

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE JUNTAS  
TUBULARES SOLDADAS EM AÇO API 5L GRAU B COM BASE NA NORMA  
PETROBRAS N-2301**

**ALEXANDRE AMARAL SGOBBI**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na  
Área de Tecnologia Nuclear – Materiais.

Orientador:  
Dr. Maurício David Martins das Neves

**SAO PAULO**

**2015**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE JUNTAS  
TUBULARES SOLDADAS EM AÇO API 5L GRAU B COM BASE NA NORMA  
PETROBRAS N-2301**

**ALEXANDRE AMARAL SGOBBI**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na  
Área de Tecnologia Nuclear – Materiais.

Orientador:  
Dr. Maurício David Martins das Neves

**VERSÃO CORRIGIDA**  
Versão original disponível no IPEN

**SAO PAULO**

**2015**

*Dedico este trabalho a Deus, pois sem Ele, eu nada seria e nada saberia.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Maurício David Martins das Neves pela orientação e grande oportunidade cedida para realização de um dos meus sonhos,

À minha esposa querida, Nathana Reis, pelo grande apoio, incentivo e entendimento das minhas horas ausente de mente e corpo para estudo e desenvolvimento deste trabalho,

Ao IPEN, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, pela oportunidade e estrutura cedida para realização deste trabalho,

À empresa HEATING COOLING pelo apoio e entendimento das horas de ausência para as aulas, desenvolvimento e conclusão deste trabalho,

A todos do Centro Técnico da LINCOLN ELECTRIC pela disponibilização do espaço, equipamentos, consumíveis e do solícito soldador para soldagem das peças de teste,

Aos meus pais, Newton e Neide, que me concederam a valiosíssima oportunidade de estudo e graduação em engenharia mecânica,

A empresa BRASITEST pela execução do ensaio radiográfico,

A empresa PROAQT pela usinagem das amostras para os ensaios,

E também a todos quanto colaboraram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho, que fique registrada a minha gratidão.

*"Un peu de science éloigne de Dieu, beaucoup de science y ramène."*

*Louis Pasteur*

# **CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE JUNTAS TUBULARES SOLDADAS EM AÇO API 5L GRAU B COM BASE NA NORMA PETROBRAS N-2301**

ALEXANDRE AMARAL SGOBBI

## **RESUMO**

Para a certificação de um procedimento de soldagem, quer seja de alta responsabilidade na soldagem de oleodutos e gasodutos em tubulações de aço carbono ou para um uso rotineiro e diário em fábricas e oficinas, deve ser realizada uma análise profunda dos fenômenos ocorridos no material de base (MB), no metal de adição (MA) e na zona afetada pelo calor (ZAC). Por meio desta análise criteriosa na qualificação de um procedimento de soldagem, o procedimento é liberado para ser utilizado, seja qual for o objetivo final da soldagem. Apenas com a Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS) qualificada em mãos é possível iniciar os trabalhos de soldagem, e caso esta seja seguida integralmente, o sucesso do processo está a um passo de se concretizar.

Para demonstração desta interação existente entre qualificação, análise dos resultados, aprovação dos ensaios e aprovação da especificação, foi desenvolvido este trabalho utilizando o material de base na forma tubular API 5L Gr. B soldado com os processos eletrodo revestido (SMAW) e arame tubular autoprottegido (FCAW-S). Foi utilizada uma junta tubular como exemplo de estudo e qualificação de um procedimento de soldagem baseado na documentação contida na norma da Petrobrás N-2301 e em outros códigos e normas, que regem a qualificação do processo de soldagem utilizado em refinarias e plantas de produção brasileiras.

Foram estudados em conjunto os resultados obtidos por meio de ensaios mecânicos, ensaios não destrutivos e microestruturais. Ambas as Especificações dos Procedimentos de Soldagem preliminares (pEPS), estabelecidas antes do início da soldagem dos dois processos de soldagem, foram aprovadas e qualificadas, satisfazendo as características macro e microscópicas, metalúrgicas e mecânicas da junta soldada.

*Palavras chave: Aço API 5L Gr.B, EPS, soldagem em campo, caracterização microestrutural, documentação técnica de soldagem.*

# **MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF TUBULAR WELDED JOINTS ON API 5L GRADE B STEEL BASED ON BRAZILIAN NATIONAL STANDARD PETROBRAS N-2301**

ALEXANDRE AMARAL SGOBBI

## **ABSTRACT**

A comprehensive analysis of the phenomena occurring in the base metal (MB), filler metal (FM) and the heat affected zone (HAZ) should be conducted to provide the qualification of the welding procedure, either in high-demand carbon steel oil & gas pipelines or standard factory & workshop daily, usual operation.

By means of this thorough welding procedure qualification, the process will be released, whatever the ultimate goal of welding. Only after the welding procedure specification (WPS) is qualified, is possible to start any welding work, and being the norm fully observed, the process is nearly to start successfully.

The present work has been elaborated to demonstrate the interaction of qualification, result analysis, tests and specification approval, by applying the following elements: tubular base metal API 5L grade B welded with Shielded Metal Arc Welding process (SMAW) and self-shielded Flux Cored Arc Welding process (FCAW-S).

A tubular joint was used as sample for a welding procedure qualification studies based on technical documentation specified on Petrobras N-2301, a Brazilian standard, and any others codes and standards that rule welding qualification on refineries & production plants of this company. The results obtained through mechanical testing, non-destructive testing and microstructure were studied together. Both preliminary welding procedure specifications (pWPS) established before the welding of these two welding processes, have been approved and qualified.

The support given by welding qualification record (WQR) allows the joints to be welded in production, and result in reliable weld bead that satisfy the macro & microscopic, metallurgical and mechanical characteristics.

*Keywords: Steel API 5L grade B, WPS, field pipe welding, microstructural analysis, welding documentation.*

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>19</b>
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>20</b>
3.1 A SOLDAGEM DE TUBULAÇÕES PARA TRANSPORTE DE FLUIDOS EM INSTALAÇÕES DE PROCESSO .....	20
3.2 A QUALIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO E A DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA DE SOLDAGEM ....	23
3.2.1 <i>As normas e códigos aplicáveis na soldagem</i> .....	23
3.2.2 <i>A norma Petrobrás N-2301 e a documentação técnica na soldagem</i> .....	25
3.2.3 <i>O código ASME BPVC Seção IX</i> .....	26
3.2.4 <i>A norma API STD 1104</i> .....	27
3.2.5 <i>O código AWS D1.1</i> .....	30
3.2.6 <i>A norma ISO 15614-1</i> .....	31
3.3 O PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODOS REVESTIDOS (SMAW).....	31
3.3.1 <i>Aplicações</i> .....	32
3.3.2 <i>Fundamentos</i> .....	33
3.3.3 <i>Tipos de eletrodos revestidos</i> .....	33
3.3.4 <i>Funções dos revestimentos</i> .....	34
3.3.5 <i>Variáveis da soldagem com eletrodos revestidos</i> .....	36
3.3.6 <i>Equipamentos</i> .....	37
3.4 O PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAMES TUBULARES (FCAW).....	38
3.4.1 <i>Características do processo</i> .....	38
3.4.2 <i>Aplicações</i> .....	39
3.4.3 <i>Parâmetros de soldagem</i> .....	40
3.4.4 <i>Vantagens e desvantagens</i> .....	42
3.4.5 <i>Tipos de arames tubulares</i> .....	42
3.4.6 <i>Equipamentos</i> .....	43
3.5 A COMBINAÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM SMAW E FCAW-S .....	44
3.6 PRINCIPAIS DESCONTINUIDADES NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM SMAW E FCAW .....	46
3.6.1 <i>Trincas</i> .....	46
3.6.2 <i>Trincas induzidas por hidrogênio</i> .....	47
3.6.3 <i>Inclusão de escória</i> .....	51
3.6.4 <i>Porosidade</i> .....	52
3.7 A CARACTERIZAÇÃO MACRO E MICROESTRUTURAL .....	56
3.7.1 <i>Macroestrutural</i> .....	56
3.7.2 <i>Microestrutural</i> .....	57
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>59</b>
4.1 METAL DE BASE (MB) – API 5L GRAU B PSL 1 .....	59
4.2 METAL DE ADIÇÃO (MA) – ELETRODOS REVESTIDOS E ARAMES TUBULARES.....	60
4.2.1 <i>MA – Eletrodos revestidos</i> .....	60
4.2.2 <i>MA – Arame tubular autoprottegido</i> .....	62
4.3 EPS PRELIMINAR E OS PARÂMETROS DE SOLDAGEM PREDEFINIDOS .....	63
4.4 A PREPARAÇÃO E SOLDAGEM DAS PEÇAS DE TESTE.....	65

4.5	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL – EXECUÇÃO DOS ENSAIOS .....	69
4.5.1	<i>Ensaio de Tração</i> .....	69
4.5.2	<i>Ensaio de Dobramento</i> .....	71
4.5.3	<i>Ensaio de Dureza</i> .....	74
4.5.4	<i>Ensaio Macrográfico</i> .....	76
4.5.5	<i>Ensaio Micrográfico – Caracterização Microestrutural</i> .....	76
4.5.6	<i>Ensaio de Impacto</i> .....	76
4.5.7	<i>Ensaio Visual</i> .....	78
4.5.8	<i>Ensaio por Líquido Penetrante</i> .....	79
4.5.9	<i>Ensaio Radiográfico</i> .....	80
4.6	ENSAIOS MECÂNICOS E ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS - CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO .....	80
4.6.1	<i>Ensaio de Tração</i> .....	80
4.6.2	<i>Ensaio de Dobramento</i> .....	82
4.6.3	<i>Ensaio de Dureza</i> .....	83
4.6.4	<i>Ensaio Macrográfico</i> .....	83
4.6.5	<i>Ensaio de Impacto</i> .....	84
4.6.6	<i>Ensaio Visual</i> .....	86
4.6.7	<i>Ensaio por Líquido Penetrante</i> .....	87
4.6.8	<i>Ensaio Radiográfico</i> .....	88
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>90</b>
5.1	ENSAIOS MECÂNICOS E ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS .....	90
5.1.1	<i>Ensaio Visual</i> .....	90
5.1.2	<i>Ensaio por Líquido Penetrante</i> .....	91
5.1.3	<i>Ensaio Radiográfico</i> .....	92
5.1.4	<i>Ensaio de Tração</i> .....	93
5.1.4.1	Peça de teste SMAW-1 .....	93
5.1.4.2	Peça de teste SMAW-2 .....	94
5.1.4.3	Peça de teste SMAW-3 .....	95
5.1.4.4	Peça de teste FCAW-1 e FCAW-2.....	96
5.1.5	<i>Ensaio de Dobramento</i> .....	99
5.1.5.1	Peça de teste SMAW-1 .....	99
5.1.5.2	Peça de teste SMAW-2 .....	101
5.1.5.3	Peça de teste SMAW-3 .....	101
5.1.5.4	Peça de teste FCAW-1 e FCAW-2.....	102
5.1.6	<i>Ensaio de Dureza</i> .....	103
5.1.6.1	Peças de teste SMAW .....	104
5.1.6.2	Peças de teste FCAW .....	105
5.1.7	<i>Ensaio de Impacto</i> .....	107
5.1.8	<i>Ensaio Macrográfico</i> .....	110
5.1.9	<i>Ensaio Micrográfico – Caracterização Microestrutural</i> .....	114
5.1.9.1	Peça de teste SMAW.....	114
5.1.9.2	Peça de teste FCAW.....	119
5.2	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM SMAW E FCAW 127	
5.3	ENSAIOS EXIGÍVEIS PARA QUALIFICAÇÃO DE UM PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM .....	129
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>132</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relatórios exigidos pela N-2301 no Anexo C.....	26
Tabela 2. Quantidade de ensaios mecânicos e ensaios não destrutivos mínimos exigidos para cada norma e código para uma junta chanfrada de 6” e 7,11 mm de espessura .....	28
Tabela 3. Variáveis essenciais, não essenciais e não especificadas por norma para a qualificação do procedimento de soldagem .....	30
Tabela 4. Materiais de alma para eletrodos revestidos .....	34
Tabela 5. Materiais do revestimento e funções .....	35
Tabela 6. Compostos dos eletrodos revestidos de classificação E6010 e E7018 .....	35
Tabela 7. Efeito da influencia dos parâmetros na soldagem com eletrodos revestidos .....	37
Tabela 8. Eficiência de detecção de descontinuidades por ensaio. Tabela A-110 (ASME BPVC V, 2011) .....	47
Tabela 9. Composição química do MB .....	59
Tabela 10. Comparação das propriedades mecânicas da norma e certificado do MB .....	60
Tabela 11. Resumo dos diâmetros de eletrodos utilizados nas amostras .....	61
Tabela 12. Dados da EPS preliminar para o processo SMAW .....	64
Tabela 13. Dados da EPS preliminar para o processo combinado SMAW + FCAW-S .....	65
Tabela 14. Dados da soldagem das peças de teste .....	69
Tabela 15. Dados ensaio de tração. SMAW-1 .....	94
Tabela 16. Dados ensaio de tração. SMAW-2 .....	95
Tabela 17. Dados ensaio de tração. SMAW-3 .....	96
Tabela 18. Dados das amostras de tração. FCAW-1 e FCAW-2 .....	97
Tabela 19. Dados ensaio de tração. FCAW-1 .....	98
Tabela 20. Dados ensaio de tração. FCAW-2 .....	98
Tabela 21. Resumo dos resultados para todas as amostras .....	99
Tabela 22. Dados do ensaio de dureza SMAW-2 com microdurômetro convencional .....	104
Tabela 23. Dados do ensaio de dureza SMAW-3 com microdurômetro instrumentado .....	104
Tabela 24. Dados do ensaio de dureza FCAW com microdurômetro convencional .....	105
Tabela 25. Dados do ensaio de dureza FCAW com microdurômetro instrumentado .....	105
Tabela 26. Dados do ensaio de impacto. Metal de Base API 5L grau B .....	108
Tabela 27. Dados do ensaio de impacto. FCAW-1 e FCAW-2 .....	108
Tabela 28. Dados do ensaio de impacto. SMAW-3 .....	108
Tabela 29. Ensaios mecânicos e propriedades analisadas (CALLISTER, 2010) .....	130

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cenário internacional de infraestrutura de gasodutos. Fonte: PEMAT (2022).....	20
Figura 2. Soldagem em campo, REX Pipeline, EUA. Fonte: Pricegregory .....	21
Figura 3. Localização da tubulação no sistema de ar condicionado. Fonte: o autor. ....	22
Figura 4. Spools do sistema de refrigeração e ar condicionado em refinarias. Fonte: o autor .....	23
Figura 5. Fluxograma típico para fabricação de spools soldados. Fonte: o autor. ....	24
Figura 6. Processo de soldagem com Eletrodo Revestido. Fonte: AWS WELDING HANDBOOK (1991)...	32
Figura 7. Escória do processo SMAW destacada do cordão. Fonte: o autor. ....	36
Figura 8. Esquemático do processo de soldagem com Arames Tubulares. Fonte: LINCOLN (2011). ....	39
Figura 9. Soldagem do gasoduto Gryazovets-Vyborgna – Russia. Fonte: Grazprom.....	44
Figura 10. Nível de hidrogênio na soldagem por SMAW e FCAW. Fonte: GRONG (1997).....	48
Figura 11. Determinação da temperatura de pré-aquecimento em função do carbono equivalente. Fonte: KOU (2002).....	49
Figura 12. Solubilidade do hidrogênio no aço carbono. Fonte: GRONG (1997).....	50
Figura 13. Temperaturas envolvidas durante o resfriamento da poça de fusão. Fonte: GRONG (1997).....	53
Figura 14. Processo de absorção dos elementos químicos nas duas zonas da poça de fusão. Fonte: GRONG (1997).....	53
Figura 15. Concentração de hidrogênio na poça de fusão em função da localização. Fonte: Gedeon e Eagar, (1990).....	54
Figura 16. Forças envolvidas no processo de liberação de uma bolha para a superfície do metal de solda. Fonte: GRONG (1997). ....	54
Figura 17. Tipos de porosidades. (a) porosidades isoladas, (b) porosidades agrupadas, (c) porosidades alinhadas e (d) porosidades do tipo vermiforme. Fonte: N-1738 (2003). ....	56
Figura 18. Diferentes fases presentes na ZAC. Fonte: KOU (2002).....	58
Figura 19. Consumíveis embalados a vácuo utilizados na soldagem com eletrodos revestidos. Fonte: o autor. ....	61
Figura 20. Consumíveis utilizados na soldagem da terceira peça de teste (SMAW-1) com eletrodos revestidos. Fonte: o autor. ....	62
Figura 21. Embalagem hermética de arame tubular utilizado na soldagem das peças de testes. Fonte: Lincoln Electric.....	63
Figura 22. Diagrama de elaboração de EPS por meio da qualificação de um procedimento de soldagem com ensaios. Fonte: ISO 15607 (2003). ....	66
Figura 23. Medição da espessura do tubo nas extremidades e nariz. SMAW-1. Fonte: o autor. ....	67
Figura 24. Utilização do arame espaçador para determinar a abertura de raiz. SMAW-1. Fonte: o autor.....	67
Figura 25. Peça de teste ponteada nas posições 3, 6, 9 e 12 h. SMAW-2. Fonte: o autor.....	67
Figura 26. Soldagem da peça de teste. SMAW-1. Fonte: o autor. ....	67
Figura 27. Soldagem da peça de teste. FCAW-1. Fonte: o autor. ....	68

Figura 28. Dispositivo de rotação e equipamento para soldagem da peça de teste – FCAW-2. Fonte: o autor.	68
Figura 29. Remoção da escória após soldagem – FCAW-2. Fonte: o autor.	69
Figura 30. Dimensões da amostra conforme QW-462.1(b). Fonte: ASME BPVC IX (2010).	70
Figura 31. Amostras para ensaio de tração. (a) SMAW-1 e (b) SMAW-2. Fonte: o autor.	70
Figura 32. Equipamento utilizado para o ensaio de tração	71
Figura 33. Amostras para ensaio de tração. Peça de teste soldada – FCAW-1. Fonte: o autor.	71
Figura 34. Dimensões das guias de dobramento conforme QW-466. Fonte: ASME BPVC IX (2010).	72
Figura 35. Dimensões das amostras extraídas conforme QW-462.3(a). Fonte: ASME BPVC IX (2010).	72
Figura 36. Equipamento utilizado no ensaio de dobramento e amostra durante o ensaio. Fonte: o autor.	73
Figura 37. Amostras para ensaio de dobramento. (a) SMAW-1 e (b) SMAW-2. Fonte: o autor.	73
Figura 38. Amostras para ensaio de dobramento. FCAW-1. Fonte: o autor.	73
Figura 39. Perfil para medição da dureza. Fonte: PETROBRAS N-0133 (2013).	74
Figura 40. Microdurômetro convencional de bancada do fabricante SHIMADZU HMV-2. Fonte: o autor.	75
Figura 41. Microdurômetro instrumentado com microscópio e software para análise. Fonte: o autor.	75
Figura 42. Perfil de localização do entalhe e amostra. Fonte: AWS D1.1 (2010).	77
Figura 43. Amostra com entalhe localizado a 1 mm da ZL. Fonte: o autor.	78
Figura 44. Amostras (ZF, ZL + 1 mm, +5 mm, e MB) antes do ensaio de impacto. Fonte: o autor.	78
Figura 45. Ensaio por Líquido Penetrante em toda a circunferência da junta. SMAW-3 Fonte: o autor.	80
Figura 46. Perfis de junta de topo. Fonte: AWS D1.1 (2010).	85
Figura 47. Limites para aceitação do ensaio radiográfico do código. Fonte: AWS D1.1 (2010).	89
Figura 48. Ensaio visual após escovamento. SMAW-2. Fonte: o autor.	90
Figura 49. Ensaio visual na raiz da peça de teste SMAW-3 (a) e FCAW-1 (b). Fonte: o autor.	90
Figura 50. Ensaio não destrutivo de líquido penetrante. Limpeza e aplicação do líquido penetrante solúvel em água. SMAW-3. Fonte: o autor.	91
Figura 51. Ensaio não destrutivo de líquido penetrante. Porosidades isoladas. SMAW-3. Fonte: o autor.	91
Figura 52. Ensaio radiográfico. Posição 1 a 3, respectivamente “a” até “c”. SMAW-3. Fonte: o autor.	92
Figura 53. Ensaio radiográfico. Poros isolados. SMAW-3. Fonte: o autor.	93
Figura 54. Amostras rompidas fora da ZF e ZAC. SMAW-1. Fonte: o autor.	94
Figura 55. Amostras rompidas fora da ZF após o ensaio de tração. SMAW-2. Fonte: o autor.	94
Figura 56. Formato taça-cone no local do rompimento das amostras. SMAW-2. Fonte: o autor.	95
Figura 57. Amostras rompidas no MB após ensaio de tração. SMAW-3. Fonte: o autor.	96
Figura 58. Amostras com rompimento fora da ZF. FCAW-1. Fonte: o autor.	97
Figura 59. Amostra com rompimento no MS após ensaio de tração. FCAW-2. Fonte: o autor.	98
Figura 60. Amostra após ensaio de tração. (a) Rompimento fratura dúctil (b). FCAW-1 (CALLISTER, 2010). . Fonte: o autor.	99
Figura 61. Amostras após o ensaio de dobramento. SMAW-1. Fonte: o autor.	100
Figura 62. Ensaio de ensaio líquido penetrante após a dobra das amostras. SMAW-1. Sequencia: DF1, DF2, DR1 e DR2. Fonte: o autor.	100
Figura 63. Amostras após o ensaio de dobramento. SMAW-2. Fonte: o autor.	101

Figura 64. Amostras após o ensaio de líquido penetrante. SMAW-2. Fonte: o autor.....	101
Figura 65. Amostras com revelador após o ensaio com líquido penetrante. SMAW-3. Fonte: o autor.....	102
Figura 66. Amostras após dobramento. Na sequencia da figura: DF1, DF2, DR1 e DR2. FCAW-1. Fonte: o autor.....	102
Figura 67. Amostras após o ensaio de líquido penetrante. FCAW-1 (a) e FCAW-2 (b) . Fonte: o autor. ....	103
Figura 68. Gráfico com escala de dureza HV para valores próximos a superfície. SMAW-3. Fonte: o autor. ....	104
Figura 69. Gráfico com escala de dureza HV para valores próximos a raiz. SMAW-3. Fonte: o autor. ....	105
Figura 70. Marcações do microdurômetro instrumentado. (a) MB 40x e (b) ZAC 20x. Fonte: o autor. ....	106
Figura 71. Gráfico com escala de dureza HV para valores próximos a superfície. FCAW-1. Fonte: o autor. ....	107
Figura 72. Gráfico com escala de dureza HV para valores próximos a raiz. FCAW-1. Fonte: o autor. ....	107
Figura 73. Amostras após ensaio de impacto. SMAW-3. Fonte: o autor.....	109
Figura 74. Amostras com entalhe localizado no MS. FCAW-1.....	110
Figura 75. Amostras com entalhe localizado no MB. FCAW-1. Fonte: o autor. ....	110
Figura 76. Macrografia da peça de teste SMAW-1. Indicações de concavidades na raiz e desalinhamento. Fonte: o autor.....	111
Figura 77. Diferentes zonas identificadas na macrografia da peça de teste FCAW-1. Fonte: o autor. ....	112
Figura 78. Ensaio macrográfico com auxilio de microscópio óptico com aumento de 6,3x e escala micrométrica. FCAW-1. Fonte: o autor. ....	112
Figura 79. Ensaio macrográfico a olho nu na amostra embutida com ataque químico. FCAW-1. Fonte: o autor. ....	112
Figura 80. Crescimento epitaxial dos grãos no passe de acabamento sobre o passe de enchimento. SMAW-3. Fonte: o autor.....	113
Figura 81. Crescimento epitaxial dos grãos do passe de acabamento sobre a ZAC. SMAW-3. Fonte: o autor. ....	113
Figura 82. Macrografia com a sequência de passes. SMAW-3. Fonte: o autor. ....	114
Figura 83. Micrografias alinhada do MB próximo à superfície externa do tubo. 5x (a) e 20x (b) . Fonte: o autor. ....	114
Figura 84. Micrografias do MB próximo à superfície interna do tubo. 50x (a) e 100x (b) . Fonte: o autor...	115
Figura 85. Micrografia do metal de base (a), zona fundida (b) e zona afetada pelo calor (c) . Fonte: o autor. ....	116
Figura 86. (a) Microestruturas do cordão de solda. (b) Micrografia da ZL com a fase de grãos grosseiros da ZAC. Fonte: o autor. ....	116
Figura 87. Micrografia do metal de base e início da ZAC com grãos refinados e sua localização no cordão de solda. Fonte: o autor.....	117
Figura 88. Micrografias com aumento de 50x do MB (a) e da fase de refino de grão (b) e suas localizações. Fonte: o autor. ....	117
Figura 89. Inclusões de escória na raiz vista com aumento de 5x (a) e 100x (b). Fonte: o autor.....	118
Figura 90. Macrografia com a sequência de passes. Fonte: o autor. ....	119

Figura 91. Micrografias do MB. 5x (a); 20x (b); 50x (c) e 50x (d) . Fonte: o autor. ....	120
Figura 92. Comparação do tamanho de grão do MB (a) e fase de refino de grão (b) na ZAC com 100x – FCAW-1. Fonte: o autor. ....	121
Figura 93. Macrografia (a) e micrografia (b) em microscópio óptico do MB até passe de acabamento. Fonte: o autor. ....	121
Figura 94. Zona afetada pelo calor: fase com grãos grosseiros. Aumento de 5x, 20x e 100x. Fonte: o autor. ....	122
Figura 95. Esquema de crescimento de ferrita Widmanstatten em grão austenítico. ....	122
Figura 96. ZL entre passe de enchimento e metal de base com aumento de 10x. FCAW-1. Fonte: o autor..	123
Figura 97. Macrografia (a) e micrografia óptica (b). Zona de ligação entre passes. FCAW-1. Fonte: o autor. ....	123
Figura 98. Porta-amostra do microscópio eletrônico com quatro amostras do ensaio de impacto. FCAW-2. Fonte: o autor .....	124
Figura 99. Micrografia da amostra de impacto da ZAC distante 5 mm da ZL. Aumento de 25x. FCAW-2. Fonte: o autor. ....	124
Figura 100. Microestrutura alinhada da amostra de impacto da ZAC distante 5 mm da ZL. FCAW-2. Fonte: o autor. ....	125
Figura 101. Microestrutura alveolar do MB. FCAW-2. Fonte: o autor. ....	126
Figura 102. Microestrutura alveolar fina da ZF. FCAW-2. Fonte: o autor. ....	126
Figura 103. Porosidade encontrada no MS. Aumento de 100x (a) e 200x (b). FCAW-2. Fonte: o autor. ....	127
Figura 104. Poro com dimensão de 800µm da ZF. FCAW-2. Fonte: o autor. ....	127
Figura 105. Exemplo de ensaio macrográfico. FCAW-1. Fonte: o autor.....	131

## LISTA DE ABREVIÇÕES E SÍMBOLOS

API	American Petroleum Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
CCC	Cúbico de Centro Centrado
CFC	Cúbico de Face Centrada
CJP	Complete Joint Penetration
END	Ensaio Não Destrutível
EPS	Especificação do Procedimento de Soldagem
FCAW-G	Flux Cored Arc Welding – Gas Shielded
FCAW-S	Flux Cored Arc Welding – Self Shielded
GG	Grão Grosseiro
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GR	Grãos Refinados
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
ISO	Internacional Standard Organization
MA	Metal de Adição
MB	Metal Base
MIG/MAG	Metal Inert Gas / Metal Active Gas
MS	Metal de Solda
PEMAT	Plano Decenal de Expansão da Malha de Transportes Dutoviário
PEPS	Especificação do Procedimento de Soldagem Preliminar
PROMINP	Programa de Mobilização da Indústria Nacional de Petróleo e Gás Natural
RQPS	Registro da Qualificação do Procedimento de Soldagem
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
SWPS	Standard Welding Procedure Specifications
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
A	Ampère
°C	Grau Celsius
HV	Hardness Vickers
I <sub>c</sub>	Intensidade de corrente
J	Joules
m	Metro
MPa	Megapascal
µm	Micrometro
mm	Milímetro
min	Minuto
DC+	Polaridade Direta
DC-	Polaridade Reversa
U	Tensão em vazio
V <sub>a</sub>	Velocidade de avanço
V	Volt

## 1. INTRODUÇÃO

A finalidade da qualificação de uma especificação de procedimento de soldagem (EPS) é de determinar se a soldagem destinada a uma aplicação específica é capaz de fornecer as propriedades necessárias à junta (ASME BPVC IX, 2010). Com base na qualificação da EPS se obtém um conjunto de variáveis que satisfazem as propriedades especificadas no projeto, sejam elas metalúrgicas ou mecânicas. Durante a qualificação do procedimento de soldagem deve ser documentado um conjunto de limites máximos e mínimos das variáveis contidas no processo.

A fabricação e a montagem de tubulações em diversos processos das refinarias brasileiras ainda é muito dependente de profissionais qualificados. Cerca de 40% das horas de mão de obra despendidas na construção de uma nova planta petroquímica destina-se às atividades relacionadas à tubulação (PROMINP, 2004). Para a construção de tubulações de gás natural terrestre 49% dos custos finais são destinados ao pagamento de mão de obra (YEPP, 2004). Portanto, a implantação de procedimentos de qualificação de soldagem precisos, que poupem tempo e reduzam a necessidade de retrabalhos, é fundamental para o bom desempenho do sistema de tubulações como um todo.

Na fabricação de um componente soldado, existem diversas etapas de início ao fim do projeto, tais como: planejamento, execução e controle da soldagem, registro e controle de qualidade (PETROBRAS N-2301, 2011). Para a elaboração de um novo procedimento de soldagem foram verificadas as exigências em normas e códigos de soldagem, utilizados com maior frequência no Brasil. Baseados nesta análise, foram comparados os ensaios requeridos em cada norma e código. Após a execução de ensaios mecânicos foram realizados estudos para caracterização microestrutural nas diversas áreas da junta, tais como metal base (MB), metal de solda (MS) e zona afetada pelo calor (ZAC) para compreender os fenômenos decorridos ao longo do processo de soldagem.

O material de base utilizado neste estudo foi o tubo aço carbono API 5L Gr.B, soldado na posição 5G com o processo de Eletrodo Revestido (Shielded Metal Arc Welding - SMAW) e Arame Tubular autoprotetido (Flux Cored Arc Welding Self-Shielded – FCAW-S), dois processos usuais na soldagem em campo, em razão do desempenho neste ambiente. Uma soldagem em campo envolve quatro vezes mais tempo, do que uma solda realizada dentro das propriedades da empresa com condições favoráveis (PROMINP, 2004). Portanto, torna-se importante estudar e desenvolver procedimentos

qualificados que atendam as características de soldagem nestes ambientes, evitando retrabalhos e reparos desnecessários para correção de descontinuidades.

A norma N-0133 (2013) é restritiva quanto ao uso do processo de soldagem combinado, SMAW e FCAW-S, utilizado neste estudo. Para esta norma somente é válido o uso do processo de soldagem FCAW-S no material de base aço-carbono em elementos estruturais. O uso deste processo de soldagem em tubulações e equipamentos sujeitos a pressão interna não é permitido. Tal restrição pode tornar-se obsoleta se observados os requerimentos para a qualificação dos diversos procedimentos de soldagem em elementos estruturais ou em juntas tubulares sob pressão.

## 2. OBJETIVOS

**Desenvolver e qualificar** uma EPS utilizando os processos SMAW e FCAW-S de forma combinada no preenchimento da junta visando a soldagem de tubulações de aço carbono API 5L Grau B, com base na documentação técnica de soldagem da norma Petrobras N-2301.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 A soldagem de tubulações para transporte de fluidos em instalações de processo

Ao longo dos anos, a soldagem provou ser um método eficaz de união de metais. Em especial, por sua viabilidade financeira, torna-se ideal para instalações de dutos e tubulações realizadas em campo para o transporte de óleo, gás, derivados de petróleo e outros tantos fluidos. Com a descoberta da camada pré-sal e a entrada em operação de novas refinarias, tais como Rnest-PE em 2014 e 2015, Comperj-RJ em 2016, Premium I e II-CE em 2018 e 2019, novas rotas de dutos no Brasil devem ser urgentemente construídas e as existentes devem ser ampliadas (PETROBRAS PE-2030, 2014).

Segundo o PEMAT 2022 (2014), o Plano decenal de expansão da malha de transportes dutoviário do Brasil até 2022, apresentado em 2014 pelo Ministério de Minas e Energia, o marco-zero de desenvolvimento da malha de gasodutos de abrangência nacional foi a conclusão do gasoduto Brasil-Bolívia e a interligação em Guararema com a malha do sudeste em 2000. Atualmente, o Brasil conta com uma malha de 9.244 km de gasodutos instalados (Figura 1).

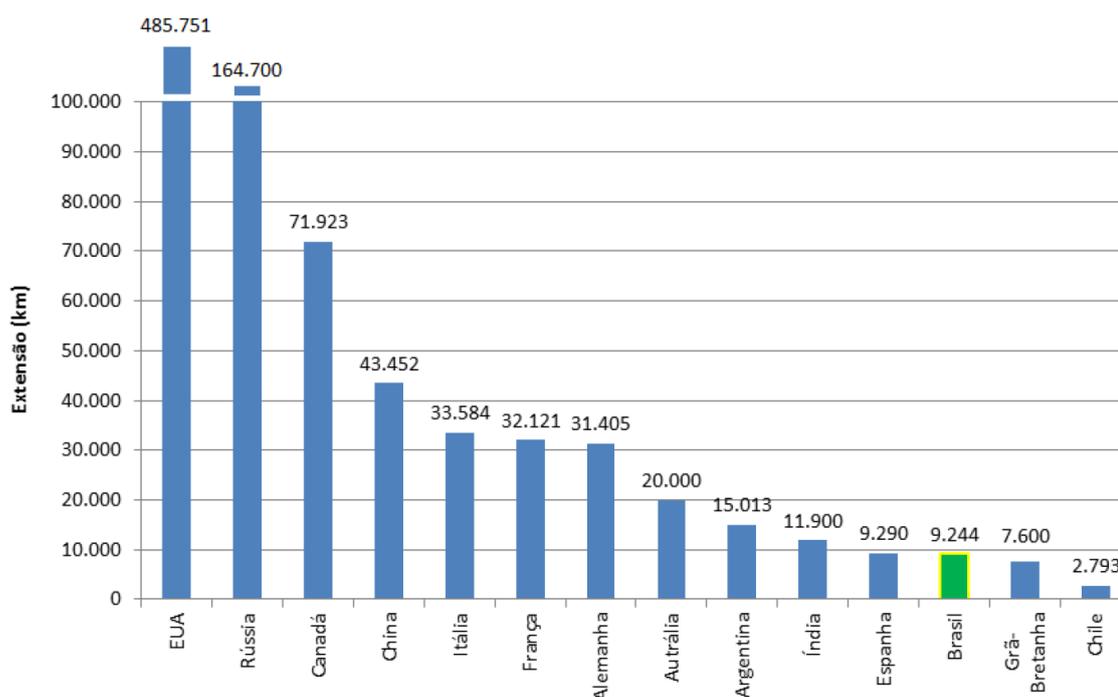


Figura 1. Cenário internacional de infraestrutura de gasodutos. Fonte: PEMAT (2022)

Em 2013 foram ofertados ao mercado nacional 41 milhões de m<sup>3</sup>/dia de gás natural. Segundo o Plano Estratégico (PE 2030), a previsão é que a oferta de gás natural no Brasil chegue a 86 milhões de m<sup>3</sup>/dia até 2020 e 97 milhões m<sup>3</sup>/dia de 2020-2030. Estes números indicam que irá dobrar e quase triplicar a movimentação de gás natural na malha de dutos Brasileira nos próximos 15 anos. Estes dados sugerem uma maior demanda de investimentos expressivos, tanto na rede de gasodutos como na capacidade de processamento existente, o que resultará na expansão das atividades de construção de dutos atual. No Plano Estratégico da Petrobras de 2030 é reconhecido que a infraestrutura de escoamento e processamento da produção atualmente não é suficiente para a demanda crescente.

Para que esta ampliação ocorra, é necessário que a tecnologia envolvida nos processos de soldagem de dutos e tubulações, bem como a produtividade desempenhada por estes processos possam acompanhar o ritmo de crescimento. O processo de automatização na soldagem e o uso de processos mais produtivos são indispensáveis nesta ampliação e devem ganhar cada vez mais espaço.

O processo de soldagem de tubos com eletrodos revestidos (SMAW) é plenamente capaz de atender às exigências de qualidade de soldagem em campo (figura 2) e, apesar de ter sido consolidado e amplamente utilizado na malha de dutos construída até hoje no Brasil e no mundo, tem baixa produtividade quando comparado a outros processos de soldagem semiautomático, tais como a soldagem com arames sólidos com proteção a gás (GMAW) e a soldagem com arames tubulares autoprotetidos (FCAW-S).



Figura 2. Soldagem em campo, REX Pipeline, EUA. Fonte: Pricegregory

Os processos de soldagem GMAW e FCAW, apesar de serem semiautomáticos e dependentes de mão de obra qualificada, possuem baixo custo frente ao uso de equipamentos de soldagem automática circunferencial adotado por muitas montadoras de dutos terrestres para aumento da produtividade em países de primeiro mundo. Os recentes desenvolvimentos na eletrônica dos equipamentos semiautomáticos resultaram em aumento na produtividade e redução da necessidade de retrabalho na junta soldada, proporcionando alta qualidade e baixo custo quando comparado aos equipamentos totalmente automatizados (YEPP, 2004).

Na soldagem de tubulações em campo é necessário que o processo de soldagem possa acompanhar as variáveis existentes neste ambiente. O vento, a sujidade local, altas temperaturas e alta umidade são fatores que influenciam a qualidade final da junta soldada. Um processo de soldagem que pode preencher estes requisitos com a mesma qualidade oferecida pelo processo com eletrodos revestidos, porém com maior produtividade, é o processo de soldagem com arames tubulares autoprotégidos, que não utiliza proteção gasosa, apenas por escória.

Um material muito utilizado nestas aplicações é o tubo aço carbono API 5L Gr.B. Este material é exigido para uso em linhas de refrigeração e sistemas de ar condicionado aplicado a instalações terrestres de refino (figura 3) para o transporte de água gelada. As tubulações neste sistema são pré-montadas em pipe-shops e posteriormente levadas a campo para conclusão da montagem do sistema.

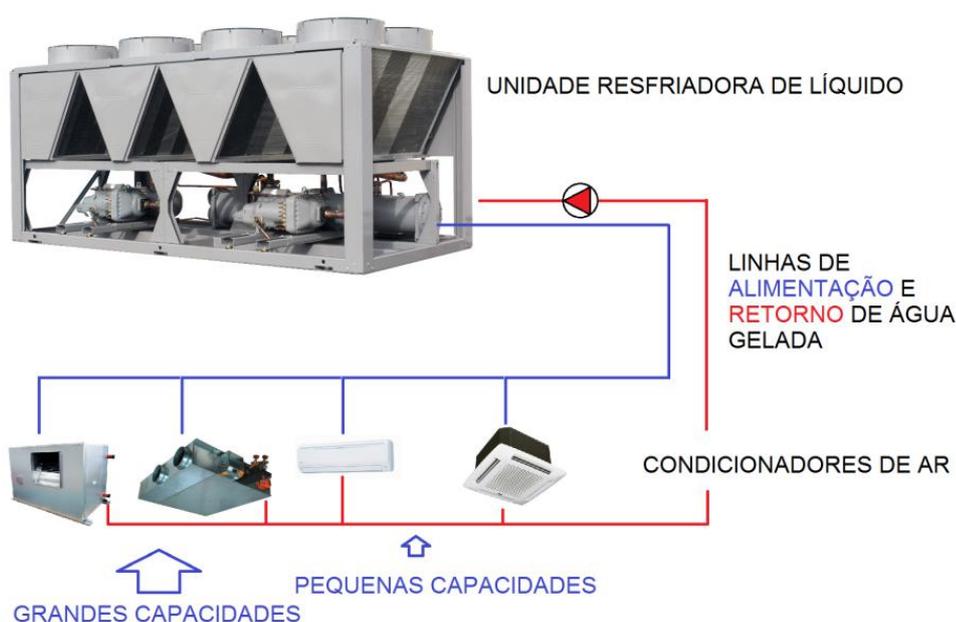


Figura 3. Localização da tubulação no sistema de ar condicionado. Fonte: o autor.

O conceito de pré-fabricação de tubulação em trechos curtos que facilitam a montagem, chamados de “spools”, é uma prática adotada há muitos anos para a instalação de complexos petroquímicos (PROMINP, 2004; PATEL, 2011). O termo “spool”, derivado da palavra “carretel” em inglês, é utilizado para definir pequenos segmentos de tubulação (figura 4). Estes segmentos podem conter trechos retos, curvas, reduções, tês e demais conexões, formando pequenos subconjuntos fabricados. A pré-fabricação da tubulação em pipe-shop aumenta a eficiência do processo de soldagem e a capacidade de produção (HAAS, 2002).



Figura 4. Spools do sistema de refrigeração e ar condicionado em refinarias. Fonte: o autor.

Existem diversas etapas a serem percorridas antes que os spools sejam enviados para o local de montagem. Com base na figura 5 é possível observar um fluxo típico de fabricação de tubulação modular (MOSAYEBI et al, 2012).

## **3.2 A qualificação do procedimento e a documentação técnica de soldagem**

### **3.2.1 As normas e códigos aplicáveis na soldagem**

As diversas normas e os códigos existentes para regulamentar as atividades relacionadas à soldagem são elaborados por comitês. Estes comitês contam com diversos profissionais experientes do setor, fabricantes de consumíveis, fabricantes de equipamentos, órgãos governamentais, universidades e demais instituições relacionadas ao assunto. Os objetivos de um código ou de uma norma quando disponibilizada para o mercado são diversos, porém, entre estes principais objetivos estão: o controle da qualidade de uma junta soldada, a padronização e uniformização de produção, diminuição de acidentes com prejuízo de materiais e vidas, aumento da produtividade, melhora da

eficiência do processo e redução de custos. Portanto, estes documentos devem ser claros e de fácil interpretação.

