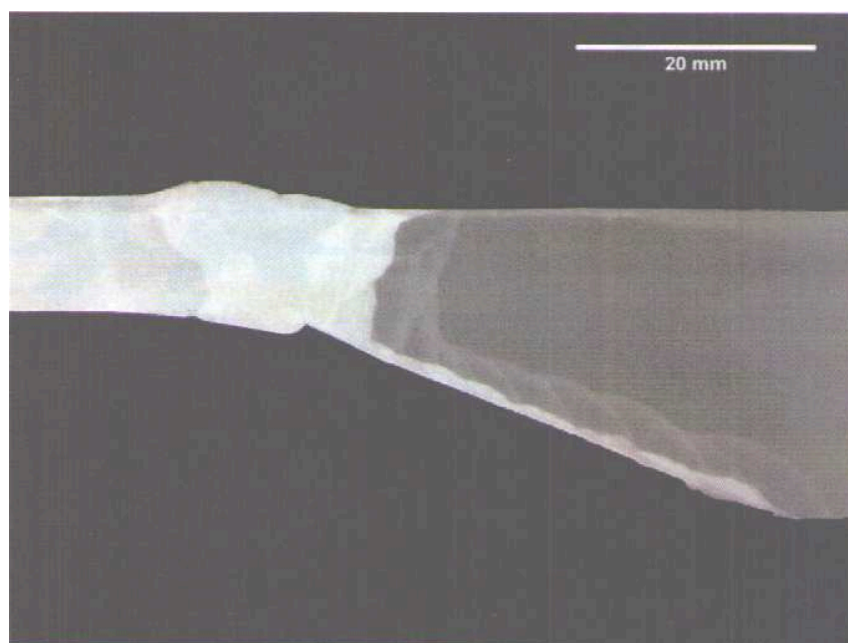


Figura 66 – Aspecto macrográfico da junta soldada (fonte: autor)

O corpo de prova de macrografia mostrou todas as regiões da junta soldada, apresentando fusão completa e ausência de descontinuidades.

G) Análise metalográfica

Os dois corpos de prova para análise metalográfica foram retirados de posições diametralmente opostas. A Figura 67 apresenta a distribuição dos pontos dos ensaios metalográficos, enquanto as Figuras 68 até 87 apresentam a microestrutura de cada ponto analisado com aumento de 500X.

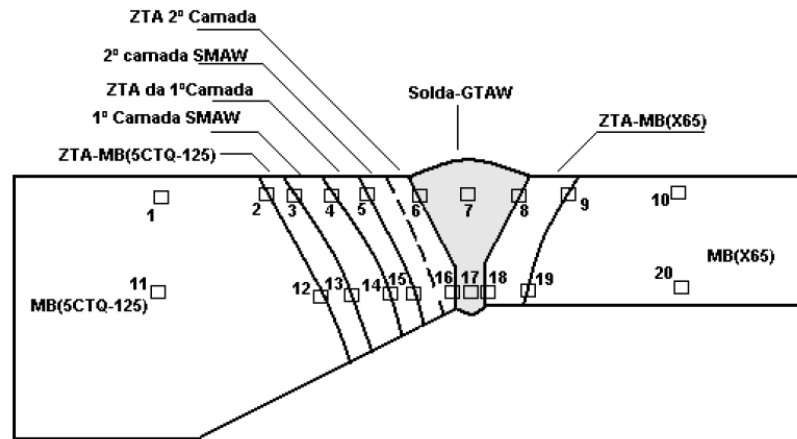


Figura 67 - Distribuição dos pontos dos ensaios metalográficos da junta soldada (fonte: autor)

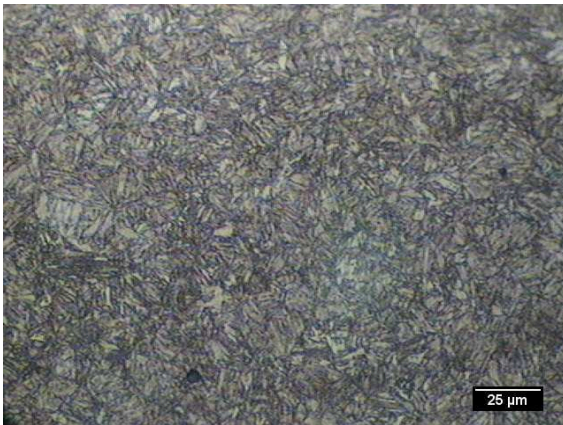


Figura 68 - Ponto 1 – Microestrutura do metal base API 5CT grau Q125. Martensita revenida. Aumento 500X.

