



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E MECÂNICA
DE JUNTAS SOLDADAS UTILIZANDO OS PROCESSOS
GTAW, FCAW E SMAW.**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
PERNAMBUCO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

AUTOR: DINIZ RAMOS DE LIMA JÚNIOR

ORIENTADOR: Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO

RECIFE – PE

2013



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Dissertação submetida à
Universidade Federal de
Pernambuco para obtenção do
grau de Mestre em engenharia
mecânica.

AUTOR: DINIZ RAMOS DE LIMA JÚNIOR

RECIFE – PE

2013

Catálogo na fonte

Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

L732c Lima Júnior, Diniz Ramos de.

Caracterização microestrutural e mecânica de juntas soldadas utilizando os processos GTAW, FCAW e SMAW / Diniz Ramos de Lima Júnior. - Recife: O Autor, 2013.

81 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.

Inclui Referências Bibliográficas.

“CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DE JUNTAS
SOLDADAS UTILIZANDO OS PROCESSOS GTAW, FCAW E SMAW”

DINIZ RAMOS DE LIMA JÚNIOR

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E FABRICAÇÃO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO (UFPE)

Prof. Dr. CARLOS AUGUSTO DO NASCIMENTO OLIVEIRA (UFPE)

Prof. Dr. ANTÔNIO JOSÉ RAMIREZ LONDONO (LNNano)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus e a Nossa Senhora das Graças por sempre me darem força nessa longa caminhada que está apenas começando.

A minha esposa, Viviane por sempre estar ao meu lado me dando apoio e me incentivando a lutar pelos meus sonhos.

Aos meus pais Diniz e Mércia, por tudo que me ensinaram e fizeram para que eu chegasse até aqui.

Ao meu irmão Rodrigo pelo seu companheirismo e por me incentivar a lutar pelos meus sonhos.

Ao professor Severino Urtiga por ser mais que um orientador, um amigo.

Ao Professor Cezar Gonzales pelo apoio e amizade.

Aos meus amigos Magda Rosângela, Bruna Nayara, Ivanilda Ramos, Sara Orácio, Rubem, Carlos Augusto, Orlando Rocha, entre vários outros que me incentivaram durante o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço em especial a Daniel Wallestain,IVALDO DANTAS, Janaína Cirino, Ivo Leonardo, Willian Alessandro, Márcio Nogueira e Paulo Rogério por todo o suporte oferecido e a disponibilidade nos momentos solicitados.

A TOMÉ Engenharia que foi de fundamental importância para o desenvolvimento e conclusão do trabalho.

Ao Programa e professores da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

E por fim a Universidade Federal de Pernambuco, por me dar estrutura e conhecimento para a realização deste trabalho.

RESUMO

Dentro das refinarias os tanques de armazenamento desempenham um papel fundamental, pois armazenam matéria prima para abastecimento das unidades, produtos intermediários entre os processos e produtos finais para distribuição. O presente trabalho mostra de modo comparativo as características microestruturais e mecânicas de metais de solda empregando os processos de soldagem Arame Tubular (FCAW), Eletrodo Revestido (SMAW) e TIG (GTAW) aplicados na fabricação e reparo de tanques de armazenamento utilizados na indústria de petróleo. Os procedimentos de soldagem seguiram EPS (Especificação do Procedimento de Soldagem) utilizada pela empresa Tomé Engenharia na fabricação e reparo de tanques de armazenamento para indústrias de petróleo. O metal de base utilizado foi o aço estrutural de classificação ASTM A-36 em geometria para obtenção de uma junta soldada com 300,0 mm x 300,0 mm x 19,0 mm, com a utilização de chanfro tipo K. A solda foi multipasses de topo na posição horizontal (2G). Para realização deste estudo foram realizados três tipos de ensaios destrutivos: tração, microdureza Vickers e metalografia. Para inspeção das juntas soldadas foi utilizado o ensaio não destrutivo Ultrassom TOFD (Time of Flight Diffraction) bastante utilizado na inspeção das estruturas da indústria de petróleo, gás e naval. Os resultados indicaram a importância da seleção do processo de soldagem em termos de produção e formação da junta. No processo de soldagem com Arame Tubular a formação da junta soldada foi composta por menor número de passes quando comparado com o processo com eletrodo revestido, além de uma menor zona termicamente afetada como apresentado nas macrografias, já as micrografias mostraram que o processo por eletrodo revestido apresentou menor número de inclusões de escoria.

Palavras-Chaves: Características microestruturais e mecânicas. Indústria de petróleo. Tanques de armazenamento. EPS (Especificação do Procedimento de Soldagem). Aço ASTM A-36.

ABSTRACT

Within the refineries storage tanks play a key role because they store raw material to supply the units, intermediary products between processes and final products for distribution. This paper shows in a comparative way the microstructural characteristics and mechanical properties of weld metals using welding processes Flux-cored Arc Welding (FCAW), Shielded Metal Arc Welding (SMAW) and Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) applied in manufacture and repair of storage tanks used in the oil industry. The welding procedures followed EPS (Welding Procedure Specification) used by TOMÉ Engenharia Company in the manufacture and repair of storage tanks for oil industry. The base metal used was structural steel classification ASTM A-36 plate geometry to obtain a welded joint with 300.0 mm x 300.0 mm x 19.0 mm and applied in bevel K. The welding was top multipass in a horizontal position. For this study there were three types of destructive tests: tensile, micro hardness and metallography. For inspection of welded joints was used non-destructive testing Ultrasonic TOFD (Time of Flight Diffraction) widely used for inspection of structures in oil, gas and naval industries. The results indicated the importance of welding process selection in terms of production and joint formation. In the welding processes FCAW, the welded joint formation was composed of quantity less passes than compared to the process SMAW, and a smaller heat affected zone as shown in macrographs, besides the micrographs showed that the shielded metal process had fewer slag inclusions.

Key Words: mechanical and microstructural characteristics. Oil industry. Storage tanks. EPS (Welding Procedure Specification). Steel ASTM A-36.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	15
2.1 Soldagem.....	15
2.1.1 Junta.....	15
2.1.2 Chanfro.....	15
2.1.3 Partes de uma junta.....	17
2.1.3.1 Zona Fundida.....	17
2.1.3.2 Zona de Ligação.....	18
2.1.3.3 Zona Termicamente Afetada.....	18
2.1.4 Soldagem Multipasses.....	20
2.1.5 Posição de Soldagem.....	22
2.1.6 Classificação dos Processos de Soldagem.....	22
2.2 Processos de Soldagem a arco elétrico.....	23
2.2.1 Arco elétrico.....	23
2.2.2 Processo de Soldagem Eletrodo Revestido (SMAW).....	24
2.2.2.1 Eletrodos Revestidos.....	25
2.2.2.2 Tipos de Revestimento.....	26
2.2.2.2.1 Revestimento Celulósico.....	26
2.2.2.2.2 Revestimento Rutílico.....	26
2.2.2.2.3 Revestimento Básico.....	26
2.2.2.2.4 Revestimento Ácido.....	27
2.2.2.2.5 Revestimento Oxidante.....	27
2.2.2.3 Classificação dos Eletrodos.....	27
2.2.2.4 Seleção do eletrodo adequado para aços Carbono.....	28
2.2.2.5 Fonte.....	28
2.2.3 Processo de soldagem Arame Tubular (FCAW).....	29
2.2.3.1 Modo de Transferência.....	31
2.2.3.1.1 Transferência por Curto-Circuito.....	31
2.2.3.1.2 Transferência Globular.....	32
2.2.3.1.3 Transferência Aerossol.....	33
2.2.3.1.4 Transferência Arco Pulsado.....	33

2.2.4	Processo de soldagem TIG (GTAW).	34
2.3	Metalurgia da soldagem.	36
2.3.1	Energia de soldagem.	36
2.3.2	Ciclos térmicos de soldagem.	37
2.3.3	Classificação Metalográfica da Ferrita.	38
2.3.3.1	Instituto Internacional de Soldagem (IIW).	38
2.4	Ensaio não Destrutivos.	39
2.4.1	Ensaio Ultrasom TOFD (Time of Flight Diffraction).	40
2.5	Ensaio Destrutivos.	42
2.5.1	Ensaio de Tração.	42
2.5.2	Ensaio de Microdureza.	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS.	44
3.1	Materiais.	45
3.1.1	Metal de base.	45
3.1.2	Consumíveis da soldagem.	45
3.1.2.1	Arame Tubular AWS E71T-1.	45
3.1.2.2	Vareta AWS ER70S-3.	46
3.1.2.3	Eletrodo AWS E7018.	47
3.1.2.4	Gás de proteção.	48
3.2	Métodos.	48
3.2.1	Procedimento de soldagem.	48
3.2.2	Amostra TF.	49
3.2.3	Amostra TE.	51
3.2.4	Amostra EE.	52
3.2.5	Inspeção dos corpos de prova por Ultrasom TOFD.	53
3.2.6	Análise da composição química.	54
3.2.7	Retirada dos corpos de prova.	54
3.2.8	Caracterização microestrutural.	54
3.2.9	Caracterização macroestrutural.	55
3.2.10	Ensaio de tração.	55
3.2.11	Ensaio de Microdureza Vickers.	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.	59
4.1	Análise da composição química.	59