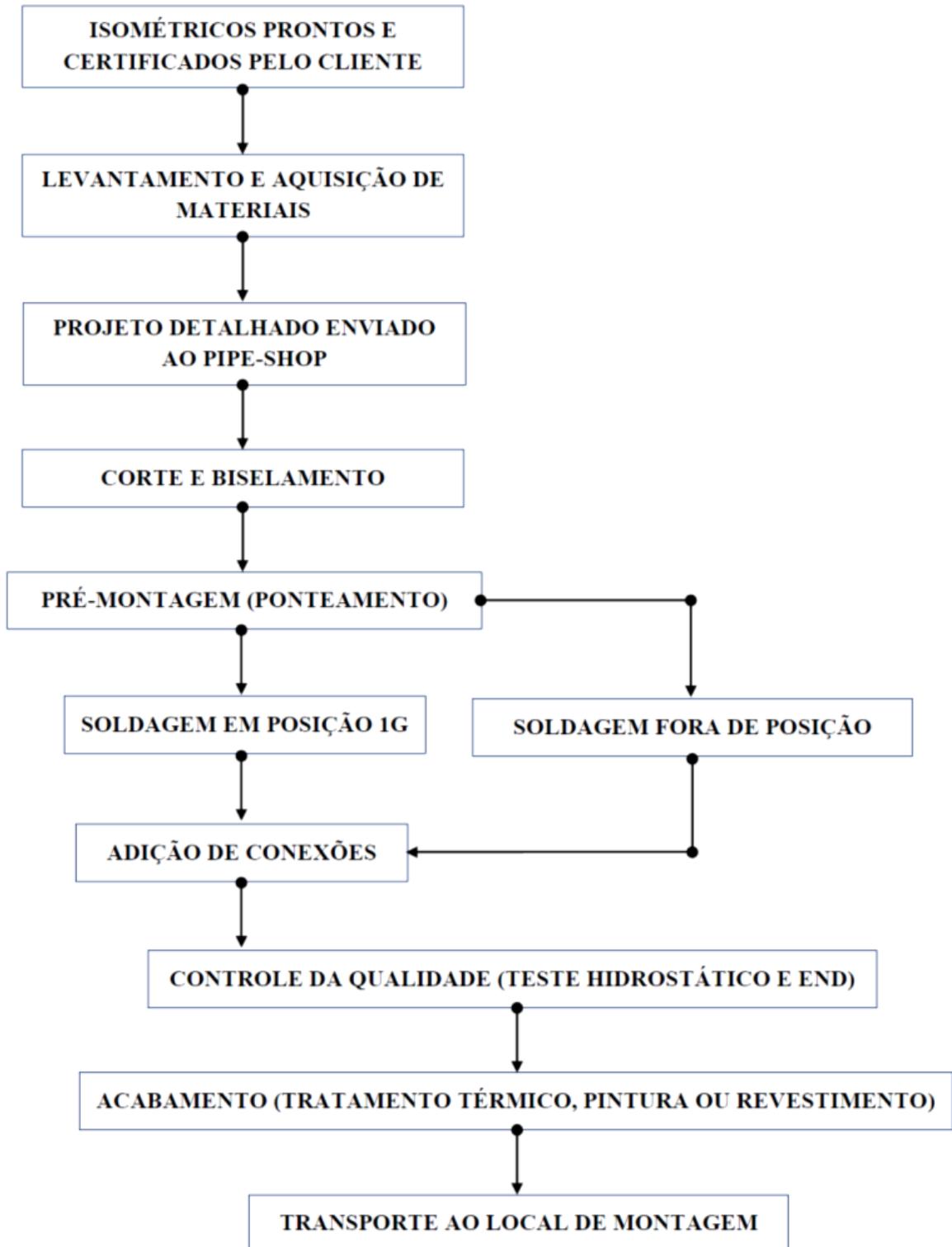


Figura 5. Fluxograma típico para fabricação de spools soldados. Fonte: o autor.

Como resultado do cumprimento às exigências impostas, a junta soldada está a poucos passos de conter um padrão de qualidade assegurado. Porém, a qualificação de um procedimento de soldagem é apenas o início do processo e caracteriza-se por um bom planejamento das atividades. A qualificação por si só não pode garantir o sucesso da soldagem, pois ela deve ser seguida integralmente nos mínimos detalhes (HOLDREN, 2014). É importante lembrar que estes documentos são dinâmicos e devem ser sempre utilizados na última revisão ou de acordo com a data do contrato.

### **3.2.2 A norma Petrobrás N-2301 e a documentação técnica na soldagem**

As condições específicas da norma da Petrobras N-2301 (2011) fixam requisitos técnicos para elaboração da documentação de soldagem empregada no planejamento, execução, controle e certificação dos procedimentos de soldagem. A norma N-2301 (2011) contém somente requisitos técnicos para detalhar a estrutura completa de um Plano de Qualificação de Soldagem, entre outros documentos, e seus conteúdos. Nesta norma adotam-se como referência as demais normas de fabricação, montagem e manutenção, sejam elas normas da Petrobras ou normas internacionais elaboradas por comitês, tais como: ISO, ASME, AWS entre outras. Para que sejam verificados os procedimentos de qualificação, para cada tipo de ensaio e seus critérios de aprovação, devem ser consultados os códigos e normas de soldagem aplicáveis. A etapa de qualificação do procedimento de soldagem é enquadrada no planejamento. Deve ser assegurada que a elaboração esteja de acordo com as normas referenciadas para execução dos ensaios mecânicos, ensaios não destrutivos e ensaios macrográficos.

O Plano de Qualificação de Procedimentos de Soldagem (PETROBRAS N-2301, 2011) exige como conteúdo mínimo uma lista de peças de testes a serem soldadas, um plano de ensaios não destrutivos, um plano de ensaios mecânicos e macrográficos e, para condições específicas, a energia de soldagem. Estes ensaios devem ser realizados baseados em alguma norma aplicável ao projeto, normalmente definida entre contratante e contratada. Os ensaios, por sua vez, também possuem critérios de aceitação especificados pela mesma norma aplicável, assim como comentado anteriormente.

A norma N-2301 (2011), mediante ao anexo C, instrui com detalhes de qual forma um Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem (RQPS) deve ser elaborado, bem como os relatórios dos ensaios não destrutivos e destrutivos anexos indicados na tabela 1.

Tabela 1. Relatórios exigidos pela N-2301 no anexo C

ITEM DA N-2301	TÍTULO DO DOCUMENTO
C-1	CONDIÇÕES GERAIS
C-2	CONDIÇÕES ESPECÍFICAS
C-2.1	REQUISITOS MINIMOS DA RQPS
C-2.2	RELATÓRIO DE REGISTRO DO ENSAIO DE TRAÇÃO
C-2.3	RELATÓRIO DE REGISTRO DO ENSAIO DE DOBRAMENTO
C-2.4	RELATÓRIO DE REGISTRO DO ENSAIO DE IMPACTO
C-2.5	RELATÓRIO DE REGISTRO DO ENSAIO MACROGRÁFICO
C-2.6	RELATÓRIO DE REGISTRO DO ENSAIO DE DUREZA
C-2.7	RELATÓRIO DE REGISTRO DO ENSAIO DE FRATURA

### 3.2.3 O código ASME BPVC Seção IX

A ASME BPVC IX (2010) atualmente é o código mais detalhado para nortear e guiar a qualificação de um procedimento de soldagem. O propósito de uma especificação e qualificação do procedimento de soldagem, elaborado com base no código Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME), é de suprir uma proposta de soldagem adequada às propriedades mecânicas e metalúrgicas requeridas pelo projeto.

No artigo V deste código existem especificações de procedimentos padrões pré-qualificados (SWPS - Standard Welding Procedure Specifications) pela Sociedade americana de soldagem (AWS - American Welding Society). Estas EPS pré-qualificadas são livres para serem utilizadas em qualquer projeto que contenha suas variáveis essenciais dentro dos limites testados e aprovados da EPS. Caso a soldagem seja corretamente executada com os parâmetros dentro dos limites estabelecidos, a solda produzida apresenta resultados conhecidos de ensaios mecânicos e micrográficos. Nesta norma, a EPS é classificada por tipo de processo, grupos de materiais, tipos de consumíveis, espessura da junta qualificada, posição qualificada e outras variáveis.

O uso de procedimentos pré-qualificados resulta em economia de tempo e recursos para uma empresa. Os ensaios exigidos neste código para qualificação de um novo procedimento podem ser descartados quando utilizada este tipo de EPS pré-qualificada. Estando de posse de um procedimento pré-qualificado, é necessário apenas qualificar os soldadores que participam do processo.

Para novos procedimentos de soldagem são exigidos ensaios de acordo com as características da junta. De acordo com as características deste estudo, as quantidades mínimas de ensaios mecânicos e ensaios não destrutivos exigidos nas normas e códigos estão especificadas na tabela 2. Estes ensaios devem ser executados e registrados a fim de integrarem a uma nova especificação de soldagem (EPS). Para obter uma qualificação após a soldagem de uma peça de teste com os parâmetros pré-definidos em uma EPS preliminar, um registro de qualificação de procedimento (RQPS) deve ser preenchido.

O formulário da RQPS disponibilizado pela ASME BPVC IX (2010) item QW-483, para preenchimento das informações da soldagem da peça de teste, ensaios e resultados é condizente com as informações exigidas pela N-2301 (2011), porém, a ASME BPVC IX (2010) não exige a elaboração de um registro de resultados dos ensaios mais detalhado (tração, dobramento, dureza, macrográfico, etc) quando comparada com a norma Petrobras N-2301 (2011).

A qualificação de um procedimento de soldagem em uma posição qualquer, seja ela 1G, 2G, 5G ou 6G, qualifica também todas as demais posições da junta para a EPS final. Igualmente a posição de soldagem, a qualificação do procedimento executada em tubos também qualifica o procedimento para ser utilizado em chapa e vice-versa (ASME BPVC IX, 2010). Deve se atentar que os consumíveis utilizados na soldagem devem respeitar as posições permitidas conforme indicação do fabricante.

#### **3.2.4 A norma API STD 1104**

A norma da associação americana de petróleo (API STD 1104, 2005) é utilizada especificamente para soldagem de tubulações de aço carbono e aços ligados API 5L para transporte de petróleo cru, derivados do petróleo, combustíveis, dióxido de carbono, nitrogênio e demais aplicações de transporte de fluidos.

Para definições e termos, as normas elaboradas pela sociedade AWS são referenciadas como base. Para execução dos ensaios não destrutivos do tipo ultrassom, líquido penetrante, partículas magnéticas e ensaios radiográficos, as normas da ASTM são tomadas como referência.

A especificação do procedimento de soldagem exposto no item 5 da API STD 1104 (2005) difere em alguns aspectos em relação ao código ASME BPVC IX (2010). Ambos os códigos tratam as variáveis essenciais de modo diferente. Para cada processo no código ASME BPVC IX (2010) há a relação de variáveis essenciais, variáveis não

essenciais e variáveis suplementares. Porém, para a norma da API as variáveis essenciais são unificadas e comuns a todos os processos (API STD 1104, 2005).

Tabela 2. Quantidade de ensaios mecânicos e ensaios não destrutivos mínimos exigidos para cada norma e código para uma junta chanfrada de 6" e 7,11 mm de espessura

ENSAIOS (7)		NORMA/CÓDIGO			
		ASME BPVC IX (3)	API STD 1104 (4)	AWS D1.1 (5)	ISO 15614-1 (6)
<b>Ensaio de Tração</b>	Transversal a solda	2	2	2	2
	Transversal Face	2	2	2	2
<b>Ensaio de dobramento</b>	Transversal Raiz	2	2	2	2
	Longitudinal	-	-	-	-
<b>Ensaio destrutivo</b>	Impacto	-	-	1	-
	Macrográfico	-	-	1	1
	Dureza	-	-	-	-
	Nick-break	-	2	-	-
	CTOD	-	-	-	-
	Micrográfico	-	-	-	-
	Corrosão	-	-	-	-
<b>END - Ensaio não destrutivos</b>	Visual	-	-	1	1
	Líquido Penetrante	-	-	-	1
	Part. Magnéticas	(1)	(2)	-	-
	Radiografia	-	-	1	1
	Ultrasonografia	-	-	-	-

#### NOTAS GERAIS

(1) Não são especificados END para qualificação de procedimentos, apenas para qualificação de soldadores e operadores.

(2) Para qualificação do desempenho de soldadores e juntas em produção são exigidos END. Para qualificação do procedimento não há requerimentos de inspeção por END.

(3) ASME BPVC IX item QW-450 para espessura de até 10 mm

(4) API STD 1104 item 5.6 para espessura de até 12,7 mm

(5) AWS D1.1 item 4.5 complementado por tabela 4.2 (d), Item 4.11.3 e tabela 4.14 (a), para espessura de parede de 3,2 a 9,6 mm

(6) ISO 15614-1 item 7 para aços do sub grupo 1.1 sem espessura de parede definida. Os END devem ser realizados após o tempo necessário para a difusão do Hidrogênio.

(7) Ensaio exigido para uma junta tubular de 6" e parede 7,1mm, soldada com SMAW e FCAW-S

Com base na tabela 3 é possível comparar em cada norma e código, quais variáveis são consideradas como essenciais, tomando como referência o processo de soldagem com eletrodos revestidos (SMAW). Algumas destas variáveis podem classificadas como essenciais ou não essenciais quando comparadas entre os códigos e

normas. A definição de variável essencial na qualificação de procedimentos de soldagem, segundo o código ASME item QW-401.1, é particular para cada processo e é definida como “*modificações nas condições de soldagem que afetem as propriedades mecânicas*” (ASME BPVC IX, 2010). Segundo o código da AWS item C4.7, variável essencial é “*toda variável que afeta as propriedades mecânicas do material, seja de natureza química ou mecânica.*” (AWS D1.1, 2010).

Portanto, mediante a estas definições, torna-se indiferente à aplicação final da junta soldada, pois as variáveis que exercem influência profunda nas propriedades mecânicas e metalúrgicas devem ser classificadas como essenciais sendo comuns a todos as aplicações. Entretanto, para cada processo de soldagem é cabível que exista um conjunto de variáveis que são classificadas como essenciais e não essenciais.

Tabela 3. Variáveis essenciais, não essenciais e não especificadas (n/e) por norma para a qualificação do procedimento de soldagem.

VARIÁVEL		NORMA/CÓDIGO			
		ASME BPVC IX (QW-253)	API STD 1104	AWS D1.1	ISO 15614-1
GRUPO DO MATERIAL – API 5L GRAU B – AÇO CARBONO		<i>P-1 G-1</i>	<i>5.4.2.2 <math>\sigma_e &lt; 290 MPa</math></i>	<i>I</i>	<i>1.1 (ISO 15608)</i>
PROCESSO DE SOLDAGEM		<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>
JUNTA	Tipo de chanfro	<i>Não essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>n/e</i>
	Pequenas variações no ângulo do chanfro	<i>Não essencial</i>	<i>Não essencial</i>	<i>Não essencial</i>	<i>n/e</i>
POSIÇÃO	Modificação	<i>Não essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>
MATERIAL DE BASE	Espessura	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>
	Passe > 13mm	<i>Essencial</i>	<i>n/e</i>	<i>n/e</i>	<i>n/e</i>
	Classificação (P-n, Parent n)	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>
MATERIAL DE ADIÇÃO	F-nº (clas geral)	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>
	A-nº (clas quim)	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>n/e</i>	<i>Essencial</i>
	d (diam eletrodo)	<i>Não essencial</i>	<i>n/e</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>
	t (esp passe)	<i>Essencial</i>	<i>n/e</i>	<i>n/e</i>	<i>Essencial</i>
	Classe (R,I,H4,etc)	<i>Não essencial</i>	<i>Não essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>
PRÉ AQUEC	Diminuição de temp	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>

TRAT TÉRMICO	Modificações no ToTo	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>
TÉCNICA	Tempo entre passes	<i>n/e</i>	<i>Essencial</i>	<i>n/e</i>	<i>Essencial</i>
	Ascendente p/ Descendente	<i>Não essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>n/e</i>
	Velocidade de avanço	<i>Não essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Não essencial</i>	<i>n/e</i>
CARACT ELÉT	Polaridade	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Essencial</i>	<i>Não essencial</i>
	Corrente / Tensão (heat input)	<i>Essencial</i>	<i>n/e</i>	<i>Não essencial</i>	<i>Essencial</i>

### 3.2.5 O código AWS D1.1

O código da Sociedade Americana de Soldagem abrange em 8 cláusulas o projeto completo de uma junta soldada (AWS D1.1, 2010). As primeiras cláusulas detalham requisitos gerais e o projeto de uma junta soldada com função estrutural. Nas cláusulas intermediárias do código são detalhados como se obtém a qualificação de uma EPS com os ensaios para validação, a formação de uma RQPS de suporte e a qualificação de soldadores conforme a EPS utilizada. A fabricação do componente, a fase de inspeção e os critérios de aceitação dos ensaios não destrutivos (END) estão nas cláusulas finais. O código AWS D1.1 (2010) contém requisitos claros com muitas ilustrações que atendem não somente as necessidades da indústria americana mas também à indústria mundial. Por este motivo, este código está presente nos diversos projetos de juntas soldadas e é frequentemente exigido em contratos nacionais e internacionais.

A qualificação de um procedimento de soldagem é tratada no item B da quarta cláusula. Neste código existem três tipos diferentes de projetos de juntas para que sejam detalhados quais os ensaios são necessários para a qualificação de uma EPS: junta com penetração completa, junta com penetração parcial e junta de filete.

A junta de topo tubular deste estudo se enquadra no primeiro tipo como junta com penetração completa (CJP – Complete Joint Penetration). Analogamente ao código ASME BPVC IX (2010), para este tipo de junta soldada são exigidos três tipos de ensaios com duas amostras por tipo de ensaio para validação de uma EPS, são eles: ensaio de tração, ensaio de dobramento de face e ensaio de dobramento de raiz, num total de seis amostras.

### 3.2.6 A norma ISO 15614-1

Muito similar ao código da Associação Americana de Engenheiros Mecânicos, porém mais sucinta, a norma Europeia ISO 15614 parte 1 (2004) de autoria britânica, traz orientações e referências para elaboração de especificações e qualificações de soldagem. A soldagem da peça de teste, ensaios mecânicos, faixas das qualificações e registro da qualificação do procedimento de soldagem (RQPS) são alguns exemplos do conteúdo desta norma.

Apesar de sucinta, diferentemente dos demais códigos ASME, AWS e API, na ISO 15614-1 (2004) é solicitado uma maior quantidade de ensaios não destrutivos a serem executados na peça de teste soldada (vide tabela 2). Quando comparada com as demais normas e códigos é possível observar que a norma ISO 15614-1 (2004) contém a maior quantidade de variáveis essenciais para a qualificação de um procedimento de soldagem (vide tabela 3). Esta maior quantidade de variáveis classificadas como essenciais, resulta em maior restrição da especificação do procedimento de soldagem (EPS), obrigando a recorrer à qualificação de novos procedimentos com maior frequência. Por outro lado, a qualificação de um novo procedimento de soldagem por esta mesma norma é mais ampla e flexível do que as demais normas e códigos, contemplando cinco tipos de possíveis qualificações de procedimentos de soldagem, conforme figura 22 do item 4.4.

Na norma ISO 5817 (2003), referenciada na ISO 15614-1 (2004), são determinados os níveis de qualidade para a junta soldada (D, C ou B), baseada em diversos fatores, tais como: projeto da junta, processos subsequentes, modo de carregamento, condições de trabalho, descontinuidades e até mesmo uma análise econômica do processo. O limite de qualidade mais rigoroso (B) especificado na ISO 5817 (2003) deve ser utilizado como critério de aprovação na qualificação do procedimento de soldagem.

Assim como o código ASME BPVC IX (2010), a qualificação de um procedimento de soldagem em uma posição qualquer na ISO 15614-1 (2004), qualifica também todas as demais posições da junta, seja em chapa ou em tubo. Esta proposição é válida para especificações que não exijam os ensaios de dureza e ensaio de impacto.

### 3.3 O processo de soldagem com eletrodos revestidos (SMAW)

O processo de soldagem com eletrodos revestidos, conhecido pela sigla SMAW, proveniente do nome do processo em inglês, *Shielded Metal Arc Welding*,

consiste na coalescência dos metais produzido pelo calor de um arco elétrico mantido entre a ponta de um eletrodo revestido e a superfície do metal de base da junta a ser soldada, como pode ser visto na Figura 6 (AWS WELDING HANDBOOK, 1991).

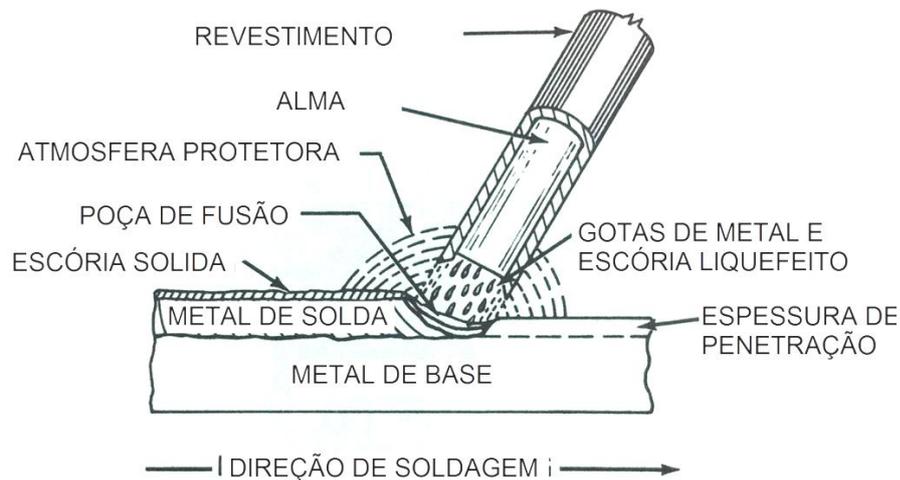


Figura 6. Processo de soldagem com Eletrodo Revestido. Fonte: AWS WELDING HANDBOOK (1991).

### 3.3.1 Aplicações

O processo de soldagem com eletrodos revestidos é utilizado para a soldagem da maioria de tipos de metais e ligas existentes, tais como aço carbono, aço baixa liga, aço inoxidável, ferro fundido, cobre, níquel, alumínio e ligas de alumínio. Há casos onde a soldagem de metais dissimilares também é utilizada. O processo SMAW não é satisfatório apenas na soldagem de metais reativos, como Titânio e Zircônio, e refratários, como Cádmiio, Tântalo e Molibdênio (AWS WELDING HANDBOOK, 1991).

O processo pode ser utilizado nas mais variadas espessuras de metais, de 1,6 a 38 mm e em qualquer posição de soldagem de chapas ou tubulações. Para espessuras inferiores a 1,6 mm o processo pode se tornar inviável, pois a poça de fusão pode atravessar a espessura do material, causando perfurações e não a junção desejada. Para espessuras superiores a 38 mm a produtividade desenvolvida se torna um fator limitante. (AWS WELDING HANDBOOK, 1991).

A facilidade de utilização do processo somado a simplicidade do maquinário exigido são grandes vantagens do processo. Pode ser utilizado tanto para manutenção industrial quanto para produção em linha, fabricação de estruturas, soldagem de cascos de navios, tubulações de transporte de gases e líquidos, corte e até furação. Há possibilidade de uso em ambientes externos com presença de vento, neve e alta umidade.

A soldagem em qualquer posição (plana, horizontal, vertical, sobre cabeça e circunferencial) dá grande versatilidade ao processo e é considerada como outra vantagem. Porém, quando possível e praticável deve ser dada a preferência para soldagem na posição plana, pois é exigido menos habilidade do soldador e podem ser aplicados eletrodos revestidos com maiores diâmetros que, por sua vez, possuem maior taxa de deposição. (AWS WELDING HANDBOOK, 1991; SENAI, 2013).

A procura pela maior produtividade na soldagem moderna é a principal razão para a substituição do processo de soldagem com eletrodos revestidos. A limitada taxa de deposição em virtude da constante troca de eletrodos é considerada sua maior desvantagem (KOU, 2002).

### **3.3.2 Fundamentos**

Todos os processos de soldagem por arco elétrico necessitam de algum tipo de proteção para evitar contaminação com os gases presentes na atmosfera. Na soldagem com eletrodos revestidos, a fusão do revestimento no momento da soldagem é responsável por esta proteção da poça de fusão. A escória líquida, resultante do revestimento fundido, flutua em direção à superfície da poça de fusão para proteger o metal de solda da atmosfera durante a solidificação (FORTES, 2005).

Além destas reações químicas, o oxigênio do ar pode formar uma película de oxido sobre as gotículas durante a transferência para o metal base. Esta reação tem relação com a dimensão da gotícula transferida do eletrodo até a poça de fusão. Quanto menor for a área de contato, e conseqüentemente, menor as reações de oxidação na superfície da gotícula, mais efetiva é a transferência de Mn e Si para a poça de fusão (KOU, 2002).

Mais importante do que o controle de oxigênio e nitrogênio na soldagem com eletrodos revestidos é o controle do hidrogênio no cordão de solda. No item 3.6 deste estudo são comentadas as principais discontinuidades deste processo de soldagem, e, entre elas um tipo nocivo de trinca, a trinca induzida por hidrogênio.

### **3.3.3 Tipos de eletrodos revestidos**

O eletrodo revestido é um condutor metálico que permite a passagem de uma corrente elétrica. É constituído por um núcleo metálico chamado de alma, envolvido por um revestimento composto de matérias orgânicas ou inorgânicas e minerais, com dosagens bem definidas, de acordo com o tipo e classificação do revestimento.

O material composto da alma é, em partes, independente do material de base a ser soldado, podendo ser da mesma natureza do metal de base ou não, uma vez que há a possibilidade de utilizar revestimento que complementem a composição química da alma. Os revestimentos são complexos em sua composição química, pois tem diversas funções que são conseguidas pela mistura dos diversos elementos adicionados. Na tabela 4 são mostrados os materiais da alma do eletrodo mais adequados à soldagem de aços e ferros fundidos. (SENAI, 2013). Para aços carbono os eletrodos são classificados segundo a composição química do revestimento, o tipo de corrente, posição de soldagem e propriedades mecânicas (AWS A5.1, 1991; AWS WELDING HANDBOOK, 1991). As propriedades mecânicas de um eletrodo devem ser no mínimo igual ou superior ao limite de escoamento do material de base (PETROBRAS N-0133, 2013).

O diâmetro de um eletrodo corresponde sempre ao diâmetro de sua alma. Os principais diâmetros encontrados no mercado estão na faixa de 2,5 a 6,4 mm (3/32” a 1/4”), embora existam eletrodos especiais com dimensões diferentes.

Tabela 4. Materiais de alma para eletrodos revestidos

MATERIAL DE BASE	ALMA
Aços de baixo teor de carbono e baixa liga	Aço efervescente (igual ou inferior a 0,1% de C)
Aços inoxidáveis	Aço efervescente ou aço inoxidável
Ferros fundidos	Níquel puro, liga Fe-Ni, f <sup>o</sup> f <sup>o</sup> , aço ou bronze.

Na composição química do revestimento de um eletrodo são utilizados diversos componentes químicos com diferentes funções. Nesta classificação, o elemento com maior teor no revestimento é aquele a ser utilizado como base. A tabela 5 e 6 mostram os tipos de funções para os elementos adicionados ao revestimento, a composição química e função para dois tipos comuns de eletrodos revestidos, E6010 e E7018 (FORTES, 2005).

### 3.3.4 Funções dos revestimentos

As funções do revestimento no processo de soldagem SMAW são elétricas, metalúrgicas e mecânicas. Quando se utiliza um eletrodo sem revestimento e sem nenhum outro tipo de proteção, é impossível se estabelecer um arco elétrico. Porém, com a ação ionizante de alguns elementos como potássio e silicatos contidos nos revestimentos, o gás

liberado da fusão do revestimento é mantido ionizado e é possível manter o arco aberto (AWS WELDING HANDBOOK, 1991).

Tabela 5. Materiais do revestimento e funções

FUNÇÕES DESEJADAS	ELEMENTOS ADICIONADOS
Formadores de Gás	Celulose, dolomita, CaCO <sub>3</sub> , etc
Formadores de Escória e materiais fundentes	Argila, talco, TiO <sub>2</sub> , CaCO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , Fe-Mn, FeO, feldspato, asbestos, etc
Estabilizadores de arco elétrico	TiO <sub>2</sub> , ilmenita, silicatos de Na e K, etc
Desoxidantes	Fe-Si, Fe-Mn, Fe-Cr
Adição de elementos de liga	Fe-Ni, Fe-Mn, Fe-Cr, etc

A presença do revestimento no eletrodo permite a continuidade e consequentemente a estabilidade do arco, mesmo em trabalhos com corrente alternada.

Tabela 6. Composição química dos eletrodos revestidos de classificação E6010 e E7018

ELETRODO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	QUANT	FUNÇÃO	PROTEÇÃO
<b>E6010</b>	Celulose	35%	Formador de Gases	40% H <sub>2</sub> 40% CO + CO <sub>2</sub> 20% H <sub>2</sub> O
	Rutilo	15%	Formador de escória Estabilizador do arco	
	Ferro-Manganês	5%	Desoxidante	
	Talco	15%	Formador de escória	
	Silicato de Sódio	25%	Aglomerante Agente fluxante	
<b>E7018</b>	Carbonato de Cálcio	30%	Formador de Gases Agente fluxante	80% CO 20% CO <sub>2</sub>
	Fluorita	20%	Formador de escória Agente fluxante	
	Ferro-Manganês	5%	Desoxidante	
	Silicato de Potássio	15%	Aglomerante Estabilizador do arco	
	Pó de Ferro	30%	Agente de deposição	

A escória, mais leve que o metal depositado, atua como proteção do banho de fusão não somente contra a oxidação, mas também contra um rápido resfriamento, impossibilitando a criação de trincas pelo diferencial de temperatura e modificando a microestrutura do metal depositado. A escória também proporciona um isolamento térmico que permite a liberação de gases retidos no interior do metal depositado, evitando a formação de poros e minimizando o endurecimento do metal depositado (SENAI, 2013). É possível ver este fenômeno na escória destacada e solidificada na Figura 7.

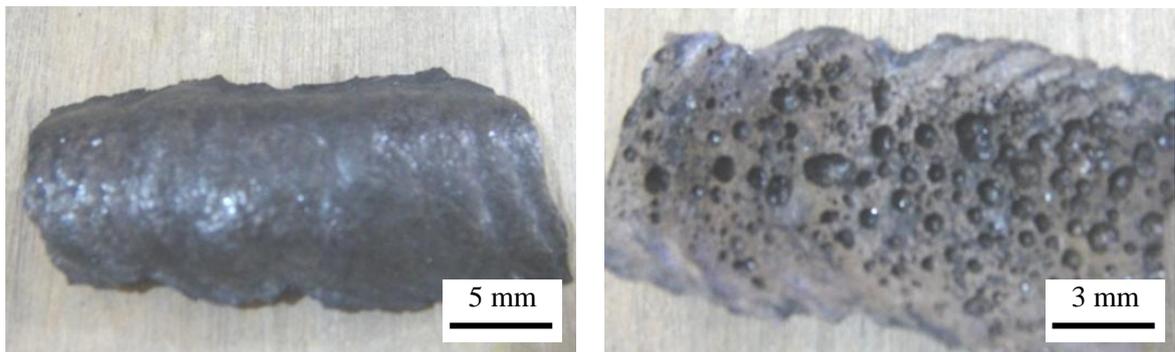


Figura 7. Escória do processo SMAW destacada do cordão. Fonte: o autor.

O revestimento acrescenta a poça de fusão de metal fundido elementos de liga, os quais ficam inseridos na junta e melhoram as propriedades mecânicas do cordão de solda. Os revestimentos com pó de ferro permitem aumentar a produtividade, melhoram a soldabilidade operacional na soldagem e a taxa de deposição. O silício existente no revestimento atua como desoxidante, formando óxido de silício e removendo parte do oxigênio da poça de fusão.

### 3.3.5 Variáveis da soldagem com eletrodos revestidos

As principais variáveis na soldagem com eletrodos revestidos são: tipo da junta, metal de base, metal de adição, posição de soldagem, pré-aquecimento, tratamento térmico após soldagem, características elétricas e técnica de soldagem (ASME BPVC IX, 2010).

O processo de soldagem com eletrodos revestidos possui poucos parâmetros com possibilidade de regulagem se comparado a outros processos de soldagem. Os efeitos de cada parâmetro de soldagem em função das características do cordão de solda são mostrados na tabela 7.

### 3.3.6 Equipamentos

O equipamento para soldagem com eletrodos revestidos é composto por um transformador, transformador-retificador, fonte de energia, gerador, cabos, porta-eletrodo e grampo terra.

Um transformador para soldagem com corrente alternada pode ser monofásico ou trifásico. O transformador é responsável pela transformação da corrente elétrica da rede para corrente de soldagem, pela redução da tensão da rede elétrica disponível para a tensão de soldagem e pelo aumento de intensidade de corrente da rede disponível para a intensidade de corrente de soldagem. Um transformador opera somente com corrente alternada. O transformador-retificador fornece corrente contínua, mas também pode trabalhar corrente alternada, caso um sistema possa desativar o retificador.

Tabela 7. Efeito da influência dos parâmetros na soldagem com eletrodos revestidos onde  $I_c$  representa a intensidade de corrente,  $V_a$  é a velocidade de avanço na soldagem e  $U_o$  é a tensão em vazio. Fonte: SENAI (2013).

EFEITOS E CAUSAS	FUSÃO	FORMA DO DEPÓSITO	ASPECTO DO DEPÓSITO	PENETRAÇÃO	FORMA DA CRATERA	OUTROS DEFEITOS PROVÁVEIS
IC, VA E UO NORMAIS	Normal	Correta	Regular e limpo	Ótima	Circular e Saudável	Nenhum
IC ↓ (BAIXO)	Difícil	Muito convexo	Regular e limpo	Fraca	Deformada mas saudável	Prováveis poros e inclusão de escória
IC ↑ (ALTO)	Agitado	Achatado e deformado	Muito irregular e muitos respingos	Alta	Deformada com poros e trincas	Mordedura, porosidade, eventuais trincas
VA ↓	Normal	Muito convexo	Regular	Alta	Regular profunda	Mordedura
VA ↑	Muito irregular	Convexo e deformado	Muito irregular com estrias alongadas	Fraca	Deformada com poros	Mordedura, porosidade, eventuais trincas
UO ↓	Normal	Convexo	Regular e limpo	Razoável	Regular	Nenhum
UO ↑	Irregular	Achatado e deformado	Muito com muitos respingos	Alta	Regular	Poros se o eletrodo estiver incorreto

A fonte de energia para este processo deve ser do tipo corrente constante, ao invés de tensão constante, em que a corrente de soldagem sofre pouca influência de variação de comprimento e tensão do arco elétrico. A corrente constante é escolhida em razão da dificuldade de controle do comprimento do arco pelo soldador, causando variações na tensão do arco durante o processo de soldagem (AWS WELDING HANDBOOK, 1991).

O porta-eletrodo serve para a fixação e contato para energização do eletrodo. É fundamental que o eletrodo esteja bem posicionado e o porta-eletrodo bem isolado para evitar risco de choque elétrico. O porta-eletrodo deve ser adequado para cada faixa de corrente de soldagem para evitar aquecimento e baixo contato. O peso maior de um porta-eletrodo causa fadiga ao longo do tempo de utilização pelo soldador e acarretando em baixo rendimento do profissional. Portanto, o porta-eletrodo deve ser dimensionado adequadamente.

São dois os cabos flexíveis para a soldagem com eletrodos revestidos: o cabo que transporta a corrente de soldagem para o porta-eletrodo e o cabo de retorno, popularmente chamado de cabo-terra, que faz a interligação da corrente de volta ao equipamento. Estes podem ser feitos de cobre ou alumínio. Os cabos devem apresentar grande flexibilidade, bom isolamento, resistência à abrasão, à sujeira, a faíscas e ao ligeiro aquecimento interno, de modo a cooperar com a facilidade do trabalho em locais de difícil acesso. O diâmetro dos cabos deve estar de acordo com a faixa de corrente, a distância total do circuito e ciclo de trabalho de soldagem que funcionará o equipamento. (SENAI, 2013; AWS WELDING HANDBOOK, 1991).

### **3.4 O processo de soldagem com arames tubulares (FCAW)**

#### **3.4.1 Características do processo**

O processo de soldagem ao arco elétrico com arames tubulares, conhecido como FCAW (Flux Cored Arc Welding) utiliza um eletrodo metálico tubular não sólido, com diversos formatos de fechamento do arame que contém um fluxo no seu interior próprio para a proteção do arco elétrico e do cordão de solda, semelhante ao processo de soldagem com eletrodos revestidos (SMAW). A soldagem com arame tubular pode utilizar ou não gás de proteção.

A soldagem com arames tubulares pode ser automática com a tocha conduzida exclusivamente pela máquina, ou semi-automática, onde o soldador controla a posição, o deslocamento da tocha e o comprimento do arco. Os primeiros usos dos arames tubulares tinham grandes diâmetros e eram restritos a soldagem em posições planas ou horizontais. Após o desenvolvimento de arames de diâmetro menor tornou-se possível a soldagem em todas as outras posições, tais como: sobre-cabeça, vertical e até mesmo circunferenciais.

A soldagem com arame tubular, igualmente a soldagem com eletrodos revestidos (SMAW) apresenta um cordão com acabamento sob uma camada de escória protetora. Esta camada deve ser removida após o termino da soldagem ou para um novo passe sobre a junta. Com base na figura 8 é possível observar um desenho esquemático da soldagem com arames tubulares autoprotégidos (LINCOLN, 2011).

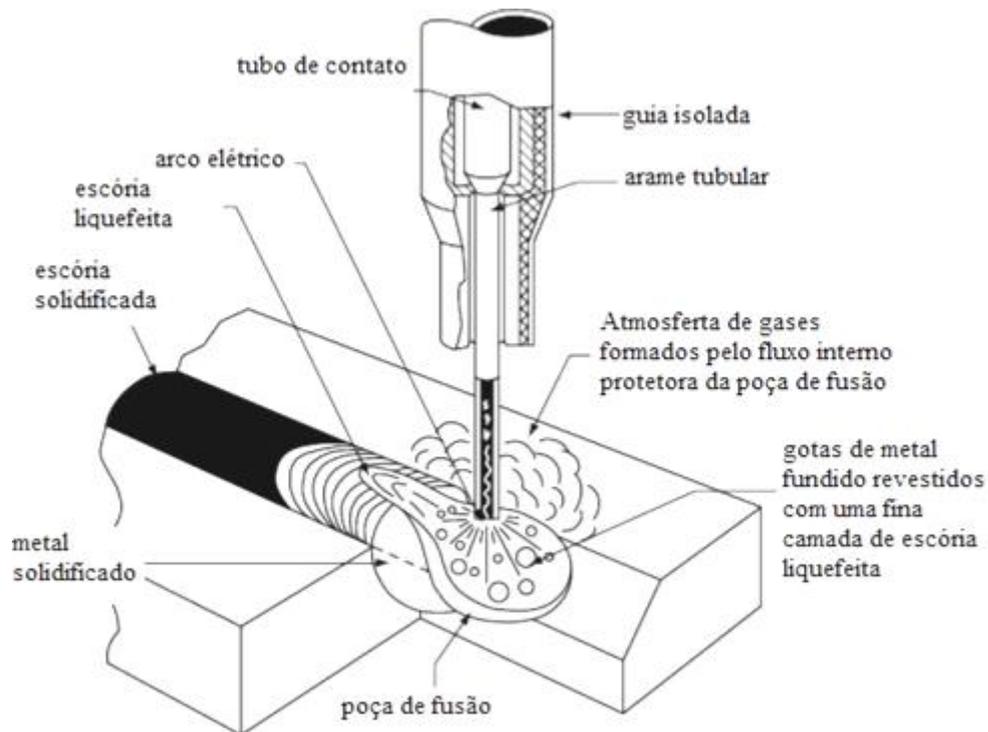


Figura 8. Esquemático do processo de soldagem com Arames Tubulares. Fonte: LINCOLN (2011).

### 3.4.2 Aplicações

A utilização do processo de soldagem com arame tubular tem aumentado em razão de ser um processo mais produtivo quando comparado à soldagem com eletrodos revestidos. A aplicação deste processo é extensa e abrange todo tipo de juntas e materiais que podem ser soldados com eletrodos revestidos. O processo é altamente versátil utilizado tanto na indústria naval e offshore, para construção de plataformas, estruturas na

exploração de petróleo, construção de gasodutos e dutos para transporte de derivados de petróleo, estruturas com chapas de grande espessura e outras tantas aplicações.

O processo de soldagem com arames tubulares autoprotégidos, no qual não é utilizado o gás de proteção, chamado de FCAW-S (Flux Cored Arc Welding Self Shielded) possibilita a soldagem em todas as posições, em chapas ou em tubos, e em todos os tipos de juntas. Há possibilidade de soldagem em locais com ventos de até 48 km/h, segundo as recomendações do fabricante (LINCOLN, 2011).

### **3.4.3 Parâmetros de soldagem**

Os principais parâmetros de soldagem no processo de soldagem arame tubular são: intensidade de corrente, tensão do arco elétrico, stick-out, taxa de deposição e vazão do gás de proteção (quando adicionado ao processo).

A intensidade de corrente neste processo deve ser proporcional à velocidade de alimentação do arame consumível. Com a condição que todos os outros parâmetros permaneçam constantes, a variação da intensidade da corrente implica na variação da taxa de deposição, variação da penetração e proporciona cordões com má aparência se utilizados com diâmetros de eletrodos incompatíveis com a intensidade. Pouca intensidade de corrente pode acarretar em respingos, transferência de gotas de grande diâmetro, e porosidade.

A tensão está relacionada diretamente com o comprimento do arame tubular e com o comprimento do arco elétrico. A variação da tensão influenciará no formato do cordão de solda, a molhagem e caso utilizado em faixas incorretas, pode produzir porosidades. Um arco elétrico longo, produzindo tensões elevadas, causa excesso de respingos e um formato de cordão de solda irregular. Para o uso de arames autoprotégidos (FCAW-S) é ideal trabalhar com arcos menores, evitando a formação de nitretos no metal depositado em função da falta de proteção gasosa externa. Tensões adequadas para cada tipo de arame tubular são normalmente informadas pelo fabricante em catálogos.

O stick-out é definido pela distância entre a ponta do tubo de contato até a ponta do eletrodo exposto. Quanto maior for esta distância, maior será o aquecimento no arame por efeito Joule. Assim como a tensão, o stick-out indicado para cada tipo de arame deve ser atentado segundo as informações do fabricante. Um stick-out inadequadamente maior do que o indicado pode ocasionar em respingos, cordões muito convexos e falta de penetração. A taxa de deposição é diretamente afetada pelo stick-out, pois uma maior

distância aumenta o calor produzido no arame e conseqüentemente, a quantidade de material depositado na junta.

A velocidade de soldagem influencia diretamente o resultado e a qualidade do trabalho de soldagem com arames tubulares. Velocidades excessivas ou velocidades baixas geralmente são responsáveis por mordeduras ou inclusão de escoria. Para evitar estes problemas, deve-se trabalhar com a velocidade de soldagem adequada, permitindo boa penetração na junta e taxa de deposição correta para formação do cordão. A velocidade de soldagem é relacionada com o tipo de consumível, o seu diâmetro e a intensidade de corrente. Devem ser atentadas as características no catálogo fornecedor de consumíveis.

A taxa de deposição é a quantidade de metal fundido por unidade de tempo. Esta variável é relacionada diretamente com a intensidade de corrente, com o diâmetro do eletrodo consumível, da tensão do arco elétrico, do “stick-out” e do tipo do material a ser depositado.

Se utilizado gás de proteção na soldagem com arames tubulares, o processo é identificado como FCAW-G (Flux Cored Arc Welding Gás Shielded). A vazão do gás de proteção condiciona a qualidade do resultado final da soldagem, semelhantemente ao processo de soldagem com arame sólido MIG/MAG (GMAW). Uma vazão baixa de gás de proteção pode permitir a infiltração de ar do atmosfera adjacente, carregado de oxigênio e nitrogênio, causando porosidades e inclusões no metal depositado. A vazão adequada dependerá da distância da tocha à peça, da posição de soldagem, do tipo de gás e do local onde está sendo efetuado o trabalho.