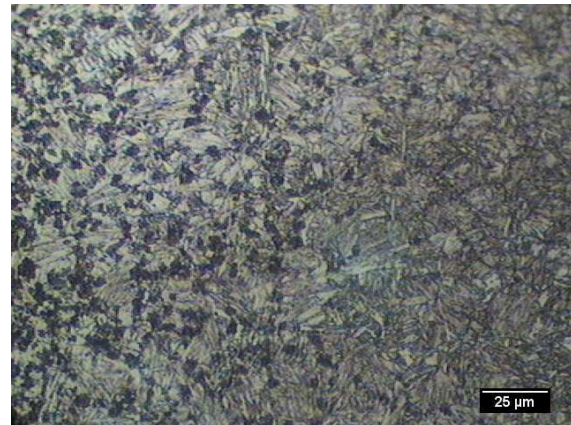


Figura 69 - Ponto 2 – Transição entre o metal base (à direita), com microestrutura de martensita revenida, e a zona afetada pelo calor pela camada depositada por SMAW (à esquerda), com microestrutura de martensita revenida e bainita. Aumento 500X.

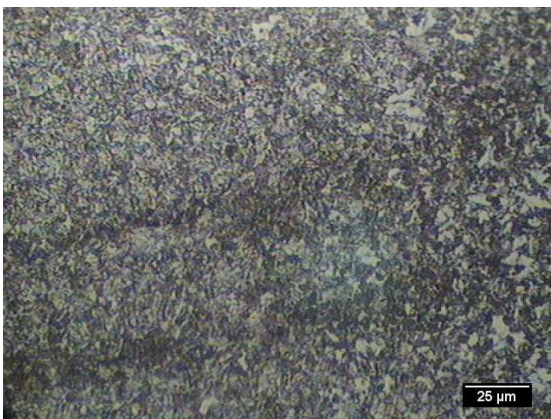


Figura 70 - Ponto 3 – Transição da zona afetada pelo calor do metal base API 5CT grau Q125 (à direita) e a camada depositada por SMAW (à esquerda) com microestrutura de martensita revenida. Aumento 500X.

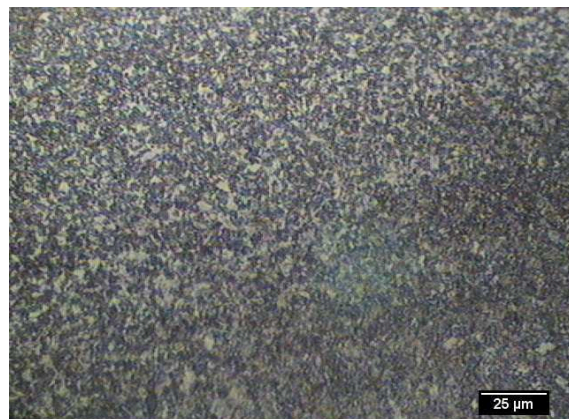


Figura 71 – Ponto 4 – Transição entre a primeira camada SMAW (à direita) e a zona afetada pelo calor desta primeira camada (à esquerda) com microestrutura de martensita e bainita. Aumento 500X.

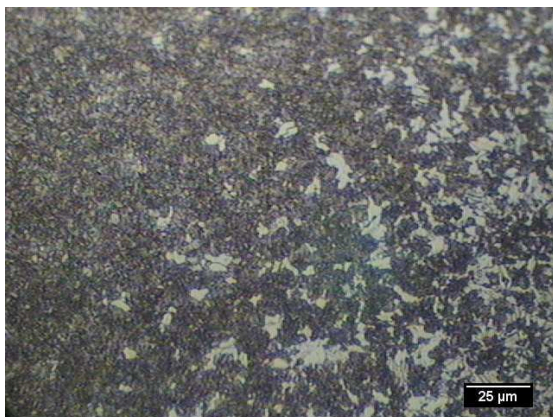


Figura 72 - Ponto 5 – Transição entre a zona afetada pelo calor da primeira camada depositada por SMAW (à esquerda), com microestrutura de martensita com bainita e a segunda camada SMAW (à direita), com microestrutura de martensita revenida. Aumento 500X.

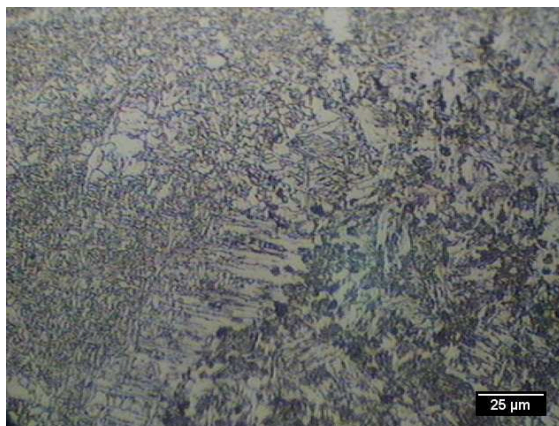


Figura 73 - Ponto 6 – Linha de fusão entre a segunda camada depositada por SMAW (à direita), com microestrutura de martensita revenida e o metal de solda depositado pelo processo GTAW (à esquerda) com microestrutura de ferrita acicular e ferrita de contorno de grão. Aumento 500X.