4.2 Macrografia.....	59
4.3 Micrografia.	61
4.3.1 Micrografia Metal de Base.....	61
4.3.2 Micrografia da Zona Fundida do corpo de prova TF.....	62
4.3.2 Micrografia Zona Termicamente Afetada (ZTA) corpo de prova TF.....	63
4.3.3 Micrografia Zona Fundida (ZF) corpo de prova TE.....	64
4.3.4 Micrografia Zona Termicamente Afetada (ZTA) corpo de prova TE.....	66
4.3.5 Micrografia Zona Fundida (ZF) corpo de prova EE.....	67
4.3.6 Micrografia Zona Termicamente Afetada (ZTA) corpo de prova EE.....	68
4.3.7 Inclusões nas amostras TF, TE e EE.....	70
4.4 Inspeção de Soldas por TOFD.....	72
4.5 Ensaio de tração.....	74
4.6 Ensaio de Microdureza Vickers.....	75
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	79
7 REFERÊNCIAS.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Tipos de junta.....	15
Figura 2.2- Principais tipos de chanfro.....	16
Figura 2.3- Elementos de um chanfro.	17
Figura 2.4- Regiões de uma junta soldada.....	17
Figura 2.5- Crescimento do grão.	18
Figura 2.6- Estrutura da ZTA de um aço de baixo carbono.	19
Figura 2.7- Sequência de deposição em solda multipasses.	19
Figura 2.8- Posições de soldagem.	22
Figura 2.9- Regiões de um arco elétrico.....	23
Figura 2.10- Soldagem SMAW.....	24
Figura 2.11- Classificação de eletrodos revestidos para aços carbono.....	28
Figura 2.12- Fontes e equipamentos utilizados na soldagem SMAW.....	29
Figura 2.13- Processo FCAW.....	30
Figura 2.14- Transferência por curto-circuito.	32
Figura 2.15- Transferência globular.	32
Figura 2.16- Transferência por aerossol.	33
Figura 2.17- Transferência por arco pulsado.....	34
Figura 2.18- Processo GTAW.....	34
Figura 2.19- Equipamentos processo GTAW.	33
Figura 2.20- Representação das curvas de temperatura em várias posições de uma junta soldada.....	37
Figura 2.21- Desenho esquemático do ensaio TOFD.....	39
Figura 2.22- Resultado da inspeção de um bloco escalonado.	39
Figura 2.23- Diagrama tensão-deformação de um ensaio de tração e suas respectivas regiões para um determinado material.	42
Figura 2.24- Modelo de retirada de corpos de prova soldados para o ensaio de tração.....	43
Figura 3.1- Montagem da junta para realização da soldagem.	44
Figura 3.2- Geometria do chanfro.	49
Figura 3.3- (a) Croqui da amostra TF, TE e EE.	49
Figura 3.4- Montagem para realização do ensaio Ultrassom TOFD.	54
Figura 3.5- Dimensões dos corpos de prova segundo a Norma ASTM E8 para realização do ensaio de tração.	56
Figura 3.6- Corpos de prova para ensaio de tração.	56
Figura 3.7- fixação do corpo de prova para realização do ensaio de tração.....	57
Figura 3.8- Espaçamento mínimo entre identificações segundo a Norma ASTM E384.....	57
Figura 3.9- Esquema para ensaio de microdureza.	58
Figura 4.1- Macrografia corpo de prova TF.....	60
Figura 4.2- Macrografia corpo de prova TE.....	60
Figura 4.3- Macrografia corpo de prova EE.....	59

Figura 4.4- Micrografia com aumento de 50X do aço ASTM A36 utilizado como metal de base para confecção das amostras TF, TE e EE. Ataque Nital 2% .	59
Figura 4.5- Micrografia com aumento de 200X do aço ASTM A36 utilizado como metal de base para confecção dos corpos de prova TF, TE e EE. Ataque Nital 2%.	62
Figura 4.6- Micrografia com aumento de 200X da zona fundida do corpo de prova TF. Ataque Nital 2% .	63
Figura 4.7- Micrografia com aumento de 500X da zona fundida do corpo de prova TF. Ataque Nital 2% .	63
Figura 4.8- Micrografia com aumento de 200X da zona termicamente afetada do corpo de prova TF. Ataque Nital 2%.	64
Figura 4.9- Micrografia com aumento de 500X da zona termicamente afetada do corpo de prova TF. Ataque Nital 2%.	64
Figura 4.10- Micrografia com aumento de 200X da zona fundida do corpo de prova TE. Ataque Nital 2% .	65
Figura 4.11- Micrografia com aumento de 500X da zona fundida do corpo de prova TE. Ataque Nital 2% .	65
Figura 4.12- Micrografia com aumento de 200X da zona termicamente afetada do corpo de prova TE. Ataque Nital 2% .	66
Figura 4.13- Micrografia com aumento de 500X da zona termicamente afetada do corpo de prova TE. Ataque Nital 2% .	67
Figura 4.14- Micrografia com aumento de 200X da zona fundida do corpo de prova EE. Ataque Nital 2% .	68
Figura 4.15- Micrografia com aumento de 500X da zona fundida do corpo de prova EE. Ataque Nital 2% .	68
Figura 4.16- Micrografia com aumento de 200X da zona termicamente afetada do corpo de prova EE. Ataque Nital 2% .	69
Figura 4.17- Micrografia com aumento de 500X da zona termicamente afetada do corpo de prova TF. Ataque Nital 2%.	69
Figura 4.18- Inclusões encontradas no corpo de prova TF.	67
Figura 4.19- Inclusões encontradas no corpo de prova TE.	68
Figura 4.20- Inclusões encontradas no corpo de prova EE.	68
Figura 4.21- ensaio Ultrassom no corpo de prova TF a 70°	69
Figura 4.22-ensaio Ultrassom no corpo de prova TF a 60°	69
Figura 4.23- ensaio Ultrassom no corpo de prova TE a 70°.	73
Figura 4.24- ensaio Ultrassom no corpo de prova TE a 60°.	73
Figura 4.25- ensaio Ultrassom no corpo de prova EE a 70° .	74
Figura 4.26- Curva Tensão x Deformação dos corpos de prova TF, TE e EE.	75
Figura 4.27- Médias dos resultados obtidos no ensaio de microdureza Vickers na região superior do corpo de prova conforme Figura 3.9.	76
Figura 4.28- Médias dos resultados obtidos no ensaio de microdureza Vickers na região central do corpo de prova conforme Figura 3.9.	77
Figura 4.29- Médias dos resultados obtido io de microdureza Vickers na região inferior do corpo de prova conforme Figura 3.9.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Classificação do IIW para microconstituintes de metal de solda de aços de baixo carbono.	39
Tabela 3.1- Processos de soldagem utilizados na confecção das amostras TF, TE e EE.	44
Tabela 3.2- Composição química em % do aço ASTM A-36.	45
Tabela 3.3- Propriedades mecânicas do aço ASTM A-36.	45
Tabela 3.4- Composição química do arame E71T-1.	46
Tabela 3.5- Propriedades mecânicas do metal depositado.	46
Tabela 3.6- Composição química da vareta ER70S-3.	47
Tabela 3.7- Propriedades mecânicas do metal depositado.	47
Tabela 3.8- Composição química do eletrodo AWS E7018.	48
Tabela 3.9- Propriedades mecânicas do eletrodo AWS E7018.	48
Tabela 3.10- Parâmetros utilizados na soldagem da amostra TF.	50
Tabela 3.11- Variação da energia de soldagem por passe na amostra TF.	50
Tabela 3.12- Parâmetros utilizados na soldagem da amostra TE.	49
Tabela 3.13- Variação da energia de soldagem por passe na amostra TE.	49
Tabela 3.14- Parâmetros utilizados na soldagem da amostra EE.	52
Tabela 3.15- Variação da energia de soldagem por passe na amostra EE.	53
Tabela 4.1- Resultado da análise química no metal de base das amostras.	57
Tabela 4.2- Médias dos resultados obtido no ensaio de tração.	74

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento industrial, a utilização de instalações metálicas enterradas ou submersas, tais como oleodutos, gasodutos, adutoras, navios, plataformas de petróleo, tanques de armazenamento, dentre outras, tem sido cada vez mais frequente.

O aço ASTM A-36 é um aço estrutural muito utilizado em diversos setores destas indústrias, sendo notório o destaque na fabricação de tanques de armazenamento de petróleo e seus derivados.

Dentro das refinarias estes tanques armazenam matéria prima para abastecimento das unidades, produto intermediário que é o produto final de uma unidade e matéria prima de outra, além de produto final que está pronto para distribuição.

Em todos estes segmentos percebemos uma intensa busca pela melhoria na qualidade das juntas soldadas na fabricação destas estruturas para evitar o risco de acidentes como por exemplo, uma ruptura, já que a maioria destes tanques armazenam produtos que são prejudiciais ao meio ambiente e saúde das pessoas que ali trabalham.

Atualmente percebe-se varias pesquisas e desenvolvimento de novas técnicas de soldagem objetivando a seleção de métodos mais adequados para aplicações específicas.

Os processos de soldagem Eletrodo revestido (SMAW) e Arame tubular (FCAW) são amplamente utilizados nestes setores devido à ampla aplicação em termos de espessuras e materiais utilizados, e em algumas situações como, por exemplo, na soldagem da boca de visita no costado, o processo TIG (GTAW) é utilizado juntamente com estes processos no passe de raiz da junta.

A colaboração da empresa TOMÉ Engenharia neste estudo tem permitido a realização de pesquisas para melhoramento e desenvolvimento dos processos de soldagem num trabalho científico, no qual tem sido possível a interação entre a universidade e o setor industrial.