Para o processo de soldagem com arames tubulares e com gás de proteção (FCAW-G) normalmente são utilizadas misturas de argônio (Ar) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ou apenas dióxido de carbono. O tipo de gás influencia tanto na taxa de deposição quanto na intensidade de corrente a ser utilizada. Quando utilizado apenas CO<sub>2</sub> a soldagem é realizada com maiores intensidades de corrente por causa da maior quantidade de oxigênio presente no gás de proteção. No processo de soldagem com arames tubulares autoprotégidos (FCAW-S) utilizados no presente estudo, não é necessário o gás de proteção.

Os modos de transferência na soldagem com arames tubulares com proteção gasosa são semelhantes ao processo de soldagem MIG/MAG (GMAW) convencional. Existem as transferências por pulverização, curto circuito e transferência globular. No processo de soldagem com arames tubulares sem gás de proteção (FCAW-S) a

transferência é feita pelo método globular, com grandes gotas distorcidas na ponta do eletrodo.

#### **3.4.4 Vantagens e desvantagens**

As vantagens e desvantagens deste processo podem ser analisadas tanto se comparado a outros processos de soldagem quanto entre o uso de gás de proteção ou arames autoprotetidos. A economia quando da ausência do gás de proteção, o maior comprimento do arame para alcances maiores em juntas com chanfros inacessíveis para o gás de proteção, a soldagem em campo com ambientes agressivos e a simplicidade do equipamento, são algumas uma vantagem para o uso de arames autoprotetido em relação aos processos de soldagem que necessitam do gás de proteção. A alimentação automática do arame autoprotetido proporciona maior produtividade em relação ao processo de soldagem manual com eletrodos revestidos, suprimindo a principal desvantagem deste processo manual.

As desvantagens do processo, tanto com uso gás de proteção como com arames autoprotetidos, são as mesmas dos processos que utilizam escória como proteção do cordão de solda. Há a necessidade de limpeza e remoção da escória entre passes e ao final da soldagem. As imperfeições do tipo porosidade e inclusão não metálica na solda podem ser encontradas no cordão de solda caso não forem utilizados os parâmetros de soldagem conforme o procedimento aprovado.

#### **3.4.5 Tipos de arames tubulares**

Os arames tubulares disponíveis para soldagem variam de acordo com o diâmetro. Os formatos internos podem ser descritos como: sem costura, de topo, sobreposto, dobra simples, dupla ou múltipla. A seleção do arame tubular para a soldagem de aços carbonos e aços de baixa liga seguem a normatização da Sociedade Americana de Soldagem (AWS 5.20M, 2005), que consideram fatores como soldagem monopasse ou multipasse, uso ou não de gás de proteção, tipo de corrente, posições de soldagem e os resultados das propriedades mecânicas no metal depositado, com ou sem tratamento térmico após soldagem.

No caso da soldagem com arames tubulares sem gás de proteção, denominados autoprotetidos, a fusão do fluxo interno e a solidificação na superfície do metal depositado atuam como proteção, contra contaminação da atmosfera no metal em processo de

solidificação. Este fluxo interno atua como proteção da poça de fusão semelhantemente ao processo de soldagem com eletrodos revestidos (SMAW).

O fluxo interno é composto por elementos formadores de escória, desoxidantes e estabilizadores do arco elétrico. O alumínio, elemento redutor do oxigênio, é muito utilizado atualmente nos arames tubulares autoprotetidos para controle de porosidade (WEI, 2002). Com o arco estável há poucos salpicos e a escoria é formada regularmente resultando em bom acabamento do cordão. A quantidade de fluxo dentro do arame tubular consumível é aproximadamente 15 a 30% do peso total. Os tipos de fluxos existentes que existem atualmente são: composição metálica, rúflica e básica.

Os arames tubulares com fluxo de composição metálica são semelhantes aos arames sólidos, quando usados com correntes baixas a transferência dá-se por curto circuito, quando usados com correntes altas a transferência dá-se por pulverização. A transferência com correntes elevadas permite altas taxas de deposição e cordões de boa forma.

Os arames tubulares com fluxo de composição rúflica a transferência na maioria dos casos é por pulverização. Uma parte do fluxo se funde e forma uma camada de escória na superfície da gota, já a outra parte se decompõe em gases de proteção e a parte restante é transferida para a poça de fusão, formando uma camada de escória na superfície da poça de fusão. Os arames tubulares com fluxo de composição básicos tem transferência por curto-circuito irregular com correntes baixas. Para correntes altas o modo de transferência é globular e não axial. A parte do fluxo não fundida adquire a forma de um dedo projetado do arame em direção ao arco.

#### **3.4.6 Equipamentos**

O equipamento para o processo de soldagem com arame tubular seja para soldagem com arames autoprotetidos (FCAW-S) ou para arames com proteção externa auxiliar (FCAW-G), é o mesmo, pois a diferença está na tocha e no cabo de alimentação. Para a soldagem com arames autoprotetidos não há necessidade de canal para o gás de proteção na tocha. O equipamento é composto de fonte de energia, alimentador de arame, tocha, cilindro de gás e cabo terra. A fonte de energia é semelhante a utilizada no processo MIG/MAG (GMAW), assim como a tocha e o alimentador do arame.

### 3.5 A combinação dos processos de soldagem SMAW e FCAW-S

Frequentemente são utilizados dois tipos de processos na soldagem de uma mesma junta tubular, seja por questões metalúrgicas ou econômicas (LINCOLN, 2013). Pouco difundido no Brasil, o processo de soldagem combinado de tubulações em campo com eletrodo revestido celulósico para raiz e o processo de soldagem por eletrodos tubulares autoprotégidos no enchimento e acabamento, ganha espaço em outros países pela sua produtividade aliada as propriedades mecânicas mantidas ou ganhas, quando comparado à soldagem somente com eletrodos revestidos celulósicos e básicos.

A soldagem de tubulações de aços de alta resistência em campo impõe desafios ainda maiores aos consumíveis e processos de soldagem (figura 9). Para estas aplicações são procurados consumíveis de baixo teor de hidrogênio e alta resistência mecânica. O processo de soldagem com eletrodos revestidos ainda é o mais utilizado para soldagem de juntas tubulares em campo (FERNANDES, 2011). Este processo, apesar de atender as características mecânicas e metalúrgicas, impõe algumas restrições, como o maior tempo total de soldagem e a introdução de altas quantidades de hidrogênio a junta, quando comparado a outros processos de soldagem semiautomáticos. O hidrogênio na junta soldada, acima de determinados valores, pode originar trincas a frio, conforme será comentado mais adiante no item 3.6 deste estudo.

O processo de soldagem com arames tubulares sem proteção gasosa (FCAW-S) possui atualmente, uma alta diversidade de consumíveis especiais para soldagem de tubulações com aços de alta resistência, desde a especificação API 5L grau B até a X80.



Figura 9. Soldagem do gasoduto Gryazovets-Vyborgna – Rússia. Fonte: Grazprom.

Para a soldagem de tubulações de alta resistência, o processo de soldagem com arames sólidos e proteção gasosa (GMAW) também pode ser utilizado, porém deve ser atentado o alto custo associado a este processo na soldagem em campo (LINCOLN, 2013). Diversos autores estudaram a utilização do processo de soldagem FCAW-S em campo para tubulações API X65 a X80 obtendo sucesso na qualificação dos procedimentos e ressaltando a produtividade superior a soldagem com eletrodos revestidos (JUNIOR, 2013). Na soldagem de tubulações em campo, onde a junta está suscetível à alta sujidade do local, ventos e impurezas carregadas pelo ar, o processo de soldagem com proteção de escória obtém vantagem significativa sobre os processos com proteção gasosa. A utilização do processo combinado entre eletrodos revestidos e arames tubulares autoprotetidos, fornece a proteção ideal para estes ambientes e atendem aos requisitos mecânicos e metalúrgicos esperados, assim como a produtividade e tempo total de soldagem.

Um estudo recente desenvolvido pelo fabricante de consumíveis, Lincoln Electric dos Estados Unidos (LINCOLN, 2013), concluiu que uso dos processos de soldagem combinado em tubulações em campo é uma excelente solução. O estudo também conclui que o processo de soldagem com eletrodos revestidos aplicados a raiz e arames tubulares no enchimento e acabamento é economicamente viável para produzir juntas soldadas de qualidade para soldagem em campo (LINCOLN, 2013).

O código ASME BPVC IX (2010) no item QW-200.4 e a norma API STD 1104 (2005) permitem que em uma única especificação de procedimento de soldagem (EPS) contenha mais de um processo ou material de adição, se respeitados os limites de espessura para cada processo previamente qualificado em uma peça de teste.

Para o código AWS D1.1 (2010) é permitido que sejam utilizados dois processos de soldagem que estão qualificados em uma mesma junta soldada, sem a necessidade de requalificação. Porém, assim como nos demais códigos, as variáveis essenciais e seus limites devem ser respeitados.

A norma ISO 15614-1 (2004) permite que a qualificação de dois procedimentos de soldagem seja feita individualmente ou em uma mesma peça de teste. As espessuras depositadas para cada processo devem ser registradas para servirem de base para os limites aplicáveis. Somente a sequencia dos processos empregada na qualificação é válida para a soldagem das juntas em produção, impedindo a inversão de processos.

A norma N-0133 (2013) é restritiva quanto ao uso da combinação dos processos de soldagem SMAW e FCAW-S. Para esta norma somente é válido o uso do processo de soldagem FCAW-S no material de base aço-carbono em elementos estruturais.

O uso deste processo de soldagem em tubulações e equipamentos sujeitos a pressão interna ainda não é permitido. Tal restrição torna-se obsoleta se observados os requerimentos para a qualificação dos diversos procedimentos de soldagem em elementos estruturais ou em juntas tubulares sob pressão, conforme é determinado na norma N-2301 (2011).

### **3.6 Principais discontinuidades nos processos de soldagem SMAW e FCAW**

Segundo o código da ASME (ASME BPVC IX, 2010), uma discontinuidade é uma interrupção da estrutura típica do material, como uma falta da homogeneidade que afetam características mecânicas, metalúrgicas e físicas. Uma discontinuidade não necessariamente é classificada como uma falha (MODENESI, 2001), porém toda falha é originada de uma discontinuidade. Todos os tipos de discontinuidades em juntas tubulares podem ser detectáveis por meio de ensaios não destrutivos. Nos próximos subitens são exemplificadas as discontinuidades mais comuns que podem estar presente nas juntas soldadas pelo de eletrodo revestido (SMAW) e arame tubular autoprottegido (FCAW-S).

#### **3.6.1 Trincas**

Nos diversos critérios de aprovação, a junta soldada deve estar livre de qualquer tipo de trinca, seja ela superficial, subsuperficial, contida no interior do metal de solda ou na Zona Afetada pelo Calor (ZAC). Na ponta de uma trinca é alojada uma tensão hipotética infinita resultante de um concentrador de tensões suficientemente grande para provocar a propagação da falha e conseqüente ruptura do material como resposta ao menor estímulo de tensão aplicada (ANDERSON, 2005).

Dentro do grupo de discontinuidades, qualquer tipo de trinca sempre é classificado como uma falha. A tabela 8 extraída do código ASME para ensaios não destrutivos (ASME BPVC V, 2011) especifica três ensaios não destrutivos (END) altamente eficazes para detecção de trincas, são eles: ensaio por líquidos penetrantes, ensaio de partículas magnéticas e ensaio ultrassônico angular. É interessante observar que um ensaio executado de maneira isolada pode deixar de detectar algumas das principais discontinuidades contidas na solda, porém, a solução desta lacuna está na aplicação de dois ou mais ensaios em uma mesma junta soldada, desta forma, sua integridade pode ser assegurada. O ensaio visual, combinado com o ensaio de líquidos penetrantes e complementado com o ensaio radiográfico em uma junta tubular é capaz de detectar e mensurar a maioria das discontinuidades que possivelmente podem estar presente na junta. Caso o acesso ao interior da tubulação seja possível, são válidas as proposições da tabela 8.

Tabela 8. Eficiência de detecção de descontinuidades por ensaio. Tabela A-110 (ASME BPVC V, 2011)

DESCONTINUIDADES E MÉTODOS DE DETECÇÃO	VISUAL	LÍQUIDO PENET.	PART MAG.	RADIOG .	ULTRASOM ANG.	VISUAL + LIQ. PENET. + RADIOG.
PERFURAÇÃO	ALTA	-	-	ALTA	MÉDIA	ALTA
TRINCAS	BAIXA	ALTA	ALTA	MÉDIA	ALTA	ALTA
REFORÇO EXCESSIVO	ALTA	-	-	ALTA	MÉDIA	ALTA
INCLUSÃO DE ESCÓRIA	-	-	MÉDIA	ALTA	MÉDIA	ALTA
FUSÃO INCOMPLETA	MÉDIA	-	MÉDIA	MÉDIA	ALTA	ALTA
PENETRAÇÃO INCOMPLETA	MÉDIA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
DESALINHAMENTO	ALTA	-	-	ALTA	MÉDIA	ALTA
SOBREPOSIÇÃO	MÉDIA	ALTA	ALTA	-	BAIXA	ALTA
POROSIDADE	ALTA	ALTA	BAIXA	ALTA	MÉDIA	ALTA
CONCAVIDADE CENTRAL	ALTA	-	-	ALTA	MÉDIA	ALTA
MORDEDURA	ALTA	MÉDIA	MÉDIA	ALTA	MÉDIA	ALTA
TRINCAS INDUZIDAS POR HIDROGÊNIO	-	MÉDIA	MÉDIA	BAIXA	MÉDIA	MÉDIA

### 3.6.2 Trincas induzidas por hidrogênio

A soldagem de tubulações de aço carbono com rápida velocidade de resfriamento é suscetível ao aparecimento de trincas induzidas por hidrogênio (API STD 1104, 2005). Tais trincas podem ocorrer nas temperaturas próximas da ambiente após alguns minutos, horas ou até dezenas de horas após a soldagem de uma junta, em especial na ZAC (GRONG, 1997). Por esta razão, é obrigação normativa que o tempo para aplicação dos ensaios não destrutivos em materiais suscetíveis a trinca induzida por hidrogênio seja suficiente após a soldagem para maximizar a chance de detecção deste tipo de falha (ISO 15614-1, 2004; API STD 1104, 2005).

A justificativa da importância do estudo deste tipo de descontinuidade nos processos de soldagem com eletrodos revestidos e arame tubular, frente a outros processos, pode ser representada na Figura 10 com o nível de hidrogênio nos processos de soldagem SMAW, FCAW, GTAW e GMAW. As principais fontes para inclusão de hidrogênio no metal de solda são atribuídas à composição química do revestimento, umidade presente na superfície do consumível ou umidade presente no ar ambiente aderida fortemente ao substrato do eletrodo (GRONG, 1997).

Dois métodos de controle são propostos na literatura para evitar o aparecimento de trincas induzidas por hidrogênio (KOU, 2002). O primeiro deles dá-se pelo controle dos parâmetros de soldagem e o outro por meio do uso de processos e materiais adequados. Para o controle por parâmetros de soldagem, o cálculo do carbono equivalente, juntamente com a temperatura de pré-aquecimento é utilizado como eficiente método, vide Figura 11.

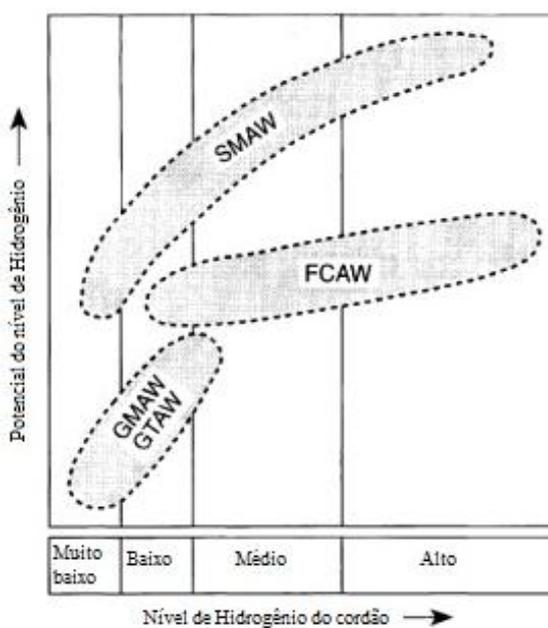


Figura 10. Nível de hidrogênio na soldagem por SMAW e FCAW. Fonte: GRONG (1997).

Segundo a norma da API (API STD 1104, 2005), para que ocorra uma trinca induzida por hidrogênio, três condições devem ser satisfeitas simultaneamente: a presença de hidrogênio na solda, o desenvolvimento de uma microestrutural suscetível ao aparecimento de trincas e tensões de tração agindo no cordão de solda. Como recomendação, para prevenir este tipo de descontinuidade uma das três condições deve ser eliminada ou minimizada. Para o código AWS D1.1 (2010), as condições para que uma trinca por hidrogênio ocorra, são semelhantes as das norma API STD 1104 (2005).

Segundo a literatura (GRONG, 1997), a origem da fragilização por hidrogênio é dependente de cinco mecanismos principais: tipo de estrutura cristalina, tipo de microestrutura, taxa de tensão aplicada, temperatura e tempo. Portanto, são válidas as proposições estipuladas nos códigos e normas para controle deste tipo de trinca.

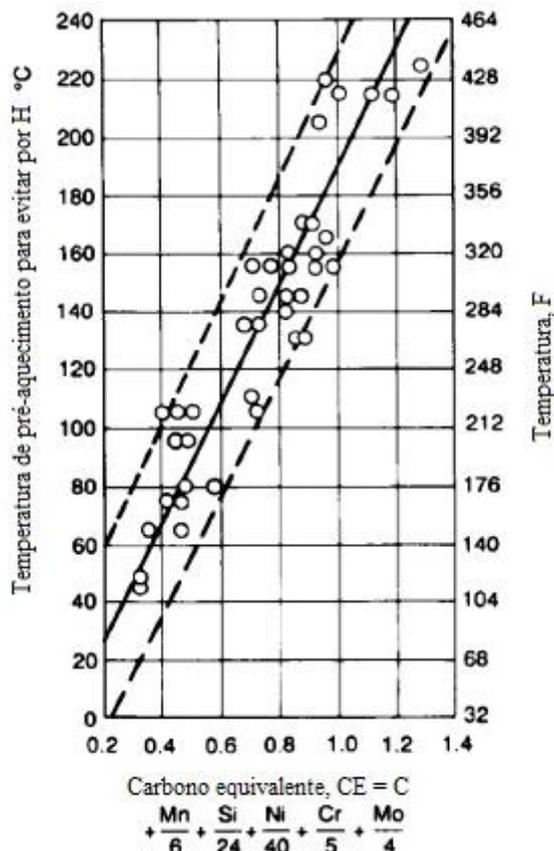


Figura 11. Determinação da temperatura de pré-aquecimento em função do carbono equivalente. Fonte: KOU (2002).

No momento da soldagem, a poça de fusão pode receber o hidrogênio proveniente da umidade do ambiente, da umidade contida no revestimento do eletrodo, no arame tubular, óleos, graxas, e outras sujidades presentes na junta (GRONG, 1997). Caso não haja tempo suficiente dentro da faixa de temperatura adequada (Figura 12) para a dissolução do hidrogênio, a poça de fusão armazena o hidrogênio. Estas moléculas se difundem ao longo do cordão de solda e para a ZAC, podendo originar as trincas. (FORTES, 2005).

De acordo com a N-0133, aços-carbono com teores de carbono igual ou inferior a 0,20% e carbono equivalente igual ou inferior a 0,44%, normalmente apresentam boa soldabilidade e não necessitam de pós-aquecimento para controle do hidrogênio difusível. Já a normatização para eletrodos revestidos da Sociedade Americana de Soldagem (AWS A5.1, 1991) limita este percentual a 0,30%.

A eliminação por completo do hidrogênio no momento da soldagem com SMAW e FCAW é muito difícil. Há uma sensível redução da introdução do hidrogênio na

poça de fusão utilizando-se de consumíveis com baixo teor de hidrogênio normalizado pela AWS, comuns no mercado atualmente.

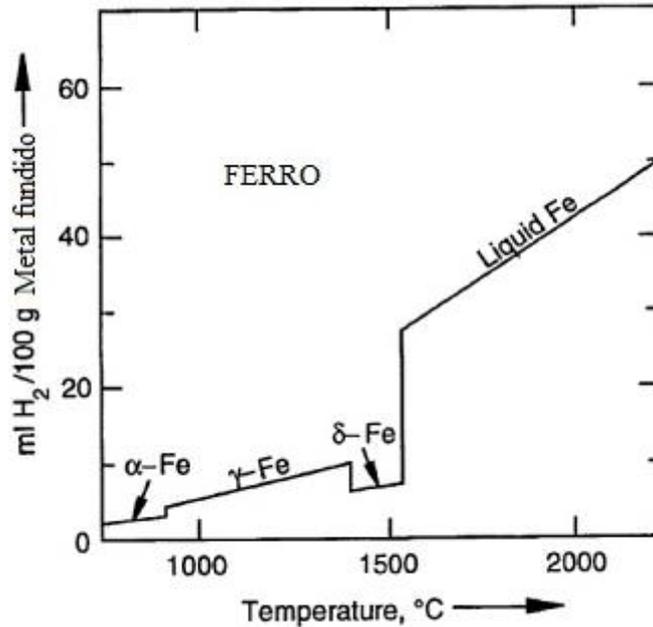


Figura 12. Solubilidade do hidrogênio no aço carbono. Fonte: GRONG (1997).

Caso não haja a possibilidade de uso dos eletrodos com baixo teor de hidrogênio, é possível qualificar um procedimento que minimize a formação de microestrutura suscetível a trincas. Segundo a norma da API (API STD 1104, 2005), o controle da dureza com valor máximo de 350 HV na ZAC, o uso da energia de soldagem adequado que imponha uma menor quantidade de calor à junta e o pré-aquecimento são recomendações para minimizar o aparecimento de trincas induzidas por hidrogênio.

Por gerar maior produtividade na soldagem de tubulação, a técnica descendente é a mais utilizada para soldagem de juntas de tubulação com espessura de parede até 25 mm. Porém, quando há uma solidificação rápida da poça de fusão, que ocorre em tubulações com maior espessura de parede, há o risco de ocorrência de trincas por hidrogênio. Para proporcionar juntas com boas características metalúrgicas e mecânicas na soldagem de tubulações mais espessas, a técnica de progressão ascendente é a mais indicada. (FORTES, 2004b).

### 3.6.3 Inclusão de escória

Segundo a API STD 1104 (2205) item 9.3.8, a inclusão de escória é definida como *um sólido não metálico alojado entre o metal de solda e o metal de base*. Inclusões de escória alongadas ou contínuas são normalmente encontradas na linha de fusão. Inclusões de escória isoladas são irregulares e podem ser encontradas em qualquer local da solda. A máxima dimensão da inclusão de escória sempre é considerada pelo comprimento total. Para que a descontinuidade do tipo inclusão de escória seja considerada uma falha em tubulações de diâmetro externo superior a 60 mm (2”), uma das oito condições estipuladas deve estar presente:

- Inclusão alongada superior a 50 mm;
- Comprimento das inclusões alongadas somadas em um trecho de 300 mm maiores do que 50 mm;
- Inclusões alongadas com largura superior a 1,6 mm;
- Dimensão das inclusões isoladas somadas em um trecho de 300 mm maiores do que 13 mm;
- Inclusões isoladas com largura superior a 3,0 mm;
- Mais de quatro inclusões isoladas de até 3,0 mm em um comprimento de 300 mm da solda;
- Comprimento das inclusões alongadas e isoladas superior a 8% do comprimento total da solda.

Para o código ASME BPVC IX (2010) a definição da descontinuidade do tipo inclusão de escória é muito semelhante à norma do Instituto Americano do Petróleo API STD 1104 (2005), dita como um material sólido não metálico aprisionado no metal de solda ou entre o metal de solda e o metal de base. Para o código AWS D1.1 (2010) o tipo de descontinuidade inclusão de escória é tratada somente como um critério de aprovação para os ensaios não destrutivos. Esta imperfeição não é mencionada no código da Sociedade Americana de Soldagem.

Segundo a norma ISO (ISO 5817, 2003), que determina níveis de qualidade diferenciados para diversos trabalhos de soldagem, nos níveis de qualidade D e C as inclusões sólidas são permitidas em 4 mm e 3 mm na altura respectivamente. Porém, para

o nível de qualidade B há uma limitação em 2 mm para a máxima altura de alguma inclusão sólida e máximo comprimento de 25 mm.

### 3.6.4 Porosidade

A porosidade é um tipo comum de descontinuidade que frequentemente é observada em juntas soldadas. São diversas as causas para o aparecimento de porosidade na solda, porém deve se atentar que para cada processo de soldagem há causas específicas para o aparecimento deste tipo de descontinuidade. Neste estudo abordam-se somente o processo de formação básico, as causas e as soluções deste tipo de descontinuidade para os processos de soldagem SMAW e FCAW-S.

Durante a soldagem, altas temperaturas são envolvidas na coluna do arco elétrico bem como na poça de fusão. Na Figura 13 é possível observar algumas temperaturas na soldagem com gás de proteção. A poça de fusão pode ser separada em duas partes: quente e fria. Com a fusão do metal consumível (eletrodo revestido ou arame tubular), após o contato com o arco elétrico, o MA é imediatamente depositado na porção quente da poça de fusão e é iniciado o processo de absorção de elementos (GRONG, 1997).

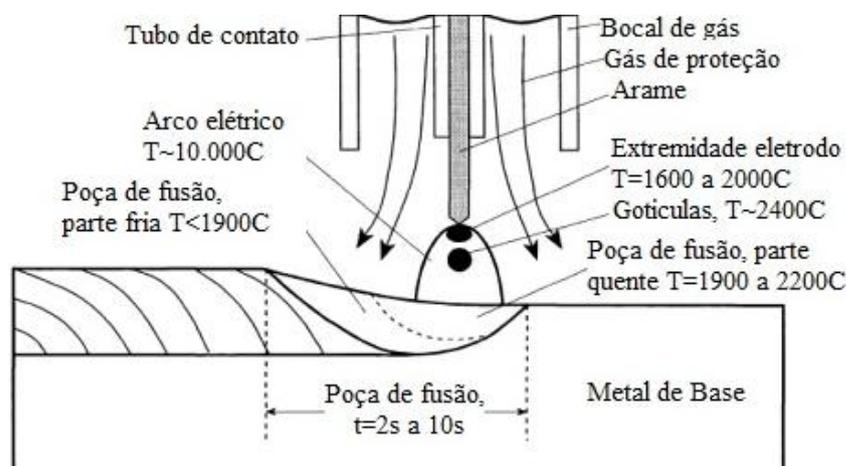


Figura 13. Temperaturas envolvidas durante o resfriamento da poça de fusão. Fonte: GRONG (1997).

Durante o resfriamento da poça de fusão, a supersaturação aumenta rapidamente por conta da diminuição da solubilidade dos elementos com a queda de temperatura do metal depositado (figura 14), resfriando a poça de metal líquido até a sua

solidificação. Este sistema de equilíbrio químico formado na solda rejeita certa quantidade de elementos da fase líquida da poça de fusão (GRONG, 1997). Durante a solidificação, caso ainda hajam gases aprisionados na solda que não tenham sido rejeitados para a atmosfera, podem ficar aprisionados na forma de poros.

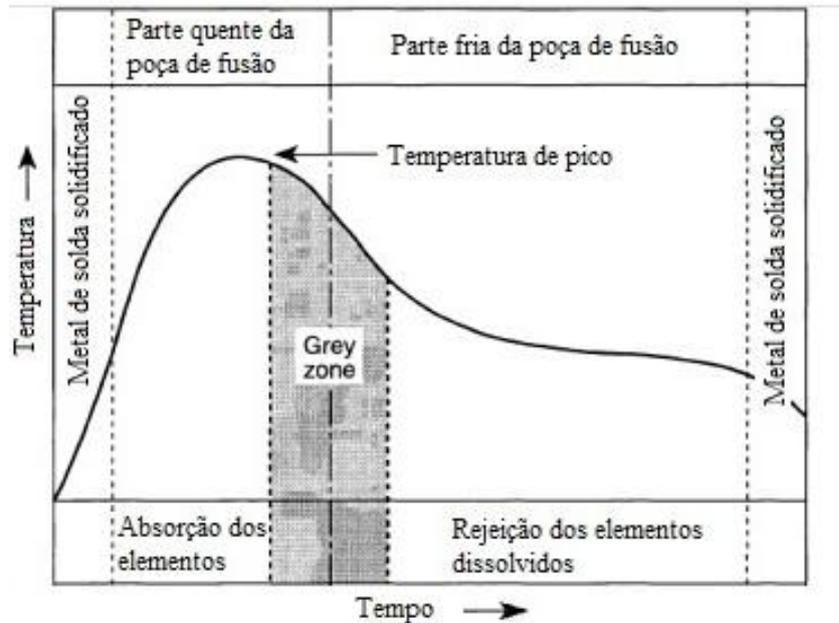


Figura 14. Processo de absorção dos elementos químicos nas duas zonas da poça de fusão. Fonte: GRONG (1997).

Segundo a literatura (GRONG, 1997; KOU, 2002), a interface sólido/líquido é o local preferencial para o alojamento do hidrogênio. Na Figura 15 proposta por Gedeon e Eagar (1990) é ilustrada esta afirmação. A presença do hidrogênio no metal de solda é um fator contribuinte para formação do defeito chamado *trinca induzida por hidrogênio*, tipo de descontinuidade comentada no item 3.6.2. Por este motivo, uma importante recomendação para a redução da probabilidade ao aparecimento de porosidade no metal de solda, propõem que a junta deve ser cuidadosamente limpa contra umidade, ferrugem, óleos, tintas e outros tipos de contaminantes (LINCOLN, 2011). Este procedimento evita a nucleação de bolhas de hidrogênio na interface sólido/líquido por contaminantes na superfície da junta, uma vez que grande parte destes contaminantes é composta por hidrocarbonetos.

Com base nas equações da taxa de crescimento das bolhas formadas na interface sólido/líquido propostas por (GRONG, 1997) é possível verificar se a força de

empuxo exercida pelo gás no interior da bolha supera a tensão superficial resultando na liberação da bolha da interface sólido/líquido.

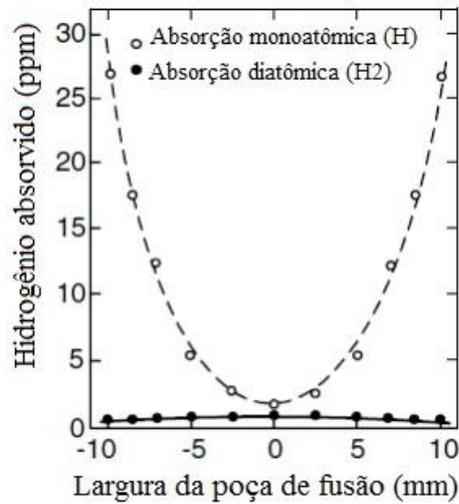


Figura 15. Concentração de hidrogênio na poça de fusão em função da localização. Fonte: Gedeon e Eagar, (1990).

Na Figura 16 é possível observar estas forças em ação, onde  $p_a$  é a pressão ambiente,  $r_g$  é o raio da bolha e  $p_g$  é a pressão total do gás interno a bolha.

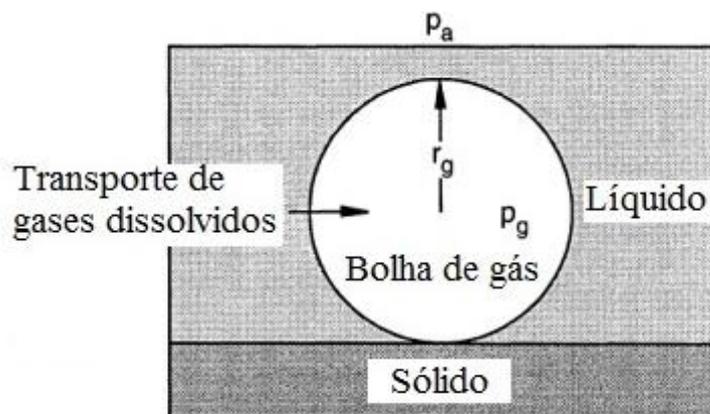


Figura 16. Forças envolvidas no processo de liberação de uma bolha para a superfície do metal de solda. Fonte: GRONG (1997).

Segundo a norma API STD 1104 (2005) porosidade é definida como um gás aprisionado na poça de fusão solidificada sem que este tivesse oportunidade para ser

conduzido até superfície e solto. Não somente esférica, a porosidade por ser alongada ou de formato irregular do tipo vermiforme.

Porosidades do tipo isoladas ou individuais, são apenas classificadas como defeitos, pela norma API STD 1104 (2005), se possuírem dimensão superior a 3 mm ou a 25% da dimensão da parede da junta. Porosidades do tipo agrupadas, encontradas no passe de acabamento, são consideradas como defeito caso o agrupamento seja superior a 13 mm ou comprimento total dos agrupamentos em 300 mm de cordão de solda exceda 13 mm. O terceiro tipo de porosidade citada na norma é a do tipo cavidade alongada na raiz. Este tipo de porosidade pode ser encontrado no passe de raiz e será considerado um defeito caso seja superior a 13 mm ou superior a 50 mm em um comprimento de 300 mm. Caso haja alguma cavidade com dimensão de 6 mm separadas por uma distancia inferior a 50 mm também será considerada uma falha. De modo geral, somadas as dimensões de todas as cavidades no passe de raiz, não pode ser excedido a 8% do comprimento total da solda. Há padrões de distribuição apresentados na norma API STD 1104 (2005) que devem ser utilizados como critério de aceitação adicional aos três tipos de porosidades apresentadas acima.

A norma ISO 5817 (2003) caracteriza a porosidade em quatro tipos: porosidade uniformemente distribuída, porosidade localizada, porosidade linear e porosidade vermiforme ou cavidades alongadas. São estabelecidos três condições para as imperfeições classificadas como porosidades ou “poros de gás”. Os limites são estabelecidos de acordo com o nível de qualidade imposto ao projeto (B, C ou D). Em todos os três níveis a porosidade, ou o poro de gás, é restrito em área, dimensão relativa e dimensão para um único poro. As permissões de porosidade em área projetada variam entre 5 a 1%, a depender da quantidade de passes na solda. Para as dimensões relacionadas à espessura da junta ficam limitadas entre 40 a 20% da espessura do cordão. Já para um poro considerado isolado as máximas dimensões estão entre 5 e 3 mm. No nível de qualidade mais rigoroso, o agrupamento de poros não pode ultrapassar a 2 mm ou 30% do comprimento transversal da solda.

Mediante a tabela 6.1, item 8 do código AWS D1.1 (2010), se estabelece o critério de aceitação para porosidades contidas em juntas tubulares de penetração completa. Porosidades do tipo vermiformes no sentido transversal a superfície da solda, também chamada no código de “*piping porosity*”, podem ocorrer no máximo em um intervalo de no mínimo 100 mm (4”) no comprimento do cordão de solda e o diâmetro máximo desta porosidade não pode ser superior a 2,5 mm.

Com base na Figura 17, extraída da Norma Petrobras N-1738 (2003), é possível observar os tipos de porosidades mais comuns presentes no metal de solda conforme comentados anteriormente.

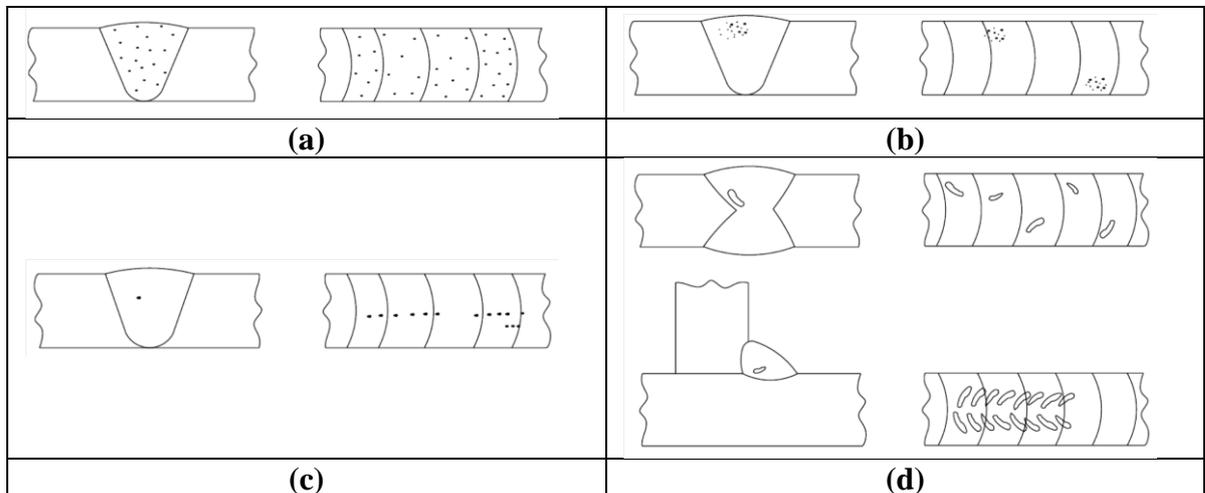


Figura 17. Tipos de porosidades. (a) porosidades isoladas, (b) porosidades agrupadas, (c) porosidades alinhadas e (d) porosidades do tipo vermiforme. Fonte: N-1738 (2003).

### 3.7 A caracterização macro e microestrutural

#### 3.7.1 Macroestrutural

Este importante ensaio permite a observação e detecção de possíveis discontinuidades presentes no cordão de solda. Neste ensaio o cordão de solda é visto por um corte transversal, a olho nu ou com pequenos aumentos de até 50x com ou sem ataque químico (ISO 17639, 2003), possibilitando que dimensionamento dos reforços de face e raiz, localização de pontos com falta de fusão, falta de penetração, possíveis inclusões de escória, trincas no MS ou na ZAC e outras discontinuidades.

A macrografia é um dos ensaios solicitados pelo código AWS D1.1 (2010) da Sociedade Americana de Soldagem para qualificação do procedimento de soldagem. As amostras que são analisadas por ensaio macrográfico devem ser atacadas quimicamente para propiciar boa e clara definição das zonas da solda (AWS D1.1, 2010). Os critérios de aprovação para este ensaio estão descritos no item 4.6.4 deste estudo.

O procedimento de soldagem é qualificado segundo a norma ISO 15614-1 (2004), se as imperfeições na peça de teste soldada estiverem dentro dos limites de qualidade nível B especificado na norma ISO 5817 (2003). Com exceção das imperfeições

do tipo reforço excessivo, penetração excessiva e espessura de garganta excessiva, a qualidade deve ser definida pelo nível C.

A norma europeia ISO 17639 (2003) contém recomendações para execução dos ensaios macro e microscópicos assim como um modelo de relatório com as principais informações para o ensaio: norma de referencia, número da EPS, objetivo da análise, peça de teste, metal de base, consumíveis, reagentes e outras informações úteis.

### 3.7.2 Microestrutural

O desenvolvimento da microestrutura está relacionado com a composição química do aço e quais processos térmicos foi submetido (CALLISTER, 2010). As microestruturas das diversas zonas de uma junta soldada influenciam o desempenho final da tubulação como um todo. As propriedades mecânicas das regiões da solda tem influência direta com o tamanho de grão. Uma região com grãos refinados é mais dura e resistente do que outras regiões com grãos grosseiros, em virtude do maior número de contornos de grãos para impedir o avanço de descontinuidades (CALLISTER, 2010). O aumento da dureza e perda das propriedades mecânicas será diretamente proporcional ao crescimento do grão nas regiões analisadas. Esta relação é mostrada pela equação de Hall-Petch (equação 2), onde o aumento do diâmetro dos grãos influencia diretamente a tensão de escoamento do material (CALLISTER, 2010). O aumento da dureza na junta soldada, especialmente na zona afetada pelo calor é extremamente indesejável, pois pode criar uma microestrutura suscetível a trincas a frio, assim como comentado anteriormente no item 3.4.2 deste estudo.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (2)$$

Equação 2. Equação de Hall-Petch para relacionar a dimensão de grão e tensão de escoamento em materiais metálicos policristalinos (CALLISTER, 2010).

Essencialmente, a ZAC de aços de baixo teor de carbono, entre 0,15 e 0,30%, contem três regiões distintas com diferentes tamanhos de grão: região com refinamento parcial de grãos, região com refinamento de grãos e região com grãos grosseiros (KOU, 2002). A região mais próxima ao MB possui um refinamento parcial dos grãos (figura 18). À medida que se aproxima da ZF, o refinamento dos grãos na ZAC será máximo até uma

determinada distancia, porém, próximo à ZL há o máximo crescimento dos grãos atingindo a maior dimensão de toda a ZAC. A diferenciação das regiões é governada pela relação das temperaturas extraídas do diagrama de fases do aço carbono na abscissa da quantidade de carbono do aço estudado (figura 18).

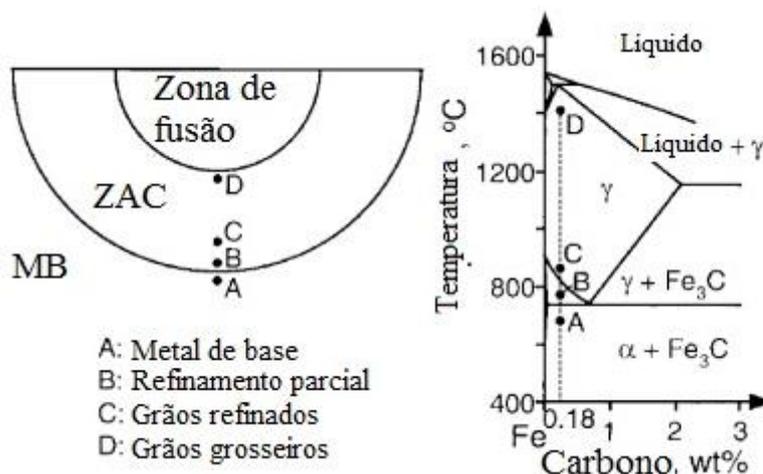


Figura 18. Diferentes fases presentes na ZAC. Fonte: KOU (2002).

Com base na análise microestrutural é possível verificar a interdependência dos resultados dos ensaios mecânicos com as fases presentes na ZAC e ZF. A análise microestrutural complementa os ensaios mecânicos investigando mais a fundo os resultados obtidos no ensaio de tração (limite de escoamento e limite de resistência), no ensaio de dureza (fases presentes no local), no ensaio de dobramento (tenacidade e alongamento do metal de solda) e ensaio de impacto (tenacidade ao impacto). O objetivo da caracterização microestrutural é avaliar a estrutura cristalina, morfologia dos grãos, orientação, precipitados e inclusões, independentemente ou não das relações com as descontinuidades presentes no material (ISO 17639, 2003).

Na análise microestrutural as amostras devem ser preparadas por técnicas metalográficas. Com a dimensão dos grãos, por exemplo, é possível alcançar uma correlação com as propriedades daquela região da junta em especial. A dimensão dos grãos pode ser medida segundo as recomendações estipuladas na norma americana ASTM E112 (1996). Estes são importantes exemplos da utilização da análise microestrutural para a qualificação de um procedimento de soldagem. Entretanto, somente após a realização dos ensaios mecânicos podem ser efetuadas as comparações dos resultados com as imagens obtidas na microestrutura.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Metal de base (MB) – API 5L Grau B PSL 1

O material de base utilizado neste estudo é o aço carbono API 5L grau B PSL 1 na forma tubular com diâmetro externo de 6”, classe de pressão SCH 40, espessura de parede 7,11mm e chanfro em V para soldagem de topo. As propriedades mecânicas e químicas são especificadas pela norma americana API 5L (2004) (tabela 3). A definição do uso deste material de base é vinculada a exigência da norma Petrobras N-0076 (2005) com a Padronização Ab para linhas de água de refrigeração e ar condicionado em refinarias brasileiras.