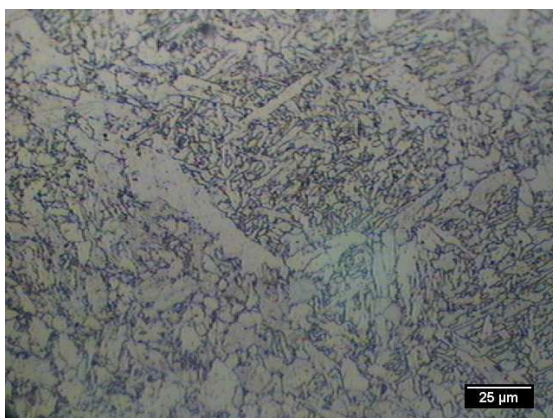


Figura 74 - Ponto 7 – Metal de solda depositado pelo processo GTAW. Ferrita poligonal em matriz de ferrita acicular. Aumento 500X.

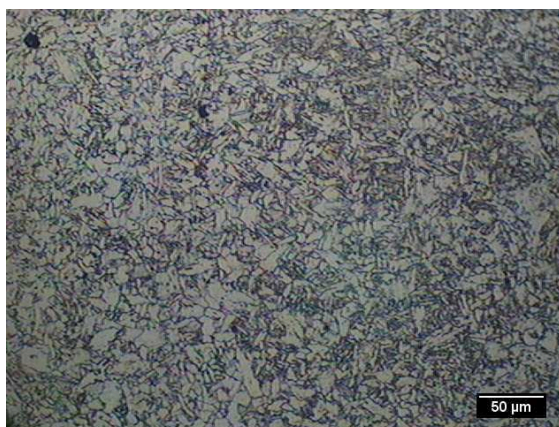


Figura 75 - Ponto 8 – Linha de fusão entre o metal de solda GTAW e a zona afetada pelo calor do metal base API 5L X65. Observa-se transição suave praticamente imperceptível. Ambas as microestruturas de ferrita acicular com ferrita poligonal e algumas ilhas de perlita. Aumento 500X.

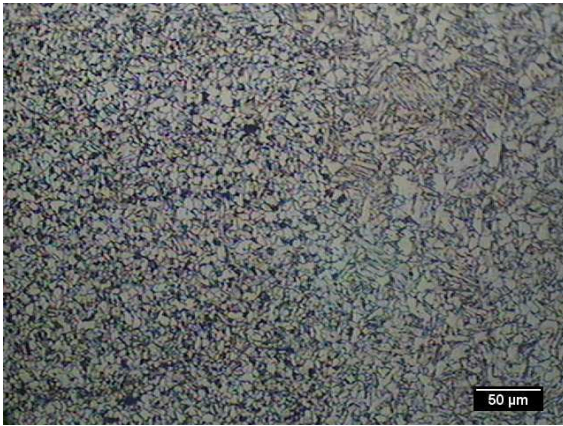


Figura 76 - Ponto 9 – Transição entre o metal de base API 5L X65 e a zona afetada pelo calor. Transição suave praticamente imperceptível. Microestrutura constituída por finos grãos ferríticos com ilhas de perlita. Aumento 500X.

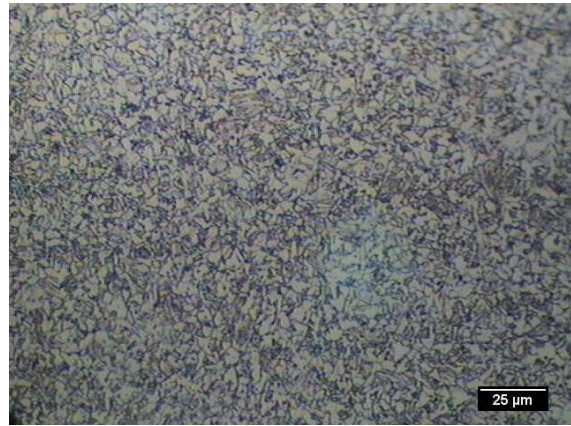


Figura 77 - Ponto 10 – Microestrutura do metal base API 5L X65. Finos grãos ferríticos. Aumento 500X.

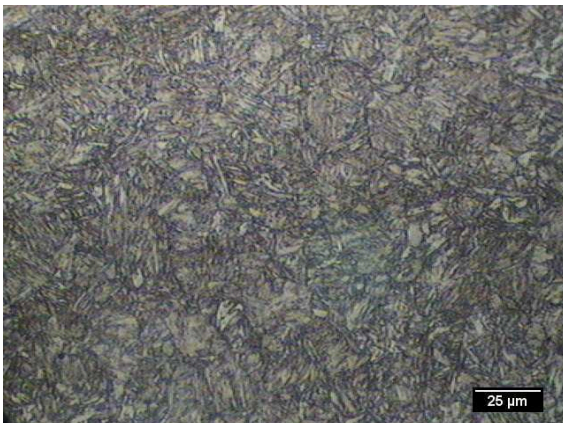


Figura 78 - Ponto 11 – Microestrutura do metal base API 5CT grau Q125. Martensita revenida. Aumento 500X.