Neste estudo foram analisadas três juntas soldadas utilizadas na fabricação e reparo de tanques de armazenamento de petróleo, sendo uma junta utilizando o processo de soldagem TIG no passe de raiz e Arame tubular no enchimento e acabamento, uma junta com o processo TIG no passe de raiz e Eletrodo revestido no enchimento e acabamento e uma junta utilizando apenas o processo Eletrodo revestido tendo como objetivo avaliar e comparar as características microestruturais e mecânicas destas juntas.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Soldagem

A união de materiais pode se dar de duas maneiras, isto é, aquelas baseadas na ação de forças macroscópicas e as baseadas em forças microscópicas. Como exemplo de união através de forças macroscópicas podemos citar a parafusagem e a rebiteagem, já para o caso de união por forças microscópicas podemos citar a brasagem, a soldagem e a colagem.

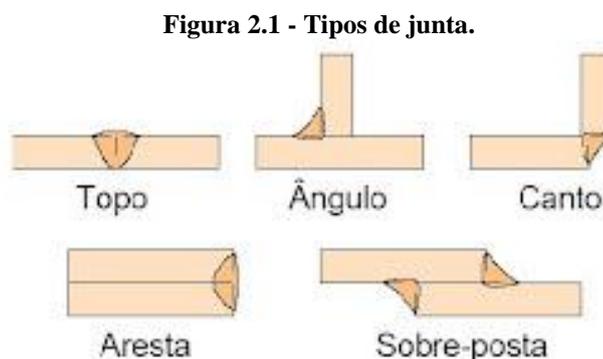
Destes processos de união, a soldagem tem grande destaque, pois é o processo de união permanente de peças metálicas mais utilizado industrialmente, por permitir a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e economia de material. Podemos definir soldagem de maneira ampla, como:

“Processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos (MARQUES et al., 2011, p. 18).”

Estes processos são muitos versáteis em termos dos tipos de ligas metálicas e das espessuras que podem ser unidas.

2.1.1 Junta

Chama-se de junta, a região onde as peças serão unidas pela operação de soldagem. Estas juntas podem ser de topo, de canto, de aresta, em ângulo ou sobreposta, como apresentado na Figura 2.1.



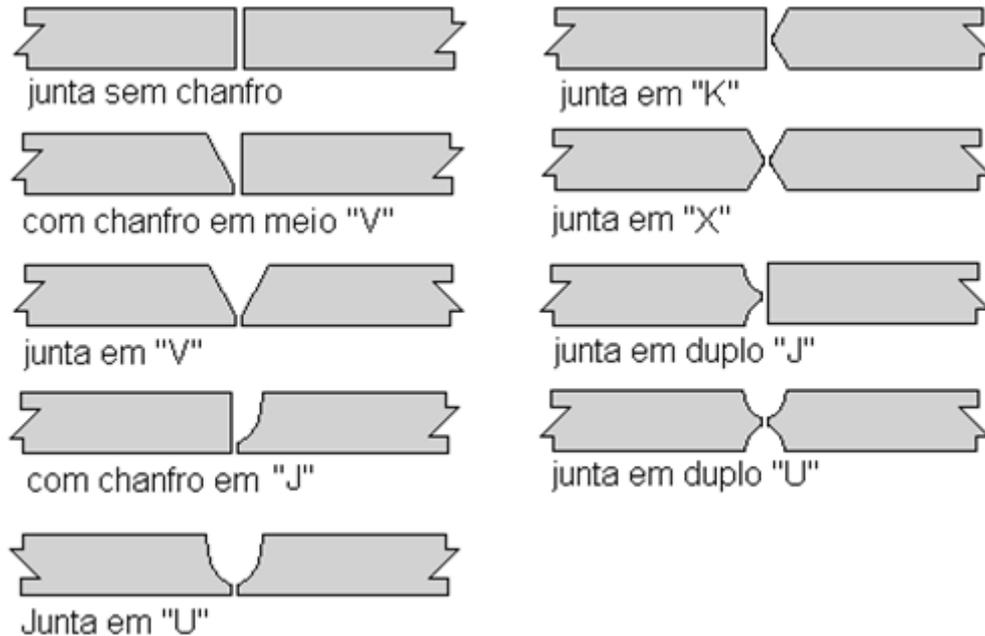
Fonte: Modenesi (2001).

2.1.2 Chanfro

Dependendo das dimensões das peças a serem soldadas e a facilidade de movimentação torna-se necessária a operação de usinagem no material. Esta preparação na

superfície da peça a ser unida e que determina o espaço para conter o material depositado é chamada de chanfro. Os tipos de chanfro mais utilizados são mostrados na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Principais tipos de chanfro.

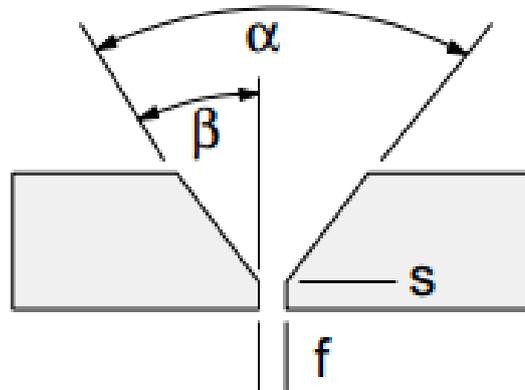


Fonte: Cunha Jr (2008).

O tipo de chanfro a ser usado na soldagem é escolhido em função do processo de soldagem a ser utilizado, da espessura das peças, da facilidade de acesso à região da junta, do tipo de junta e do custo de preparação.

Juntas sem chanfro são utilizados em materiais que possuem pequenas espessuras. O chanfro V e $\frac{1}{2}$ V são utilizados em juntas de maiores espessuras em que não é possível uma boa penetração com a utilização de junta sem chanfro. Já na situação em que a espessura da junta é muito grande, os chanfros V e $\frac{1}{2}$ V se tornam pouco interessantes, pois irão necessitar de um grande volume de metal de adição para o seu enchimento, tornando-se interessante o uso do chanfro U e J. Quando é possível a soldagem dos dois lados da junta, chanfros em X, K, duplo U ou duplo J podem ser utilizados, pois estes tem a vantagem de melhor equilibrar as tensões térmicas geradas durante a soldagem apresentando assim uma menor distorção. A Figura 2.3 apresenta os principais elementos de um chanfro (MARQUES et al., 2011).

Figura 2.3 - Elementos de um chanfro: α -ângulo de chanfro; β -ângulo de bisel; S- altura da raiz e f-face da raiz.

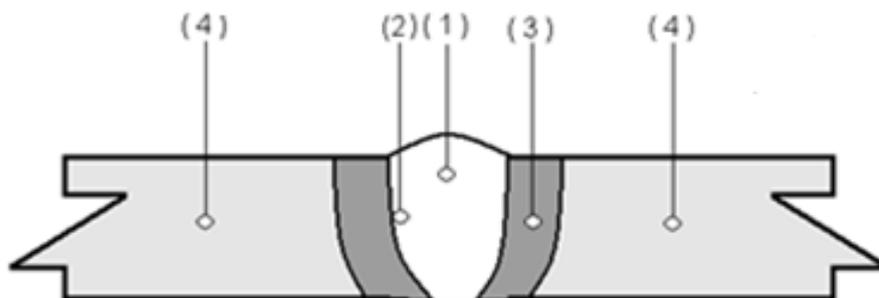


Fonte: MARQUES et al. (2011).

2.1.3 Partes de uma junta

A Figura 2.4 mostra um corte transversal de uma junta soldada de topo e nela é apresentada a zona fundida, zona de ligação, zona termicamente afetada e metal de base.

Figura 2.4 - Regiões de uma junta soldada: (1) zona fundida; (2) zona de ligação; (3) zona termicamente afetada e (4) metal de base.



Fonte: Cunha Jr. (2008).

2.1.3.1 Zona Fundida

A zona fundida de uma junta solda é constituída pela diluição entre o metal depositado e o metal de base.

Nos processos de soldagem por fusão, a zona fundida pode ser formada sob as mais diversas condições, determinando assim, várias características macro e microestruturais do

cordão de solda, tendo, assim, um importante efeito sobre as propriedades mecânicas e o comportamento da junta soldada (MARQUES et al., 2011).

Nos aços a microestrutura final do metal de solda depende de alguns fatores, são eles: Teor de elementos de liga, composição química do metal de base e ciclo térmico de soldagem que segundo Asselli (2007), tornam as transformações de fase na zona fundida destes materiais um tanto complexas, promovendo a nucleação de ferrita com diversas morfologias.

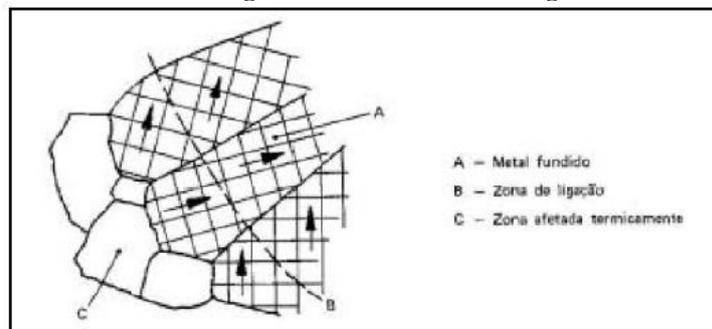
Segundo Evans (1991), podemos encontrar na zona fundida dos aços C-Mn e de baixa liga as seguintes microestruturas: ferrita primária (PF), ferrita com segunda fase (FS), ferrita acicular (AF), martensita (M) e em alguns casos é possível identificar a micro fase austenita-martensita (A-M).

2.1.3.2 Zona de Ligação

É a região limite entre a poça de fusão (líquida) e o metal de base (sólido). A partir desta linha é iniciada a solidificação e o crescimento a partir de grãos parcialmente fundidos em direção à linha central da solda formando o metal de solda.