As amostras dos tubos para realização das peças de teste foram fabricadas pela usina VALLOUREC e MANNESMANN com certificados número 0050590329 de 30/06/2013 e doadas pela empresa HEATING & COOLING TECNOLOGIA TÉRMICA LTDA. A composição química determinada pela norma API 5L (2004) e a composição apresentada no certificado de matéria prima está mostrada na tabela 9. Com a finalidade comparativa, as propriedades mecânicas do certificado de matéria prima, os valores mínimos da norma API 5L e o ensaio de tração com duas amostras usinadas do material de base, estão evidenciadas na tabela 10 (API 5L, 2004).

O uso de tubos API 5L grau B possui finalidades diversas, tais como fabricação de risers em plataformas marítimas, oleodutos e gasodutos terrestres, encamisamento de outras tubulações, entre outras. Entre alguns exemplos de utilização deste tipo de tubo está o oleoduto da baía de Guanabara, risers da plataforma PMNT-1 e o mineroduto de bauxita em Paragominas no estado do Pará.

Tabela 9. Composição química do MB

DOCUMENTO	CARBONO	MANGANÊS	FÓSFORO	ENXOFRE	TITÂNIO	CARB. EQUIV.
Norma API 5L (2004)	0,28	1,20	0,03	0,03	0,04	0,43% (MAX)
Certificado de matéria prima	0,20	0,89	0,023	0,003	0,001	0,36% (CALC)

Tabela 10. Comparação das propriedades mecânicas da norma e certificado do MB

DOCUMENTO	LIMITE DE ESCOAMENTO	LIMITE DE RESISTÊNCIA	ALONGAMENTO
Norma API 5L (2004)	241 MPa (Mín)	414 MPa (Mín)	26 % (Mín)
Certificado de matéria prima	341 MPa	485 MPa	38 %
Ensaio de tração MB	350/348 MPa	547/530 MPa	38 %

$$CE_{IIW} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr+\%Mo+\%V}{5} + \frac{\%Cu+\%Ni}{15} \quad (1)$$

Equação 1. Fórmula para cálculo do carbono equivalente dada pela IIW. Fonte: GRANJON (1967), API 5L (2004) e PETROBRAS N-0133 (2013).

## 4.2 Metal de adição (MA) – eletrodos revestidos e arames tubulares

### 4.2.1 MA – Eletrodos revestidos

Para a soldagem das peças de teste com eletrodos revestidos foram utilizados duas classes de consumíveis. No passe de raiz foi utilizado o eletrodo do tipo celulósico, adequado para este fim, conforme comentado no item 3.2.3, de classificação AWS SFA-5.1 E6010 com limite de resistência de 430 MPa. Para execução dos passes de enchimento e acabamento, o eletrodo do tipo básico, com classificação AWS SFA-5.1 E7018, também adequadamente selecionado com base na posição de soldagem, taxa de deposição e demais características do consumível. A composição química do MA estão na tabela 6.

Para a soldagem da primeira amostra foram utilizados eletrodos revestidos da marca comercial ESAB. No passe de raiz a soldagem foi executada com eletrodos de diâmetro 2,5 mm (3/32”) fornecidos em embalagem enlatada de 20 kg. Para o passe de enchimento e acabamento foi utilizado o eletrodo básico embalado a vácuo com diâmetro de alma de 3,25 mm (1/8”) e classificação AWS E7018-1 H4R com limite de resistência de 490 MPa, conforme mostrado na figura 19. O tipo de embalagem deste eletrodo dispensa o tratamento de ressecagem e manutenção em estufas antes e durante o período da soldagem da peça de teste. O fornecimento de eletrodos pré-tratados embalados à vácuo torna-se muito prático para aplicações de soldagem em campo. A umidade presente nos eletrodos básicos pode resultar em trincas, conforme comentado no item 3.4.2 e 3.4.4.



Figura 19. Consumíveis embalados a vácuo utilizados na soldagem com eletrodos revestidos. Fonte: o autor.

Para a soldagem da segunda amostra foram utilizados eletrodos revestidos da marca comercial LINCOLN ELECTRIC. Semelhante a primeira peça de teste, o passe de raiz foi executado com eletrodos de diâmetro 2,5 mm (3/32") fornecidos em latas de 20 kg. Para o passe de enchimento e acabamento foi utilizado o eletrodo básico com diâmetro de alma de 2,5 mm (3/32") com especificação AWS E7018-1 fornecidos em latas de 15 kg.

Na soldagem da terceira amostra com o processo de eletrodos revestidos, também foram utilizados consumíveis da marca comercial LINCOLN ELECTRIC. Diferentemente da primeira e segunda peça de teste, o passe de raiz foi executado com eletrodos de diâmetro 3,25 mm (1/8") fornecidos em latas de 20 kg. Para o passe de enchimento e acabamento foi utilizado o eletrodo básico com diâmetro de alma de 3,25 mm (1/8") com especificação AWS E7018-1 fornecido em latas de 15 kg (figura 20).

Na tabela 11 é possível observar um resumo dos diâmetros de alma de eletrodo utilizados na soldagem de cada peça de teste.

Tabela 11. Resumo dos diâmetros de eletrodos utilizados nas amostras

AMOSTRAS SMAW	PASSE DE RAIZ	CLASSE AWS	PASSE DE ENCHIMENTO E ACABAMENTO	CLASSE AWS	FABRICANTE
SMAW-1	Ø2,5 mm (3/32")	E-6010	Ø3,25 mm (1/8")	E-7018-1 H4R	ESAB
SMAW-2	Ø2,5 mm (3/32")	E-6010	Ø2,5 mm (3/32")	E-7018-1	LINCOLN ELECTRIC
SMAW-3	Ø3,25 mm (1/8")	E-6010	Ø3,25 mm (1/8")	E-7018-1	LINCOLN ELECTRIC

Para o código ASME BPVC IX (2010), o diâmetro do eletrodo é classificado como uma variável não essencial, porém para o código da AWS D1.1 (2010) e da norma ISO 15614-1 (2004) esta variável é classificada como essencial na soldagem.



Figura 20. Consumíveis utilizados na soldagem da terceira peça de teste (SMAW-1) com eletrodos revestidos. Fonte: o autor.

#### 4.2.2 MA – Arame tubular autoprottegido

Para a soldagem das peças de teste com o processo combinado, designadas como FCAW-1 e FCAW-2, o arame tubular autoprottegido utilizado foi da classe de consumíveis E71T-8-H16 (AWS A5.20, 2005) para ambas as peças de teste. Este consumível foi utilizado para os passes de enchimento e acabamento. Segundo sua classificação, este arame tubular autoprottegido é apropriado para a soldagem com múltiplos passes e fora da posição plana e horizontal, igualmente para passes ascendentes.

Os arames tubulares da classificação T-8 são autoprottegidos e operam com eletrodo conectado ao polo negativo e corrente tipo contínua. A escória produzida por estes arames possui características que permitem a soldagem fora da posição plana ou horizontal. Estes arames são aplicáveis para soldagem de estruturas que requerem boa tenacidade a baixas temperaturas, pois contém elementos para reduzir o teor de enxofre da solda (AWS WELDING HANDBOOK, 1991). Segundo o fabricante, é possível utilizar este consumível para soldagem de tubulações API 5L até a classe X60, porém a classe T-8 é utilizada para soldagem de tubos de classificação até X80 em campo (JUNIOR, 2013).

Para a soldagem das peças de teste foram utilizados arames tubulares autoprottegidos da marca comercial LINCOLN ELECTRIC. No passe de enchimento e acabamento a soldagem foi executada com arames de diâmetro 1,6 mm (1/16”) fornecido em uma bobina de 11,3 kg. O tipo de embalagem hermética dispensa o tratamento de

ressecagem (Figura 21), pois estes arames são relativamente secos após aberta a embalagem pela primeira vez (LINCOLN, 2011). Assim como os eletrodos embalados a vácuo, estes arames são igualmente práticos para aplicações de soldagem em campo.



Figura 21. Embalagem hermética de arame tubular utilizado na soldagem das peças de testes. Fonte: Lincoln Electric.

#### 4.3 EPS preliminar e os parâmetros de soldagem predefinidos

Os parâmetros de soldagem iniciais foram definidos utilizando-se como base em uma EPS pré-existente e validada para o material de base ASTM A-53 grau B e A-106 grau B na forma tubular. Para validação de uma nova EPS contendo o material de base API 5L grau B foram preparadas e executadas as soldagens das peças de teste com base nos parâmetros da EPS pré-existente, chamada aqui em diante de EPS preliminar, somadas às orientações dos fabricantes de consumíveis para ambos os processos de soldagem: eletrodo revestido e arame tubular autoprotetido. A elaboração da EPS preliminar é parte obrigatória do RQPS (PETROBRAS N-2301, 2011). A EPS preliminar é a melhor estimativa das variáveis selecionada para qualificar o procedimento (MOORE, 2010). Na tabela 12 estão mencionados os parâmetros pré-definidos utilizados como base para elaboração da EPS preliminar e soldagem das peças de teste.

Após a soldagem das peças de teste com parâmetros adequados ao novo material, os dados foram registrados para posterior análise com os ensaios mecânicos e microestruturais.

Para a soldagem das peças de teste com o processo combinado, com uso do processo SMAW para o passe de raiz e FCAW-S para o passe de enchimento e

acabamento, foram aproveitados os valores dos parâmetros da EPS de base somente para o passe de raiz com eletrodo revestido celulósico.

Tabela 12. Dados da EPS preliminar para o processo SMAW

PARÂMETRO	RAIZ	ENCHIMENTO E ACABAMENTO
CORRENTE	40 a 80 A	75 a 120 A
TENSÃO	25 a 28 V	25 a 28 V
POLARIDADE	DIRETA DC+ (ELETRODO POSITIVO)	DIRETA DC+ (ELETRODO POSITIVO)
CHANFRO	60° +10° -5°	
VELOCIDADE DE AVANÇO	19 a 38mm/min	19 a 100 mm/min
DIÂMETRO DO ELETRODO	2,5 a 3,25 mm	2,5 a 3,25 mm
PRÉ-AQUECIMENTO / INTERPASSE	20° C	250° C
TÉCNICA	ESTREITO OU OSCILANTE ASCENDENTE	
ABERTURA RAIZ	1,5 a 2,5 mm	
LARGURA RAIZ	1,0 a 2,5 mm	

Para obtenção dos parâmetros corretos de soldagem com o processo FCAW-S foram consultados os catálogos disponibilizados pelo fabricante, assim como indicado na literatura da Sociedade Americana de Soldagem (AWS WELDING HANDBOOK, 1991). Ajustes na corrente, tensão e stick-out foram feitos em chapas de teste soldadas previamente ao passe de enchimento e acabamento para ajuste dos parâmetros conforme tabela 13, para ambas as peças de teste: FCAW-1 e FCAW-2.

A nova EPS a ser desenvolvida é chamada de especificação do procedimento de soldagem preliminar, conforme o anexo C da norma ISO 15607 (2003) que contém regras gerais para elaboração de procedimentos de soldagem para materiais metálicos. (Figura 22).

Há cinco diferentes métodos apresentados segundo a norma ISO 15614-1 (2004) para qualificação de uma EPS. O método de qualificação da EPS a luz da norma citada para o presente estudo é a qualificação por testes e ensaios registrados em um procedimento.

Tabela 13. Dados da EPS preliminar para o processo combinado SMAW + FCAW-S

PARÂMETRO	RAIZ	REFORÇO DE RAIZ	ENCHIMENTO E ACABAMENTO
PROCESSO DE SOLD.	SMAW	SMAW	FCAW-S
CORRENTE	40 a 80 A	75 a 120 A	220 A
TENSÃO	25 a 28 V	25 a 28 V	17 a 19 V
POLARIDADE	DIRETA DC+ (ELET. POS.)	DIRETA DC+ (ELET. POS.)	REVERSA DC- (ELET. NEG.)
CHANFRO	60° +10° -5°		
VELOCIDADE DE AVANÇO/ALIM.	19 a 38mm/min	19 a 100 mm/min	50 a 100 mm/min e 3,8 m/min
DIÂMETRO DO ELETRODO	2,5 a 3,25 mm	2,5 a 3,25 mm	1,6 mm
STICK-OUT	-	-	25 mm (1")
PRÉ-AQUECIMENTO / INTERPASSE	20° C	250° C	
TÉCNICA	ESTREITO OU OSCILANTE ASCENDENTE		
ABERTURA RAIZ	1,5 a 2,5 mm		
LARGURA RAIZ	1,0 a 2,5 mm		

Na qualificação da EPS, com base nesta mesma norma, são necessárias quatro etapas: desenvolvimento de uma EPS preliminar pelo fabricante, registro dos limites das variáveis válidas ao procedimento de soldagem, elaboração da EPS final conforme os testes e ensaios executados e liberação para uso e produção (ISO 15607, 2003).

#### 4.4 A preparação e soldagem das peças de teste

A preparação para soldagem das peças de teste seguiu a orientação e recomendação dos códigos e normas estudados, apostilas de soldagem de tubulação e EPS preliminar pré-existente para os materiais ASTM A-53 grau B e A-106 grau B. A preparação para soldagem das peças de teste com eletrodos revestidos pode ser observada nas figuras 23 a 25.

A soldagem das peças de teste foi realizada na posição 5G conforme pode ser visto nas figuras 26 e 27 e com passes ascendentes para evitar o aparecimento de trincas induzidas por hidrogênio, conforme comentado no item 3.6.2. Para as normas e códigos de qualificação do procedimento de soldagem referenciados no presente estudo, a posição de

soldagem da peça de teste não é uma variável essencial para qualificação de um procedimento. Portanto, a posição 5G foi adotada como referência.

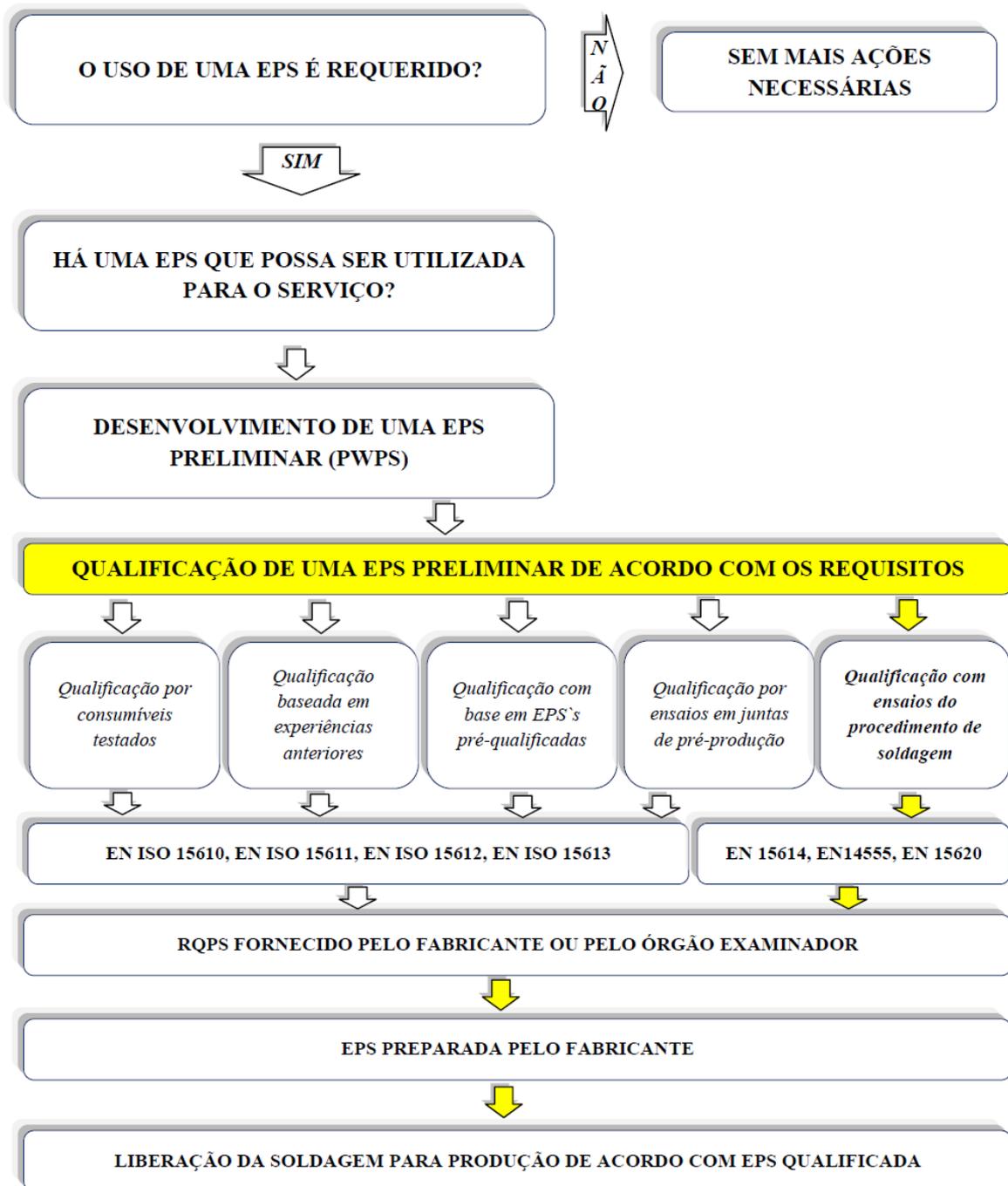


Figura 22. Diagrama de elaboração de EPS por meio da qualificação de um procedimento de soldagem com ensaios. Fonte: ISO 15607 (2003).



Figura 23. Medição da espessura do tubo nas extremidades e nariz. SMAW-1. Fonte: o autor.



Figura 24. Utilização do arame espaçador para determinar a abertura de raiz. SMAW-1. Fonte: o autor.



Figura 25. Peça de teste ponteadada nas posições 3, 6, 9 e 12 h. SMAW-2. Fonte: o autor.

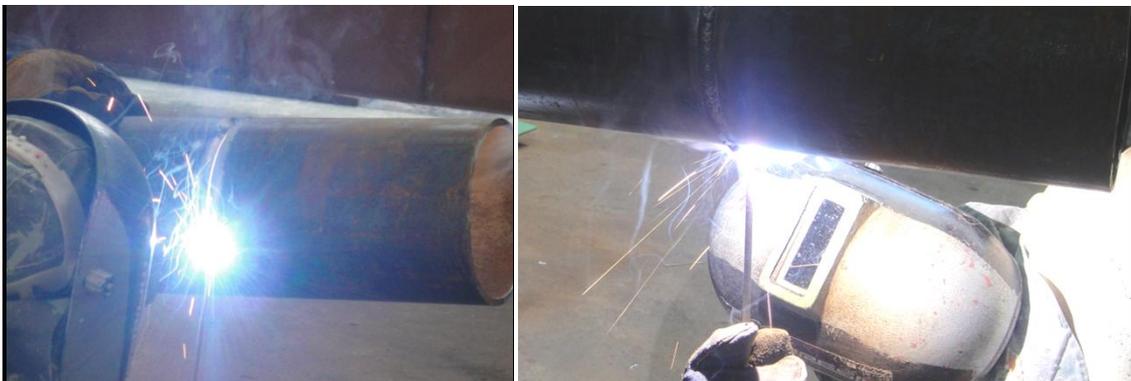


Figura 26. Soldagem da peça de teste. SMAW-1. Fonte: o autor.

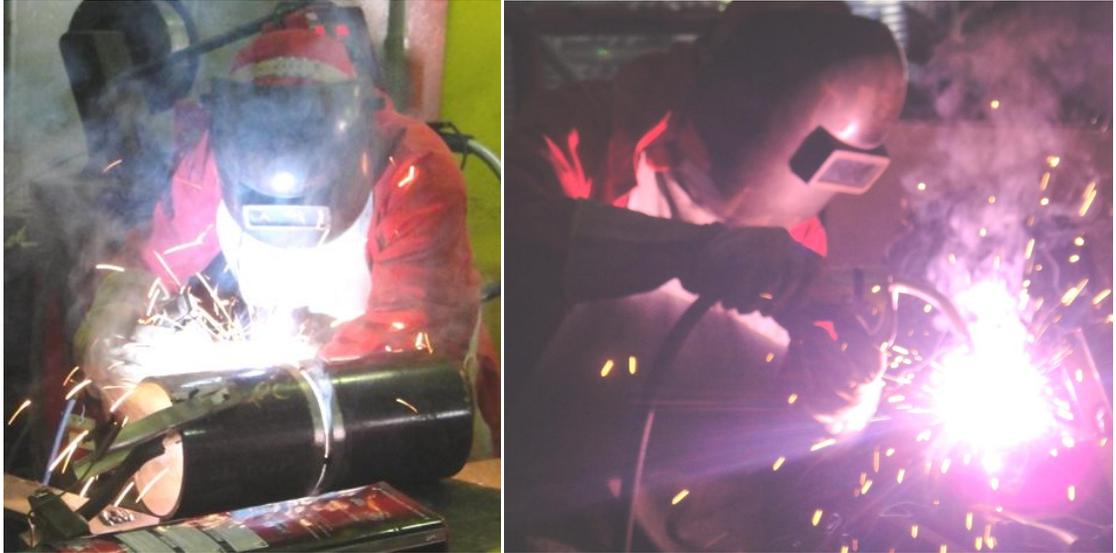


Figura 27. Soldagem da peça de teste. FCAW-1. Fonte: o autor.

Para a soldagem da peça de teste FCAW-2 foi utilizado um dispositivo com rotação automática para tubos (figura 28), e o equipamento Power Wave S500, que está alocado no centro técnico da Lincoln Electric de Guarulhos. Depois de finalizada a soldagem (figura 29), foram registrados os tempos das etapas para os dois processos, conforme visto na tabela 14. Os valores obtidos com a soldagem das peças de teste do mesmo processo foram somados para composição de valores médios dos tempos totais. Foi observado um ganho expressivo de tempo no passe de enchimento e acabamento. Para a etapa de limpeza e passe de raiz, idêntica para os dois processos de soldagem, os tempos coletados estiveram próximos, porém não iguais.



Figura 28. Dispositivo de rotação e equipamento para soldagem da peça de teste – FCAW-2. Fonte: o autor.



Figura 29. Remoção da escória após soldagem – FCAW-2. Fonte: o autor.

Todos os ensaios nas peças de teste e nas amostras usinadas depois de realizada a soldagem, foram executados conforme as orientações e recomendações dos códigos e normas (ISO 15614-1, 2004; ASME BPVC IX, 2010; API 5L, 2004; AWS D1.1, 2010). A seguir são descritos os métodos e os procedimentos utilizados para cada ensaio.

Tabela 14. Dados da soldagem das peças de teste

ATIVIDADE	PEÇAS DE TESTE	
	SMAW-1/2/3	FCAW-1/2
Limpeza do chanfro	16 min	20 min
Passe de raiz	41 min	59 min
Passe de enchimento e acabamento	36 min	10 min
Tempo total de soldagem	93 min ou 1h e 33 min	89 min ou 1h e 29 min

## 4.5 Caracterização mecânica e microestrutural – Execução dos ensaios

### 4.5.1 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração devem ser executados conforme as orientações e critérios estabelecidos no código ASME BPVC IX (2010). Segundo o código, o objetivo do ensaio é determinar o limite de resistência máximo de juntas soldadas com chanfros. As amostras foram extraídas e usinadas da peça de teste de acordo com o item QW-462.1 (b) do mesmo código (figura 30).

Neste código é recomendado que para peças de teste com espessura inferior a 25 mm (1") toda a espessura da junta soldada do tubo deve ser utilizada para composição da amostra. A amostra com seção reduzida deve ser utilizada em seções de tubos superiores a 75 mm (3"). Neste estudo, foram utilizadas as amostras com seção reduzida (figura 31 e 33). A velocidade utilizada nos ensaios foi de 10 mm/min. A amostra deve se romper com a aplicação de uma tensão unidirecional. O limite de resistência deve ser obtido pelo quociente da máxima tensão de ruptura e a seção transversal dimensionada da amostra antes do ensaio. O ensaio de tração foi realizado em um equipamento hidráulico, comum para este ensaio, do fabricante MTS modelo 810 (figura 32).

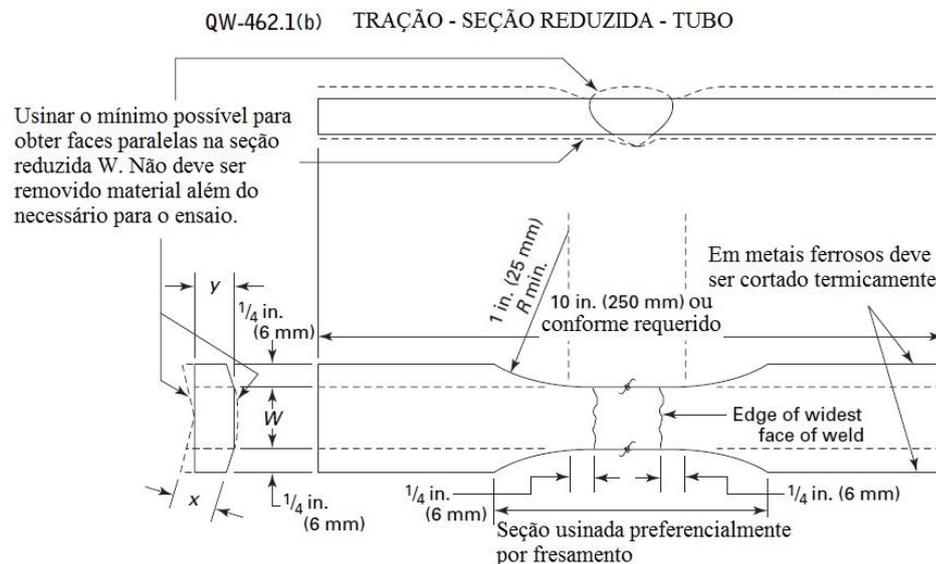


Figura 30. Dimensões da amostra conforme QW-462.1(b). Fonte: ASME BPVC IX (2010).



Figura 31. Amostras para ensaio de tração. (a) SMAW-1 e (b) SMAW-2. Fonte: o autor.



Figura 32. Equipamento utilizado para o ensaio de tração. Fonte: o autor.

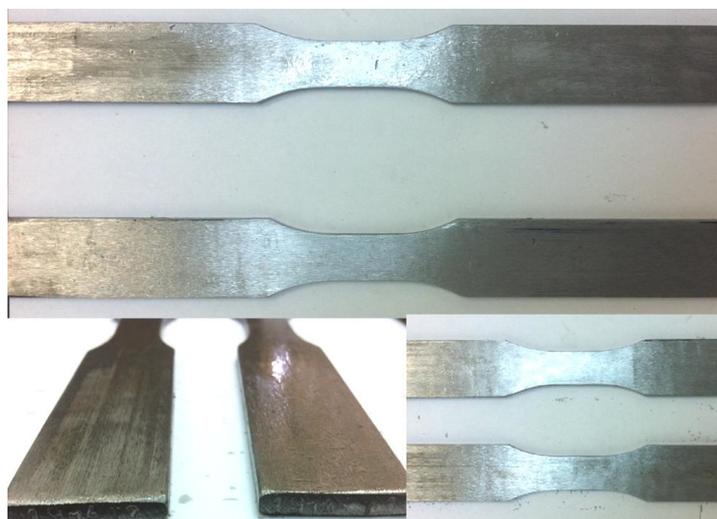


Figura 33. Amostras para ensaio de tração. Peça de teste soldada – FCAW-1. Fonte: o autor.

#### 4.5.2 Ensaio de Dobramento

Os ensaios de dobramento foram executados conforme as orientações e critérios estabelecidos no código ASME BPVC IX (2010). Este ensaio, segundo a ASME BPVC IX (2010), tem o propósito de determinar se a junta soldada está em condições plenas e se possui boa ductilidade.

O tipo de guia utilizado no estudo está representado na Figura 34. Todas as amostras foram extraídas do tubo de teste de acordo com o código (Figura 35) e com seção transversal aproximadamente retangular. As faces cortadas longitudinalmente devem ser consideradas as laterais da amostra e as faces das superfícies com maiores áreas são determinadas como área de face e área da raiz. O ensaio de dobramento pode ser realizado

de cinco métodos, sendo o mesmo ensaiado de modo transversal ou longitudinal ao eixo da solda. A solda e a ZAC devem estar inseridas completamente na porção dobrada da amostra. A amostra deve ser dobrada por aplicação de uma força entre as guias (figura 36) que devem estar lubrificadas para evitar esforços resistentes que não sejam perpendiculares às amostras. As amostras forjadas são mostrados nas figuras 37 e 38.

#### QW-466.1 DIMENSÕES DO CUTELO E BASE

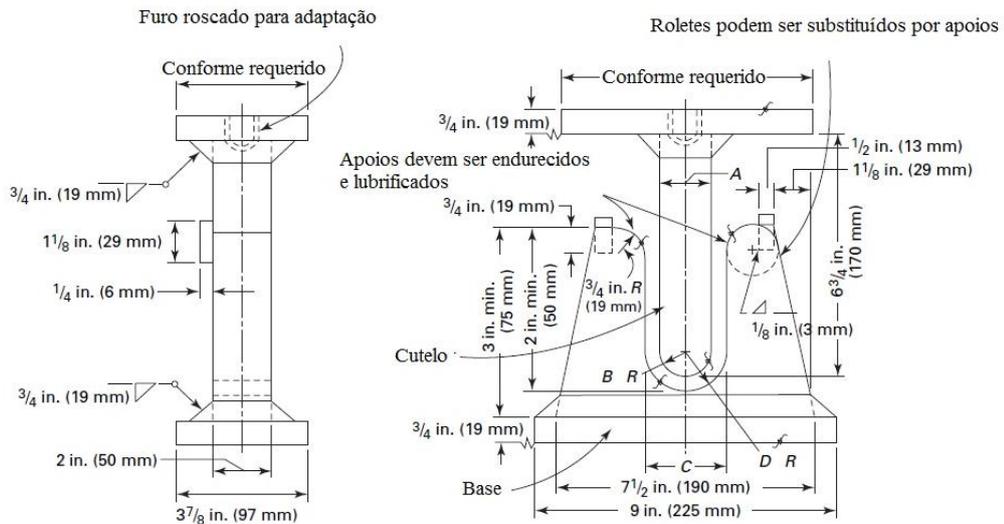


Figura 34. Dimensões das guias de dobramento conforme QW-466. Fonte: ASME BPVC IX (2010).

#### QW-462.3(a) CORPO DE PROVAS - DOBRAMENTO

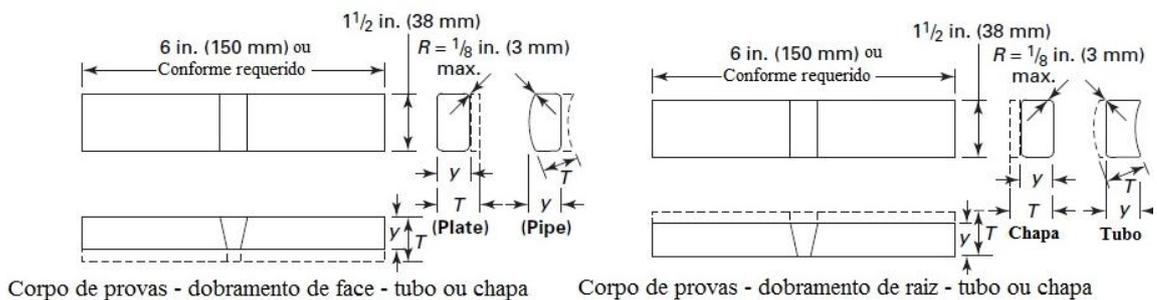


Figura 35. Dimensões das amostras extraídas conforme QW-462.3(a). Fonte: ASME BPVC IX (2010).



Figura 36. Equipamento utilizado no ensaio de dobramento e amostra durante o ensaio. Fonte: o autor.

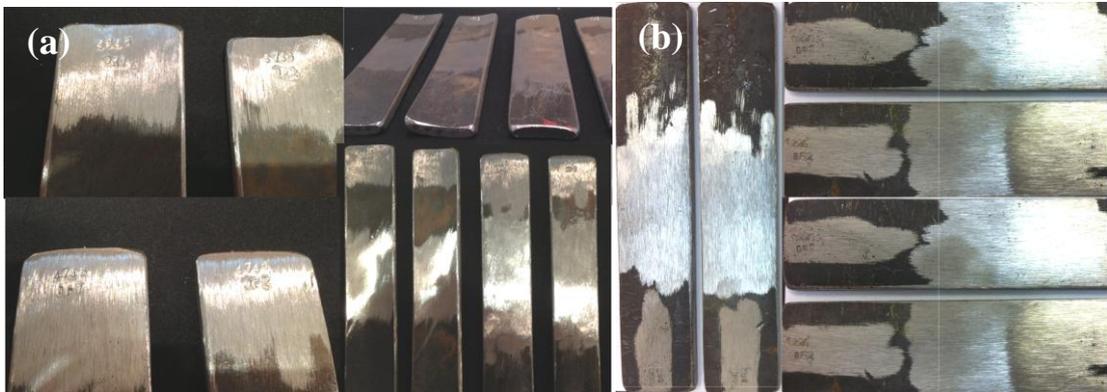


Figura 37. Amostras para ensaio de dobramento. (a) SMAW-1 e (b) SMAW-2. Fonte: o autor.

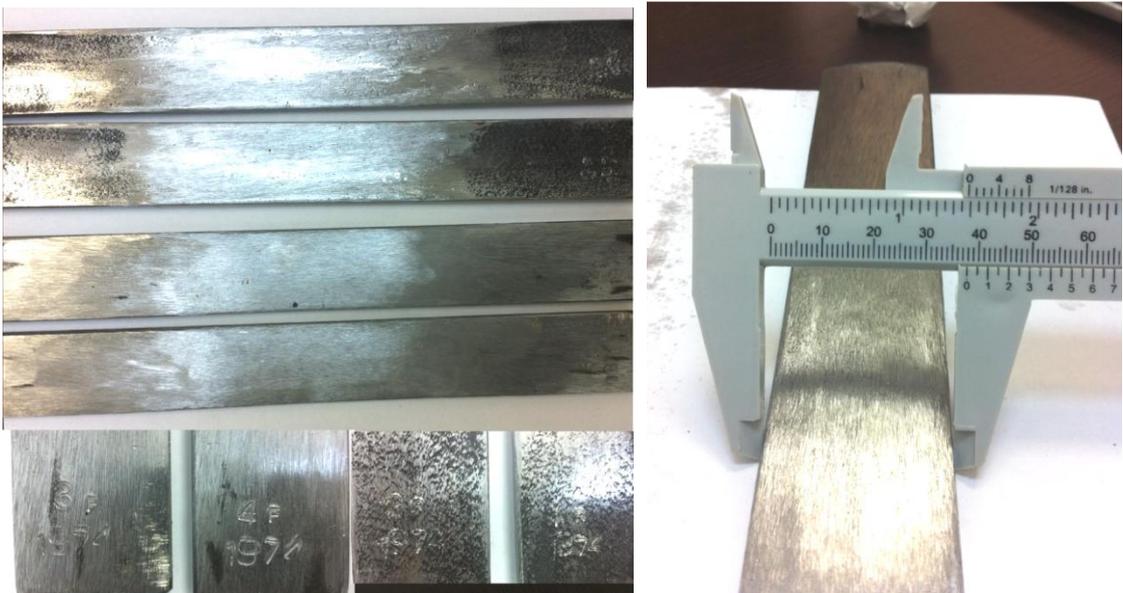


Figura 38. Amostras para ensaio de dobramento. FCAW-1. Fonte: o autor.

### 4.5.3 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza, apesar de simples, traz informações importantes para determinação das características metalúrgicas e mecânicas. Este ensaio deve ser realizado em três zonas do cordão de solda: ZF, ZAC e MB. Diferentemente dos ensaios de dobramento e tração, o propósito do ensaio de dureza é de determinar se a junta soldada apresenta ductilidade suficiente analisando a dureza de sua microestrutura em diferentes zonas. Caso esta dureza esteja demasiadamente alta e acima dos limites estabelecidos, a junta torna-se frágil e suscetível a trincas. A sequência correta dos passes pode minimizar a existências de áreas com baixa tenacidade em função da redução do comprimento da região de grãos grosseiros da ZAC. A tenacidade do cordão de solda diminui conforme houver o crescimento dos grãos na ZAC. Porém, para aços ferríticos não ligados, assim como o material de base neste estudo, o controle do resfriamento após a soldagem é suficiente para garantir tenacidade do cordão de solda (ISO 1011, 2001).

O perfil de dureza utilizado neste estudo foi baseado na prática recomendada pela Norma Petrobras N-0133. Na Figura 39 é possível observar as zonas e os pontos de dureza extraídos do cordão de solda das peças de teste. A carga utilizada para a marcação dos pontos de dureza Vickers de algumas amostras foi de 5,0 kgf aplicadas durante 10 segundos na superfície da amostra, conforme recomendação normativa, em microdurômetro convencional de bancada do fabricante SHIMADZU modelo HMV-2 (figura 40). Para outras amostras foi utilizado o método de análise por microdureza instrumentada, com base na norma ISO 14577 (2007). Nesta norma há três limites que possibilitam classificar o ensaio em macro, micro ou nano escalar. Os ensaios com força aplicada inferior a 2 N e profundidade das marcações superior à 200 nm, assim como os utilizados neste estudo, são classificados como micro escalar, segundo a ISO 14577 (2007).

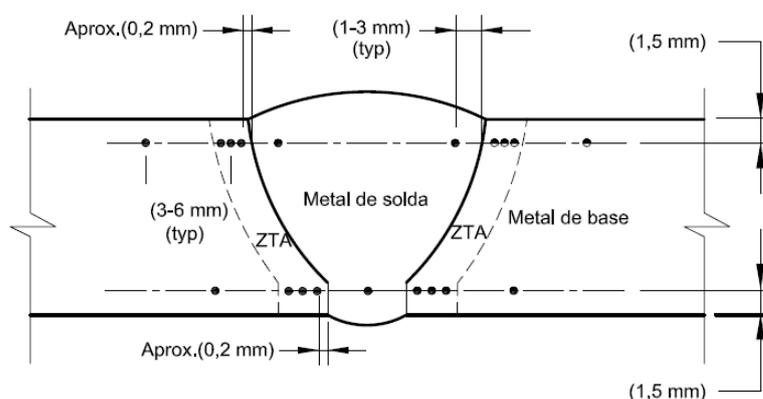


Figura 39. Perfil para medição da dureza. Fonte: PETROBRAS N-0133 (2013).

O equipamento utilizado para o ensaio de microdureza instrumentada foi o microdurômetro FISCHERSCOPE HM2000 XYm que possui um microscópio acoplado para localização das áreas e marcação exata dos pontos de interesse (figura 41). Por meio do software WIN-HCU conectado ao microdurômetro foi possível extrair os valores de dureza das marcações automaticamente, sem a necessidade de medição das arestas da impressão no material. A força utilizada para marcação das marcações no MB foi de 1000 mN aplicada durante 20s.



Figura 40. Microdurômetro convencional de bancada do fabricante SHIMADZU HMV-2. Fonte: o autor.

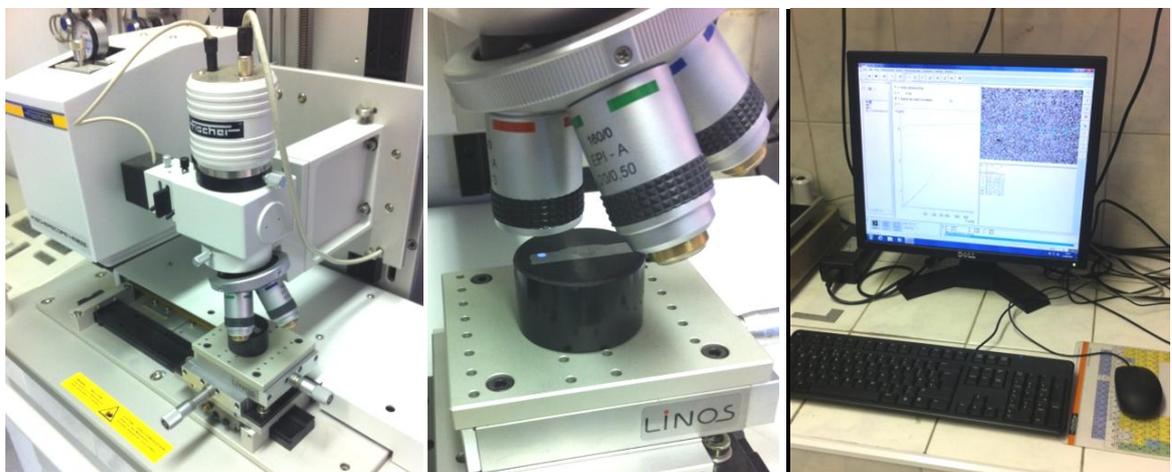


Figura 41. Microdurômetro instrumentado com microscópio e software para análise. Fonte: o autor.

#### **4.5.4 Ensaio Macrográfico**

Para realização dos ensaios macrográficos, as amostras foram atacadas com solução de Nital a 10%, composta por ácido nítrico e álcool etílico, que não ataca quimicamente a ferrita, mas apenas delinea os contornos de grãos e escurece a perlita. Após o ataque a amostra foi enxaguada com álcool e secada com ar quente. O ensaio macrográfico das amostras foi realizado em um microscópio óptico do tipo Stereomicroscope I, modelo 475200, da fabricante Zeiss, com diferentes aumentos para estudo da geometria dos cordões de solda e também a olho nu.

#### **4.5.5 Ensaio Micrográfico – Caracterização Microestrutural**

Para que fosse realizado o ensaio micrográfico a fim de observar a microestrutura, as fases e os contornos de grãos formados no MS, ZAC e no MB, a amostra foi submetida aos processos de corte, embutimento, lixamento com lixas 220, 320, 400 e 600 e polimento com pasta de diamante de 6  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$  com tempo suficiente para desaparecimento das marcas dos lixamentos anteriores. Igualmente ao ataque químico do ensaio macrográfico, a amostra foi atacada com solução de Nital a 10%, composta por ácido nítrico e álcool etílico, que não ataca quimicamente a ferrita, mas apenas delinea os contornos de grãos e escurece a perlita. Então, a amostra foi enxaguada com álcool, secada com ar quente e levada ao microscópio para se iniciar a análise. O microscópio óptico da fabricante Olympus modelo BX51M, e o microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo da fabricante JEOL modelo JSM 6701F, foram utilizados como ferramenta para obtenção das imagens micrográficas.

#### **4.5.6 Ensaio de Impacto**

O ensaio de impacto tipo Charpy com entalhe em V foi realizado a fim de observar o comportamento da microestrutura na zona fundida, na zona afetada pelo calor e no metal de base. Este tipo de ensaio é solicitado somente pelo código AWS D1.1 (2010) para o processo de soldagem combinado. Para o processo de soldagem com eletrodos revestido, nas características da peça de teste deste estudo, não há exigência de realização deste ensaio em nenhuma das normas estudadas para qualificação de um novo procedimento de soldagem.