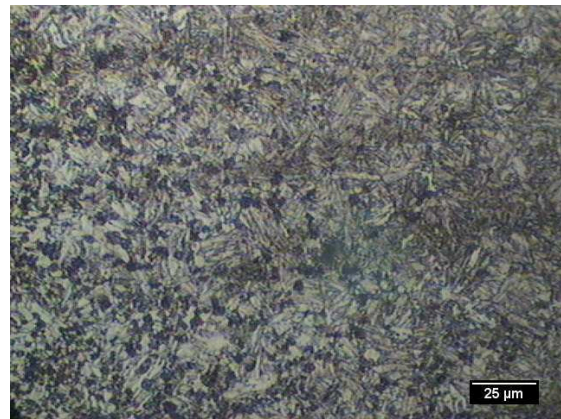


Figura 79 - Ponto 12 – Transição entre o metal base (à direita), com microestrutura de martensita revenida, e a zona afetada pelo calor pela camada depositada por SMAW (à esquerda), com microestrutura de martensita revenida e bainita. Aumento 500X.

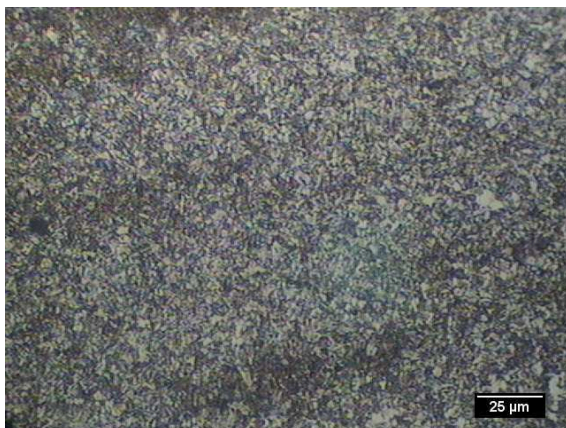


Figura 80 - Ponto 13 – Transição da zona afetada pelo calor do metal base API 5CT grau Q125 (à direita) e a camada depositada por SMAW (à esquerda) com microestrutura de martensita revenida. Aumento 500X.

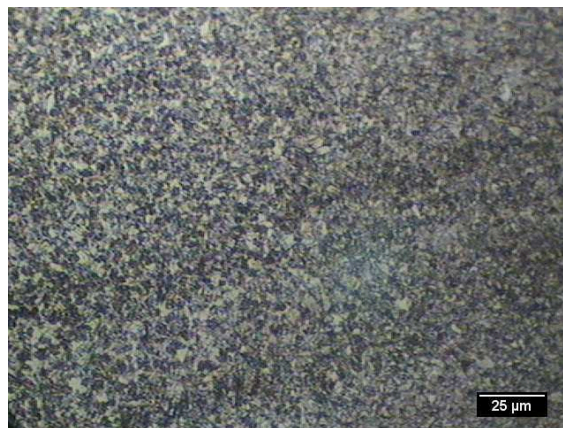


Figura 81 - Ponto 14 – Transição entre a primeira camada SMAW (à direita) e a zona afetada pelo calor desta primeira camada (à esquerda) com microestrutura de martensita e bainita. Aumento 500X.

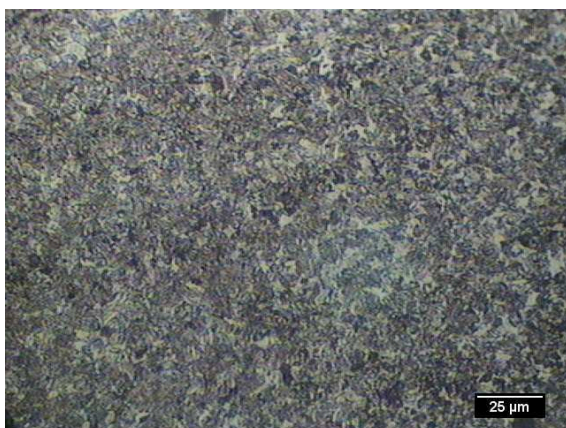


Figura 82 - Ponto 15 – Transição entre a zona afetada pelo calor da primeira camada depositada por SMAW (à direita), com microestrutura de martensita com bainita e a segunda camada SMAW (à esquerda), com microestrutura de martensita revenida. Aumento 500X.

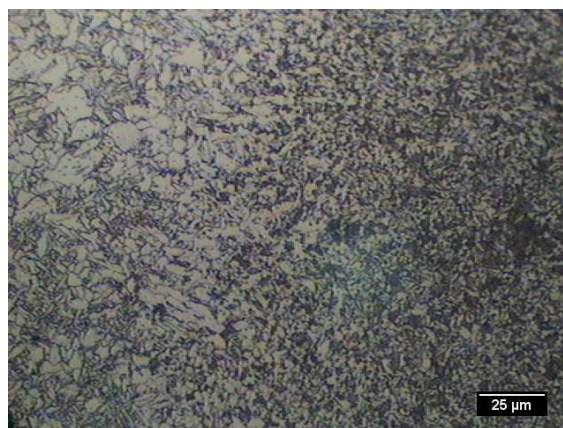


Figura 83 - Ponto 16 – Transição entre a segunda camada depositada pelo processo SMAW (à direita), com microestrutura de martensita revenida e o metal de solda depositado pelo processo GTAW (à esquerda) com microestrutura de ferrita acicular. Aumento 500X.