O crescimento do grão inicia-se pelo agrupamento dos átomos da fase líquida ao substrato sólido existente, estendendo-se este, sem alterar a sua orientação cristalográfica, conforme ilustrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Crescimento do grão.



Fonte: Modenesi (2010).

2.1.3.3 Zona Termicamente Afetada

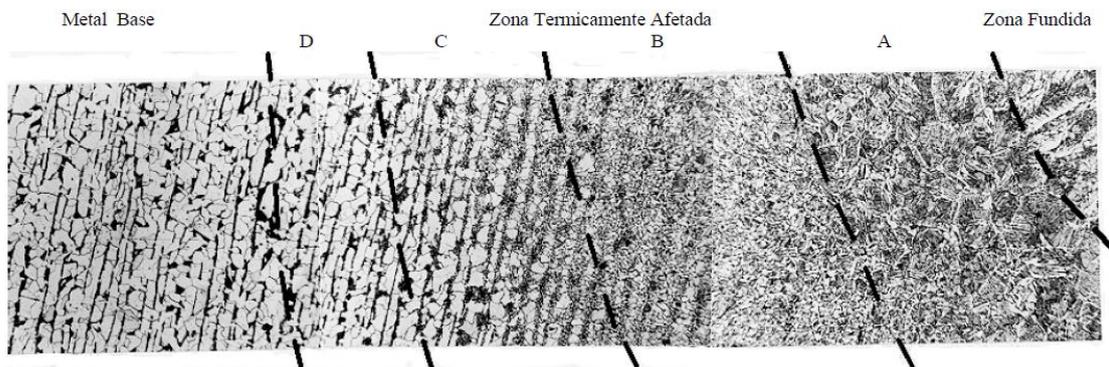
A zona termicamente afetada é a região próxima à zona fundida que sofre alterações microestruturais devido ao ciclo térmico gerado durante a soldagem. Esta região depende basicamente do metal de base, procedimento para execução da soldagem e do processo de soldagem utilizado.

Dependendo do material utilizado na soldagem, os efeitos do ciclo térmico poderão ser os mais variados. Para materiais não transformáveis a mudança estrutural mais marcante será

o crescimento de grão, já em materiais transformáveis teremos mudanças estruturais mais complexas (MARQUES et al., 2011).

A Figura 2.6 apresenta a estrutura da zona termicamente afetada de um aço de baixo carbono.

Figura 2.6 - Estrutura da ZTA de um aço de baixo carbono. As divisões aproximadas correspondem a: A - Região de Granulação Grosseira, B - Região de Normalização, C - Região Intercrítica e D - Região Subcrítica.



Fonte: Modenesi (2010).

Dependendo da energia de soldagem utilizada no processo, o ciclo térmico pode dividir a ZTA em quatro zonas, as quais apresentam diferentes características metalúrgicas, e consequentemente diferentes propriedades mecânicas. São elas: (MODENESI, 2010).

- **Região de granulação Grosseira:** Também conhecida como região de crescimento de grão, corresponde a porções do metal base aquecidas acima de sua temperatura de crescimento de grão (em geral, em torno de 1200°C), tendo uma microestrutura caracterizada pelo seu elevado tamanho de grão.
- **Região de Normalização:** Região que situa-se mais afastada da linha de fusão que a anterior, sendo submetida durante a soldagem, a temperaturas de pico entre cerca de 1200°C e a linha A3 (Diagrama FeC). Esta região é caracterizada por uma estrutura de granulação fina, similar à dos aços normalizados. Esta região não é considerada problemática para a maioria dos aços, exceto para aqueles temperados e revenidos, onde ela pode apresentar menor resistência mecânica que o metal base.
- **Região Intercrítica:** Região em que o material é aquecido, durante a soldagem, entre as linhas A3 e A1 (Diagrama FeC) e sofre uma transformação parcial, isto é, apenas parte de sua estrutura é transformada em austenita, que se decompõe em seguida durante o resfriamento. Em um aço com uma estrutura de ferrita e perlita antes da

soldagem, as regiões perlíticas (com cerca de 0,8% de carbono) e uma quantidade variável da ferrita junto à perlita se transformam em austenita durante a soldagem. No resfriamento, estas regiões que apresentam-se com um teor de carbono maior do que o teor médio do aço, podem se transformar em martensita se a velocidade de resfriamento for suficientemente elevada.

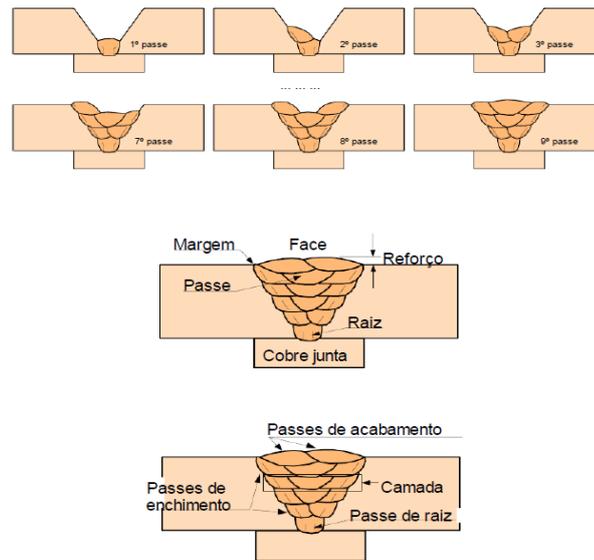
- **Região Subcrítica:** Região que apresenta pequenas alterações microestruturais visíveis ao microscópio óptico em aços na condição laminado a quente ou normalizado. Estas se resumem basicamente a uma pequena esferoidização da perlita. Em aços temperados e revenidos, as alterações microestruturais são mais intensas, ocorrendo um superrevenido das regiões da ZTA aquecidas acima da temperatura original de tratamento. Nestas condições, a região intercrítica é mais extensa e apresenta uma queda de dureza em relação ao metal base.

Segundo Albuquerque et al. (2011), uma granulação grosseira no metal de solda não é necessariamente prejudicial à tenacidade, desde que o microconstituente presente nesta região da junta soldada seja predominantemente constituído de Ferrita Acicular (AF). Este microconstituente apresenta granulação fina e entrelaçada, composta por finas ripas de ferrita com cementita entre estas ripas. Devido à distribuição caótica das ripas de ferrita, a presença deste microconstituente é favorável ao aumento da tenacidade no metal de solda de aços com alta resistência e baixa liga (ARBL), possibilitando uma boa relação entre resistência e tenacidade.

2.1.4 Soldagem Multipasses

Em uma junta soldada podemos obter uma zona fundida constituída por um ou mais passes depositados segundo uma sequência de deposição e organizados em camadas. Na Figura 2.7 é apresentada uma sequência de passes para uma junta de topo com chanfro V.

Figura 2.7 - Sequência de deposição em junta soldada com multipasses.



Fonte: Modenesi (2001).

Neste tipo de soldagem o acréscimo de metal sobre metal é notoriamente um conjunto sucessivo de transformações, já que os passes posteriores geram um efeito similar a tratamentos térmicos sobre os passes já executados, da mesma forma sobre a ZTA dos passes anteriores, criando uma heterogeneidade metalúrgica (MARQUES et al., 2011; MODENESI, 2010).

Podemos citar como consequências da soldagem multipasses:

- Cada ciclo térmico gerado pelo passe subsequente refinará ou normalizará parte do metal do passe anterior;
- O calor do aporte térmico total por passe é reduzido a medida que o crescimento de grão é minimizado;
- O passe prévio pode fornecer um pré-aquecimento o qual tende a incrementar o tempo de resfriamento;
- O passe subsequente tende a refundir parte do passe anterior e o aquecimento gerado alivia as tensões residuais.

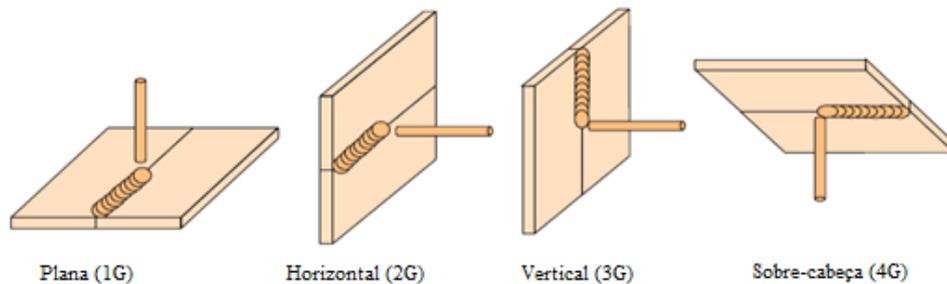
Segundo Albuquerque et al. (2011), a formação de constituintes frágeis é influenciada pelos ciclos térmicos de soldagem, principalmente para o caso de soldas multipasses.

2.1.5 Posição de Soldagem

Dependendo do processo de soldagem, do tipo de chanfro, da posição da peça a ser soldada e do eixo da solda pode-se ter as seguintes posições de soldagem: plana, horizontal, vertical ou sobrecabeça.

Segundo a ASME (American Society of Mechanical Engineers) a posição de soldagem é designada por um dígito seguido de uma letra. Assim, as posições plana, horizontal, vertical e sobrecabeça são designadas, respectivamente por 1G, 2G, 3G e 4G para soldas de topo. A Figura 2.8 apresenta as posições de soldagem.

Figura 2.8 - Posições de soldagem.



Fonte: Modenesi (2001).