Em substituição ao ensaio qualitativo do tipo Nick-break, solicitado pela norma API STD 1104 (2005), o ensaio de charpy V foi escolhido, pois apresenta resultados quantitativos, possibilitando estudar a região separada pelo impacto.

A preparação das amostras foi executada conforme a norma ASTM A370 figura 11b (ASTM A370, 2009) com seção reduzida em razão da espessura das peças de testes soldadas (Figura 42). As amostras foram usinados com seção de 10 x 5 x 55 mm, com posterior aplicação do fator de correção (ASTM A370, 2009) dos resultados para obter valores equivalentes a amostra padronizado de 10 x 10 x 55 mm. Com o intuito de comparar os resultados entre os dois processos de soldagem utilizados, a temperatura ambiente foi adotada para execução de todos os ensaios.

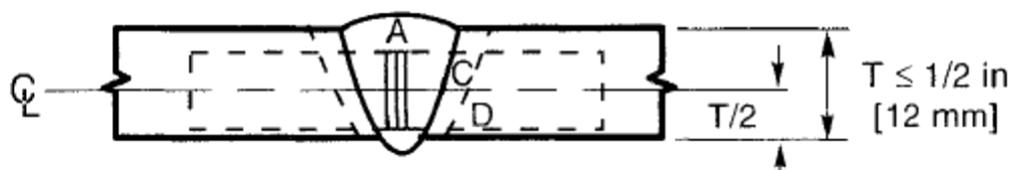


Figura 42. Perfil de localização do entalhe e amostra. Fonte: AWS D1.1 (2010).

A espessura da junta, o formato do chanfro e a quantidade de passes de uma junta soldada, influenciam diretamente a energia imposta (aporte de calor) ao material no momento da soldagem. Quanto maior o aporte de calor ao material, menor é o valor final da tenacidade. Para que a energia de soldagem não seja introduzida excessivamente à junta, alguns artifícios podem ser utilizados, tais como alterar o formato do chanfro, aumentar o número de passes e utilizar a técnica filetada, com cordões lineares, em substituição a técnica trançada de deposição do MA.

Em procedimentos de soldagem que requerem tenacidade controlada, em especial para aplicações a baixas temperaturas, cordões largos com oscilação excessiva devem ser evitados. Um estudo realizado por uma fabricante de consumíveis (FORTES, 2004c) demonstrou este fenômeno comparando duas juntas soldadas com a mesma espessura, porém com a quantidade de passes diferentes. A junta com a menor quantidade de passes obteve valores menores de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy em V. Conseqüentemente, a junta com maior quantidade de passes, que introduziu menores aportes de calor, obteve valores de tenacidade de até 40% superior.

Na soldagem das peças de teste deste estudo, apesar de não ser exigido o controle da tenacidade, a técnica de soldagem filetada, linear e sem oscilação foi utilizada

para a soldagem com o processo de eletrodos revestidos, visando introduzir valores menores de energia a junta soldada. Para a soldagem das peças de teste com o processo combinado, a técnica trançada foi utilizada no enchimento e acabamento.

Os códigos da ASME BPVC IX (2010) e AWS D1.1 (2010) tratam a técnica de soldagem com uma variável suplementar essencial, portanto, tornando-se essencial, somente se o controle da tenacidade for exigido. A norma API STD 1104 (2005) não classifica as técnicas de soldagem e a norma europeia ISO 15614-1 (2004) determina somente que seja feito um controle da energia imposta.

As amostras extraídas para execução do ensaio de impacto seguiram as recomendações do código AWS D1.1 (2010). Para juntas com espessura inferior a 12 mm, a linha de centro, localizada na metade da espessura da junta soldada, determinou a posição do entalhe na amostra. Foram usinados e ensaiados três amostras em três regiões diferentes do cordão de solda: A, B e C, conseqüentemente, metal de solda, ZAC distante 1 mm da ZL e ZAC distante 5 mm da ZL (figura 43). Três amostras extraídas do MB também foram ensaiadas com efeito de comparação dos resultados (figura 44).

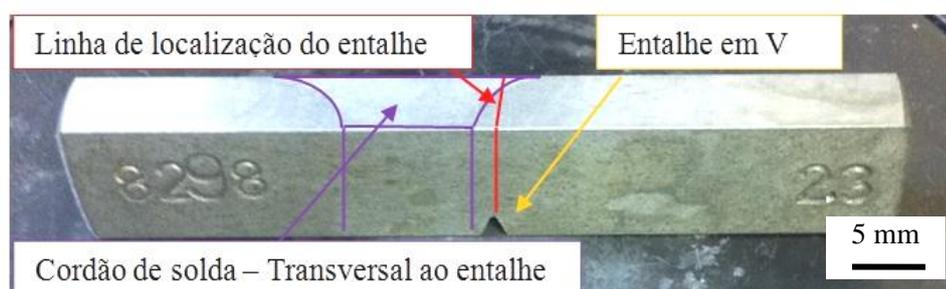


Figura 43. Amostra com entalhe localizado a 1 mm da ZL. Fonte: o autor.

#### 4.5.7 Ensaio Visual

O ensaio visual é o primeiro dos ensaios não destrutivos a ser realizado antes que qualquer outro método de ensaio seja executado sobre a junta soldada. Pouco dispendioso, porém de grande importância, com base no ensaio visual é possível detectar discontinuidades superficiais, verificar a morfologia do cordão de solda e a depender da posição da junta, verificar as condições da raiz e penetração do cordão. As discontinuidades possíveis de serem detectadas pelo ensaio visual são: falta de fusão, falta de penetração, concavidades, mordeduras, porosidades e algumas trincas superficiais.

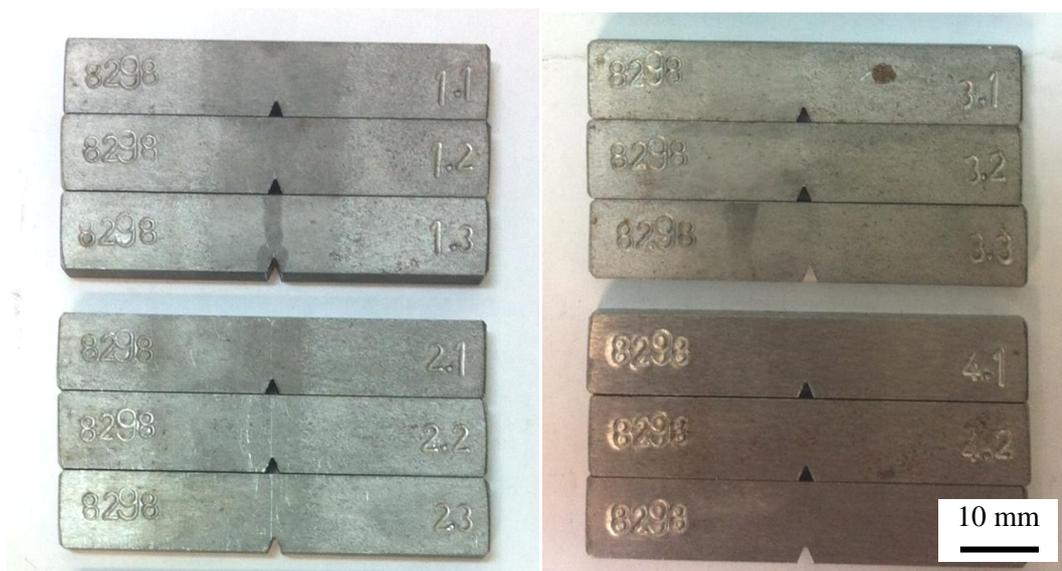


Figura 44. Amostras (ZF, ZL + 1 mm, +5 mm, e MB) antes do ensaio de impacto. Fonte: o autor.

Das doze principais discontinuidades possíveis de estarem presentes na soldagem de tubulação, elencados pelo código de exames não destrutivos da Sociedade Americana dos Engenheiros Mecânicos (ASME BPVC V, 2011), seis destas podem ser perfeitamente detectáveis por meio do ensaio visual. Aliado a certas condições especiais e boa preparação do profissional que executa o ensaio, outras quatro discontinuidades podem ser detectadas. Portanto, apenas dois tipos de discontinuidade necessitam de um ensaio não destrutivo do tipo volumétrico e complementar a detecção, conforme tabela 8 deste estudo.

O ensaio visual foi executado em todas as peças de teste após a soldagem. Os critérios de aceitação estão de acordo com os requisitos estabelecidos no subitem 4.6.6. Segundo a tabela 2 deste estudo apenas o código AWS D1.1 (2010) e a norma ISO 15614-1 (2004) estabelecem como obrigatório o ensaio visual na peça de teste.

#### 4.5.8 Ensaio por Líquido Penetrante

Para verificação das condições da superfície do cordão de solda, foi executado o ensaio de líquido penetrante (figura 45) em todas as juntas finalizadas.

O procedimento para execução do ensaio foi baseado em orientações do fabricante dos consumíveis do ensaio (penetrante e revelador), bem como no código da Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME BPVC V, 2011), onde são especificados os procedimentos e orientações para o sucesso da execução do ensaio.



Figura 45. Ensaio por Líquido Penetrante em toda a circunferência da junta. SMAW-3 Fonte: o autor.

#### 4.5.9 Ensaio Radiográfico

Juntamente com o ensaio visual e ensaio por líquido penetrante, o ensaio radiográfico é essencial para detecção de descontinuidades internas ao cordão de solda. Portanto, para verificação das condições internas das peças de teste soldadas, foi executado o ensaio de radiográfico por um laboratório especializado de acordo com as exigências do código da Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos, ASME BPVC IX (2010).

#### 4.6 Ensaios mecânicos e ensaios não destrutivos - Critérios de aceitação

Neste item são expostos os critérios de aprovação segundo cada uma das normas e códigos estudados (ASME BPVC IX, AWS D1.1, API STD 1104 e ISO 15614-1) para qualificação de um novo procedimento de soldagem.

##### 4.6.1 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração das amostras extraídas das peças de teste foram executados conforme as orientações e recomendações de cada código e norma referenciada. Os critérios de aprovação para cada uma delas encontram-se nos itens a seguir.

O valor mínimo de tensão de ruptura para qualificação de um procedimento de soldagem é estipulado pela ASME BPVC IX (2010) em uma tabela (QW/QB-422). O aço API 5L grau B possui limite mínimo de resistência de 60 ksi ou 415 MPa. Para que a

amostra de tração seja considerada aprovado, o limite de resistência nos ensaios não deve ser inferior aos critérios listados a seguir e deve atender as seguintes condicionais:

- Tensão de ruptura superior ao limite mínimo de resistência tabelado para o metal base;
- Tensão de ruptura superior ao limite mínimo de resistência inferior entre dois metais tabelados para o caso de metais base distintos;
- Tensão de ruptura superior ao limite de resistência do metal de adição;
- Rompimento no metal de base fora da região soldada ou a interface da solda, considerando que o limite de resistência não seja inferior a 5% ao valor tabelado;
- Rompimento no metal de solda, porém não inferior ao limite de resistência do metal de base (ASME INTERPRETATION SECTION IX, 1995).

Para ser considerado aprovado no ensaio de tração pela norma ISO 15614-1 (2004) o limite de resistência da amostra não deve ser inferior ao metal de base correspondente da peça de teste a menos que seja especificado um outro parâmetro para o ensaio.

Para soldagem de materiais dissimilares, o limite de resistência da amostra ensaiada não deve ser inferior ao metal de base da peça de teste com o menor limite de resistência. Em cada amostra que venha a apresentar valores inferiores aos determinados pelo ensaio de tração na norma ISO 15614-1 (2004), duas novas amostras devem ser ensaiadas e aprovadas para que o procedimento de soldagem seja aprovado.

Para a norma API STD 1104 (2005), o material de base das peças de teste soldadas possuem limite mínimo de escoamento estipulado pela norma API 5L (2004) em 35 ksi ou 241 MPa e limite de resistência mínimo de 60 ksi ou 414 MPa. O limite de resistência do MA e da ZAC devem ser superiores ou iguais aos valores estipulados na norma para o material do tubo. Porém, não há necessidade que o MB apresente limite de resistência superior ao MA utilizado na soldagem.

Caso as amostras rompam fora do MS ou da ZAC, isto é, unicamente no MB e nas proximidades da solda, e atenda ao limite de resistência mínimo estipulado na norma, o ensaio é considerado aceito. Caso a amostra rompa no MS ou na ZAC, porém o limite de

resistência observado for igual ou superior ao estipulado na norma para o MB, o ensaio também é considerado aprovado.

Na ocorrência de uma fratura que apresente valores de limite de resistência do material da tubulação inferiores aos valores normatizados, as amostras devem ser armazenadas e um novo ensaio com novas variáveis deve ser realizado para correção da falha.

O critério de aprovação para o código da AWS D1.1 (2010), especifica somente que o limite de resistência da amostra não seja inferior ao limite mínimo especificado para o metal de base da junta.

#### **4.6.2 Ensaio de Dobramento**

Para o código ASME BPVC IX (2010), a ZF e a ZAC devem estar completamente dentro da porção dobrada. A amostra dobrada com as guias deve estar livre de qualquer descontinuidade no MS e na ZAC maiores do que 3 mm (1/8") medidas em qualquer direção na superfície convexa da amostra ensaiada. Descontinuidades originadas nas bordas da amostra devem ser descartadas se evidenciado que estas não foram originadas por inclusão de escória, falta de fusão, ou outras descontinuidades internas a amostra.

Para a norma ISO 15614-1 (2004), durante o ensaio, a amostra não deve revelar nenhuma imperfeição ou descontinuidade maior que 3 mm em qualquer direção. Descontinuidades e falhas que surjam das extremidades da amostra dobrada devem ser ignoradas na avaliação.

O ensaio de dobramento de face e de raiz deve ser considerado como aceito pela norma API STD 1104 (2005) se nenhuma trinca ou descontinuidade exceder a 3 mm (1/8") ou metade da espessura da parede da amostra, qual dimensão for menor, em qualquer direção, seja no MS ou na ZAC. Trincas geradas no ensaio observadas nas laterais da amostra devem ser consideradas somente se forem maiores do que 6 mm (1/4") ou se comprovadas imperfeições nesta porção dobrada da junta soldada. Cada amostra testada deve atender a estes requisitos para ser considerada aprovada.

O código da AWS D1.1 (2010) especifica que a superfície convexa da amostra ensaiada por dobramento deve ser cuidadosamente examinada a procura de descontinuidades superficiais. Para que seja aceito, a amostra não deve possuir descontinuidades maiores que 3 mm (1/8") em qualquer direção. A soma de toda as descontinuidades maiores do que 1 mm (1/32"), porém não superiores 3 mm (1/8"), não

deve passar de 10 mm (3/8") de comprimento. A dimensão máxima para qualquer descontinuidade encontrada nas laterais da amostra não deve exceder a 6 mm (1/4"). Porém, caso seja superior a 6 mm e não seja evidenciada que a descontinuidade é resultante de inclusão de escória ou outro tipo de defeito, esta mesma amostra deve ser desconsiderada e uma nova amostra da peça de ensaio original deve ser ensaiado novamente.

#### **4.6.3 Ensaio de Dureza**

Não há critérios de aprovação para qualificação do procedimento de soldagem nestes códigos ASME BPVC IX (2010), AWS D1.1 (2010) e API STD 1104 (2005), referente a ensaio de dureza.

Para a norma ISO 15614-1 (2004), o resultado dos valores de dureza encontrado nas duas fileiras onde o ensaio foi executado deve atender aos requisitos da tabela 2 desta mesma norma. Para os metais do grupo 1, na qual o aço API 5L grau B está incluído, a dureza máxima encontrada não poderá ultrapassar a 380 HV. Para casos onde a junta soldada foi submetida a tratamento térmico, a dureza máxima é de 320 HV.

Caso o valor de um único ponto seja superior ao valor máximo especificado, um novo perfil de dureza deve ser executado no verso da amostra ou em uma nova área desbastada na mesma face.

#### **4.6.4 Ensaio Macrográfico**

Para o código ASME BPVC IX (2010), há apenas critérios de para aprovação dos ensaios macrográficos para juntas de filete e não para juntas de topo tubulares.

Assim como comentado no item 4.5.4, a determinação do nível de qualidade da junta soldada (A, B ou C) (ISO 5817, 2003) da norma ISO 15614-1 (2004), deve estar baseada em diversos fatores, tais como: o projeto da junta, processos subsequentes, modo de carregamento, condições de trabalho e até mesmo uma análise econômica do processo. O limite de qualidade mais rigoroso (B) especificado na ISO 5817 (2003) deve ser utilizado como critério de aprovação na qualificação de uma EPS. As descontinuidades que podem ser detectadas no ensaio macrográfico e seus respectivos limites estão listados na sequência:

- Trincas: nenhum tipo de trincas é aceitável;

- Inclusões não metálicas: largura e comprimento máximo de 1,4 e 7 mm respectivamente;
- Falta de fusão: não permitido;
- Falta de penetração: não permitido;
- Mordeduras e concavidades de raiz: inferior a 0,35 mm de profundidade;
- Desalinhamento máximo: 2,0 mm;
- Sobreposição: não permitido;
- Marcas de abertura de arco inadequada: não permitido;
- Respingos: critério de aceitação dependente da aplicação;

Somente para as descontinuidades do tipo reforço e penetração excessivas o limite de qualidade moderado (C) é aceitável. O reforço máximo deve ter altura inferior a 2,95 mm e a penetração máxima na raiz da solda em relação ao chanfro não pode ser superior a 4,0 mm (considerando como média a espessura do cordão de solda em 13,0 mm na face e 5,0 mm na raiz).

Na norma API STD 1104 (2005) são especificados requisitos de ensaio macrográfico somente em juntas realizadas em serviço (com fluido em operação) na tubulação no momento da soldagem. Para qualificação de procedimentos de soldagem não há pré-requisitos ou critérios de aceitação para este ensaio.

Para o código da AWS D1.1 (2010), após verificação visual da amostra, para a junta ser considerada aprovada segundo os critérios para juntas de topo com chanfro simples em “V”, a junta deve ser isenta de trincas, deve ter fusão completa entre os passes e o metal de base, não conter mordeduras acima da dimensão de 0,8 mm de profundidade e estar de acordo com os perfis mostrados na Figura 46.

Para o presente estudo o valor de “R” corresponde a 3,0 mm. Concavidades de raiz são permitidas no máximo de 2 mm, porém a concavidade não deve ser inferior a superfície do material de base na raiz.

#### **4.6.5 Ensaio de Impacto**

Conforme a tabela 2 do item 3.2.3 deste estudo, não há critérios de aprovação para qualificação do procedimento de soldagem referente ao ensaio de impacto no código ASME BPVC IX (2010) e na norma API STD 1104 (2005).

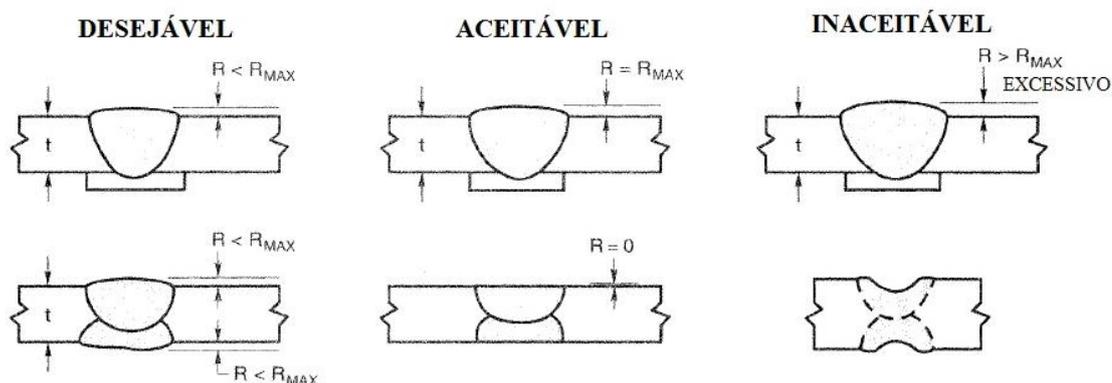


Figura 46. Perfis de junta de topo. Fonte: AWS D1.1 (2010).

Em aplicações especiais onde for requerido valor mínimo de tenacidade a impacto e materiais de base com dimensão superior a 12 mm, a norma ISO 15614-1 (2004) exige a execução do ensaio de impacto. Para que o ensaio de impacto seja considerado aprovado duas das três amostras do tipo Charpy em V para cada região da junta (MA e ZAC) devem conter valores acima ou iguais aos valores de energia absorvida média se comparado ao metal de base da junta. Uma das três amostras pode apresentar energia absorvida abaixo da média especificada, porém não inferior a 70%. O aço API 5L grau B possui o valor mínimo de energia de 40 Joules (API 5L, 2004), ou 20 Joules para amostras com metade da dimensão da amostra das dimensões originais de 10 x 10 mm, assim como as ensaiadas neste estudo. Caso o conjunto de três amostras não preencham os requisitos, três novas amostras devem ser extraídas da peça de teste. A média da energia absorvida destas três novas amostras somado aos anteriores não pode ser inferior a media requerida pelo ensaio.

Segundo a norma AWS D1.1 (2010) todo procedimento de soldagem que utiliza o processo de soldagem com arame tubular autoprottegido (FCAW-S), associado a outro processo de soldagem qualquer, deve ser submetido ao ensaio de impacto para verificação da energia absorvida na interface entre os processos (AWS D1.1, 2010). Para esta norma, a energia mínima do ensaio de 20 J deve atender às exigências da norma ASTM A370 (2009). Para a amostra com dimensão reduzida de 10 x 5 mm, o valor mínimo proporcional deve ser de 11 J (ASTM A370, 2009). Quando for requerido em documentos de contrato, o ensaio de impacto deve ser executado conforme a temperatura e a orientação do cliente (AWS D1.1, 2010).

#### 4.6.6 Ensaio Visual

Para o código ASME BPVC IX (2010) e para a norma API STD 1104 (2005) não são exigidos ensaios não destrutivos após soldada uma peça de teste para qualificação de um novo procedimento. Por este motivo, não há nenhuma referencia adotada ou algum critério de aprovação para o ensaio não destrutivo do tipo visual. O código da ASME BPVC IX (2010) faz referencia ao código ASME BPVC V (2011) para avaliação e detecção de descontinuidades em juntas soldadas.

Na norma API STD 1104 (2005) são expostos os critérios de aprovação para o ensaio visual somente para qualificação de soldadores. Para ser considerada aprovada, a solda não deve conter trincas de qualquer espécie, penetração inadequada ou perfurações. As mordeduras podem ter dimensão máxima de 0,8 mm (1/32”) ou somarem no máximo 50 mm em um trecho de 300 mm de cordão de solda. A falha em atender estes requisitos impede que a junta soldada prossiga para os demais ensaios mecânicos solicitados pela norma para qualificação do soldador.

Para a norma ISO 15614-1 (2004), o ensaio visual possui critérios de aprovação muito similares ao ensaio macrográfico. Com exceção de algumas descontinuidades do tipo volumétricas (inclusão de escória, falta de fusão entre passes, falta de fusão na lateral do chanfro) que não podem ser detectadas no ensaio visual, todas as demais imperfeições podem também ser detectadas. De acordo a norma ISO 15614-1 (2004) o ensaio pode ser realizado antes, durante e logo após a soldagem.

Segundo o código da AWS D1.1 (2010), no item 4.9.1.1, a inspeção visual de uma junta de topo deve atender a seis requisitos básicos para que seja considerada aprovada, conforme mencionados a seguir.

- Nenhuma trinca é aceitável no ensaio visual, independente da dimensão.
- As crateras encontradas devem ser preenchidas até a altura da seção transversal.
- O reforço da solda não deve apresentar dimensão superior a 3 mm (1/8”) tampouco falta de fusão.
- Mordeduras não devem exceder a dimensão de 1 mm (1/32”)

- Toda a raiz deve ser inspecionada para juntas de penetração completa. A raiz deve estar livre de descontinuidades, não deve conter trincas, falta de fusão ou penetração insuficiente.
- Para juntas de penetração completa soldadas somente de um lado sem sobre juntas a concavidade da raiz não deve ultrapassar 2 mm (1/16”).

#### **4.6.7 Ensaio por Líquido Penetrante**

Para os códigos da ASME BPVC IX (2010) e AWS D1.1 (2010), e também para a norma API STD 1104 (2005), na qualificação de um novo procedimento de soldagem, não é exigido o ensaio do tipo líquido penetrante.

Segundo a norma API STD 1104 (2005) para as juntas soldadas em produção são especificados os ensaios não destrutivos de radiografia, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, ultrassom e visual. Porém, para a qualificação de um novo procedimento de soldagem, tais ensaios não destrutivos não são necessários. Os critérios mencionados a seguir, especificam o método de aplicação do ensaio de líquidos penetrantes para esta norma, apesar de não exigido para a qualificação do procedimento.

As indicações reveladas por meio do ensaio de líquidos penetrantes não são necessariamente imperfeições ou falhas. Limpeza com escovas rotativas, marcas ou riscos de remoção de escória ou condições de superfície irregular no material de base podem apresentar possíveis indicações que são desconsideradas na análise final dos critérios de aprovação. Qualquer indicação igual ou inferior a 2 mm (1/16”) deve ser considerada sem relevância. Indicações relevantes são aquelas que possivelmente podem produzir imperfeições na solda. Indicações comprimento superior a três vezes a largura são classificadas como lineares. Indicações com comprimento inferiores a três vezes a largura são consideradas circulares.

No critério de aprovação para este ensaio, segundo a API STD 1104 (2005), a solda ensaiada não deve apresentar as seguintes indicações:

- Indicações lineares do tipo trincas de cratera superiores a 4 mm (5/32”);
- Outras indicações lineares classificadas como trincas que não sejam trincas de cratera;
- Indicações lineares que indiquem fusão incompleta excedentes a 25 mm (1”) em um comprimento total a 300 mm do comprimento soldado.

- Indicações circulares podem ser classificadas como porosidade, de acordo com os critérios estabelecidos no item deste estudo 3.4.4.

Para a qualificação de um novo procedimento de soldagem pela norma ISO 15614-1 (2004), é exigido em juntas de topo com penetração total, um ensaio para detecção de trincas superficiais em toda a extensão da peça de teste com partículas magnéticas ou líquidos penetrantes. Para materiais não magnéticos, conforme é enquadrado o material de base deste estudo, o aço API 5L grau B, foi utilizado o ensaio de líquido penetrante. Os critérios de aprovação para execução do ensaio por líquido penetrante são baseados na norma ISO 23277.

#### **4.6.8 Ensaio Radiográfico**

Para os códigos da ASME BPVC IX (2010) e API STD 1104 (2005), na aprovação de um novo procedimento de soldagem, não é exigido o ensaio não destrutivo do tipo radiográfico. Este tipo de ensaio pode ser realizado para a qualificação de soldadores, como método opcional de aprovação, em substituição aos ensaios mecânicos para ambos os códigos.

Os critérios de aprovação do ensaio radiográfico, para a qualificação de um novo procedimento de soldagem segundo a norma ISO 15614-1 (2004), são baseados nos níveis de qualidade da norma ISO 5817 (2003). O procedimento de soldagem é aprovado se as imperfeições detectadas no ensaio radiográfico estiverem dentro dos limites de qualidade nível B, especificado na ISO 5817 (2003), com exceções das imperfeições do tipo reforço excessivo, penetração excessiva e espessura de garganta excessiva. O limite de qualidade para estas imperfeições é definido pelo nível C.

Para o código AWS D1.1 (2010), antes da usinagem das amostras para execução dos ensaios mecânicos, a junta deve ser inspecionada por meio de um ensaio radiográfico. A cláusula 6 na parte C deste mesmo código, menciona os critérios de aprovação para o ensaio radiográfico em juntas tubulares. Qualquer descontinuidade com comprimento maior do que três vezes a espessura é considerada como alongada, e qualquer descontinuidade com comprimento igual ou inferior a três vezes a largura é considerada como arredondada. Há seis condições básicas para que uma solda em tubulação seja aprovada no ensaio radiográfico. Tais condições listadas abaixo não podem ser excedidas,

a menos que sejam avaliadas rigorosamente por uma equipe de engenheiros segundo as condições de utilização final da junta.

- Descontinuidades superiores às estipuladas na figura 47;
- Distância entre as descontinuidades inferior às estipuladas na figura 47;
- Descontinuidades arredondadas superiores a  $E/3$  (4,3 mm);
- Descontinuidades arredondadas agrupadas que na soma de todas as dimensões ultrapasse o valor máximo de uma única descontinuidade da figura 47.
- A soma de todas as descontinuidades com dimensão igual ou inferior a 2,5 mm ( $3/32''$ ) não deve exceder ao valor de  $2E/3$  ou 10 mm ( $3/8''$ ) em um comprimento inferior a 25 mm ( $1''$ ).
- Descontinuidades alongadas em um comprimento de solda de  $6E$  que somadas ultrapassem o valor de  $E$ .

Os valores de B, C e E (figura 47), 8,75 mm ( $11/32''$ ), 27 mm ( $1.1/16''$ ) e 13 mm ( $1/2''$ ), respectivamente, referem-se à dimensão máxima das descontinuidades, distancia axial mínima entre descontinuidades e dimensão da solda.

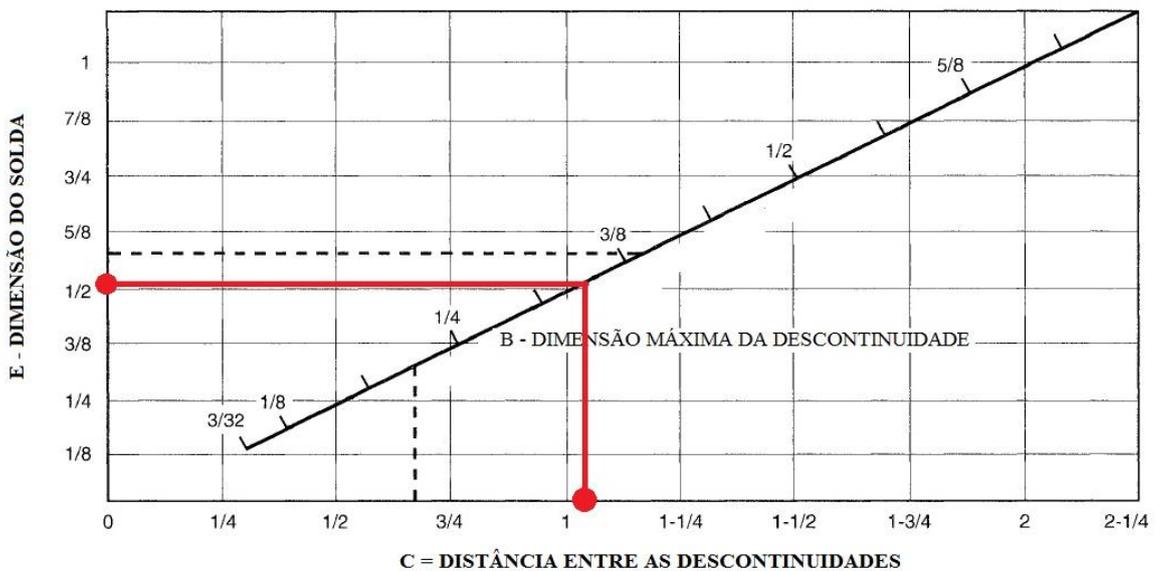


Figura 47. Limites para aceitação do ensaio radiográfico do código. Fonte: AWS D1.1 (2010).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Ensaios mecânicos e ensaios não destrutivos

#### 5.1.1 Ensaio Visual

Após executado o ensaio não destrutivo do tipo visual conforme item 4.5.7 e utilizados como critério de aceitação do ensaio o item 4.6.6, todas as amostras foram consideradas aprovadas. Não houve nenhuma indicação do tipo falta de fusão na superfície do cordão, falta de penetração, mordeduras, porosidades superficiais ou trincas. Nas figuras 48 e 49 é possível verificar a integridade de cada peça de teste soldada. Na figura 49 é mostrada a raiz da peça de teste, soldada com o processo combinado, evidenciando a penetração total com reforços dentro do limite aceitável de 4,0 mm máximo estipulados na ISO 15614-1 (2004).



Figura 48. Ensaio visual após escovamento. SMAW-2. Fonte: o autor.

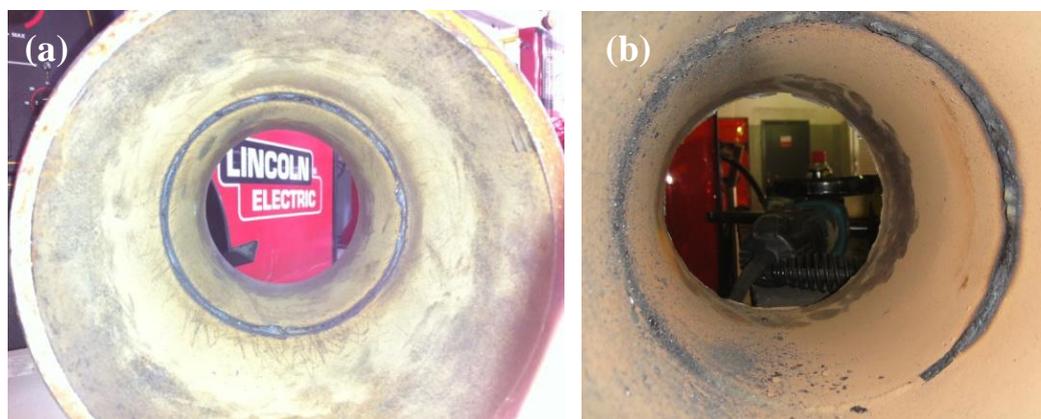


Figura 49. Ensaio visual na raiz da peça de teste SMAW-3 (a) e FCAW-1 (b). Fonte: o autor.

### 5.1.2 Ensaio por Líquido Penetrante

Após executado o ensaio não destrutivo do tipo visual, todas as amostras foram submetidas ao ensaio não destrutivo por líquido penetrante. Não ocorreram indicações relevantes segundo os critérios de aprovação. As descontinuidades do tipo: falta de fusão, falta de penetração, mordeduras, porosidades superficiais, trincas entre outras detectáveis por meio deste ensaio, não estiveram presentes nos cordões das peças de teste. O registro fotográfico do procedimento pode ser observado na figura 50.



Figura 50. Ensaio não destrutivo de líquido penetrante. Limpeza e aplicação do líquido penetrante solúvel em água. SMAW-3. Fonte: o autor.

Durante a realização do ensaio de líquido penetrante, na terceira peça de teste soldada com o processo de eletrodo revestido, foram detectados dois poros isolados não perceptíveis ao ensaio visual, com dimensão inferior a 1,0 mm cada, separados a uma distancia de 10 mm. Segundo os critérios de aprovação da norma ISO 15614-1 (2004), na qualificação de um procedimento de soldagem, poros isolados internos ao cordão de solda não devem exceder a dimensão máxima de 2,0 mm. Tais poros foram considerados pertencentes ao grupo de descontinuidades internas ao cordão de solda (ISO 15614, 2004), pois foram localizados em uma área desbastada do cordão de solda (figura 51).



Figura 51. Ensaio não destrutivo de líquido penetrante. Porosidades isoladas. SMAW-3. Fonte: o autor.

### 5.1.3 Ensaio Radiográfico

Depois de finalizado o ensaio não destrutivo por líquido penetrante, o ensaio radiográfico também foi executado. As principais descontinuidades classificadas pela ASME BPVC V (2011), na qual podem ser detectadas com facilidade por este ensaio, conforme tabela 8 do item 3.6.1 deste estudo (ASME BPVC V, 2011), não estiveram presentes nos cordões das peças de teste. Há alta eficiência e sensibilidade deste tipo de ensaio para detecção das descontinuidades do tipo mordedura, reforço excessivo, penetração incompleta, inclusões, porosidades, concavidade de raiz, desalinhamento e perfurações. Assim como no ensaio por líquidos penetrantes, não aconteceram indicações relevantes segundo os critérios de aprovação. O registro fotográfico dos resultados pode ser observado da figura 52 (a) a (c).



Figura 52. Ensaio radiográfico. Posição 1 a 3, respectivamente “a” até “c”. SMAW-3. Fonte: o autor.

Durante o ensaio radiográfico da peça de teste SMAW-3 (figura 53) foi possível observar dois poros isolados de dimensão inferior a 1 mm cada um. A existência

de poros isolados em uma junta soldada não é rara, porém deve ser atentado caso seja detectado uma uniformidade, agrupamentos de porosidades ou poros isolados superiores às dimensões permitidas nos critérios de aceitação das normas e códigos.

Por ser detectada isoladamente, a provável causa destes poros pode ser resultado de oscilações bruscas na tensão ou corrente, assim como mencionadas na tabela 7 do item 3.3.5. O processo de formação de poros é descrito em detalhes no item 3.6.4 deste estudo.



Figura 53. Ensaio radiográfico. Poros isolados. SMAW-3. Fonte: o autor.

#### **5.1.4 Ensaio de Tração**

##### **5.1.4.1 Peça de teste SMAW-1**

O valor do limite de resistência mínimo estipulado pelo código ASME BPVC IX (2010) para qualificação do procedimento de soldagem com o material de base API 5L grau B é de 415 MPa, dado pela tabela QW/QB-422. Todas as amostras extraídas da peça de teste SMAW-1 obtiveram valores superiores ao determinado no código e romperam no MB. Os valores do limite de resistência obtidos foram de 526 MPa e 554 MPa (tabela 15), respectivamente 27% e 35% acima do limite mínimo especificado, porém próximo ao valor informado no certificado de matéria prima do tubo de 485 MPa. Estes valores também ficaram bem próximos ao limite de resistência extraído do ensaio de tração realizado somente com MB, de 547 MPa e 530 MPa. Portanto, segundo o código ASME BPVC IX (2010), o ensaio foi considerado aprovado e satisfatório. Conforme é possível observar na figura 54, nas amostras foram observadas característica de rompimento dúctil com estricção na área de fratura de formato parcial de taça-cone. Examinando os demais códigos e normas para qualificação do procedimento de soldagem, as amostras também

seriam consideradas aprovadas, segundo os critérios apresentados no item 4.6.1 deste estudo.



Figura 54. Amostras rompidas fora da ZF e ZAC. SMAW-1. Fonte: o autor.

Tabela 15. Dados do ensaio de tração. SMAW-1

DADOS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2
Limite de Escoamento (MPa) - 0,2% Deformação	360	373
Valor médio com desvio padrão	366,5 ± 9,19	
Limite de Resistência (MPa)	526	554
Valor médio com desvio padrão	540 ± 19,80	

#### 5.1.4.2 Peça de teste SMAW-2

Assim como as amostras extraídas da peça de teste SMAW-1, as amostras da peça de teste SMAW-2 também obtiveram valores superiores ao determinado no código ASME BPVC IX (2010) e romperam fora da ZF (figura 55).



Figura 55. Amostras rompidas fora da ZF após o ensaio de tração. SMAW-2. Fonte: o autor.

A média aritmética dos valores de limite de escoamento e limite de resistência obtidos, foram, respectivamente, de 357 MPa e 534 MPa (tabela 16). O valor do limite de

escoamento informado no certificado de matéria prima é de 341 MPa, muito próximo do valores obtidos nos ensaios em razão do rompimento da amostra no MB. Portanto, segundo o código ASME BPVC IX (2010), o ensaio também foi considerado aprovado. É possível observar na figura 56 que as amostras demonstraram característica de rompimento dúctil com formato parcial tipo taça-cone.



Figura 56. Formato taça-cone no local do rompimento das amostras. SMAW-2. Fonte: o autor.

Tabela 16. Dados ensaio de tração. SMAW-2

RESULTADOS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4
Limite de Escoamento (MPa) - 0,2% Deformação	358	365	345	360
Valor médio com desvio padrão	357 ± 8,52			
Limite de Resistência (MPa)	531	536	532	538
Valor médio com desvio padrão	534,25 ± 3,30			

#### 5.1.4.3 Peça de teste SMAW-3

Assim como as amostras extraídas da peça de teste SMAW-1 e SMAW-2, as amostras da peça de teste SMAW-3 também obtiveram valores superiores ao determinado no código e romperam no MB (figura 57). A média aritmética dos valores de limite de escoamento foi de 369 MPa e para o limite de resistência 523 MPa (tabela 17). Assim como nos demais ensaios, o valor do limite de escoamento informado no certificado de matéria prima esteve muito próximo dos valores obtidos nos ensaios, em razão do rompimento estar localizado no MB. Portanto, segundo o código ASME BPVC IX (2010) o ensaio também foi considerado aprovado.

Tabela 17. Dados ensaio de tração. SMAW-3

RESULTADOS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2
Limite de escoamento (MPa) - 0,2% Deformação	371	367
Valor médio com desvio padrão	369 ± 2,83	
Limite de Resistência (MPa)	544	503
Valor médio com desvio padrão	523,5 ± 28,99	

#### 5.1.4.4 Peça de teste FCAW-1 e FCAW-2

As amostras extraídas da peça de teste soldadas com o processo combinado, FCAW-1 e FCAW-2, obtiveram valores superiores ao determinado no código e romperam no MB (figura 58) e no MS (figura 59). Na tabela 18 estão as dimensões das amostras usinadas. A média aritmética dos valores de limite de escoamento obtidos foi de 383,5 MPa e para o limite de resistência 512 MPa (tabela 19 e 20). Como todas as peças de teste foram extraídas de uma mesma barra de tubo API 5L grau B, os valores do limite de escoamento informado no certificado de matéria prima são os mesmos dos ensaios das peças de teste soldadas somente com eletrodos revestidos, de 341 MPa. Com exceção de uma amostra que obteve valor de limite de escoamento de 340 MPa, 1 MPa abaixo do valor do certificado, e rompimento na zona fundida, as demais amostras alcançaram valores superiores ao informado no certificado.



Figura 57. Amostras rompidas no MB após ensaio de tração. SMAW-3. Fonte: o autor.

Tabela 18. Dados das amostras de tração – FCAW-1 e FCAW-2

AMOSTRA	ESPESSURA (mm)	LARGURA (mm)	ÁREA TRANSVERSAL (mm <sup>2</sup> )
FCAW-1 – amostra 1	4,74	19,24	91,20
FCAW-1 – amostra 2	5,50	19,21	105,65
FCAW-1 – amostra 3	5,58	19,14	106,80
FCAW-1 – amostra 4	4,72	19,19	90,58
FCAW-2 – amostra 1	7,03	19,21	135,05
FCAW-2 – amostra 2	6,99	19,23	134,42

O comportamento do ensaio das amostras caracterizou fratura dúctil, conforme é proposto pela literatura para o sequenciamento do rompimento de uma amostra (figura 60) no ensaio de tração. Portanto, com base nos resultados analisados, segundo o código ASME BPVC IX (2010), os ensaios foram considerados aprovados.