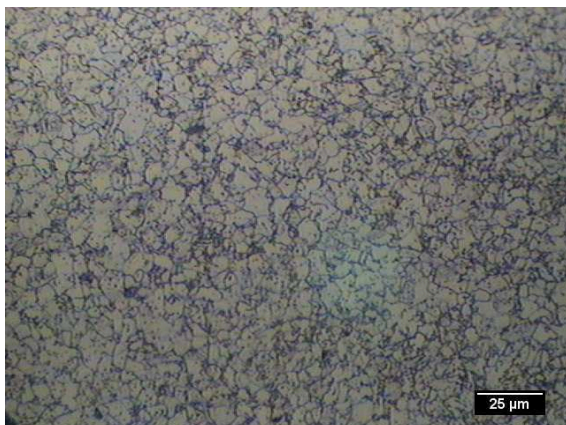


Figura 84 - Ponto 17 – Metal de solda depositado pelo processo GTAW. Ferrita poligonal com finos carbonetos. Aumento 500X.

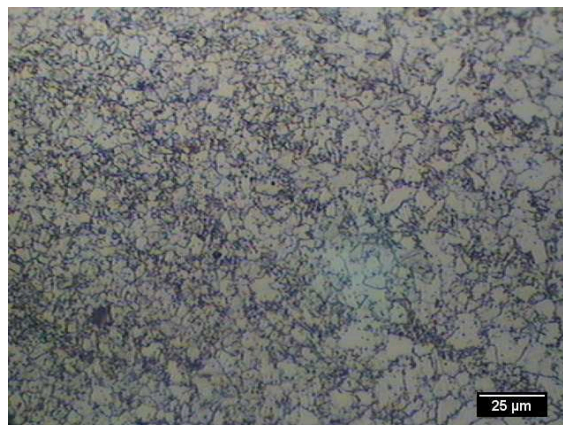


Figura 85 - Ponto 18 – Linha de fusão entre o metal de solda GTAW (à direita) e a zona afetada pelo calor do metal base API 5L X65 (à esquerda) com microestrutura de ferrita e perlita. Aumento 500X.



Figura 86 - Ponto 19 – Transição entre o metal de base API 5L X65 e a zona afetada pelo calor. Transição suave praticamente imperceptível. Microestrutura constituída por finos grãos ferríticos. Aumento 500X.

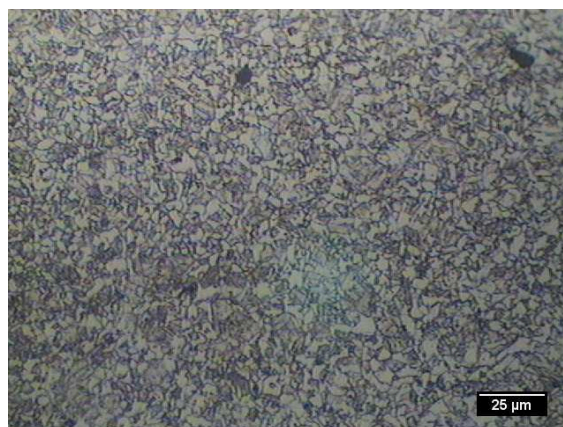


Figura 87 - Ponto 20 – Microestrutura do metal base API 5L X65. Finos grãos ferríticos. Aumento 500X.

O tubo API 5CT grau Q125 apresenta uma microestrutura de martensita revenida, e com a soldagem houve um aumento da dureza principalmente na ZAC. Com o tratamento térmico ocorreu o revenimento desta ZAC. As Figuras 68 a 87 apresentam uma transição suave entre as diferentes microestruturas nas diferentes regiões da junta soldada, isto é, ao migrar de uma região para outra não há uma interface definida entre as microestruturas adjacentes.

A transição suave da microestrutura, associada aos ensaios não destrutivos, aos valores de dureza medidos e às propriedades mecânicas encontradas, levou a conclusão que o tubo de teste CP-01 atendeu aos critérios especificados.

5.3.4. Ensaio mecânico para qualificação do procedimento de soldagem no CP-02

A) Ensaio de tração do corpo de prova soldado

O Gráfico 7 abaixo apresenta os resultados do teste de tração dos dez corpos de prova da junta soldada integral.