2.1.6 Classificação dos Processos de Soldagem

Os processos de soldagem podem ser classificados em:

- Manual: Toda operação de soldagem é realizada e controlada manualmente pelo soldador;
- Semiautomática: Processo possui controle automático da alimentação do metal de adição, mas com controle manual do posicionamento da tocha e deslocamento;
- Mecanizada: Processo possui controle automático da alimentação do metal de adição e do deslocamento do cabeçote de soldagem pelo equipamento, mas com o posicionamento, acionamento e supervisão da operação realizada por um operador;
- Automática: Processo de soldagem com controle automático através da utilização de sensores e possibilidades de programações. Podem ser divididos em duas classes: execução de operações específicas de soldagem e sistemas com robôs que permitem flexibilidade para alterações em termos de operações através de programações.

2.2 Processos de Soldagem a arco elétrico

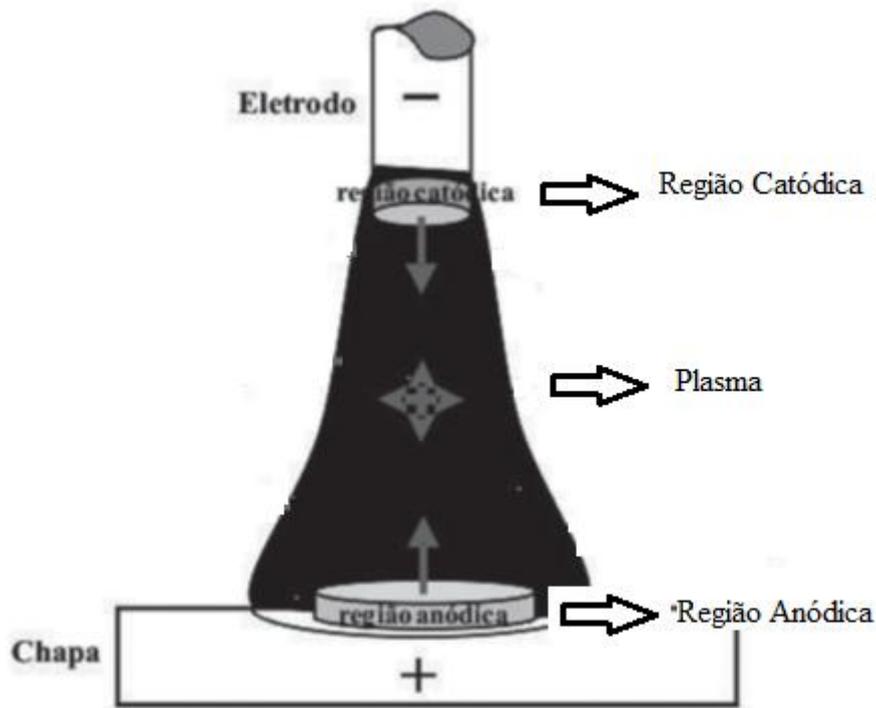
2.2.1 Arco elétrico

O arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada nas operações de soldagem por fusão de materiais metálicos.

Com a utilização do arco elétrico é possível a obtenção de uma energia concentrada para a fusão localizada do metal de base. Esta fonte de calor consiste de uma descarga elétrica, sustentada através de um gás ionizado, a alta temperatura, conhecido como plasma.

Segundo Marques et al., (2011) o arco elétrico é formado por três regiões distintas que juntas formam o comprimento do arco. A Figura 2.9 apresenta um esquema destas três regiões.

Figura 2.9 - Regiões de um arco elétrico.



Fonte: Scotti, Reis e Liskevych (2012) modificado pelo autor (2013).

As regiões de queda anódica e catódica são caracterizadas por elevados gradientes térmicos e elétricos e a soma destas é aproximadamente constante, independente das condições de operação do arco. A diferença de potencial nesta região varia de forma aproximadamente linear com o comprimento do arco.

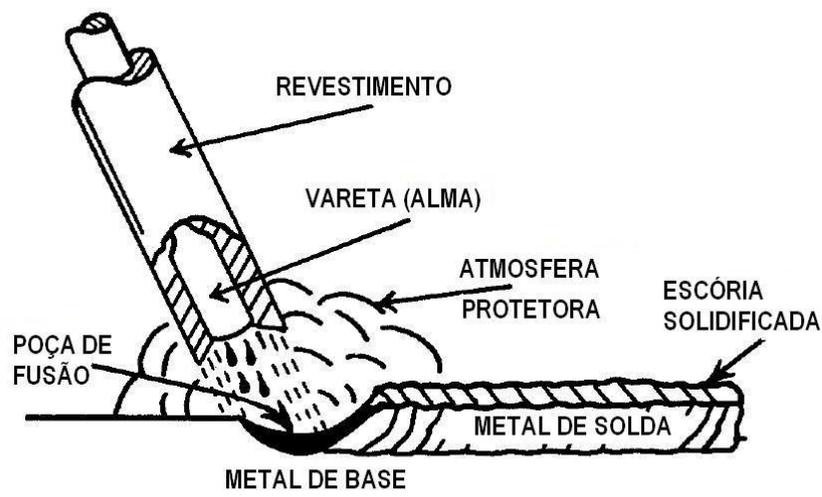
O arco de soldagem apresenta, em geral, uma elevada eficiência para transformar a energia elétrica em energia térmica e transferi-la para a peça.

2.2.2 Processo de Soldagem Eletrodo Revestido (SMAW)

A soldagem SMAW é o mais utilizado entre os vários processos de soldagem. A soldagem é realizada com o calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho. Neste processo o calor produzido pelo arco funde o metal de base, a alma do eletrodo e o revestimento. Quando as gotas de metal fundido são transferidas através do arco para a poça de fusão, são protegidas da atmosfera pelos gases produzidos durante a decomposição do revestimento. A escória líquida flutua em direção à superfície da poça de fusão, onde protege o metal de solda da atmosfera durante a solidificação (FORTES, 2005).

A Figura 2.10 apresenta um esquema deste processo.

Figura 2.10 - Soldagem SMAW.



Fonte: Fortes (2005).

São várias as vantagens do processo de soldagem SMAW, entre estas é o processo de soldagem mais simples disponível, tudo o que se necessita é de uma fonte de energia de corrente constante, dois cabos elétricos e o eletrodo.

Entre os processos de soldagem a arco, é o mais flexível no sentido que pode ser empregado em qualquer posição de soldagem para quase todas as espessuras dos aços carbono.

As desvantagens deste processo estão relacionadas com os eletrodos revestidos que apresentam taxas de deposição mais baixas que os outros processos, tornando-o menos eficiente. Além disso, o uso de eletrodos revestidos para aços carbono requer mais treinamento dos soldadores que os processos de soldagem semiautomáticos e automáticos.

2.2.2.1 Eletrodos Revestidos

Os eletrodos revestidos para soldagem de aços carbono consistem de apenas dois elementos principais: a alma metálica, normalmente de aço de baixo carbono, e o revestimento.

A alma metálica serve para conduzir a corrente elétrica e fornecer metal de adição para a junta. Já o revestimento tem segundo Fortes (2005) as seguintes funções:

- Proteção do metal de solda – Considerada a principal função, pois é responsável pela proteção do metal de solda do oxigênio, do nitrogênio e da umidade enquanto está no estado líquido, pois estes elementos quando presentes em alta temperatura gerados pelo arco combinam-se com o ferro formando nitretos de ferro e óxidos de ferro que, se presentes no metal de solda poderão causar fragilidade e porosidade;
- Estabilização do arco – Responsável pela abertura do arco e sua manutenção durante o processo de soldagem;
- Adições de elementos de liga ao metal de solda – É frequentemente necessário adicionar elementos de liga ao revestimento para balancear a perda esperada desses elementos durante a atividade de soldagem devido à volatilização e às reações químicas;
- Formação de escória – Proteção contra contaminantes atmosféricos e redução da velocidade de resfriamento do metal fundido para permitir o escape de gases;
- Posição de soldagem – Através da adição de certos elementos químicos no revestimento, como por exemplo, compostos de titânio, tem-se a possibilidade da soldagem na posição sobrecabeça;
- Propriedades mecânicas específicas do metal de solda – propriedades mecânicas específicas podem ser incorporadas ao metal de solda por meio do revestimento. Altos valores de resistência ao impacto a baixas temperaturas, alta ductilidade, e o aumento nas propriedades de escoamento e resistência mecânica podem ser obtidos pelas adições de elementos de liga ao revestimento;
- Isolamento da alma de aço - o revestimento atua como um isolante de tal modo que a alma não causará curto-circuito durante a soldagem de chanfros profundos ou de aberturas estreitas; o revestimento também serve como proteção para o operador quando os eletrodos são trocados.

2.2.2.2 Tipos de Revestimento

Os revestimentos para eletrodo podem ser divididos em cinco tipos. São eles: Revestimento Celulósico, Revestimento Rutílico, Revestimento Básico, Revestimento Ácido e Revestimento Oxidante.

2.2.2.2.1 Revestimento Celulósico

Esse revestimento possui elevada quantidade de material orgânico e suas principais características são:

- Elevada produção de gases, por exemplo: CO₂, CO, H₂ e H₂O (vapor);
- Não devem ser ressecados;
- Formação de atmosfera redutora que protege o metal fundido;
- O alto nível de hidrogênio no metal de solda depositado, o que impede o uso em estruturas muito restritas ou em materiais sujeitos a trincas por hidrogênio;
- Alta penetração;
- Formação de pouca escória e de fácil remoção;
- Muito utilizado na soldagem de tubulações;
- Utilizado em passe de raiz;
- Não indicado para enchimento de chanfro;
- Operando em CC+, obtém-se transferência por spray.