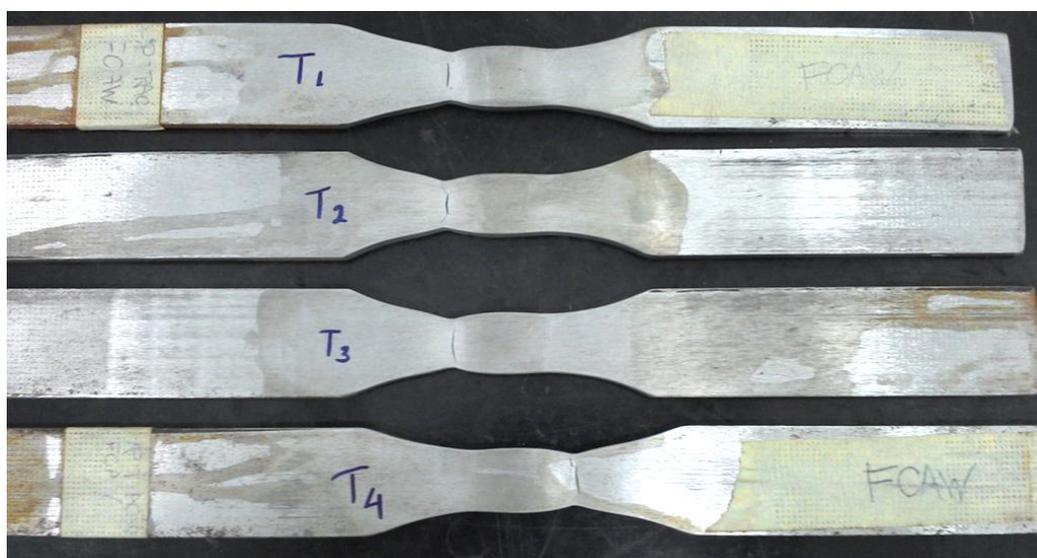


Figura 58. Amostras com rompimento fora da ZF. FCAW-1. Fonte: o autor.

O rompimento de duas amostras na zona fundida não reprovou o procedimento de soldagem, pois os valores de limite de resistência foram maiores do que o valor especificado para o metal de base. As duas amostras da peça de teste FCAW-2 romperam no MS, porém com valores de LR de 526 e 478 MPa, acima do limite especificado para o MB em 415 MPa, conforme mencionado no item 4.6.1 deste estudo.

Tabela 19. Dados do ensaio de tração. FCAW-1

RESULTADOS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4
Limite de Escoamento (MPa) - 0,2% Deformação	396	392	396	397
Valor médio com desvio padrão	395,25 ± 2,21			
Limite de Resistência (MPa)	519	513	511	525
Valor médio com desvio padrão	517 ± 6,32			

Tabela 20. Dados do ensaio de tração. FCAW-2

RESULTADOS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2
Limite de Escoamento (MPa) - 0,2% Deformação	380	340
Valor médio com desvio padrão	360 ± 28,28	
Limite de Resistência (MPa)	526	478
Valor médio com desvio padrão	502 ± 33,94	

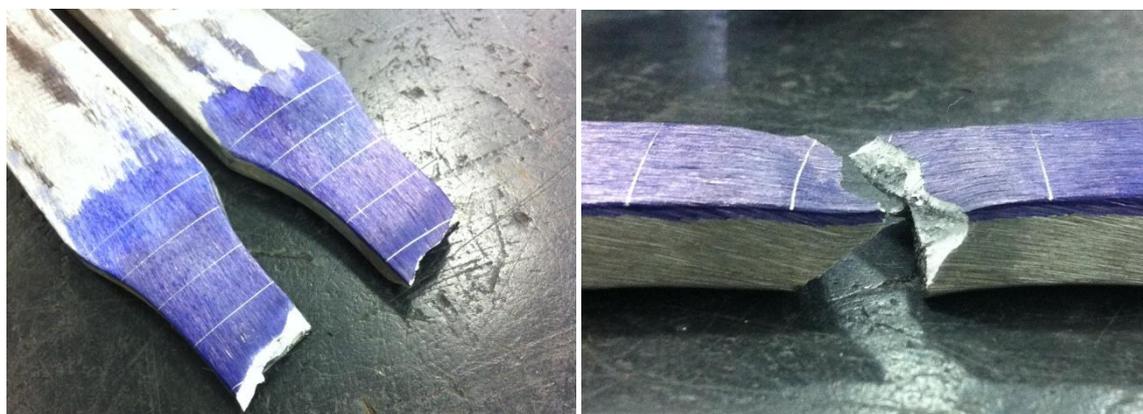


Figura 59. Amostra com rompimento no MS após ensaio de tração. FCAW-2. Fonte: o autor.

Portanto, a partir dos resultados obtidos com os ensaios de tração nas peças de teste soldadas com o processo combinado, foi possível provar que o cordão de solda manteve as propriedades mecânicas do MB, preservando a ductilidade da junta e com resultados semelhantes à soldagem com eletrodos revestidos.

Na tabela 21 é possível observar a semelhança dos resultados dos ensaios de ambos os processos de soldagem, com média e desvio padrão.

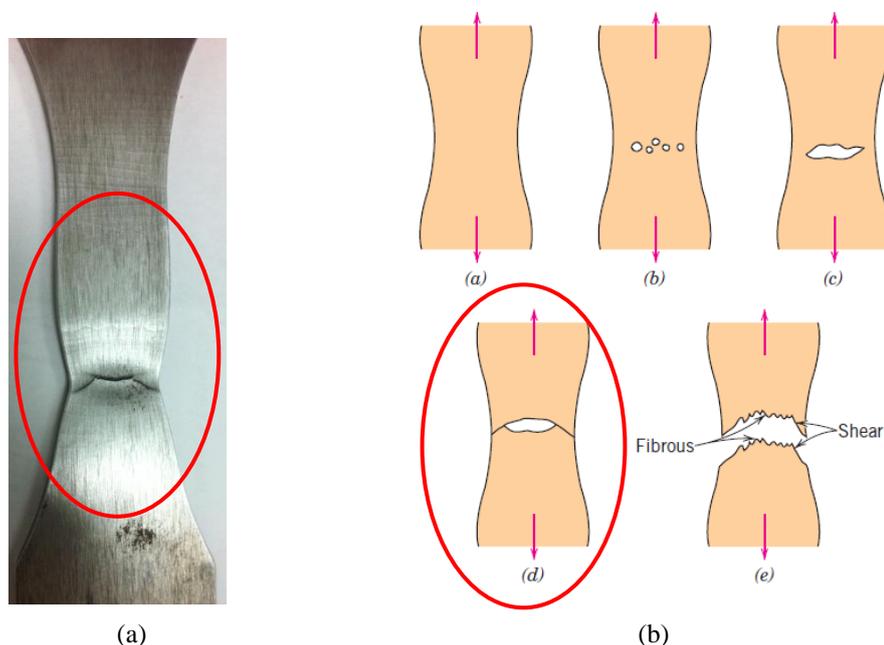


Figura 60. Amostra após ensaio de tração. (a) Rompimento fratura dúctil (b). FCAW-1 (CALLISTER, 2010). Fonte: o autor.

Tabela 21. Resumo dos resultados para todas as amostras

RESULTADOS – MÉDIA / DESVIO PADRÃO	SMAW	SMAW + FCAW-S
Limite de Escoamento (MPa) - 0,2% Deformação	362 ± 8,9	383 ± 22,2
Limite de Resistência (MPa)	533 ± 14,9	512 ± 17,7

### 5.1.5 Ensaio de Dobramento

Assim conforme comentado no item 4.5.2, o ensaio de dobramento, segundo a ASME BPVC IX (2010), tem o propósito de determinar se a junta soldada está em boas condições e possui ductilidade adequada. O metal de solda e a zona afetada pelo calor de todas as amostras estavam dentro da porção dobrada assim como recomendam as normas. A seguir são apresentados os resultados para as amostras de cada peça de teste.

#### 5.1.5.1 Peça de teste SMAW-1

Segundo os critérios de aprovação entre as normas estudadas, é unânime considerar para aceitação que a amostra não deve possuir descontinuidades maiores que 3

mm (1/8") em qualquer direção. As quatro amostras extraídas da peça de teste de numero 1 (SMAW-1), soldada com o processo de eletrodo revestido, foram consideradas aceitas. Algumas indicações foram encontradas por meio de um ensaio visual (figura 61), porém todas com dimensões bem inferiores as estipuladas pelo critério de aprovação do item 4.6.2 deste estudo. Para verificação da existência de descontinuidades não detectáveis a olho nu, foi executado um ensaio complementar por líquidos penetrantes. Foi confirmada a existência de algumas pequenas descontinuidades demarcadas na Figura 62 por meio do ensaio visual, que não invalidam o resultado positivo do ensaio.



Figura 61. Amostras após o ensaio de dobramento. SMAW-1. Fonte: o autor.

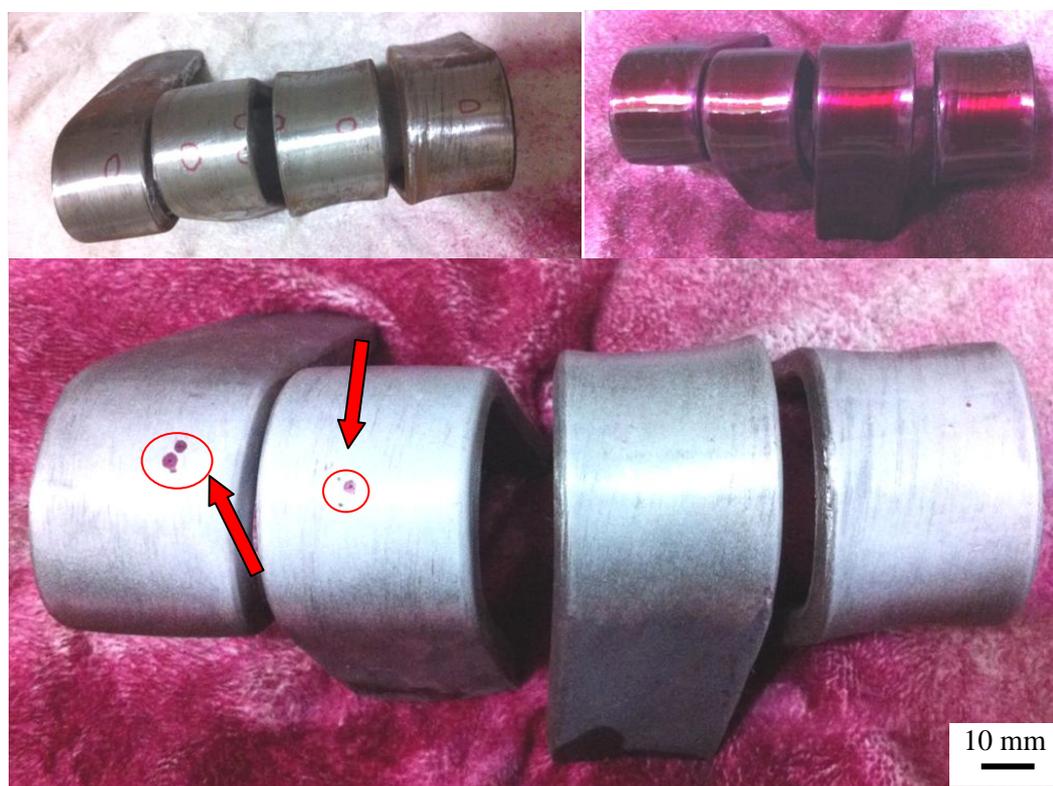


Figura 62. Ensaio de ensaio líquido penetrante após a dobra das amostras. SMAW-1. Sequencia: DF1, DF2, DR1 e DR2. Fonte: o autor.

### 5.1.5.2 Peça de teste SMAW-2

As quatro amostras extraídas da peça de teste de numero 2, soldadas com o processo de eletrodo revestido, também foram consideradas aprovadas (figura 63). Algumas indicações nas bordas da amostra DR1 foram encontradas por meio de um ensaio não destrutivo com líquido penetrante fluorescente (figura 64). Tais indicações não evidenciaram uma possível origem em inclusão de escória, falta de fusão ou trincas presentes na face do cordão. Por este motivo, estas descontinuidades foram desconsideradas, assim como permitem as normas e códigos descritos no item 4.6.2 deste estudo.



Figura 63. Amostras após o ensaio de dobramento. SMAW-2. Fonte: o autor.



Figura 64. Amostras após o ensaio de líquido penetrante. SMAW-2. Fonte: o autor.

### 5.1.5.3 Peça de teste SMAW-3

As quatro amostras extraídas da peça de teste numero 3, soldadas somente com o processo de eletrodo revestido, assim como para a primeira e segunda peça de teste,

também foram consideradas aprovadas. Porém, diferentemente dos outros ensaios de dobramento, nenhuma descontinuidade foi detectada (figura 65).



Figura 65. Amostras com revelador após o ensaio com líquido penetrante. SMAW-3. Fonte: o autor.

#### 5.1.5.4 Peça de teste FCAW-1 e FCAW-2

As amostras dobradas, extraídas da peça de teste soldada com o processo combinado de eletrodos revestidos e arame tubular, foram consideradas aceitas (figura 66). Para verificação da existência de trincas superficiais na porção dobrada, foi executado um ensaio de líquidos penetrantes. Foram detectadas algumas pequenas aberturas alongadas na amostra dobrada na face e na raiz da solda (figura 67) com 2,6 mm, 1,9 mm e 1,1 mm. Todas as aberturas ficaram abaixo do limite aceitável máximo de 3 mm.



Figura 66. Amostras após dobramento. Na sequência da figura: DF1, DF2, DR1 e DR2. FCAW-1. Fonte: o autor.

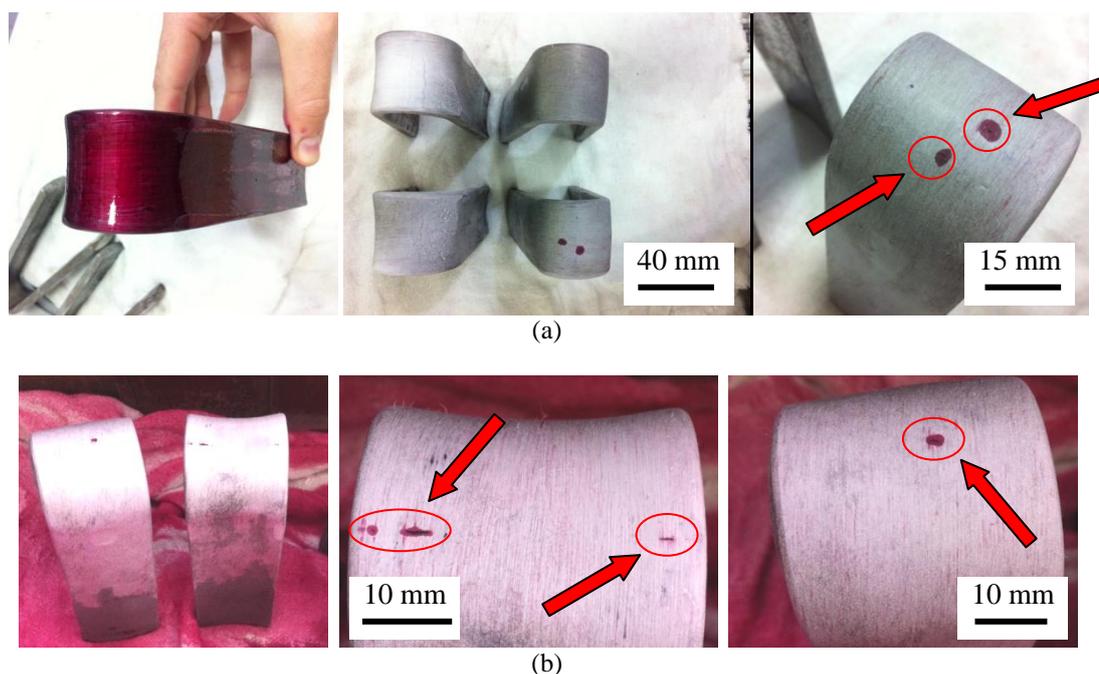


Figura 67. Amostras após o ensaio de líquido penetrante. FCAW-1 (a) e FCAW-2 (b) . Fonte: o autor.

Mediante ao ensaio de dobramento, foi possível demonstrar que há ductilidade suficiente nas juntas soldadas com o processo combinado. Portanto, baseado nestes resultados, comparado com a exigência das normas e códigos em relação à dimensão máxima das discontinuidades presente nas amostras, conclui-se que o ensaio de dobramento foi considerado aceito.

### 5.1.6 Ensaio de Dureza

As amostras embutidas, extraídas das peças de teste soldadas com o processo manual e com o processo combinado, foram analisadas com microdurômetro convencional e microdurômetro instrumentado. As medidas com escala de dureza Vickers para ambos os ensaios estão nas tabelas 22 a 25.

A profundidade média das marcações foi de 5  $\mu\text{m}$ , mensurada na curva do gráfico (profundidade versus força aplicada) do software utilizado na coleta dos dados. As três medições mostradas nas tabelas 22 a 25, correspondentes à ZAC, pertencem, respectivamente, à fase de grãos refinados (GR), fase de grãos grosseiros (GG) e grãos próximos à zona de ligação, conforme perfil de dureza recomendado pela norma Petrobras N-0133 (2013), descrita no item 4.5.3 deste presente estudo. Baseado na tabela 22, com valores extraídos do ensaio realizado no microdurômetro instrumentado, foram elaborados

os gráficos da figura 68 e 69. Os pontos plotados nestes gráficos são as médias obtidas por quatro, ou mais pontos, por região de interesse. Na figura 70 é possível observar as marcações observadas por meio do microscópio óptico acoplado ao microdurômetro instrumentado. Para que não houvesse algum erro de leitura e interpretação em função das pequenas marcações do microdurômetro nas regiões selecionadas, foram feitas, no mínimo, quatro marcações por ponto de interesse para extração da média aritmética.

### 5.1.6.1 Peças de teste SMAW

Tabela 22. Dados do ensaio de dureza SMAW-2 com microdurômetro convencional

LOCALIZAÇÃO DO PERFIL DE DUREZA (HV)	MB	ZAC			ZF			ZAC			MB
SUPERIOR DO CORDÃO	155	183	185	189	201	192	193	188	186	182	157
INFERIOR DO CORDÃO	151	168	181	198	-	179	-	190	180	171	149

Tabela 23. Dados do ensaio de dureza SMAW-3 com microdurômetro instrumentado

LOCALIZAÇÃO DO PERFIL DE DUREZA (HV)	MB	ZAC			ZF			ZAC			MB
SUP DO CORDÃO – MÉDIA	177	168	184	184	213	224	236	169	163	154	160
DESVIO PADRÃO	12	12	23	16	23	23	19	21	26	5	11
INF DO CORDÃO – MÉDIA	175	161	183	188	-	206	-	195	169	165	174
DESVIO PADRÃO	21	12	29	22	-	28	-	22	8	10	19

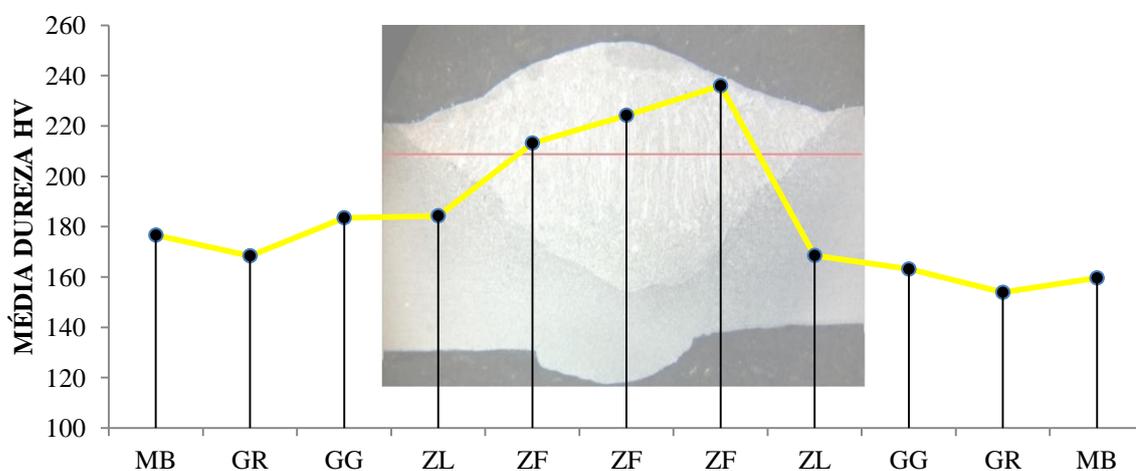


Figura 68. Gráfico com escala de dureza HV para valores próximos a superfície. SMAW-3. Fonte: o autor.

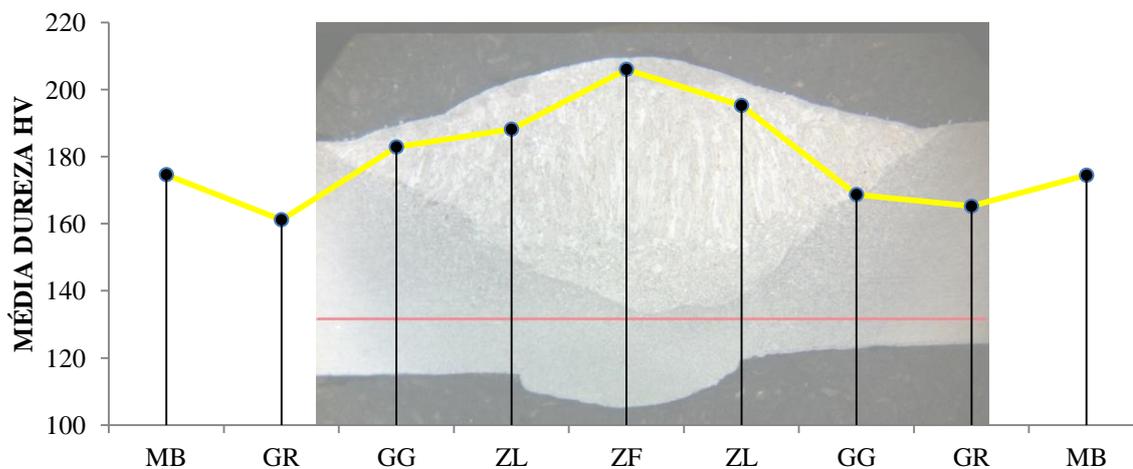


Figura 69. Gráfico com escala de dureza HV para valores próximos a raiz. SMAW-3. Fonte: o autor.

### 5.1.6.2 Peças de teste FCAW

Tabela 24. Dados do ensaio de dureza FCAW com microdurômetro convencional

LOCALIZAÇÃO DO PERFIL DE DUREZA (HV)	MB	ZAC			ZF			ZAC			MB
SUPERIOR	139	145	146	152	186	195	192	160	152	156	144
INFERIOR	154	161	166	170	-	216	-	204	183	186	153

Tabela 25. Dados do ensaio de dureza FCAW com microdurômetro instrumentado

LOCALIZAÇÃO DO PERFIL DE DUREZA (HV)	MB	ZAC			ZF			ZAC			MB
SUPERIOR – MÉDIA	166	170	173	186	201	214	219	187	176	182	160
DESVIO PADRÃO	2	24	30	18	19	31	31	7	9	28	19
INFERIOR – MÉDIA	131	176	180	171	-	199	-	183	186	172	149
DESVIO PADRÃO	11	29	23	18	-	53	-	31	57	31	24

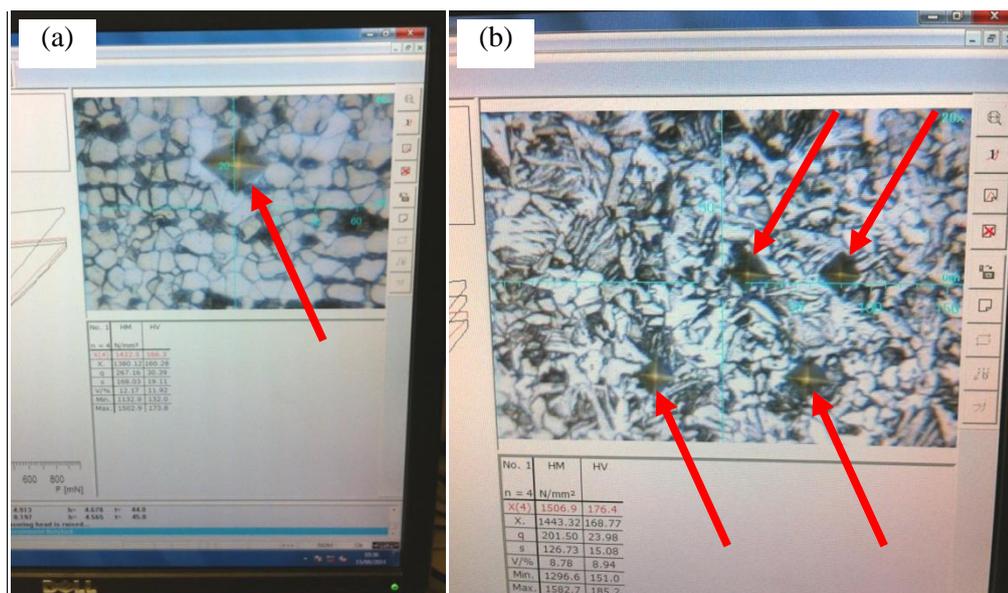


Figura 70. Marcações do microdurômetro instrumentado. (a) MB 40x e (b) ZAC 20x. Fonte: o autor.

Assim como Neto (2003) também observou no ensaio de microdureza para cordões soldados com arame tubular, a maior dureza esteve localizada na zona fundida para ambos os processos de soldagem. A média de aumento de dureza no MS em relação a ZAC foi de 20% em ambos os processos. A diferença de dureza encontrada no MS é resultado da estrutura bruta de fusão originada na solidificação, em comparação aos grãos de microestrutura recozida na ZAC e MB. Apesar da porcentagem de carbono do MA ser mais baixa do que no MB, a adição de manganês pelo MA no MS provoca um aumento generalizado de propriedades mecânicas, entre elas a dureza, limite de ruptura e tenacidade da região. Os valores de dureza encontrados estão abaixo do valor máximo especificado na norma ISO 15614-1 de 380 HV. Também foram elaborados os gráficos (figura 71 e 72), com valores extraídos do ensaio realizado no microdurômetro instrumentado, para a amostra soldada com o processo combinado.

Por não ser considerada uma chapa grossa, mas uma espessura de transição entre chapa grossa e chapa fina (GRONG, 1997), o resfriamento da parede do tubo é lento, evitando a formação de microestruturas suscetíveis a trincas induzidas por hidrogênio, ou trincas a frio, conforme comentado no item 3.6.2 deste estudo.

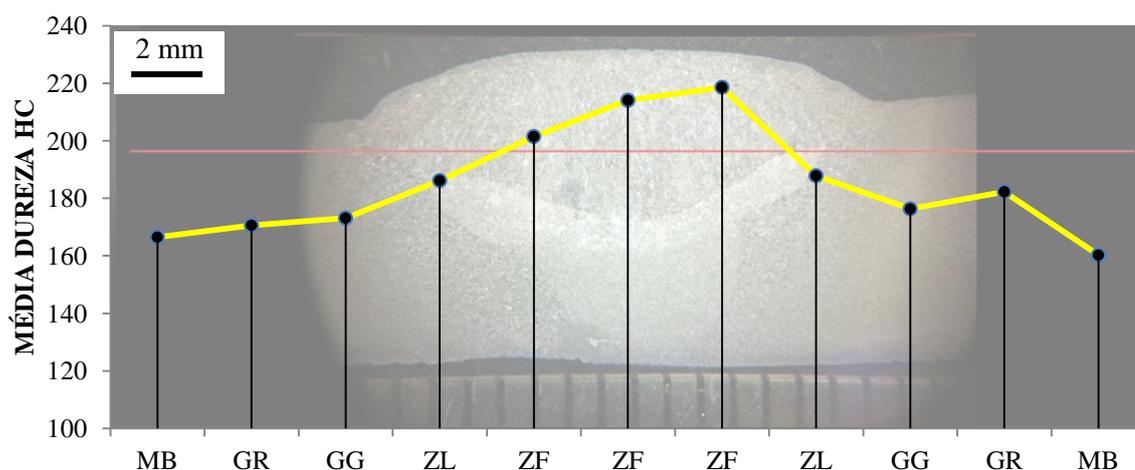


Figura 71. Gráfico com escala de dureza HV para valores próximos a superfície. FCAW-1. Fonte: o autor.

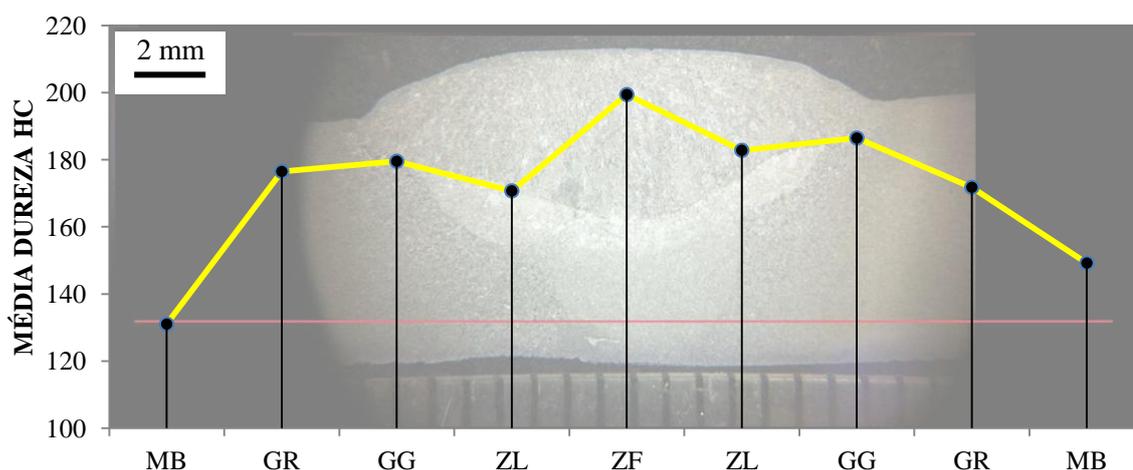


Figura 72. Gráfico com escala de dureza HV para valores próximos à raiz. FCAW-1. Fonte: o autor.

Portanto, após a realização do ensaio de dureza, foi possível concluir que foram formadas microestruturas com dureza dentro dos limites aceitáveis, que não são suscetíveis a trincas a frio, para ambos os cordões dos processos de soldagem utilizados neste estudo.

### 5.1.7 Ensaio de Impacto

Nas tabelas 26 a 28 é possível observar os resultados encontrados com base nos ensaios de impacto realizados para as amostras da figura 73, com os valores corrigidos para a dimensão reduzida da amostra (ASTM A370, 2009).

Tabela 26. Dados do ensaio de impacto. Metal de Base API 5L grau B

AMOSTRAS	MB
AMOSTRA 1	68
AMOSTRA 2	68
AMOSTRA 3	71
<b>MEDIA ARITMÉTICA</b>	<b>69</b>
<b>MEDIA COM DESVIO PADRÃO (valor corrigido - ASTM 370)</b>	<b>138 ± 3,5</b>

Tabela 27. Dados do ensaio de impacto. FCAW-1 e FCAW-2

AMOSTRAS	ZF	ZL + 1 MM	ZL + 5 MM
FCAW-1 - amostra 1	39	60	Não executado
FCAW-1 - amostra 2	40	75	Não executado
FCAW-1 - amostra 3	52	68	Não executado
FCAW-2 - amostra 1	43	74	61
FCAW-2 - amostra 2	33	62	64
FCAW-2 - amostra 3	37	66	63
<b>MEDIA ARITMÉTICA</b>	<b>41</b>	<b>68</b>	<b>63</b>
<b>MEDIA COM DESVIO PADRÃO (valor corrigido - ASTM 370)</b>	<b>82 ± 13</b>	<b>135 ± 12</b>	<b>125 ± 3</b>

Tabela 28. Dados ensaio de impacto. SMAW-3

AMOSTRAS	ZF	ZL + 1 MM	ZL + 5 MM
SMAW-3 - amostra 1	70	78	71
SMAW-3 - amostra 2	70	80	75
SMAW-3 - amostra 3	70	75	72
<b>MEDIA ARITMÉTICA</b>	<b>70</b>	<b>78</b>	<b>73</b>
<b>MEDIA COM DESVIO PADRÃO (valor corrigido - ASTM 370)</b>	<b>140 ± 0</b>	<b>155 ± 5</b>	<b>145 ± 4</b>

A técnica filetada foi utilizada na soldagem das peças de teste com o processo de eletrodos revestidos, formando cordões lineares e sem oscilação, com correntes de soldagem inferiores ao processo combinado, propiciou a formação de uma estrutura mais refinada e tenaz. Para a soldagem das peças de teste com o processo combinado, a técnica trançada foi utilizada no enchimento e acabamento. Esta técnica introduz uma quantidade significativamente maior de energia transferida à junta soldada e é desfavorável quando a tenacidade deve ser controlada. É possível que os baixos mais valores de energia absorvida para o ensaio com entalhe localizado no centro da ZF (tabela 26) do processo de soldagem combinado, se comparado aos demais resultados, seja resultado da técnica de soldagem adotada. Porém, a grande quantidade de poros encontrados nas amostras analisadas com microscópio eletrônico, também pode ter contribuído para a menor energia encontrada no MS, quando comparado as demais amostras da ZAC e MB.



Figura 73. Amostras após ensaio de impacto. SMAW-3. Fonte: o autor.

Observando as amostras depois de realizado o ensaio, foram encontradas estruturas que caracterizaram um rompimento dúctil, com a formação de lábios não paralelos ao plano dos entalhes (figura 74). As amostras com entalhe localizado no centro do cordão de solda, ou seja, no MS, romperam por completo, ao contrário das amostras extraídas do MB (figura 75). Este comportamento pode estar ser associado à microestrutura da região do metal de solda que contem grãos maiores e menor quantidade

de contorno de grãos para evitar o crescimento de trincas, permitindo o avanço da trinca e ruptura completa da amostra, caracterizando uma microestrutura menos dúctil (CALLISTER, 2010).

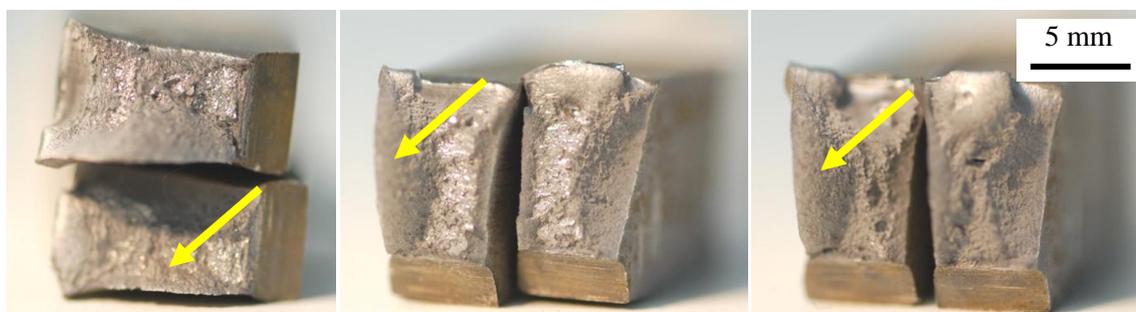


Figura 74. Amostras com entalhe localizado no MS. FCAW-1



Figura 75. Amostras com entalhe localizado no MB. FCAW-1. Fonte: o autor.

Assim como também foi observado por Junior (2013), no ensaio de impacto foram encontrados valores de energia absorvida inferiores no MS, em comparação a ZAC e MB, em peças de teste soldadas com o processo FCAW-S.

### 5.1.8 Ensaio Macrográfico

Os ensaios macrográficos foram realizados e avaliados de acordo com as exigências da norma ISO 15614-1 (2004) e do código AWS D1.1 (2010). A norma ISO 17639 (2003) é referenciada na ISO 15614-1 (2004) para realização dos procedimentos dos ensaios macro e microestruturais bem como os tipos de ataques químicos. Conforme comentado no item 4.5.4, este ensaio possibilita o dimensionamento dos reforços de face e raiz, localização de pontos com falta de fusão, falta de penetração, possíveis inclusões de escória, trincas no MS ou na ZAC e outras discontinuidades. Por meio da visualização da amostra atacada quimicamente foi possível delimitar as áreas de interesse para iniciar a análise microestrutural e o ensaio de dureza.

Algumas concavidades na raiz de no máximo 0,3 mm foram detectadas após o corte para usinagem da primeira peça de teste soldada com o processo eletrodo revestido (figura 76). De acordo com os critérios de aprovação da ISO 15614-1 (2004), para qualificação de um procedimento de soldagem, é permitida uma concavidade de raiz máxima de 0,35 mm. Como a amostra não apresentou falta de fusão na face da raiz, mas apenas leves concavidades, esta peça de teste também foi considerada aprovada.

Um desalinhamento de 1,5mm foi encontrado na macrografia sem ataque químico da primeira peça de teste soldada com o processo eletrodo revestido (figura 76). De acordo com a norma ISO 15614-1 (2004) é especificada a dimensão máxima de 2,0 mm para desalinhamento. Portanto, esta descontinuidade não caracteriza uma falha na qualificação.

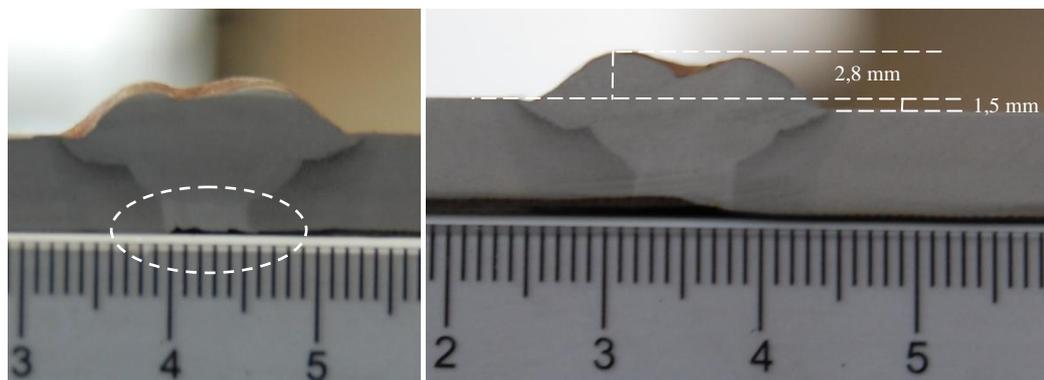


Figura 76. Macrografia da peça de teste SMAW-1. Indicações de concavidades na raiz e desalinhamento.

Fonte: o autor.

No ensaio macrográfico da amostra extraída da peça de teste soldada com o processo combinado, com eletrodo revestido e arame tubular, após ataque químico, foi possível identificar os passes, dimensionar o reforço do passe de acabamento, observar a área de refino de grão, a estrutura de solidificação e o metal de base não afetado pelo calor. (figura 77, 78, 79). Estas diferentes estruturas são detalhadas no ensaio micrográfico, item 5.1.5. Na figura 80 foi possível observar o crescimento epitaxial dos grãos na direção do maior valor do gradiente de temperatura, que é a linha de centro do cordão de solda. O fenômeno do crescimento epitaxial entre o limite da ZAC e a ZF, mostrado na figura 80, é explicado pela direção de crescimento dos grãos que apontam preferencialmente à direção de solidificação  $\langle 100 \rangle$  em metais CCC e CFC, e sentido de crescimento oposto a direção de extração de calor (figura 81) (GRONG, 1997).

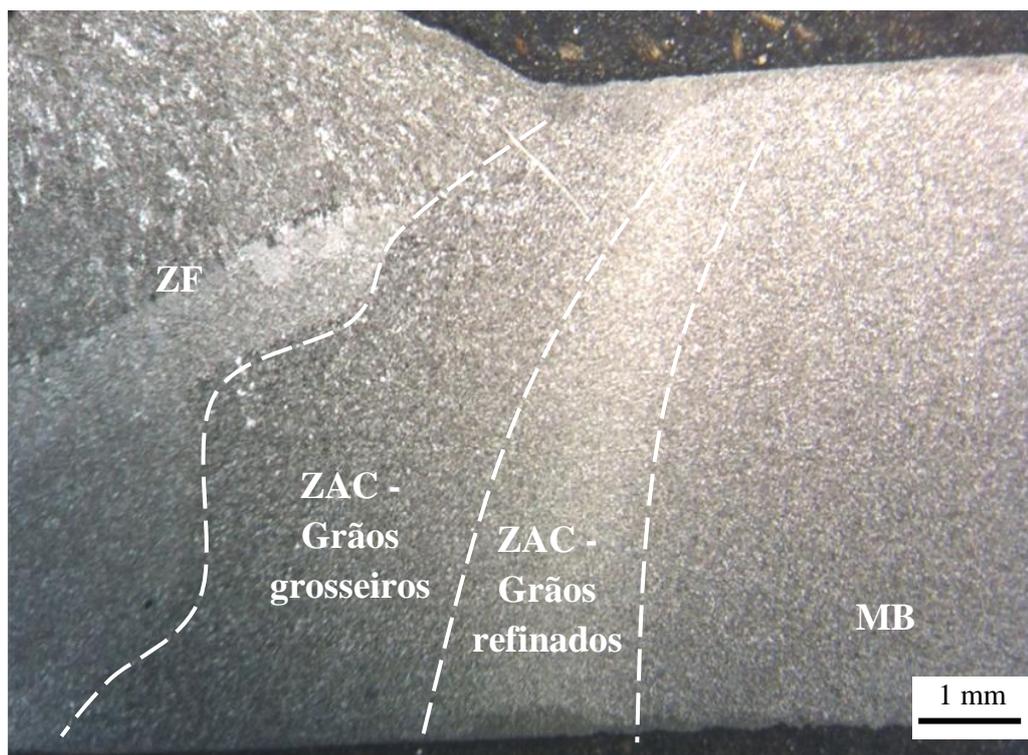


Figura 77. Diferentes zonas identificadas na macrografia da peça de teste FCAW-1. Fonte: o autor.

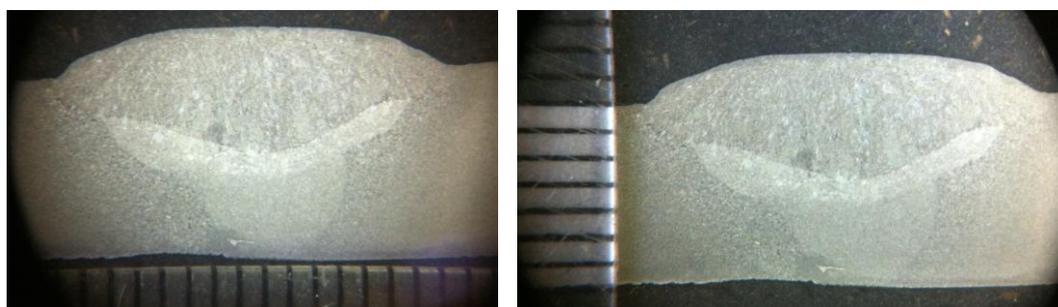


Figura 78. Ensaio macrográfico com auxílio de microscópio óptico com aumento de 6,3x e escala micrométrica. FCAW-1. Fonte: o autor.



Figura 79. Ensaio macrográfico a olho nu na amostra embutida com ataque químico. FCAW-1. Fonte: o autor.