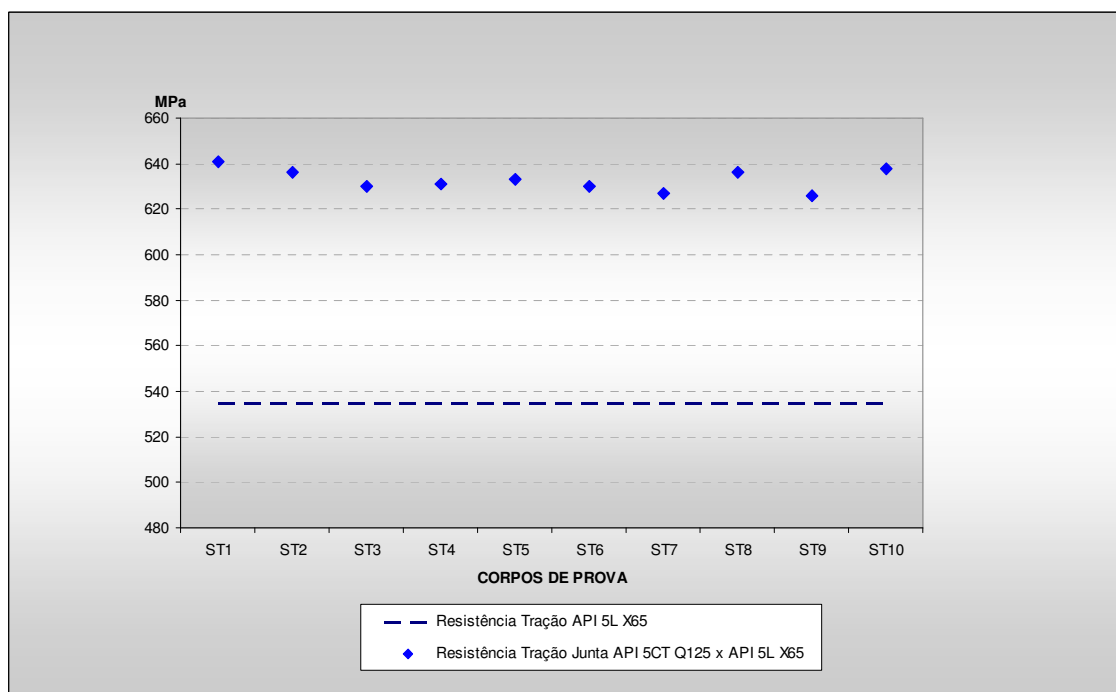


Gráfico 7 – Resultados dos ensaios tração junta soldada API 5CT grau Q125 x API 5L X65 (fonte: autor)

Os resultados do teste de tração dos dez corpos de prova integrais da junta soldada foram significativamente superiores a resistência mecânica especificada para o aço API 5L X65. É importante ressaltar que embora a resistência a tração mínima especificada para o tubo API 5CT grau Q125 seja de 860 MPa, espera-se da junta soldada uma resistência mecânica mínima especificada compatível com o tubo API 5L X65 que é de 535 MPa. Partindo-se desta premissa foram utilizados os consumíveis eletrodo revestido E7018-1, cuja resistência mínima especificada é 482 MPa e a vareta GTAW ER80S-G, cuja resistência mínima especificada é 551 MPa.

O resultado dos ensaios não destrutivos, associados os resultados dos ensaios de tração da junta integral, levou a conclusão que o tubo de teste CP-02 atendeu aos critérios especificados.

6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusões

- A pesquisa proposta definiu que o método de soldagem do tubo API 5CT grau Q125 com o tubo API5L X65 atendeu a todos os requisitos normativos para sua aplicação em gasodutos terrestres.
- O aporte térmico utilizado no corpo de prova Q-2 da Tabela 6 foi o mais adequado.
- O perfil de dureza da junta soldada demonstrou a necessidade da realização do tratamento térmico de revenimento, mesmo com o uso do amanteigamento com a técnica da meia camada, para reduzir os valores de dureza e atender ao valor máximo especificado.
- Foram encontradas na junta soldada as microestruturas constituídas de martensita revenida, perlita, bainita e ferrita acicular, demonstrando valores de energia absorvida adequados no ensaio de impacto Charpy conforme apresentado na Tabela 18.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar estudo da soldagem do tubo API 5CT grau Q125 com o próprio tubo API 5CT grau Q125, utilizando consumível de soldagem de resistência mecânica compatível com o metal de base.
- Dar continuidade à pesquisa da soldabilidade do tubo API 5CT grau C110, que possui elevado carbono equivalente CE_{iiw} de 0,76%, buscando rotas alternativas de soldagem para a sua aplicação.

7. REFERÊNCIAS

ALCATRÃO, M. S, MENEZES, M. S. Aplicação do processo de soldagem STT na soldagem de dutos. In: CONGRESSO DE CONFIABILIDADE, INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO, 1, 2006, Rio de Janeiro.

ALORAIER, A.; AL-MAZROUEE, A.; PRICE, J.W.H.; SHEHATA, T. Welding repair practices without post weld heat treatment for ferritic alloys and their consequences on residual stresses: A review. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Amsterdam/Netherlands, p. 127-133. 15 fev. 2010.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, **API 1104**: Welding of Pipelines and Related Facilities. USA, 2010.