2.2.2.2.2 Revestimento Rutílico

Contém quantidade significativa de rutilo (TiO₂) e suas principais características são:

- Consumível de uso geral;
- Revestimento apresenta até 50% de rutilo (TiO₂);
- Média penetração;
- Escória abundante, densa e facilmente destacável;
- O metal de solda pode apresentar um nível de hidrogênio alto (até 30 ml/100g);
- Requer ressecagem a uma temperatura relativamente baixa, para que o metal de solda não apresente porosidades grosseiras;
- Pode ser usado em CC ou CA.

2.2.2.2.3 Revestimento Básico

Contém quantidade apreciável de carbonato de cálcio e fluorita, e suas principais características, são:

- Geralmente apresenta as melhores propriedades mecânico-metalúrgicas entre todos os eletrodos, destacando-se a tenacidade;
- Elevados teores de carbonato de cálcio e fluorita, gerando um metal de solda altamente desoxidado e com baixo nível de inclusões complexas de sulfetos e fosfetos;
- Não opera bem em CA, quando o teor de fluorita é muito elevado;
- Escória fluida e facilmente destacável;
- Cordão de média penetração;
- São altamente higroscópicos, por este motivo necessitam de cuidados especiais de armazenagem e secagem;
- É indicado para serviços de alta responsabilidade.

2.2.2.2.4 Revestimento Ácido

Constituído principalmente de óxido de ferro e mangânes e sílica. Suas principais características são:

- Formação de escória ácida abundante e porosa de fácil remoção;
- Média penetração com poça de fusão volumosa;
- Utilizado na posição plana e horizontal;
- Utilizado em CC ou CA.

2.2.2.2.5 Revestimento Oxidante

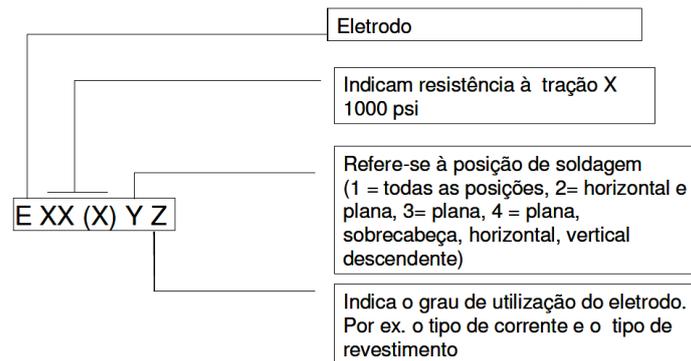
Constituído principalmente de óxido de ferro e manganês, suas principais características são:

- Escória oxidante, abundante e de fácil remoção;
- Baixa penetração;
- Não indicado para serviço de responsabilidade;
- Utilizado em CC ou CA.

2.2.2.3 Classificação dos Eletrodos

Os eletrodos para aço carbono são classificados pelos fabricantes de consumíveis, em conformidade com a especificação com base nas propriedades mecânicas do metal de solda, no tipo de revestimento, na posição de soldagem, e no tipo de corrente. O sistema de classificação é elaborado para fornecer certas informações sobre o eletrodo e o metal de solda depositado. O significado das designações da AWS (American Welding Society) é mostrado na Figura 2.11 (Fortes, 2005).

Figura 2.11 - Classificação de eletrodos revestidos para aços carbono.



Fonte: Fortes (2005).

2.2.2.4 Seleção do eletrodo adequado para aços Carbono

Segundo Fortes (2005) muitos fatores devem ser considerados quando se seleciona o eletrodo adequado para uma determinada aplicação. Alguns itens a serem considerados são:

- Tipo do metal de base - Para soldagem de aços carbono ou aços de baixo carbono (teor de carbono inferior a 0,30%) com eletrodos revestidos não terá problemas quando a resistência à tração do metal de solda for superior ao do metal de base, no entanto, a composição química do metal de base também é importante;
- Posição de soldagem - a posição de soldagem é determinante na escolha de um eletrodo para soldagem. Correntes de soldagem mais altas e, portanto, maiores taxas de deposição são possíveis durante a soldagem nas posições plana ou horizontal. Sempre que possível, a peça deve ser posicionada levando-se em consideração a facilidade de soldagem a maior velocidade de soldagem;
- Espessura da chapa - durante a soldagem de chapas finas devem ser utilizados eletrodos de baixa penetração. Ao soldar chapas grossas, pode-se utilizar um eletrodo com penetração profunda. Muitas chapas grossas podem necessitar de eletrodos de penetração profunda para o passe de raiz, e de um eletrodo de alta taxa de deposição para enchimento do chanfro.

2.2.2.5 Fonte

A soldagem com eletrodos revestidos pode empregar tanto corrente alternada (CA) quanto corrente contínua (CC), porém em qualquer caso a fonte selecionada deve ser do tipo corrente constante.

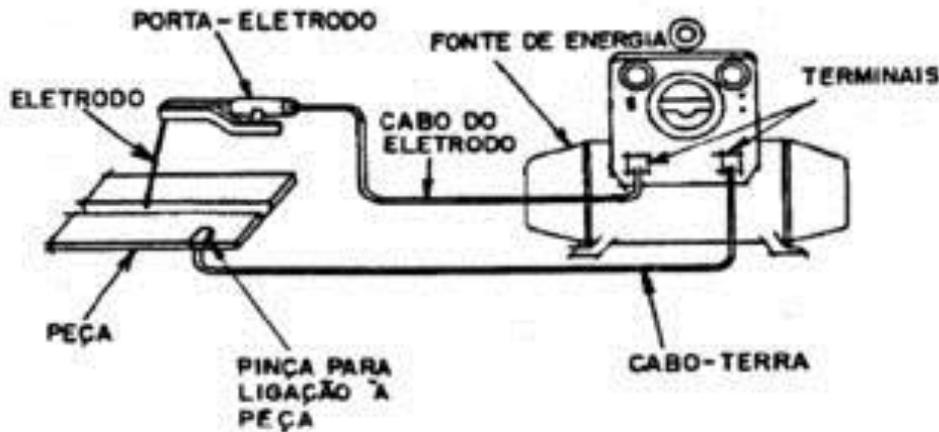
Esse tipo de fonte fornecerá uma corrente de soldagem relativamente constante independentemente das variações do comprimento do arco causadas pelas oscilações da mão

do soldador. A corrente de soldagem determina a quantidade de calor proveniente do arco elétrico e, desde que ele permaneça relativamente constante, os cordões de solda serão uniformes em tamanho e em forma.

A corrente contínua confere melhor estabilidade ao arco. O símbolo CC+ significa polaridade reversa, isto é, o eletrodo é ligado ao pólo positivo e a peça ao negativo. CC- é polaridade direta, isto é, o eletrodo é ligado ao pólo negativo e a peça ao positivo.

A Figura 2.12 apresenta a fonte e equipamentos utilizados na soldagem SMAW.

Figura 2.12- Fontes e equipamentos utilizados na soldagem SMAW.



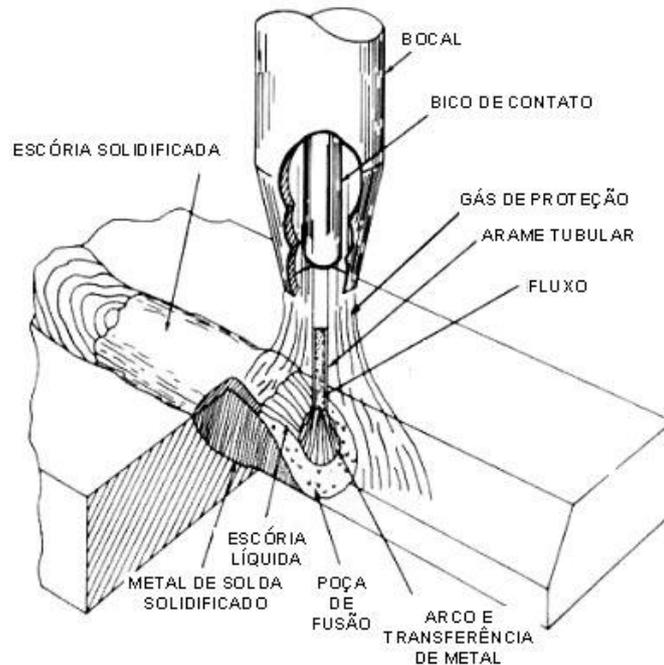
Fonte: Internet (www.ebah.com.br). Acesso em 30/01/2013.

2.2.3 Processo de soldagem Arame Tubular (FCAW)

A soldagem a arco FCAW é um processo semiautomático que produz a união de metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo tubular, contínuo, consumível e a peça de trabalho. A proteção do arco e do cordão de solda é feita por um fluxo de gás fornecido por uma fonte externa e um fluxo contido no arame que desoxida, refina o metal de solda, adiciona elementos de liga e estabiliza o arco.

A Figura 2.13 apresenta um esquema do processo FCAW.

Figura 2.13 - Processo FCAW.



Fonte: Fortes (2004).

No processo de soldagem FCAW a proteção pode ser feita totalmente pelo fluxo contido no eletrodo ou complementada por uma nuvem de gás, geralmente o CO_2 .

A eficiência de deposição deste processo está na faixa de 92 a 98%, enquanto a faixa dos eletrodos revestidos é de 68 a 72% (MYRES et. al ; 2002).

Segundo Farneze et al. (2009), em se tratando do aspecto de produtividade no processo eletrodo revestido e arame tubular, os fundamentos que justificam a maior produtividade da soldagem realizada com o processo arame tubular em relação ao processo com eletrodo revestido estão relacionados a uma melhor eficiência e taxa de deposição, somadas a um alto ciclo de trabalho, onde tais características estão sendo melhoradas, através de novas formulações dos tipos de fluxo para arames tubulares.