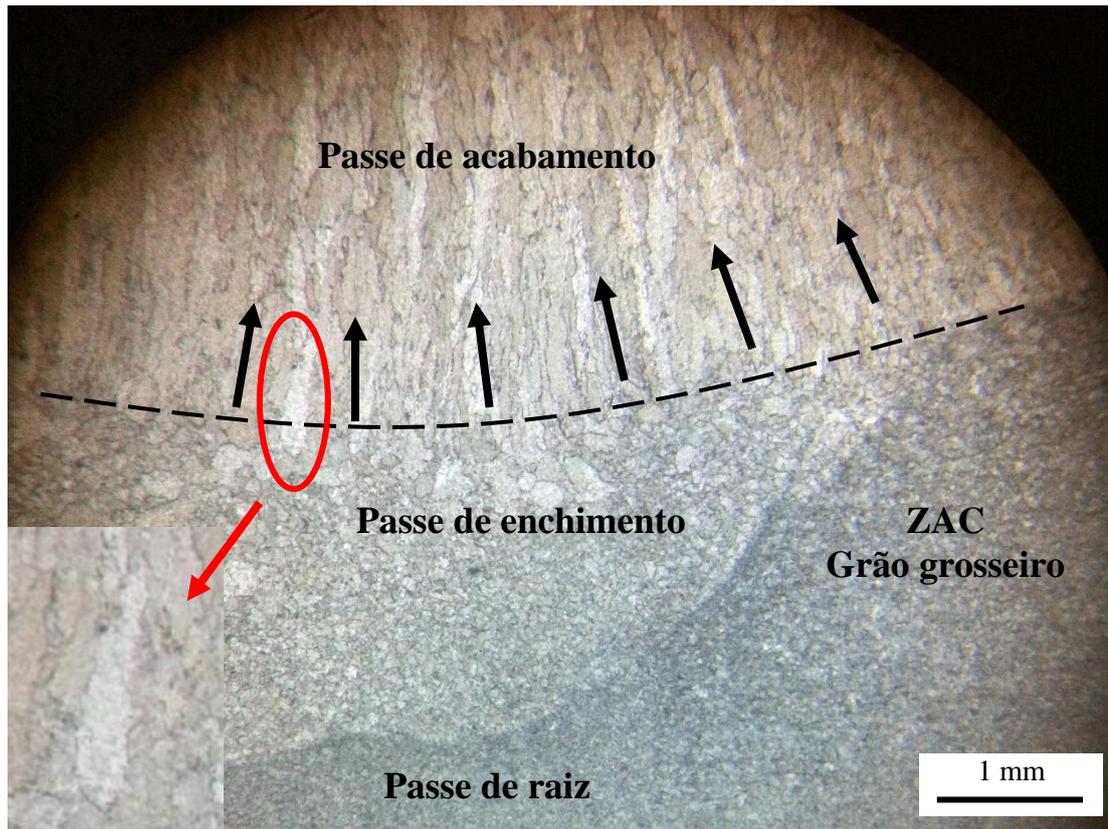


Figura 80. Crescimento epitaxial dos grãos no passe de acabamento sobre o passe de enchimento. SMAW-3.  
Fonte: o autor.

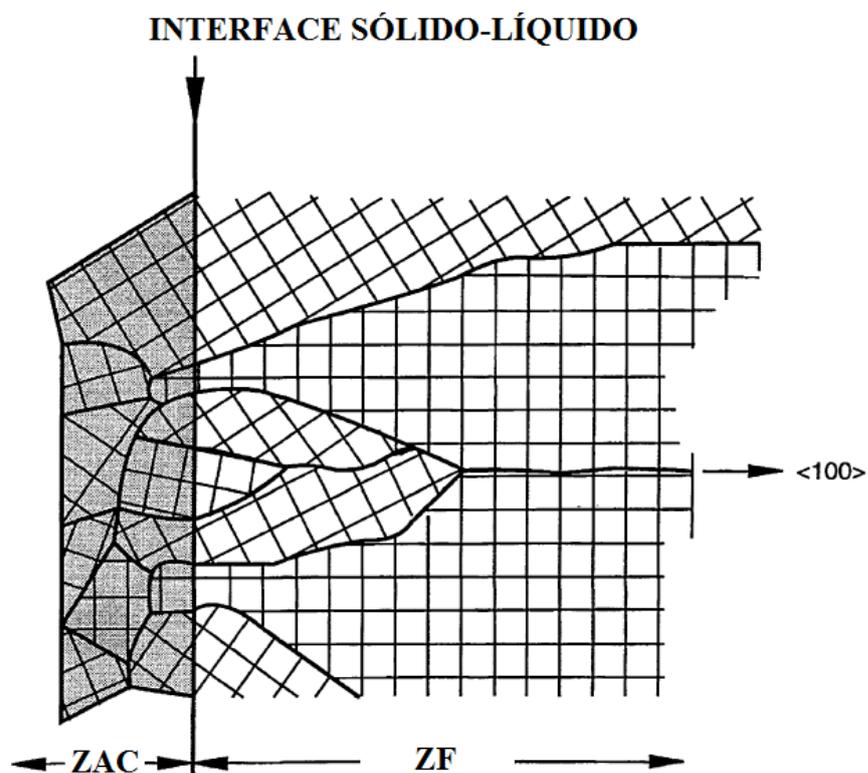


Figura 81. Crescimento epitaxial dos grãos do passe de acabamento sobre a ZAC. SMAW-3. Fonte: o autor.

## 5.1.9 Ensaio Micrográfico – Caracterização Microestrutural

### 5.1.9.1 Peça de teste SMAW

Na análise microestrutural da peça de teste soldada com o processo de eletrodos revestidos, foi possível observar a homogeneidade entre os passes e regiões em toda a solda sem que houvesse pontos com falta de fusão ou microestruturas descontínuas. Na figura 82 é mostrada a sequência dos passes de acabamento, enchimento e raiz. No metal base (figura 83 e 84) foi observada uma microestrutura alinhada tanto próxima à superfície externa, quanto próxima à superfície interna do tubo, resultado do processo termomecânico de laminação controlada que refina a estrutura austenítica (LEITE, 2010), com tamanho médio de grão ASTM 11 com  $8\ \mu\text{m}$ , baseado nas recomendações de medida da norma ASTM E112 (1996).

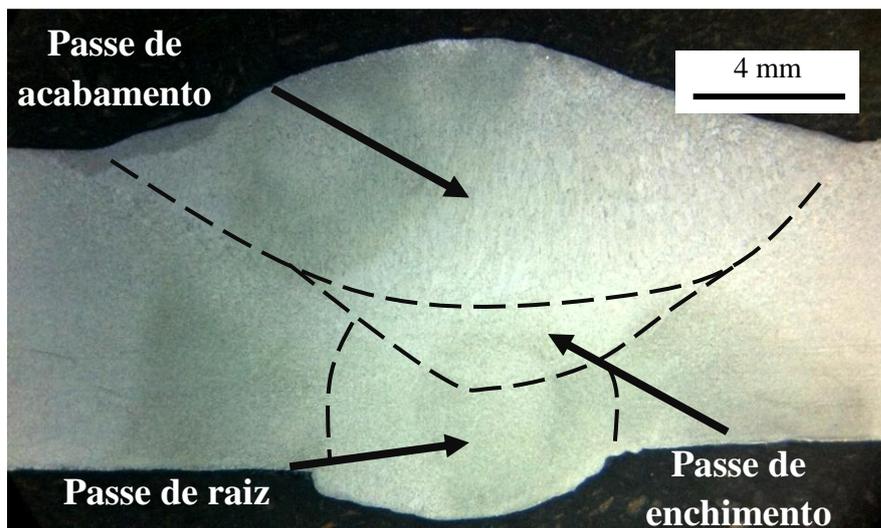


Figura 82. Macrografia com a sequência de passes. SMAW-3. Fonte: o autor.

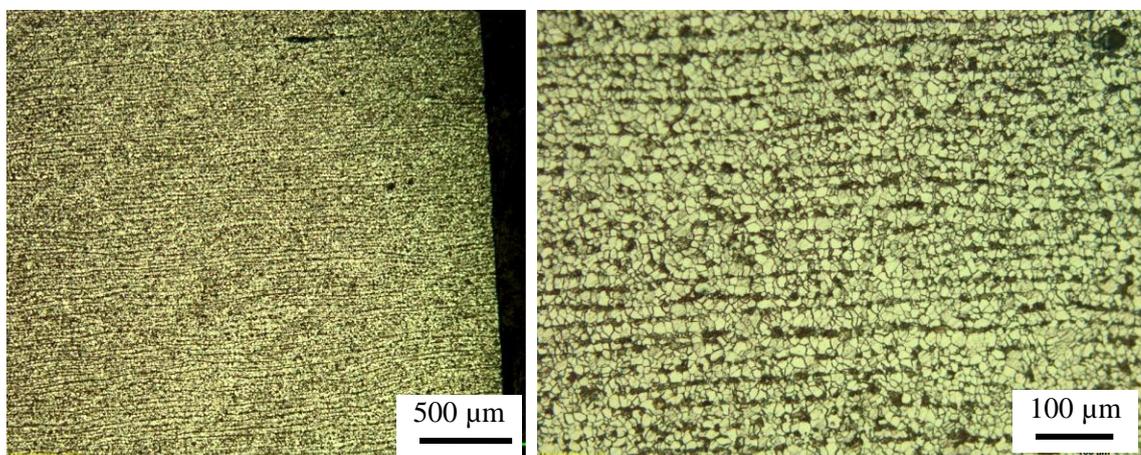


Figura 83. Micrografias alinhada do MB próximo à superfície externa do tubo. 5x (a) e 20x (b) . Fonte: o autor.

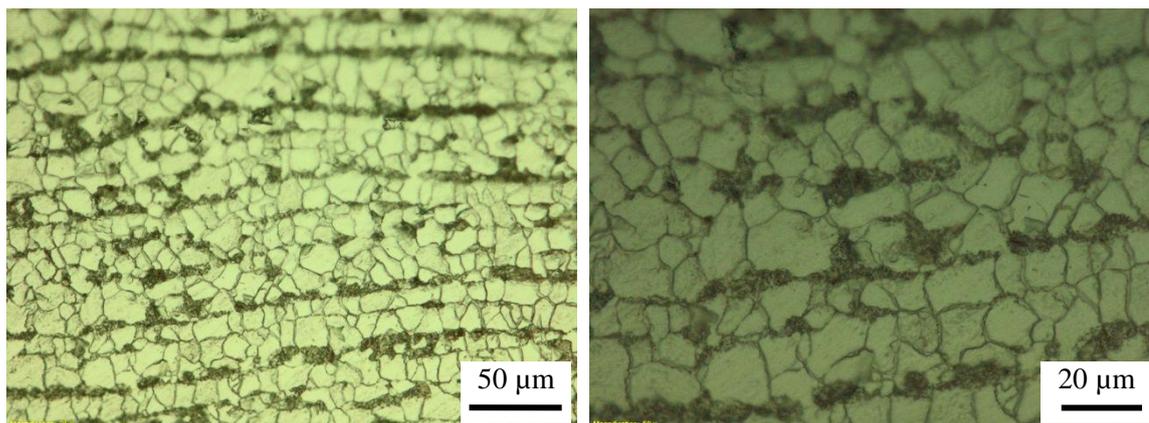


Figura 84. Micrografias do MB próximo à superfície interna do tubo. 50x (a) e 100x (b) . Fonte: o autor.

Na figura 85a a é possível observar novamente a microestrutura do metal de base, composto de grãos de ferrita (regiões claras) e grãos de perlita (regiões escuras), composta por lamelas de ferrita e cementita, estrutura típica de aços ferríticos. Na figura 85b foi registrada a zona fundida do cordão de solda na interface entre a ZAC e a ZF. A presença de grãos colunares nesta região é resultado da rápida solidificação, acompanhando perpendicularmente o máximo valor do gradiente de temperatura, que é a maior taxa de resfriamento do metal fundido. É possível observar na figura 85c a estrutura refinada da ZAC, distante da zona de ligação e próximo à região parcialmente transformada do MB.

Assim conforme a figura 85b, na figura 86 foi possível observar a estrutura dos grãos colunares avançando em direção a linha de centro do cordão de solda e os grãos grosseiros da ZAC próximos a ZL. Na figura 87 foi possível observar o início da região parcialmente transformada do MB com fluxo de calor proveniente da fase de grãos refinados da ZAC.

Conforme comentado no item 3.7.1, uma região com grãos refinados é mais dura e resistente do que outras regiões com grãos grosseiros em virtude do maior número de contornos de grãos para impedir o avanço de descontinuidades. O número ASTM (ASTM E112, 1996) de tamanho de grão encontrado na fase de grãos refinados foi de 11 e 12, com dimensão média de grão em 6,5 µm (figura 88b). Este é um dos motivos pela qual todos os ensaios de tração, considerando a soldagem sem descontinuidades e em perfeito estado, romperam no metal de base, menos resistente do que a ZAC, com tamanho de grão ASTM 11 correspondente a 8 µm.

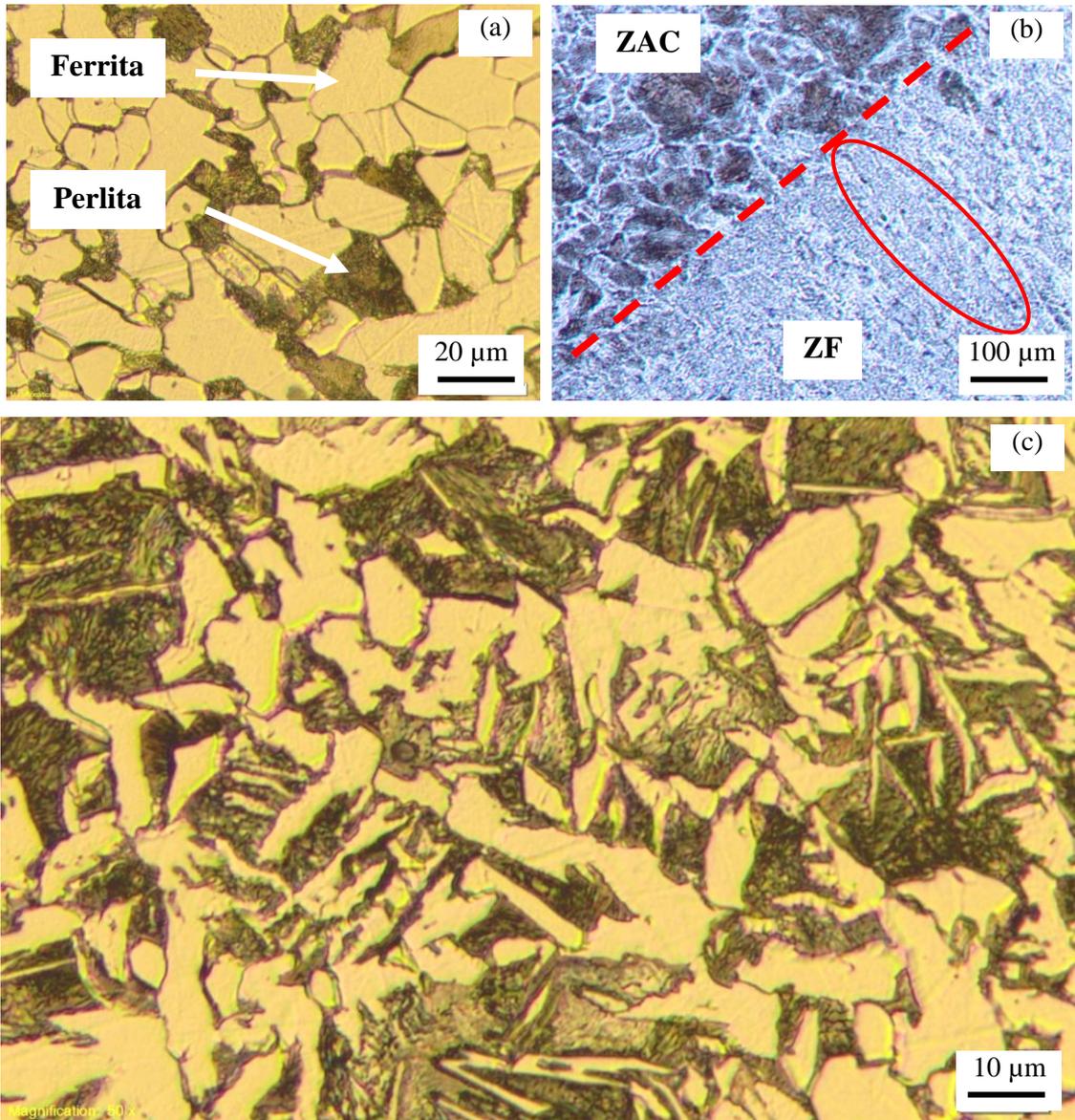


Figura 85. Micrografia do metal de base (a), zona fundida (b) e zona afetada pelo calor (c) . Fonte: o autor.

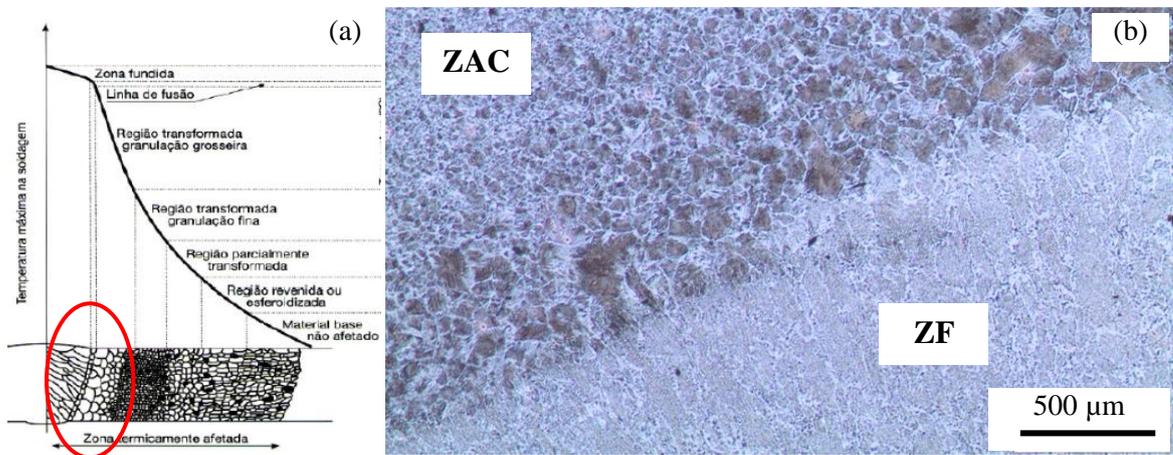


Figura 86. (a) Microestruturas do cordão de solda. (b) Micrografia da ZL com a fase de grãos grosseiros da ZAC. Fonte: o autor.

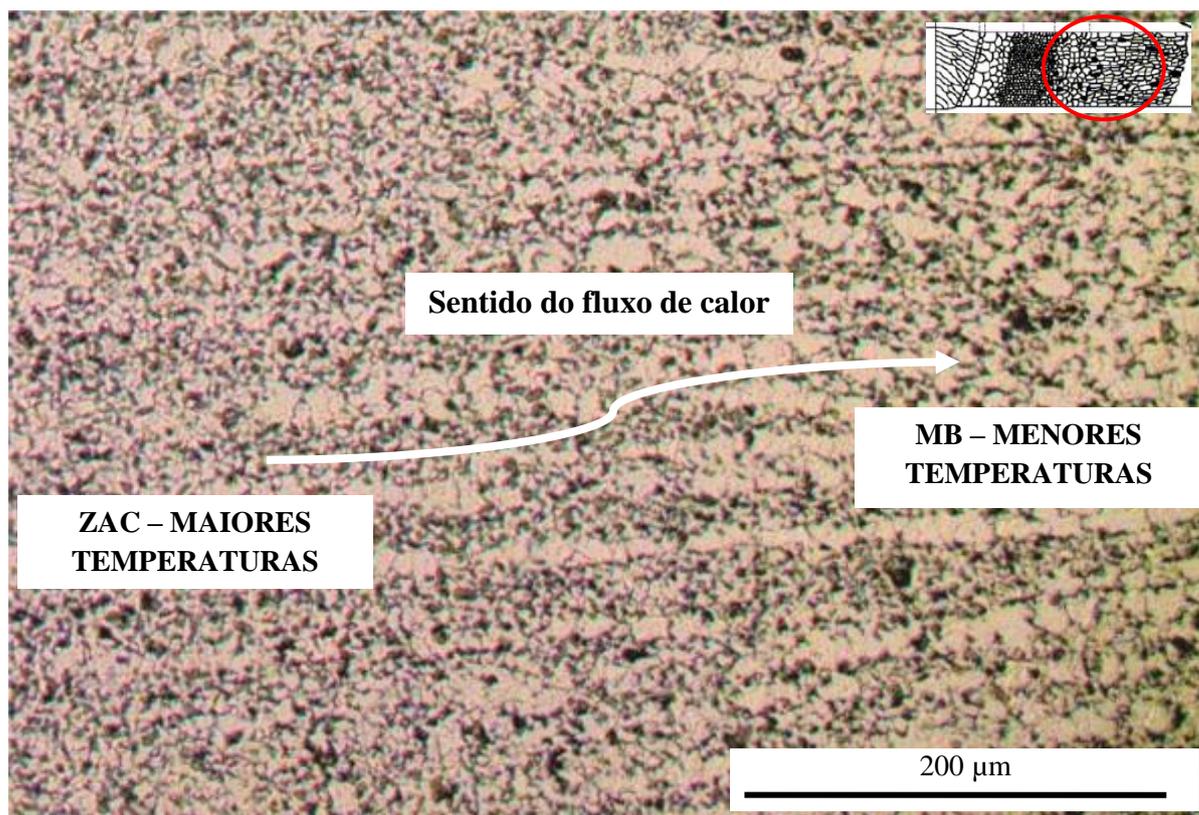


Figura 87. Micrografia do metal de base e início da ZAC com grãos refinados e sua localização no cordão de solda. Fonte: o autor.

Deste modo, foi evidenciado que o MB possuía propriedades mecânicas inferiores a todas as regiões da solda (zona afetada pelo calor, fase de refino de grão, fase de grãos grosseiros e zona fundida) garantindo as boas propriedades já esperadas da soldagem somente com eletrodos revestidos, baseado em um procedimento de soldagem largamente conhecido e utilizado no mercado mundial atualmente.

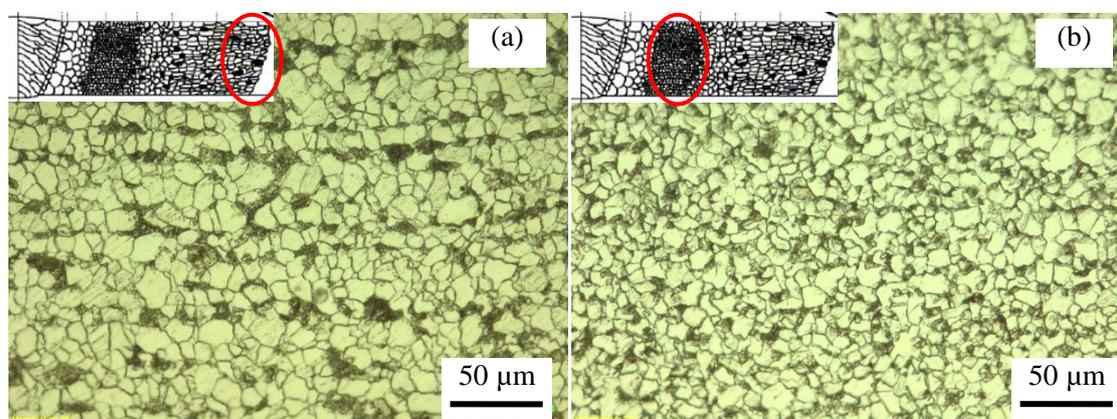


Figura 88. Micrografias com aumento de 50x do MB (a) e da fase de refino de grão (b) e suas localizações. Fonte: o autor.

Na figura 89 foi possível observar, por meio das fotografias de microscopia óptica no passe de raiz, duas regiões mais escuras de aproximadamente 50  $\mu\text{m}$  encontradas durante o ensaio micrográfico da peça de teste SMAW-3. Estas manchas foram identificadas como inclusões de escória. Inclusões de escória detectadas isoladamente são classificadas como uma descontinuidade volumétrica (ASME BPVC IX, 2010). Conforme comentado no item 3.6.3 deste estudo, estas inclusões foram resultado do aprisionamento de escória devido à rápida solidificação do metal de adição no passe de raiz. Como as inclusões não foram detectadas na interface entre os cordões ou passes subsequentes, a hipótese de limpeza ineficiente foi descartada, restando somente a hipótese da inclusão por condução incorreta do eletrodo neste trecho do cordão.

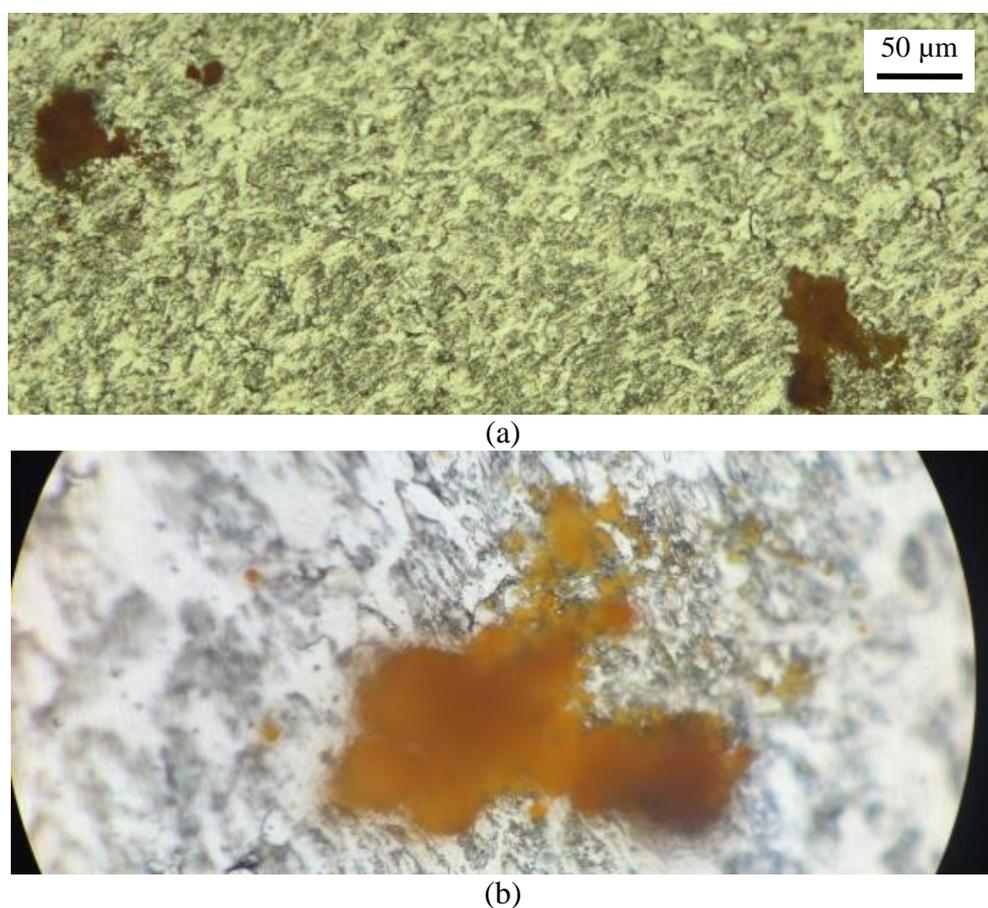


Figura 89. Inclusões de escória na raiz vista com aumento de 5x (a) e 100x (b). Fonte: o autor.

Segundo o critério de aprovação de todas as normas estudada para qualificação do procedimento de soldagem, estas inclusões não são relevantes para serem consideradas falhas, mas apenas descontinuidades de pequena dimensão.

### 5.1.9.2 Peça de teste FCAW

Durante a análise microestrutural da amostra soldada com o processo combinado entre eletrodos revestidos e arame tubular, foi possível observar claramente a morfologia dos grãos em todas as regiões: metal de base, zona afetada pelo calor, fase de refino de grão, fase de grãos grosseiros e zona fundida. Para melhor identificação das imagens, na figura 90 foi apresentada a sequência dos passes. No metal base (figura 91) foi observada uma microestrutura alinhada, resultado do processo termomecânico de laminação controlada, assim como comentado anteriormente na análise da peça de teste SMAW-3, com tamanho médio de grão ASTM 10 e 11 (8 e 11  $\mu\text{m}$ ) (ASTM E112, 1996).

Na região com refino de grão, foi observado o tamanho médio ASTM 12 com diâmetro médio de grão de 6  $\mu\text{m}$ . O refino dos grãos é resultado do ciclo térmico formado nesta região da ZAC chamado de normalização (KOLOSOSKI, 2008). É possível fazer uma comparação visual entre o metal de base e a fase de refino de grão do procedimento de soldagem combinado na figura 92.

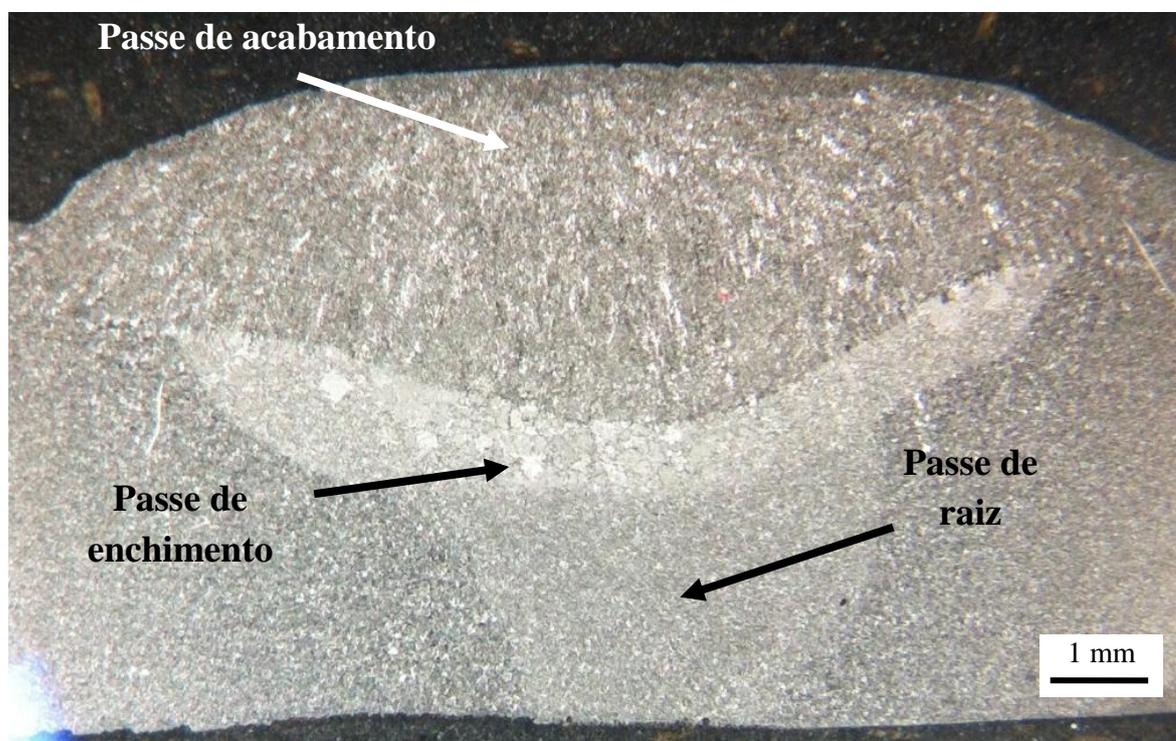


Figura 90. Macrografia com a sequência de passes. Fonte: o autor.

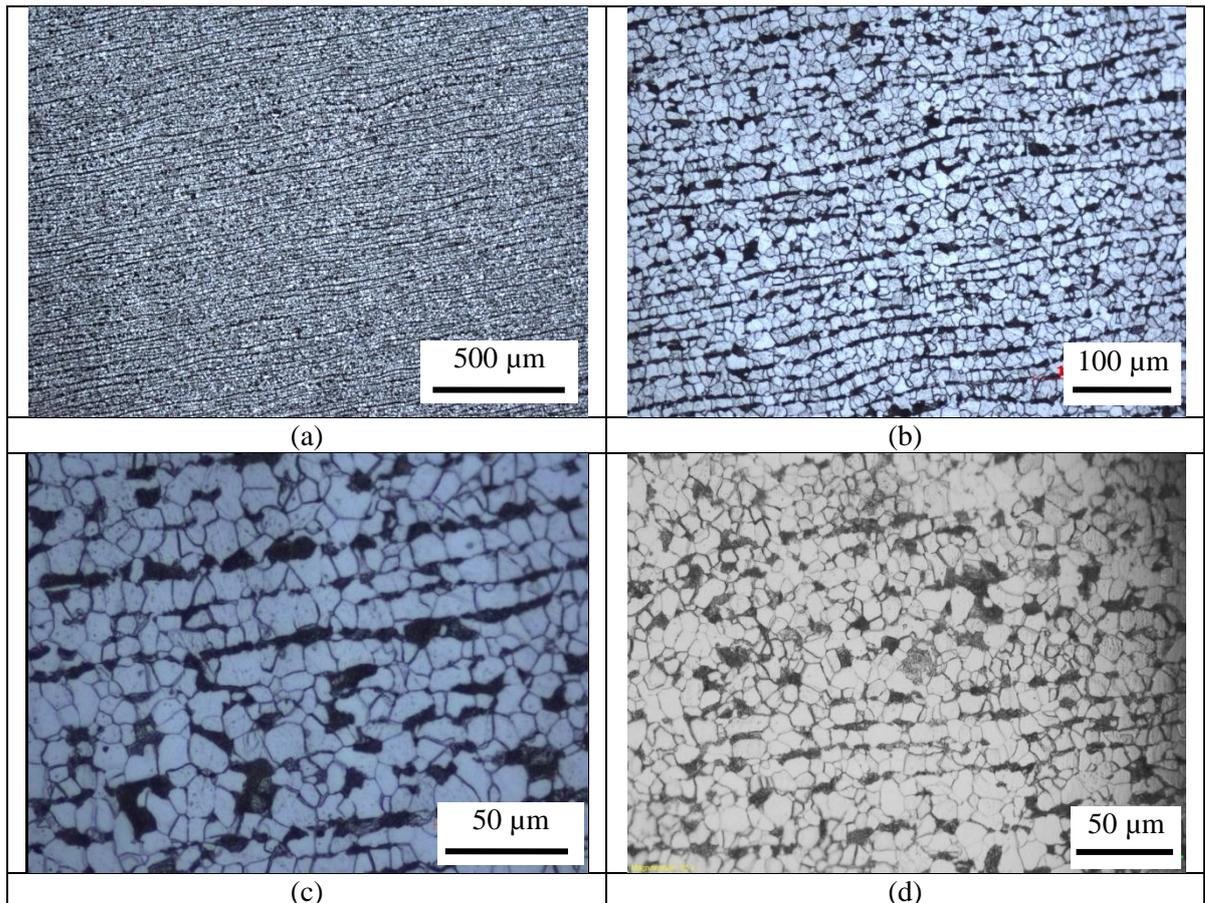


Figura 91. Micrografias do MB. 5x (a); 20x (b); 50x (c) e 50x (d) . Fonte: o autor.

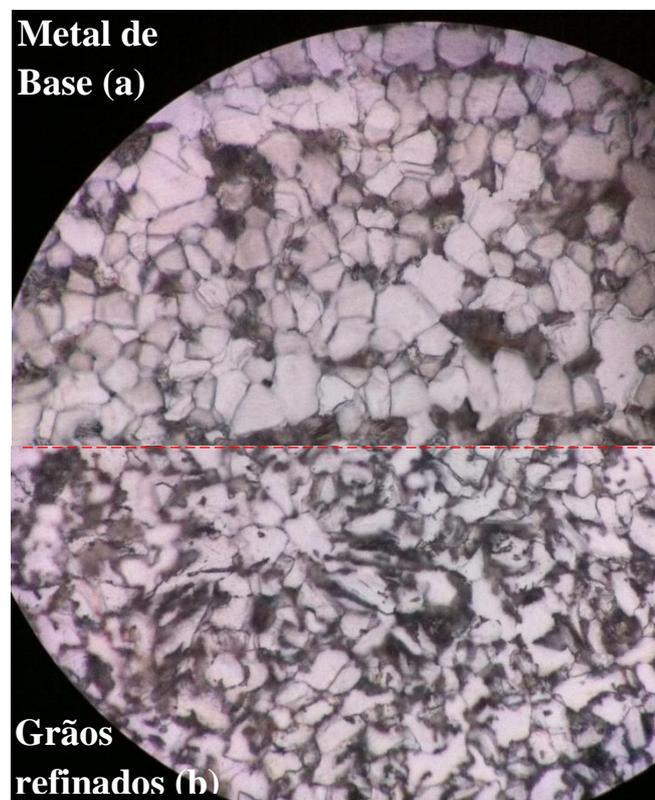


Figura 92. Comparação do tamanho de grão do MB (a) e fase de refino de grão (b) na ZAC com 100x – FCAW-1. Fonte: o autor.

Na figura 93 foi possível observar as diferentes regiões (A, B, C e D) transformadas do estado sólido: metal de base, fase de início de refino de grãos, fase de grãos refinados, fase de grão grosseiro, respectivamente, conforme mencionado no item 3.7.1 deste estudo. Próximo à linha de fusão foram encontrados grãos grosseiros e presença de ferrita Widmanstatten (figura 94). Este tipo de ferrita é nucleado diretamente em contornos de grãos austeníticos ou a partir de ferrita alotrópica, conhecidas como ferrita primária ou secundária, respectivamente (figura 95) (THEWLIS, 2004). A ferrita Widmanstatten se desenvolve na fase de grãos grosseiros (região D – figura 18) em temperatura acima da  $A_{c3}$ , entre as regiões C e D, possibilitando o crescimento dos grãos (figura 18) (KOU, 2002). Na figura 96 foi possível observar a zona de ligação entre o passe de enchimento e o metal de base com dimensões próximas de 100  $\mu\text{m}$ , e na figura 97 foram observadas em tons escuros as zonas de ligação entre os três passes do cordão de solda do processo de soldagem combinado.

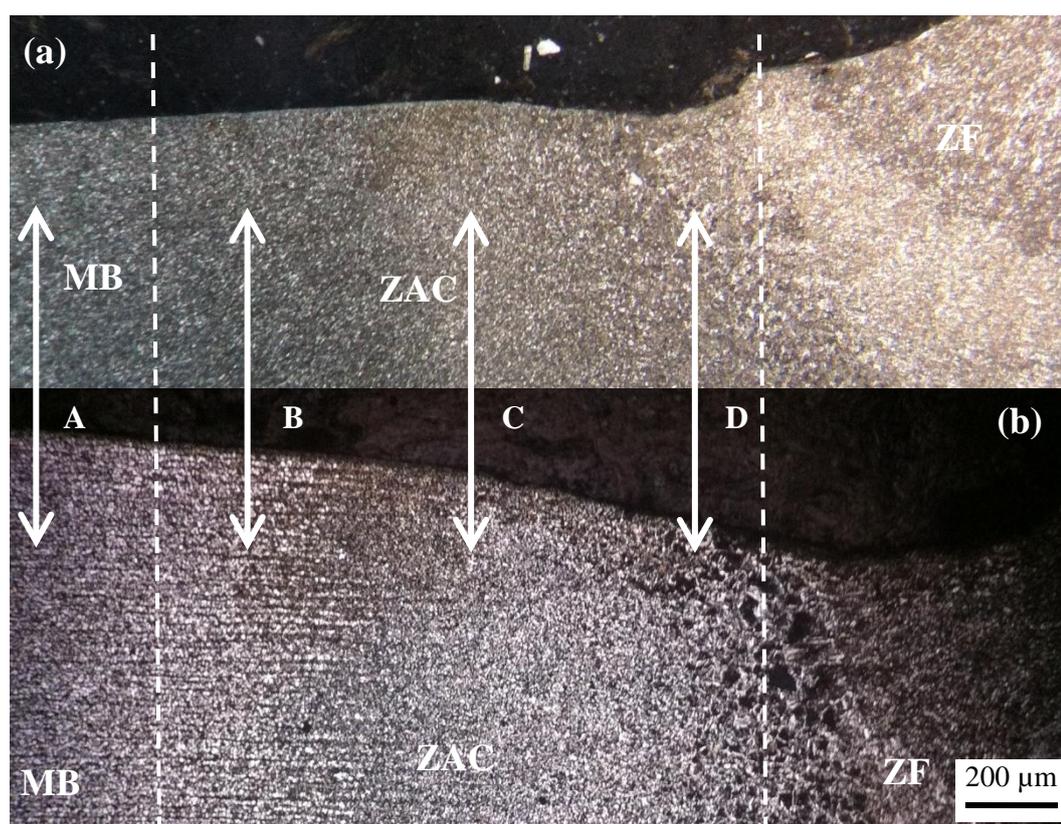


Figura 93. Macrografia (a) e micrografia (b) em microscópio óptico do MB até passe de acabamento. Fonte: o autor.

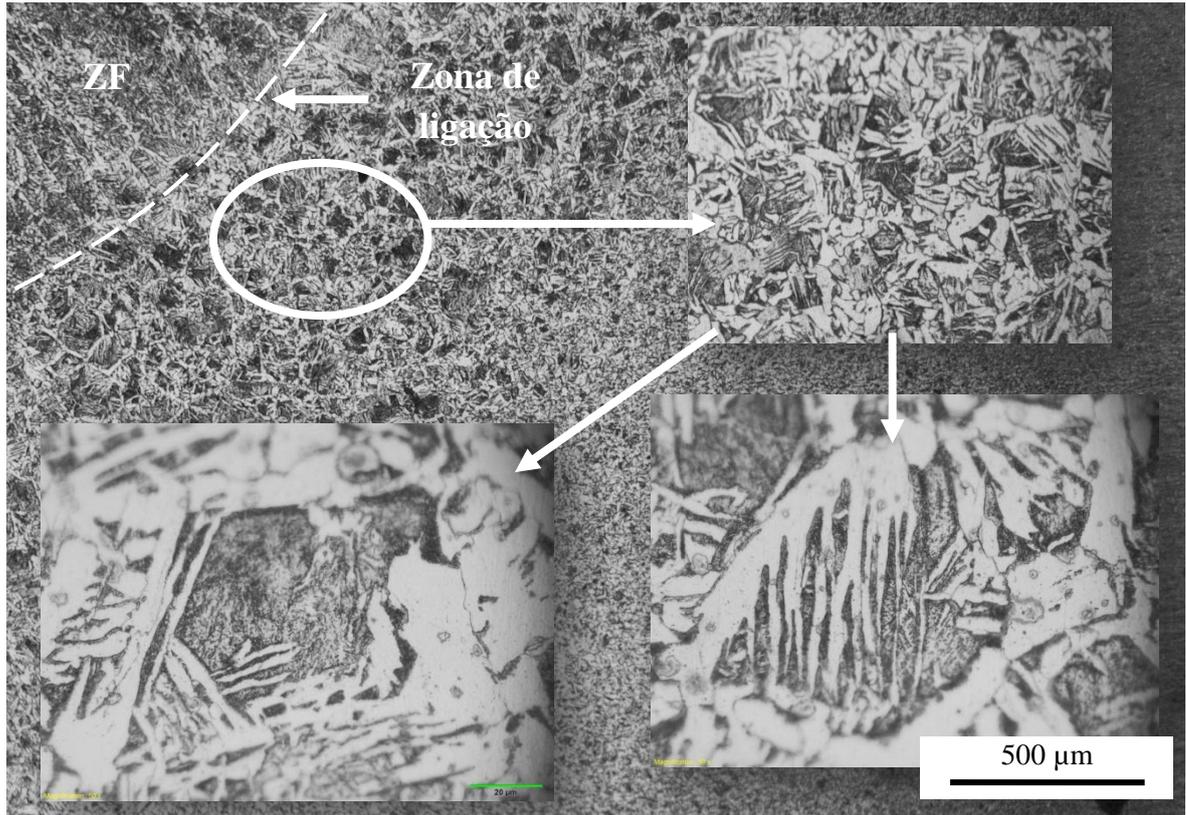


Figura 94. Zona afetada pelo calor: fase com grãos grosseiros. Aumento de 5x, 20x e 100x. Fonte: o autor.