_____, **API 5CT**: Specification for Casing and Tubing. USA, 2005.

_____, **API 5L**: Specification for Line Pipe. USA, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR MATERIALS, **ASM Handbook Volume 6**: Welding, Brazing and Soldering. 1 ed. Materials Park: ASM International, 1993. 1299 p.

AMERICAN SOCIETY FOR MECHANICAL ENGINEERS, **ASME B31.4**: Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids. USA, 2006.

_____, **ASME B31.8**: Gas Transmission and Distribution Piping Systems. USA, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTS AND MATERIALS, **ASTM A370**: Standard Test Methods and Definitions for Tests and Materials. USA, 2011.

_____, **ASTM E3**: Standard Guide for Metallographic Specimens. USA, 2007.

_____, **ASTM E7**: Standard Terminology Relating to Metallography. USA, 2003.

_____, **ASTM E92:** Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials. USA, 2003.

_____, **ASTM E112:** Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. USA, 1996.

_____, **ASTM E190:** Standard Test Methods for Guided Bend test for Ductility of Welds. USA, 2008.

_____, **ASTM E381:** Standard Method of Macroetch Testing Steel Bars, Billets, Blooms, and Forgings. USA, 2006.

_____, **ASTM E415:** Standard Test Method for Atomic Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel. USA, 2008.

AMERICAN WELDING SOCIETY, **AWS A5.1:** Specification for Carbon Steels Electrodes for Shielded Metal Arc Welding. USA, 2004.

_____, **AWS A5.28:** Specification for Low-alloy Steels Electrodes and rods for Gas Shielded Arc Welding. USA, 2005.

_____, **Welding Handbook Volume 2:** Welding Processes. 9 ed. Miami: World Engineering Xchange, 2004. 720 p.

ARROYO, F., PONCIANO, M., CHAD, L. SAWL UOE API 5L X100 – Challenge for the domestic industry. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, 2011, 2011, Rio de Janeiro.

BAILEY, N.; COE, F. R.; GOOCH, T. G.; HART, P. H. M.; JENKINS, N.; PARGETER, R. J. **Welding Steels without Hydrogen Cracking.** 2nd ed. Cambridge: Abington Publishing, 1973. 150 p.

BAILEY, N. **Weldability of Ferritic Steels.** 1 ed. Cambridge: Abington Publishing, 1994. 286 p.

BRANDI, S. D.; Transformações no estado sólido de aços-carbono. In: WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 2002. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002. cap. 8, p. 403-425.

CAMPINHO, H. S. **Aplicação do ultrassom automatizado na inspeção de solda circunferencial em dutos na indústria de petróleo e gás**. 2007. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté.

CARVALHO, L. P., ACUÑA, A. F., GODOY, A. G. Evaluation of the advantage of using mechanized welding in pipeline construction. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, 2011, 2011, Rio de Janeiro.

CUNHA J. C. L. **Soldagem de dutos em operação usando processo GTAW**. 2010. 66 f. Monografia (Especialização em Montagem Industrial e Fabricação Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense.

DEFALCO, J. Practical Applications for Hybrid Laser Welding. **Welding Journal**, Miami, p.47-51, out. 2007. Mensal.

DUBÉ, N. **Introduction to phased array ultrasonic technology applications**. 1st ed. Canada: R/D Tech Guideline, 2004. 348 p.

DURAND, R.S., BATISTA, G. Z., MENEZES, M. S.; HIPPERT, E., SOUSA L. G. S., BOTT, I.S. Qualificação de procedimentos para a soldagem circunferencial de tubos API 5L X80. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, 2007, 2007, Rio de Janeiro.

FAES, K., DHOOGHE A., DE BAETS, P., AFSCHRIFT, P. New friction welding process for pipeline girth welds - welding time optimisation. **International Journal of Advanced Manufacture Technology**, Neu-Isenburg, n. 43, p.982-992, 2009. Mensal.

FAIRCHILD, D. P., MACIA, M. L., BANGARU, N. V., KOO, J. Y. Girth welding development for X120 linepipe. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 2003, 2003, Honolulu.

FELIZARDO, I., BRACARENSE, A. Q., PEREIRA F. L., FAGUNDES H. C. Qualificação de procedimento de soldagem de tubulações utilizando robô orbital. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 33, 2007, Caxias do Sul.

FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, **Inspetor de Soldagem**: Metalurgia da Soldagem. 16 ed. Rio de Janeiro: FBTS, 2009. 44 p.

GODOY, J. M.; PEREIRA, M. S.; CAVALHEIRO, B. C. Ocorrência de trinca por fadiga em tubos de aço soldados por arco submerso - Grau API 5L X65 durante transporte marítimo. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 33, 2007, Caxias do Sul.