O equipamento básico para a soldagem FCAW é composto por uma fonte de energia, um alimentador de arame, uma tocha de soldagem e uma fonte de gás protetor, além de cabos e mangueiras.

Esse processo é amplamente utilizado na soldagem de aços de baixa liga e de baixo teor de carbono, produzindo soldas com altas taxas de deposição. Produz, ainda, excelente contorno em soldas de ângulo, alta qualidade do metal depositado com ótima aparência da solda.

A escória formada durante a soldagem tem funções de moldar e suportar o metal de adição ou auxiliá-lo a molhar o metal de base, ou seja, a capacidade de se misturar à parcela do metal de base fundido, aumentando assim, a diluição (RODRIGUES, 2010). A desvantagem da escória é a necessidade de removê-la, ainda que neste processo a geração de escória seja pouca e apresente boa destacabilidade.

A soldagem com arame tubular na grande maioria das vezes é semiautomática, na qual ocorre somente o controle automático do arame, podendo em alguns casos ser mecanizada, na qual o controle da alimentação do arame e do deslocamento do cabeçote de soldagem são automáticos, porém com o posicionamento, acionamento e a supervisão feita pelo operador de soldagem.

2.2.3.1 Modo de Transferência

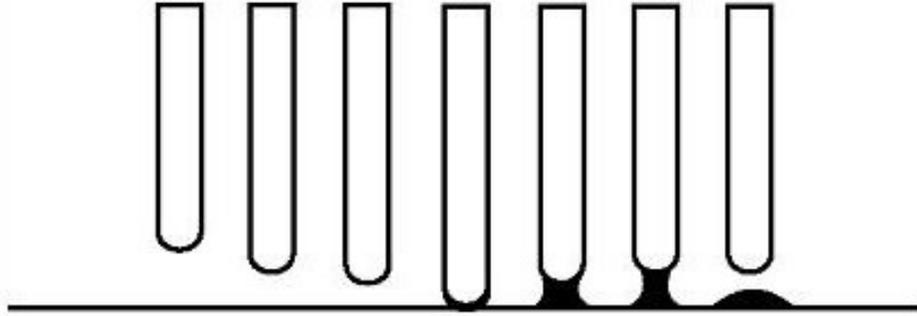
Segundo Fortes (2004), no processo de soldagem com arames tubulares podemos obter quatro tipos de transferência: aerossol (Spray), arco pulsado, globular e curto-circuito. Os fatores determinantes no modo de transferência são: fonte de energia, tipo do arame e gás de proteção. Em seu estudo, Starling (2006) destaca a importância do gás de proteção utilizado e da corrente selecionada e conclui que o aumento da corrente elétrica tem como consequência uma redução média do tamanho das gotas de metal e um aumento na frequência de destacamento das mesmas.

Tesk (2006) cita em seu trabalho que misturas de argônio com baixos teores de CO₂ permitem a obtenção da transferência do metal de adição na forma spray, sendo que, para proporções maiores que 25% deste componente, torna-se impossível a obtenção da transferência spray. Isto é justificado por Vaidya (2002) devido à alta condutividade térmica e baixa condutividade elétrica do gás não permitindo a concentração de elétrons na ponta do eletrodo, gerando o rebaixamento da coluna de plasma. Assim misturas contendo altas porcentagens de CO₂ não são indicados para operar em arco pulsado ou transferência spray.

2.2.3.1.1 Transferência por Curto-Circuito

Ocorrerá com a utilização de fontes de tensão constante, com seleção de correntes abaixo de 200 Ampères podendo sofrer algumas variações devido ao diâmetro do arame e parâmetros selecionados. Esse modo de transferência funciona através de uma série de curtos-circuitos onde o arame toca a poça de fusão e, conseqüentemente, a corrente aumenta, fundindo assim a ponta do arame. A figura 2.14 apresenta um esquema deste tipo de transferência.

Figura 2.14 - Transferência por curto-circuito.



Fonte: Fortes (2004).

O modo de transferência por curto-circuito é ideal para chapas finas, passes de raiz em juntas com abertura e especialmente para a soldagem fora de posição em peças de pequena espessura.

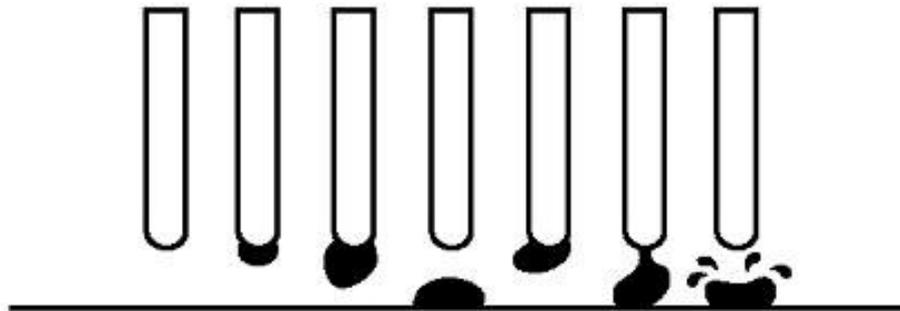
2.2.3.1.2 Transferência Globular

Utilizando-se correntes acima de 200 Ampères, dependendo do diâmetro do arame, haverá uma transição para o modo de transferência globular, onde os curtos-circuitos não acontecem a uma frequência regular.

Neste modo de transferência, os gases ricos em CO_2 são usados para proteger o arco e a região de soldagem. O arame se aquecerá formando grandes gotas de metal fundido, que será transferido através do arco em glóbulos impulsionados pela força do arco.

A Figura 2.15 apresenta um esquema deste tipo de transferência.

Figura 2.15- Transferência globular.

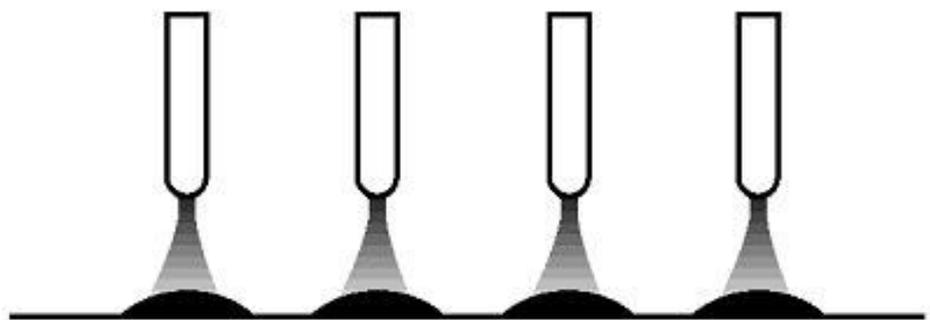


Fonte: Fortes (2004).

2.2.3.1.3 Transferência Aerossol

Este modo de transferência ocorre através da manutenção de um comprimento de arco constante, de modo que gotas extremamente finas sejam projetadas através do arco em queda livre. Para este modo de transferência torna-se necessário o argônio ou misturas de gases ricos em argônio para proteger o arco. O eletrodo positivo com corrente contínua (CC+) é empregado na maioria das aplicações e a corrente tem que estar acima de um valor crítico relacionado com o diâmetro do arame. A Figura 2.16 apresenta um esquema deste tipo de transferência.

Figura 2.16 - Transferência por aerossol.

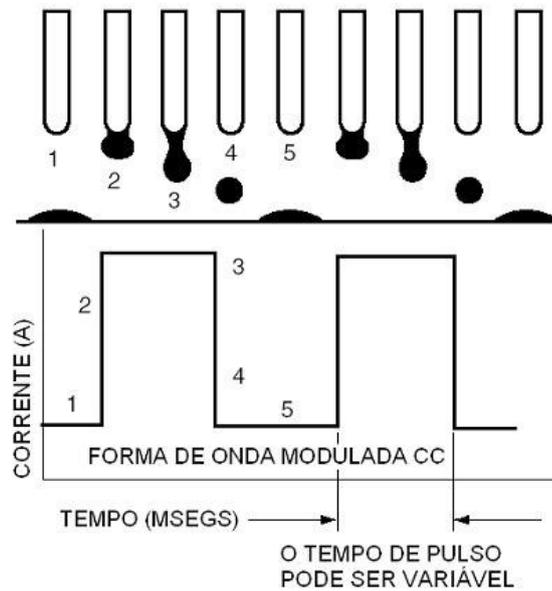


Fonte: Fortes (2004).

2.2.3.1.4 Transferência Arco Pulsado

Este modo de transferência também considerado aerossol permite a projeção de gotas através do arco a uma frequência regular. A frequência pode ser variada na fonte de soldagem para adequá-la a uma aplicação, tipo e diâmetro de arame particular. Em equipamentos mais sofisticados, podem ser ajustados os valores máximo e mínimo da corrente e a duração do ciclo. A Figura 2.17 apresenta um esquema deste tipo de transferência.

Figura 2.17 - Transferência por arco pulsado.



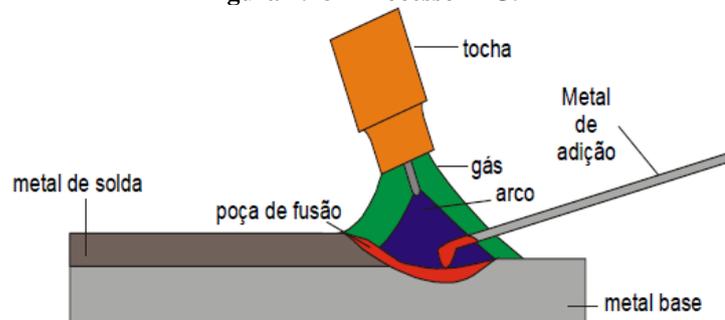
Fonte: Fortes (2004).