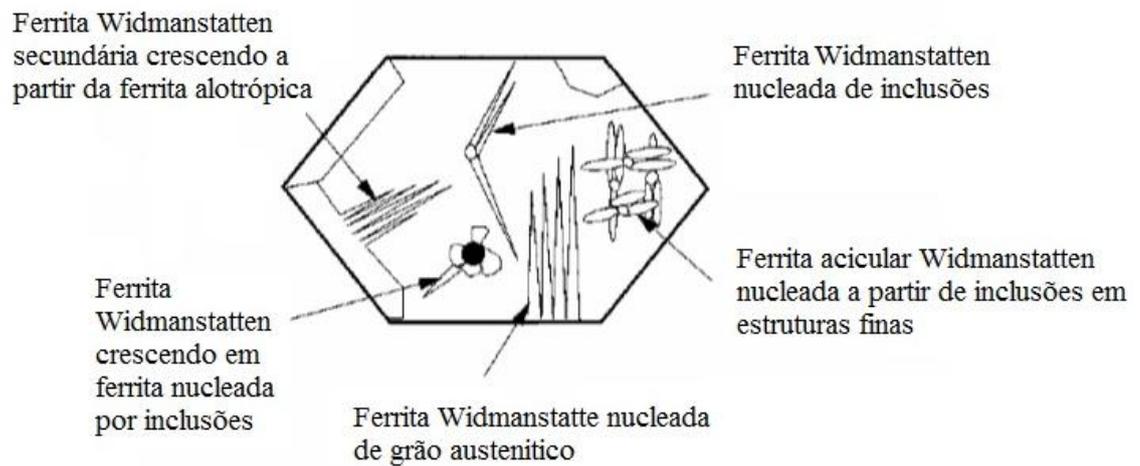


Figura 95. Esquema de crescimento de ferrita Widmanstätten em grão austenítico.

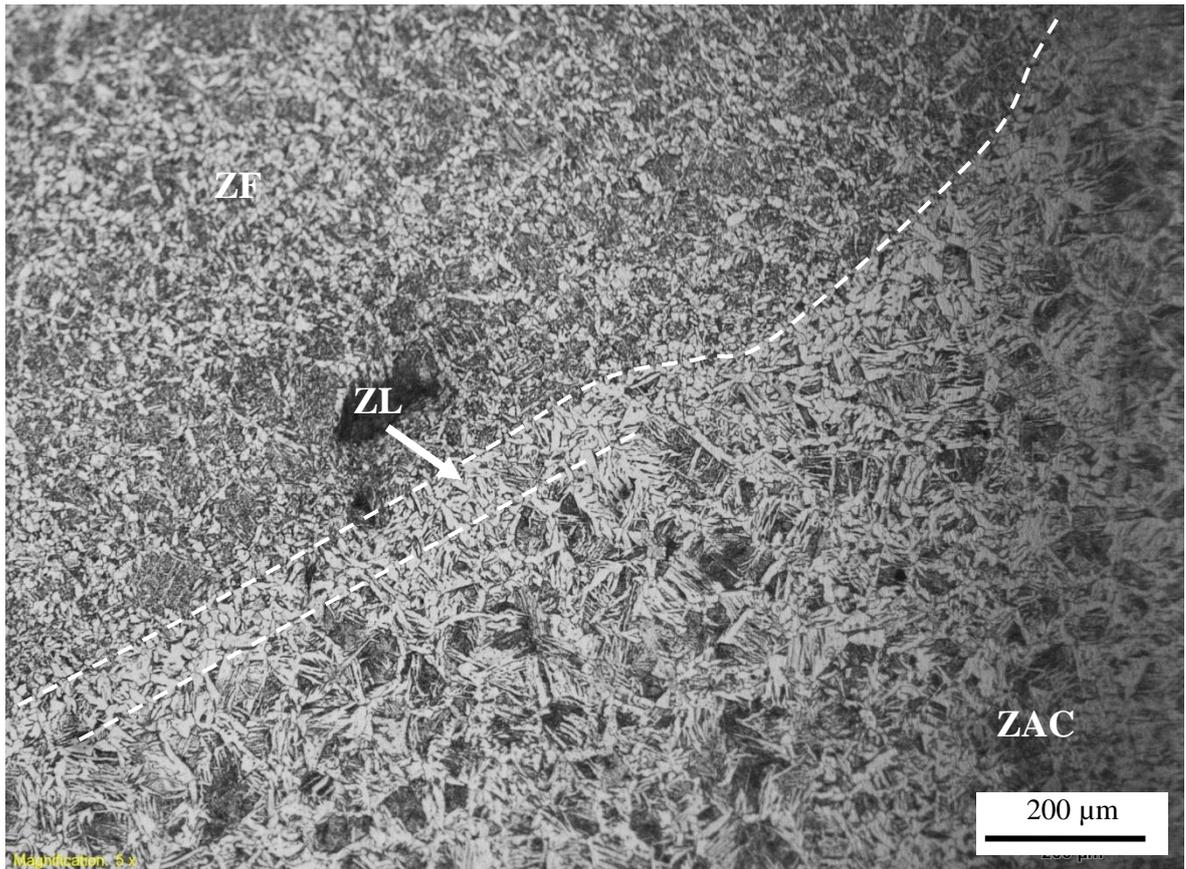


Figura 96. ZL entre passe de enchimento e metal de base com aumento de 10x. FCAW-1. Fonte: o autor.

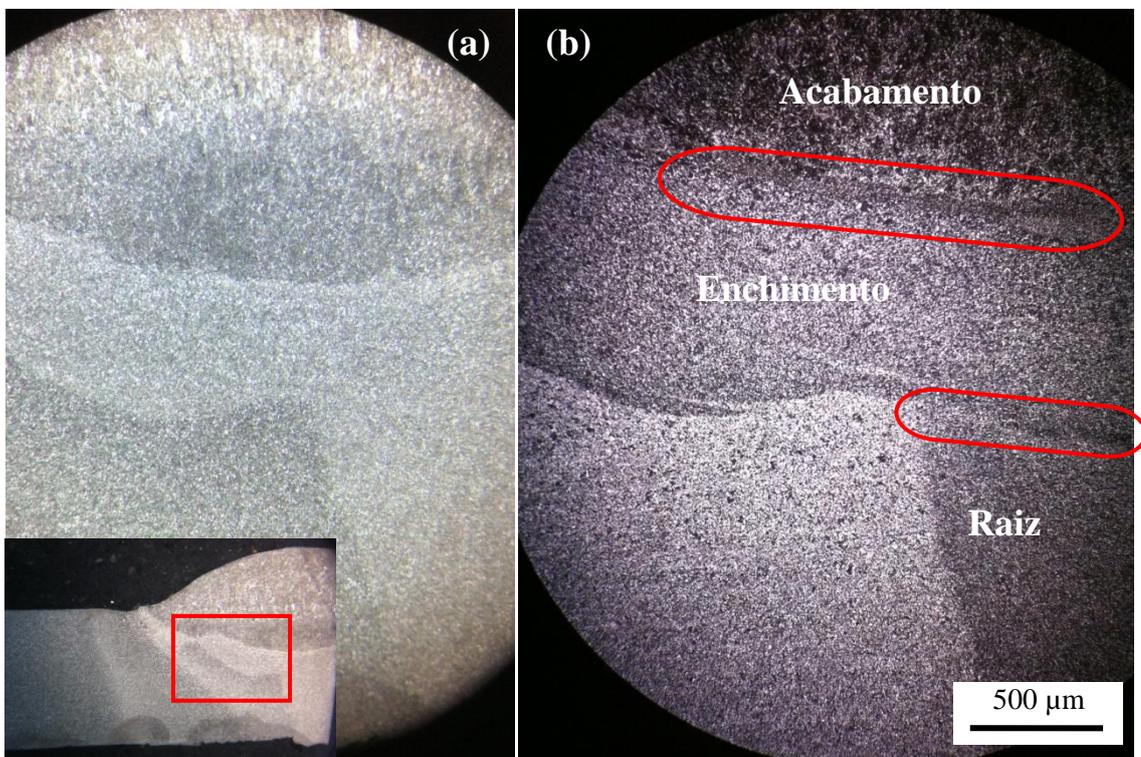


Figura 97. Macrografia (a) e micrografia óptica (b). Zona de ligação entre passes. FCAW-1. Fonte: o autor.

Na análise microestrutural das amostras do ensaio de impacto (figura 98 e 99), realizada com microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo, foram encontradas microestruturas com o mesmo alinhamento do MB (figura 100) observadas no microscópio óptico (figura 83b).



Figura 98. Porta-amostra do microscópio eletrônico com quatro amostras do ensaio de impacto. FCAW-2.  
Fonte: o autor.

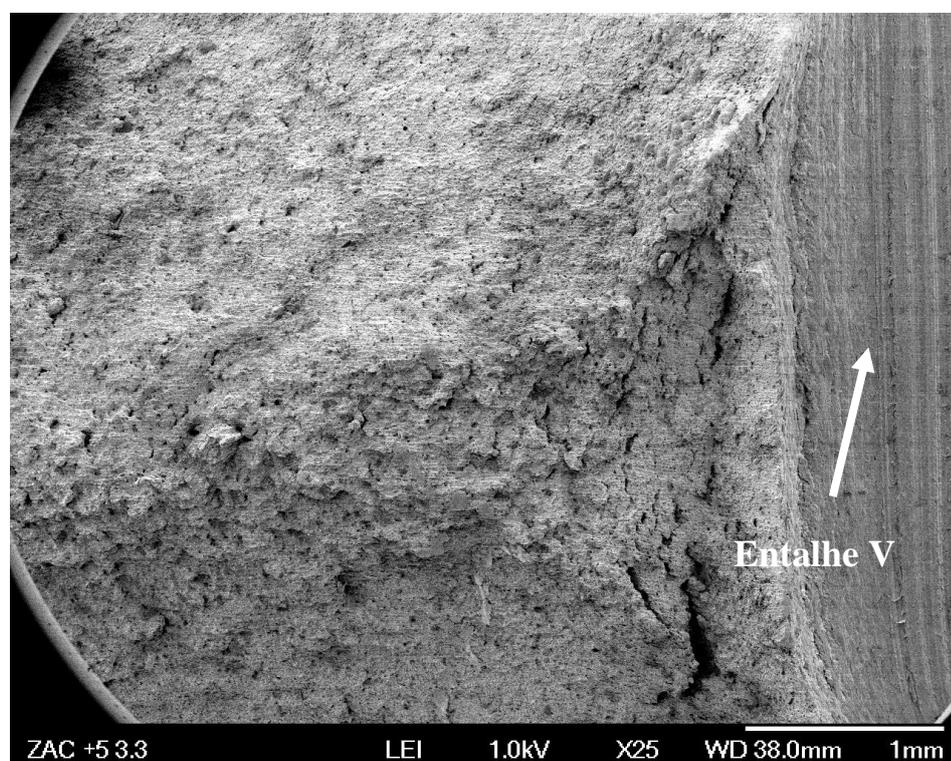


Figura 99. Micrografia da amostra de impacto da ZAC distante 5 mm da ZL. Aumento de 25x. FCAW-2.  
Fonte: o autor.

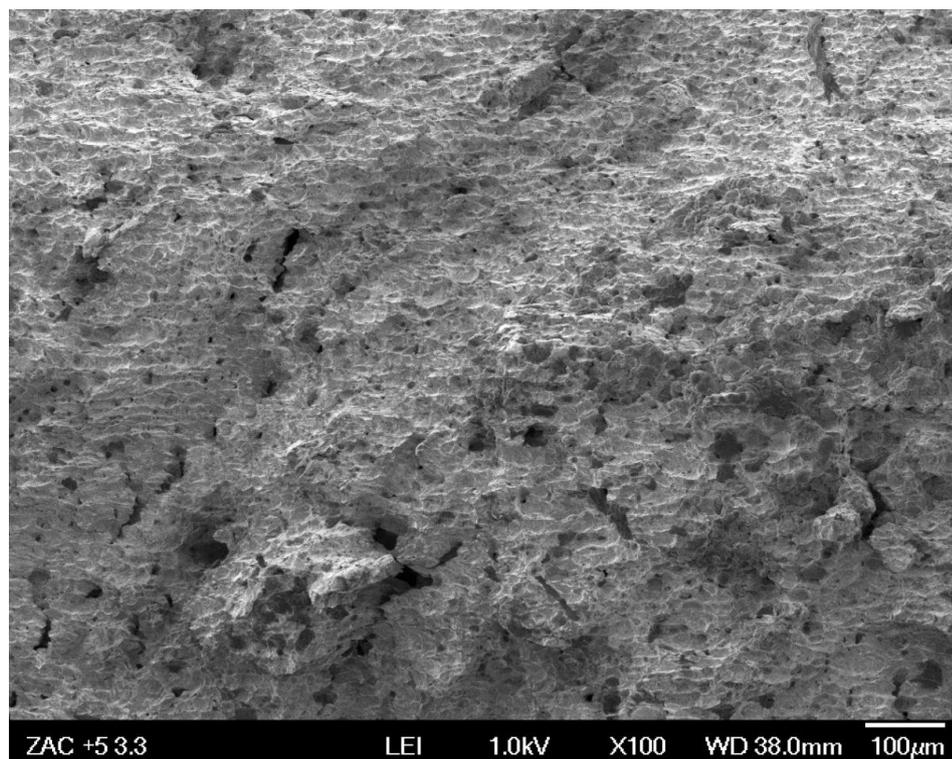


Figura 100. Microestrutura alinhada da amostra de impacto da ZAC distante 5 mm da ZL. FCAW-2. Fonte: o autor.

A microestrutura com microvazios (alvéolos), também chamados na literatura de *dimples*, encontrada em todas as amostras analisadas, são características de fratura dúctil.

O tipo de estrutura alveolar foi encontrado nas três regiões da amostra. No MB (figura 101) e na ZAC, os alveolos encontrados são maiores e com algum alinhados. No MS os alveolos são menores e sem alinhamento, resultado da morfologia bruta de fusão do cordão de solda (figura 102). No MS foram encontrados alguns poros com dimensões entre 120µm e 50µm (figura 103). Estes poros contribuem para a diminuição da área de rompimento da amostra no ensaio de impacto, que conseqüentemente resultam em menor energia absorvida. Por este motivo, os valores encontrados no ensaio das amostras da ZF, obtiveram valores inferiores a ZAC e MB (tabela 27).

A dimensão do maior poro encontrado foi de 800µm (figura 104) podendo ser observado a olho nú na amostra. Contudo, a dimensão dos poros encontrados não desqualificam o procedimento de soldagem segundo os critérios de aprovação expostos no item 3.6.4 deste estudo.

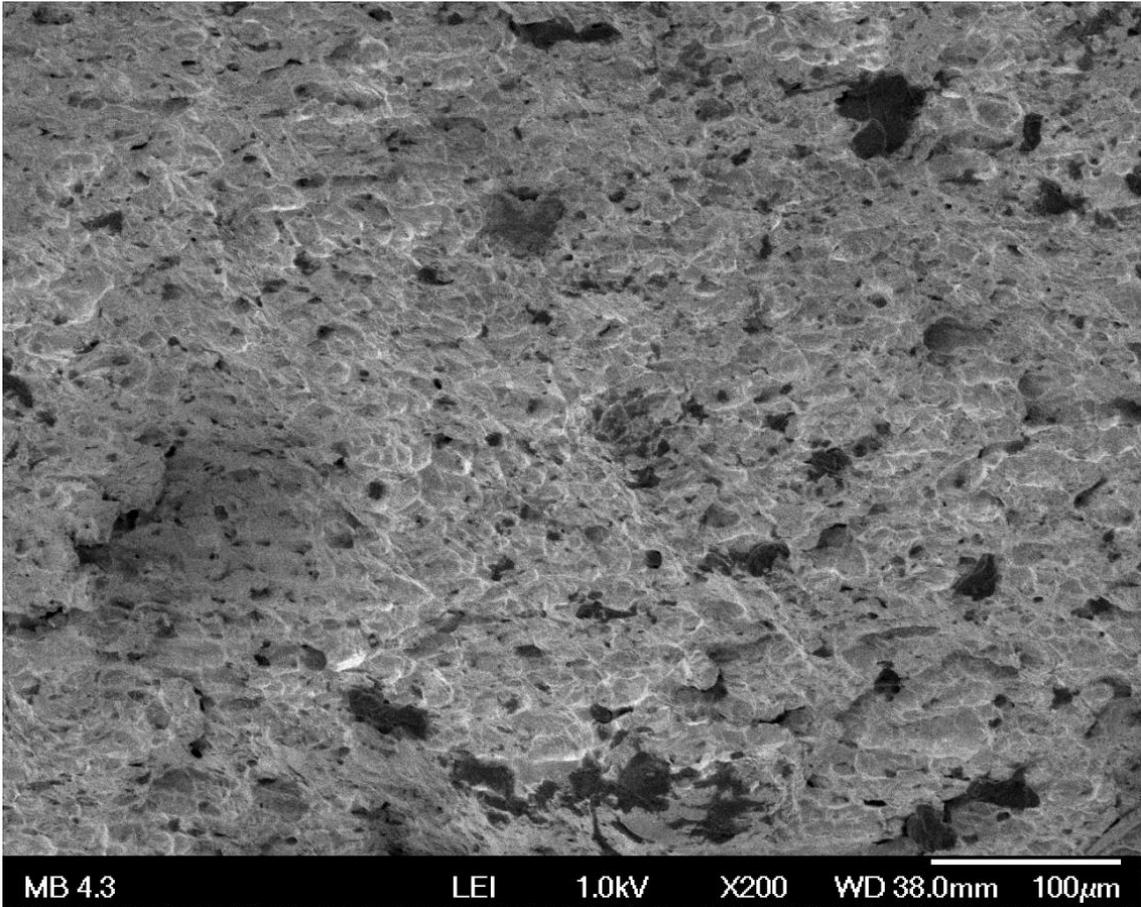


Figura 101. Microestrutura alveolar do MB. FCAW-2. Fonte: o autor.

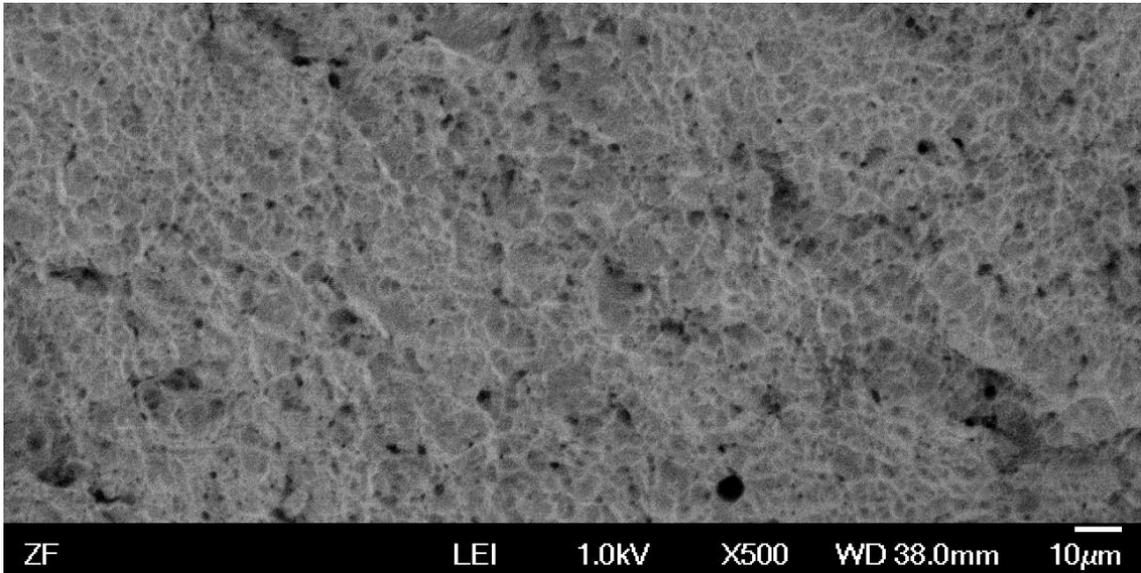


Figura 102. Microestrutura alveolar fina da ZF. FCAW-2. Fonte: o autor.

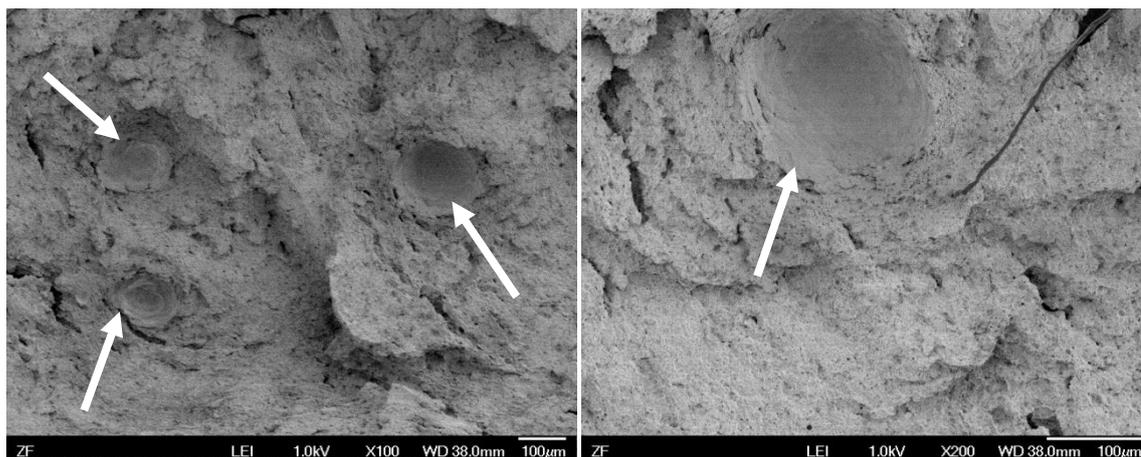


Figura 103. Porosidade encontrada no MS. Aumento de 100x (a) e 200x (b). FCAW-2. Fonte: o autor.

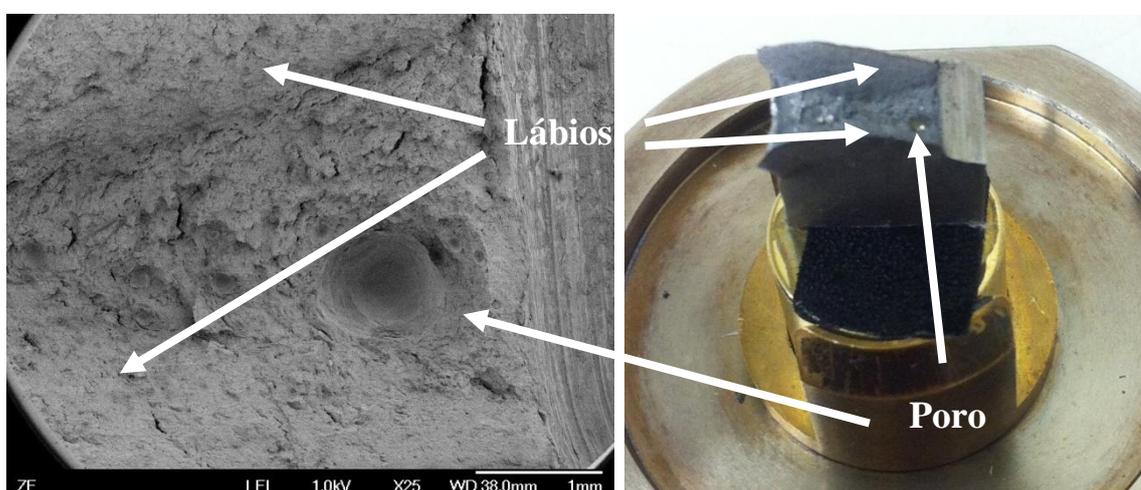


Figura 104. Poro com dimensão de 800µm da ZF. FCAW-2. Fonte: o autor.

## 5.2 Comparação de resultados entre os processos de soldagem SMAW e FCAW

Com base nas informações extraídas durante os ensaios mecânicos e microestruturais, na literatura e dados dos fabricantes de consumíveis, foi possível elaborar uma comparação técnica entre os processos de soldagem manual com eletrodo revestido (SMAW) e semiautomático com arame tubular autoprottegido (FCAW-S).

Segundo o fabricante de consumíveis, as vantagens do processo de soldagem semiautomático com arames tubulares sobre o processo manual com eletrodos revestidos para tubulações em campo estão concentrados em quatro fatores primordiais: menor teor de hidrogênio, maior taxa de deposição, melhor controle do arco elétrico e facilidade de operação (MILLER, 2014). Apontada por outro fabricante de consumíveis, outras

vantagens do processo FCAW-S provém da automatização de alimentação do arame e do controle de hidrogênio sobre a poça de fusão (LINCOLN, 2013). As vantagens apontadas pelos fabricantes destes consumíveis, tais como facilidade de operação, maior taxa de deposição e o melhor controle do arco elétrico puderam ser relatadas durante a realização das peças de teste.

Nos ensaios de tração das amostras soldadas somente com eletrodo revestido os valores de limite de resistência obtidos estiveram entre 526 e 554 MPa e para o processo combinado foram obtidos valores entre 511 e 525 MPa. Nos ensaios de dobramento ambos os processos de soldagem obtiveram resultados positivos, com ausência de descontinuidades nas porções dobradas, assim como nos ensaios micro e macrográficos os cordões vistos nos microscópios estavam íntegros, com penetração completa e boa fusão entre os passes.

O grande ganho de produtividade na comparação dos dois processos de soldagem está no tempo de realização do passe de enchimento e acabamento, etapa onde o processo semiautomático com o arame tubular autoprottegido foi introduzido. Com a soldagem da junta completa com eletrodos revestidos o tempo médio de soldagem do enchimento e acabamento foi de 36 minutos. A soldagem dos mesmos passes com arame tubular foi reduzido para 10 minutos. O ganho expressivo no tempo de soldagem destes passes poderia ser maior se fossem utilizados tubos com espessuras maiores de parede. Estes ganhos devem-se à maior taxa de deposição obtida no processo semiautomático em comparação ao processo manual com eletrodos revestido. No estudo feito por Junior (2013) utilizando arames tubulares autoprottegidos com tubos API 5L X80, uma das conclusões obtidas foi a maior produtividade para montagem de tubulações em campo em relação à soldagem manual SMAW, viabilizado técnica e metalurgicamente.

De acordo com as condições de soldagem do item 4.3 deste estudo, um eletrodo revestido foi consumido em aproximadamente um minuto. Para cada eletrodo finalizado há a necessidade de limpeza de um comprimento mínimo para abertura do arco do eletrodo subsequente para que não haja inclusão de escória no cordão finalizado. Este é um dos fatores que contribuem para o baixo ciclo de trabalho na soldagem manual. Com a soldagem semiautomática esta perda de tempo é minimizada e o aumento significativo da produtividade depende da habilidade do soldador em estabilizar o arco elétrico e executar o maior cordão possível.

Apesar das inúmeras vantagens encontradas no uso de arames tubulares autoprottegidos em substituição aos eletrodos revestidos, com equipamentos e consumíveis

disponíveis no mercado, este processo ainda encontra barreiras para implantação na indústria brasileira, assim como também comenta Braga (1997) em seu estudo do uso de arame tubular autoprotégido com corrente pulsada. A falta de interesse na fase nos projetos, o uso de equipamentos mais caros e o pouco conhecimento do processo entre os soldadores podem ser alguns dos motivos para estabelecimento de tais barreiras. A proibição do uso deste tipo de processo pela norma da Petrobras N-0133 (2013) para soldagem de tubulações e vasos de pressão, também pode ser um dos motivos da baixa popularização.

### **5.3 Ensaios exigíveis para qualificação de um procedimento de soldagem**

A necessidade de execução dos ensaios mecânicos destrutivos e ensaios não destrutivos são impostas por normas e pelas propriedades mecânicas requeridas no projeto. A norma da Petrobras N-2301 direciona a qualificação de um procedimento de soldagem adotando como referência as demais normas, tais como: ISO, ASME, AWS, e por sua vez, estas normas foram verificadas quanto aos procedimentos de qualificação para cada tipo de ensaio e seus critérios de aprovação.

Existem diferentes ensaios mecânicos com diferentes resultados obtidos. Conforme exigência do código ASME BPVC IX (2010), por meio dos ensaios destrutivos de dobramento e tração, com amostras usinadas com base nas peças de teste, foi possível qualificar os procedimentos de soldagem das juntas tubulares nos dois processos deste presente estudo. Os resultados dos ensaios mecânicos indicaram que as propriedades das juntas estudadas estão aptas para a soldagem de juntas em produção na tubulação. Todas as normas de qualificação do procedimento de soldagem analisadas neste estudo (ASME, API, AWS e ISO) contém os ensaios de tração e dobramento como mandatórios.

Nos ensaios de tração foi possível quantificar os limites de resistência e escoamento. Nos ensaios de dobramento pode ser observada qualitativamente a ductilidade da junta dobrada na face e raiz. O ensaio de dobramento de face pode revelar na amostra dobrada falhas como mordeduras excessivas, falta de fusão, inclusão de escória, trincas ou porosidades no passe de acabamento, perto à superfície da solda. O ensaio de dobramento de raiz é excelente para revelar falta de fusão ou de penetração no passe de raiz, caso estas descontinuidades estejam presentes (MATHERS, 2004). Entretanto, após os ensaios de dobramento realizados nenhuma descontinuidade foi encontrada nas amostras. Algumas

pequenas indicações foram observadas, conforme pode ser visto no item 5.1.2, porém, não caracterizaram uma falha ou reprovação da junta soldada, pois não excederam a dimensão de 3 mm.

Outros ensaios mecânicos, além dos realizados neste estudo, também podem ser exigidos conforme a necessidade de obtenção de outras propriedades mecânicas e metalúrgicas no processo, como por exemplo, tenacidade ou resistência à corrosão. Somente a norma API STD 1104 (2005), exige um ensaio complementar de fratura chamado de “nick-break”, quando comparado às demais normas e códigos. Em substituição a este ensaio qualitativo foi executado o ensaio quantitativo do tipo Charpy em V para estudo da tenacidade da junta.

Nos resultados dos ensaios mecânicos, foi possível extrair informações importantes a respeito das propriedades da junta. As principais propriedades que puderam ser analisadas pelos ensaios foram: ductilidade, tenacidade, dureza e limite de resistência.

Segundo a norma API STD 1104 (2005) o ensaio de dureza é importante para que sejam detectadas microestruturas suscetíveis à trinca por hidrogênio. Somente é possível analisar esta propriedade com um entendimento da microestrutura formada na ZAC, conforme descrito na tabela 29. A exigência para valores máximos de dureza é exigida somente pela norma API STD 1104 (2005) quando há a qualificação de procedimentos de juntas soldadas a tubulações em serviço, sem que haja uma parada programada para manutenção. Apesar de ser um importante ensaio, realizado em equipamento pouco dispendioso e com simples execução, o ensaio de dureza não é solicitado em nenhuma das quatro normas para qualificação do procedimento de soldagem deste estudo.

Tabela 29. Ensaio mecânicos e propriedades analisadas

<b>ENSAIO MECÂNICO</b>	<b>PROPRIEDADE ANALISADA</b>	<b>DESCRIÇÃO DA PROPRIEDADE</b>	<b>PEÇA DE TESTE - SMAW</b>	<b>PEÇA DE TESTE – SMAW+FCAW</b>
Ensaio de Tração	Limite de Escoamento e Resistência	Verificação da capacidade de deformação elástica e máxima força exercida sobre o material para atingir a ruptura	Aprovada	Aprovada
Ensaio de Dobramento	Ductilidade	Quantidade de energia absorvida na deformação plástica até a ruptura	Aprovada	Aprovada
Ensaio de Impacto (Charpy V)	Tenacidade	Capacidade do material de absorver energia	Aprovada	Aprovada
Ensaio de Dureza	Dureza	Propriedade do material correlacionada a uma microestrutura local	Aprovada	Aprovada

A investigação micrográfica da ZF e da ZAC foi possível somente após a identificação da microestrutura formada vista por meio do ensaio macrográfico, observando todo o cordão de solda (figura 98). O ensaio micrográfico foi fundamental para detecção de pequenas inclusões de escória que poderiam ser detectadas somente no ensaio radiográfico, porém, em virtude da reduzida dimensão, tais inclusões foram unicamente observadas por meio do ensaio micrográfico.



Figura 105. Exemplo de ensaio macrográfico. FCAW-1. Fonte: o autor.

No código ASME BPVC IX (2010) e na norma americana API STD 1104 (2005), apenas ensaios de tração e dobramento são exigidos para qualificação de um novo procedimento, porém, no código AWS D1.1 (2010) e na norma ISO 15614-1 (2004) o ensaio macrográfico é exigido juntamente com o ensaio não destrutivo visual, tornando a qualificação do procedimento de soldagem mais completa e precisa. Entretanto, as diferenças encontradas nas normas e códigos não refletem a maior ou menor qualidade da junta quando qualificada por diferentes documentos, pois em todos há abertura para realização de demais ensaios conforme a necessidade de projeto e acordado em contrato.

Portanto, estes argumentos demonstram que, para a qualificação de um novo procedimento, seja qual for a aplicação final da soldagem, os ensaios de dureza e os ensaios macro e micrográfico deveriam ser realizados para complementar os ensaios mandatórios de tração e dobramento, comum a todos os códigos e normas analisados, em especial para atender aos requisitos na norma Petrobras N-2301.

## 6. CONCLUSÕES

Assim como previamente determinado nos objetivos, após a finalização dos estudos, bem como de todos os ensaios mecânicos e micrográficos, foram alcançadas as conclusões descritas neste capítulo.

Concluiu-se pelos ensaios executados, que a eficiência combinada dos ensaios não destrutivos tipo visual, líquido penetrante e radiografia, é possível obter alto controle de detecção das descontinuidades mais comuns possíveis dos processos SMAW e FCAW-S. Estes três ensaios combinados são exigidos somente na norma ISO 15614-1 para qualificação do procedimento de soldagem dentre as quatro normas estudadas.

A Norma ISO 15614-1, dentre as normas de qualificação do procedimento de soldagem estudadas, é a mais sucinta, porém exige os ensaios não destrutivos que privilegiam a qualidade final da qualificação.

Do ponto de vista técnico e metalúrgico, baseado nos ensaios mecânicos executados neste presente estudo, os dois processos de soldagem foram qualificados, seja o processo de soldagem somente com eletrodos revestidos ou o processo de soldagem combinado, SMAW e FCAW-S.

O resultado médio das amostras do ensaio de tração, com o processo combinado, foi de  $512 \pm 17,7$  MPa e para o processo de soldagem manual com eletrodos revestido foi de  $533 \pm 14,9$  MPa.

Foi obtido o valor de  $155 \pm 5$  J no ensaio de impacto localizado na ZAC próximo a ZL para o processo de soldagem com eletrodos revestidos, e, para o processo combinado,  $135 \pm 12$  J. Este procedimento foi proposto em substituição ao uso do processo de soldagem usual com eletrodos revestidos em tubulações de aço carbono. Foram produzidas juntas soldadas de boa qualidade, com ausência de descontinuidades e reduzindo o tempo de soldagem em função da maior produtividade do processo de soldagem semiautomático FCAW-S, comparando-o ao processo manual SMAW. Portanto, observou-se que o processo de soldagem combinado é uma ótima opção para soldagem de tubulações API 5L grau B em campo, sendo viável econômica e tecnicamente.

Concluiu-se que as exigências das normas de qualificação, referenciadas na N-2301, fornecem as condições mínimas necessárias para qualificação de um procedimento de soldagem e a realização dos ensaios complementares do tipo ensaio de dureza, ensaio

macrográfico e ensaio micrográfico são fundamentais para entendimento dos fenômenos na qual a junta soldada tubular foi submetida e poderiam ser incluídos como obrigatórios.

Apesar de não normalizado, a utilização do processo combinado (SMAW + FCAW-S) se mostrou adequada para a soldagem de tubulações API 5L grau B, levando a resultados que permitiram a aprovação segundo as normas vigentes, baseada no procedimento de qualificação de soldagem da norma Petrobras N-2301.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Welding of pipeline and related facilities API Standard 1104. Washington, D.C. 2005.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Specification for line pipe 5L. Washington, D.C. 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. A-370. Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. West Conshohocken, PA. 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E-112. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. West Conshohocken, PA. 1996.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. BPVC Section IX: Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators. New York, NY. 2010.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. BPVC Section V: Nondestructive examination. New York, NY. 2011.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Interpretations section IX. v.36, p. 336, 1995.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding handbook: Welding Process, v.2. Miami, FL. 1991.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Structural welding code – steel D1.1. Miami, FL. 2010.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding A5.1. Miami, FL. 1991.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Specification for carbon steel electrodes for flux cored arc welding A5.20. Miami, FL. 2005.

ANDERSON, T. L. Fracture mechanics: Fundamentals and applications. 3.ed. Boca Raton, FL: Taylor and Francis, 2005.

BRAGA, E. M., Soldagem a arame tubular autoprottegido em corrente pulsada. 1997. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Belém, PA.

CALLISTER, W. D. Materials science and engineering: an introduction. 8.ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA PEMAT 2022. Plano decenal de expansão da malha de transporte dutoviário. 2014.

FERNANDES, P. A. E. Avaliação da tenacidade a fratura da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço API5L X80 soldado pelos processos SMAW e FCAW. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

FORTES, C. Eletrodos revestidos OK. ESAB BR, 2005.

FORTES, C. Arames Tubulares OK. ESAB BR, 2004.

FORTES, C. Metalurgia da soldagem. ESAB BR, 2004.

FORTES, C. Soldagem de tubulações. ESAB BR, 2004.

GEDEON, S.A., EAGAR, T.W. Assessing hydrogen-assisted cracking fracture modes in high-strength steel weldments. *Welding Journal*, June, p. 213s-220s, 1990.

JUNIOR, J. C. S., Soldagem e caracterização das propriedades mecânicas de dutos de aço API 5L-X80 com diferentes arames tubulares. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

MOSAYEBI, S.P. et al. Factors affection productivity of pipe spools fabrication. *Internacional Journal of Architecture, engineering and construction*, Março, v.1, n.1, p. 30-36s, 2012.

GRANJON, H., Note on the carbon equivalent. International Institute of Welding, Doc IX-555-67, 1967.

GRONG, O. Metallurgical modelling of welding. 2.ed. Cambridge, UK: The University Press, 1997.

HAAS, C. T. Preliminary research on prefabrication, pre-assembly, modularization and off-site fabrication in construction. The construction industry institute: University of Texas, USA. 2002.

HOLDREN, R. L., Making sense of welding procedure qualification. *Welding Journal*, Maio, p. 50-2s, 2014.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. BS EN 1011-2:2001. Welding - Recommendations for welding of metallic materials - Part 2: arc welding of ferritic steels. 2001.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 5817. Welding – Fusion-welded joint in steel, nickel, titanium and their alloy (beam welding excluded) – Quality levels for imperfections. 2003.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 14577. Metallic materials – instrumented indentation test for hardness and material parameter - Part 4: Test method for metallic and non-metallic coatings. 2007.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. BS EN ISO 15614-1. Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test

Structural welding – Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys. London, UK. 2004.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 15609-1. specification and qualification of welding procedures for metallic materials - welding procedure specification – Part 1: Arc welding. London, UK. 2004.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 15607. specification and qualification of welding procedures for metallic materials – General rules. London, UK. 2003.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 17639. Destructive tests on welds in metallic materials — Macroscopic and microscopic examination of welds. 2003.

KOU, S. Welding metallurgy. 2.ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

KOLOSOSKI, J. Notas de aula: NR7120 L7 - materiais metálicos. Centro Universitário da FEI, 2008.

LEITE, M.P. Caracterização mecânica, microestrutural e avaliação da fragilização pelo hidrogênio em tubos de aço API 5L grau X65 MS PSL2. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP.

LINCOLN ELECTRIC. Welding guide: Innershield, Publication C3.2400. Cleveland, OH. 2011.

LINCOLN ELECTRIC. Welding on high yield pipe. Disponível em: <<http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/high-yield-pipe-detail.aspx>>. Acesso em: 14 de Setembro de 2013.

MATHERS, G. Bend Testing. Disponível em: < <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/bend-testing-073/>>. Acesso em: 02 de Agosto de 2014.

MILLER. Examining self-shielded flux cored welding (FCAW-S) in high-strength pipeline welding applications as an alternative to stick welding (SMAW). Disponível em: < <http://www.millerwelds.com/resources/articles/self-shielded-flux-cored-welding-fcaw-high-strength-pipeline-welding-alternative-to-stick-welding-smaw>>. Acesso em: 24 de Julho de 2014.

MODENESI, P. J. Notas de aula: Soldagem I - Descontinuidades e inspeção em juntas soldadas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.

MOORE, A. J., Qualifying a WPS by testing. Inspection Trends, Outubro, v.13, n.4, p. 21-7s, 2010.

NETO, N. F. S., Caracterização de soldas em aços API 5L com diferentes arames tubulares e temperaturas de preaquecimento. 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

PATEL, K. Latest trend in Piping, pre fabricated piping spools. Out 2011. Disponível em: <[http://www.amazines.com/article\\_detail.cfm/3425042?articleid=3425042&title=Piping%2Cspools%2CPre%2CFabricated%2CPiping%2CSpools%2CPipe%2CFittings%2CStainless%2CSteel%2CPipe%2CFittings%2Cpiping%2Cproducts](http://www.amazines.com/article_detail.cfm/3425042?articleid=3425042&title=Piping%2Cspools%2CPre%2CFabricated%2CPiping%2CSpools%2CPipe%2CFittings%2CStainless%2CSteel%2CPipe%2CFittings%2Cpiping%2Cproducts)>. Acesso em: 19 de Julho de 2014.

PETROLEO BRASILEIRO S/A, N-0076. Materiais de tubulação para instalações de refino e transporte. 2005.

PETROLEO BRASILEIRO S/A, N-0133. Soldagem. 2013.

PETROLEO BRASILEIRO S/A, N-2301. Elaboração da documentação técnica de soldagem. 2011.

PETROLEO BRASILEIRO S/A, PE-2030 - PLANO ESTRATÉGICO PETROBRAS 2030. Divulgação de resultados 2013, plano estratégico 2030 e plano de negócios e gestão 2014-2018. 2014.

PROMINP, RELATORIO FINAL ABAST-02. Aumento da produtividade das empresas de construção e montagem com vistas à melhoria da competitividade da indústria nacional. 2004.

SENAI. Soldagem: Área metalurgia. São Paulo, SP. SENAI-SP, 2013.

THEWLIS, G., Classification and quantification of microstructures in steels. Materials Science and Technology, Fevereiro, v.20, p.143-60, 2004.

YEPP, D., BLACKMAN, S. A., Recent development in high productivity pipeline welding. Journal of the Brazilian society of mechanical science and engineering. v.26, p.89-97, 2004.

WEI, Q., HU et al. A study of weld pore sensitivity of self-shielded flux cored arc welding. Welding Journal, Junho, p. 90-4s, 2002.