HIGUCHI, M., SAKAMOTO, H., TANIOKA, S. A. – Study on weld repair through half bead method. IHI Engineering Review. V13, april/1980.

HOMANN, J. S., **Controle Dimensional**: Incerteza de Medições. 1 ed. São José dos Campos: PETROBRAS, 2009. 47 p.

HOULDCROFT, P.; JOHN, R. **Welding and Cutting**: A guide to fusion welding and associated cutting processes. 1st ed. Glasgow: Woodhead-faulkner Limited, 1988. 232 p.

HOWSE, D., SCUDAMORE, R., WOLOSZYN, A., BOOTH, G., HOWARD, R. Development of the laser/MAG hybrid welding process for land pipeline construction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPICATION AND EVALUATION OF HIGH-GRADE LINEPIPES IN HOSTILE ENVIRONMENTES, 1, 2002, Yokahama.

HUDSON, M. G., BLACKMAN, S. A., HAMMOND, J., DORLING, D. V. Girth welding of X100 pipeline steels. In: INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE, 4, 2002, Calgary.

INMETRO, **NIT-DICLA-021**: Expressão da Incerteza de Medição por Laboratórios de Calibração. Brasil, 2012.

KRAUTKRAMER (Austria). **Equipment Catalogue**. Disponível em: <<http://www.krautkramer.com.au/prod01.htm>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

KÜCHLER, M. M. **Aplicação da técnica da dupla camada na soldagem de dutos em operação**. 2009. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Especialidade Engenharia de Inspeção de Equipamentos) - Departamento de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LANCASTER, J. F. **Metallurgy of Welding**. 6th ed. Glasgow: Willian Andrew Publishing, 1999. 433 p.

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas**: Processos. 1 ed. Porto Alegre: Editado pelo autor, 1996. 477 p.

MARINHO, R. P.; POPE, A. M.; TASSINI, A. T.; MENEZES, M. S. Reparo do pino de fixação da base do sistema de queimadores de uma plataforma marítima de produção de petróleo. In: INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING INTERNATIONAL CONGRESS / LATIN AMERICAN WELDING CONGRESS, 2, 2008, São Paulo.

MENEZES, M. S.; SILVA, P. R.; VELLOSO, I. P. S.; MARTINS, F. J. S. Girth welding of pipe API 5CT P110 on onshore pipeline. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, 2011, 2011, Rio de Janeiro.

MENEZES, M. S.; SILVA, P. R.; CAMARGO, J. R. Estudo comparativo da soldabilidade dos tubos API 5CT C110 e API 5CT Q125 para aplicação em junta circunferencial de gasoduto terrestre. In: CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 11, 2011, Porto de Galinhas.

MENEZES, M. S.; SILVA, P. R.; DALPIAZ, G.; MARINHO, R. R. Soldagem de união do tubo API 5L X65 com tubo API 5CT Q125 em junta circunferencial de gasoduto terrestre. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 36, 2010, Recife.

MODENESI, P. J. **Fontes de energia para a soldagem a arco**. 1 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 32 p.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. 1 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2004. 196 p.

MOREIRA, E. V. **Aplicação da radiografia digital utilizando detectores planos para inspeção de soldas de gasodutos e oleodutos**. 2007. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A, Especificação técnica requisitos suplementares à norma N-464 revisão K. BRASIL, 2008.

PROAQT EMPREENDIMENTOS TECNOLÓGICOS LTDA (Brasil). **Relatório de ensaio API 5CT C110**: LB. 9869A/09. Osasco-SP, 2009. 2 p.

PROAQT EMPREENDIMENTOS TECNOLÓGICOS LTDA (Brasil). **Relatório de ensaio API 5CT Q125**: LB. 9869B/09. Osasco-SP, 2009. 2 p.

QUINTANA, M. A., HAMMOND, J. X100 welding technology – past, present and future. In: INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE, 8, 2010, Calgary.

RATNAPULI, R. C. Considerações metalúrgicas de fabricação de aços para tubos API 5L. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 62, 2007, Vitória.

SILVA, A. R.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q. **Aplicação de uma técnica variante da dupla camada na soldagem do aço 5% Cr-0,5% Mo**. Disponível em: <www.infosolda.com.br/download/15dda>. Acesso em: 22 ago. 2011.

TALAŞ, S. The assessment of carbon equivalent formulas in predicting the properties of steel weld metals. **Material & Design**, n. 31, p.2649-2653, dez. 2010. Mensal.

WHITE MARTINS (Brasil). Catálogo de gases especiais. Disponível em: <http://www.whitemartins.com.br/site/catalogo/espectrom_emissao_otica.html>. Acesso em: 31 ago. 2011.

WIDGERY, D. J. Mechanized Welding of Pipeline. **Pipeline World**, Surrey, p.19-22, dez. 2004. Mensal.

YAPP, D., LIRATZIS, T. Development of high productivity girth welding. In: SOUTH-EAST EUROPEAN IIW INTERNATIONAL CONGRESS, 2, 2010, Sofia.