2.2.4 Processo de soldagem TIG (GTAW)

O processo de soldagem TIG é um processo na qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e as peças a se unir. A proteção da poça de fusão e do arco contra contaminação pela atmosfera é feita por uma nuvem de gás inerte ou mistura de gases inertes. Neste processo a utilização de metal de adição não é obrigatório e, quando utilizado, é feita diretamente na poça de fusão.

A Figura 2.18 representa este processo.

Figura 2.18 - Processo TIG.



Fonte: Fonseca (2004).

Neste processo obtém-se um excelente controle de energia transferida para a peça. Este controle torna o processo TIG bastante adequado para soldagem de peças finas e passes

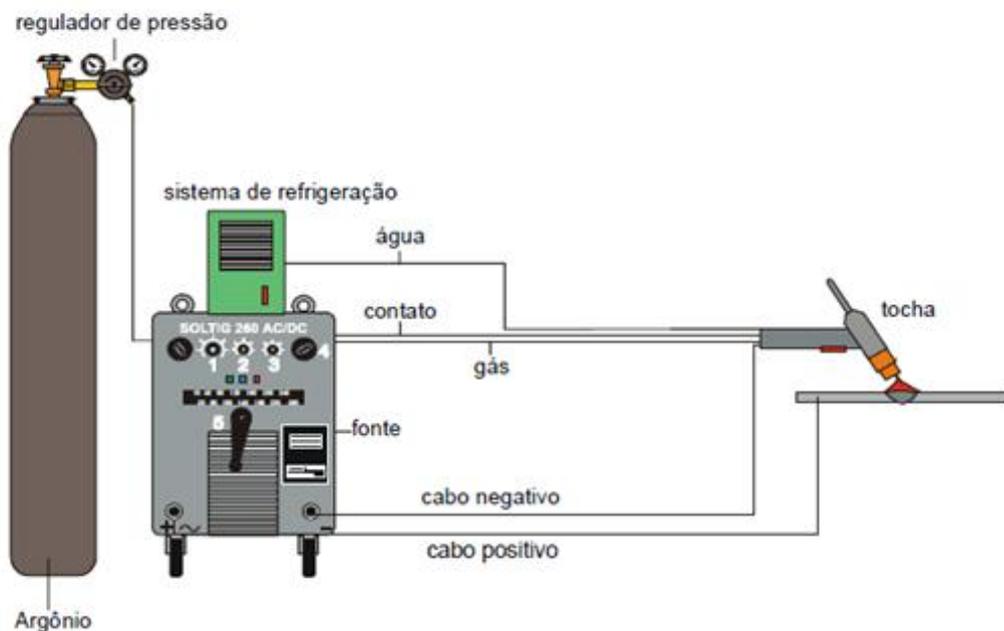
de raiz, aliada a uma eficiente proteção contra contaminação, permitindo assim a soldagem de materiais de difícil soldabilidade. Este processo possui produtividade baixa quando comparado com o processo com eletrodos revestidos (Marques et al., 2011).

A operação é normalmente manual e pode ser feita em qualquer posição, embora a mecanização do processo seja comum com o uso de dispositivos auxiliares de soldagem adequados.

Em virtude de sua baixa eficiência, o processo TIG é usado principalmente na soldagem de metais não ferrosos e aços inoxidáveis, na soldagem de peças finas e no passe de raiz de tubulações.

O equipamento utilizado neste processo consiste de uma fonte de energia, cilindro de gás protetor, dispositivo para abertura de arco, cabos e mangueiras. A fonte de corrente elétrica é do tipo corrente constante, com valor de saída ajustável para cada operação e pode ser contínua, alternada ou pulsada. A Figura 2.19 apresenta um esquema dos equipamentos utilizados neste processo.

Figura 2.19 - Equipamentos processo TIG.



Fonte: Fonseca (2004).

Os consumíveis deste processo são os gases de proteção, as varetas e arames de metal de adição. Os eletrodos de tungstênio utilizados no processo de soldagem TIG apesar de não consumíveis, se desgastam durante o processo, devendo ser trocados com certa frequência. Os

gases utilizados na proteção da solda são inertes, principalmente o argônio, hélio ou misturas destes.

Segundo Marques et al. (2011), quando comparamos a soldagem TIG com a utilização dos gases Argônio e Hélio, obtemos os seguintes resultados:

- Melhor estabilidade com argônio que com hélio;
- Menor consumo de argônio, já que este é mais denso que o hélio;
- Menores tensões de arco com argônio que com hélio;
- Menor custo do argônio;
- Maior penetração na soldagem com hélio que com argônio;
- Maior facilidade na abertura do arco com argônio;
- Melhor efeito de limpeza dos óxidos na soldagem com corrente alternada com argônio;
- Possibilidade de uso de maiores velocidades de soldagem com hélio.

A seleção do gás de proteção é feita principalmente em função do tipo de metal que se deseje soldar, da posição de soldagem e da espessura da peça.

2.3 Metalurgia da soldagem

2.3.1 Energia de soldagem

Segundo Zeemann (2003), a energia de soldagem é um parâmetro de elevada importância metalúrgica, pois juntamente com as características geométricas da junta é determinante nos ciclos térmicos impostos ao material e, portanto nas possíveis transformações microestruturais e no comportamento da junta soldada.

Quanto mais alta for a energia de soldagem aplicada na junta soldada, maior será o calor transferido para esta, maior será a poça de fusão, mais larga a zona termicamente afetada, entre outros efeitos. Por outro lado, a utilização de baixos valores pode provocar falhas de penetração, assim como elevadas velocidades de resfriamento, o que, em certas ocasiões, pode ser prejudicial.

A energia de soldagem absorvida pela junta soldada é dada pela Equação (1):

$$E = \eta \frac{V.I}{v} \quad (1)$$

onde:

E : Energia de soldagem [J/mm]

η : Eficiência térmica do processo

V : Tensão de soldagem [V]

I : Corrente de soldagem [A]

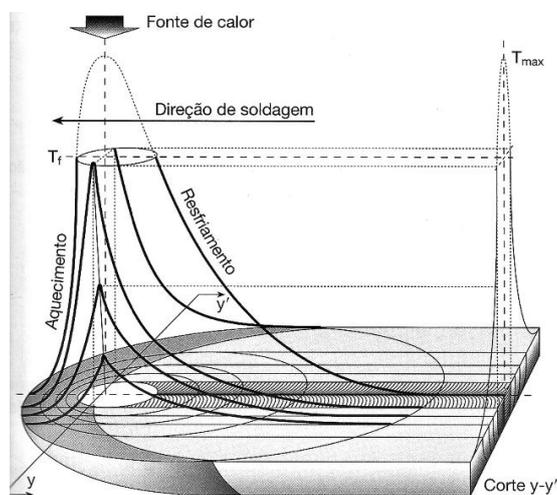
v : Velocidade de soldagem [mm/s]

2.3.2 Ciclos térmicos de soldagem

Define-se o ciclo térmico como a curva que relaciona a variação da temperatura durante a soldagem em determinado ponto com passar do tempo. Esse ciclo térmico, portanto, representa as temperaturas que o ponto em estudo atinge em cada instante do processo. Esse conjunto de temperaturas depende das seguintes grandezas: intensidade da fonte de calor, propriedades físicas do material, temperatura inicial do material, velocidade de deslocamento da fonte de energia e das coordenadas do ponto onde se deseja conhecer o valor da temperatura. O comportamento das curvas representativas de ciclos térmicos reflete aspectos importantes a respeito das condições utilizadas na soldagem. Normalmente fatores como o tipo de processo, utilização ou não de pré-aquecimento ou pós-aquecimento, energia de soldagem, soldagem multipasses, são capazes de estabelecer diferenças na forma de uma curva de ciclo térmico (RODRIGUES, 2011).

A Figura 2.20 representa os ciclos térmicos em várias posições de uma junta soldada.

Figura 2.20 - Representação dos ciclos térmicos em várias posições de uma junta soldada.



Fonte: Colpaert (2008).

Os principais parâmetros que formam o ciclo térmico são:

- **Temperatura de Pico:** Máxima temperatura atingida em um dado ponto e indica a possibilidade de ocorrência de transformações microestruturais;
- **Temperatura de Permanência:** Temperatura acima da Crítica. Este parâmetro influencia diretamente na dissolução de precipitados e/ou crescimento de grãos;
- **Velocidade de Resfriamento:** este é o parâmetro mais importante na determinação da microestrutura em materiais como os aços estruturais comuns, suscetíveis a transformações de fase durante o resfriamento.

2.3.3 Classificação Metalográfica da Ferrita

A maior parte das composições empregadas para metal depositado por solda em aços estruturais e de baixa liga depende de morfologias adequadas de ferrita para obter as propriedades desejadas, como por exemplo, tenacidade.

Segundo Colpaert (2008), existem pelo menos cinco métodos importantes para a classificação da morfologia da ferrita. São elas: Dubé modificada por Aaronson, IIW, ISIJ, Anelli e Di Nunzio e Thewlis.

Neste trabalho será adotada a classificação IIW por se tratar da microestrutura de aços soldados.

2.3.3.1 Instituto Internacional de Soldagem (IIW)

Este instituto desenvolveu um sistema de classificação para os constituintes do metal depositado na zona fundida. Segundo este sistema os constituintes mais comuns podem ser classificados como mostra a Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Classificação do IIW para microconstituintes de metal de solda de aços de baixo carbono.

Categoria principal do constituinte	Subcategoria do constituinte	Abreviação
Ferrita primária		PF
	Ferrita de contorno de grão	PF(G)
	Ferrita intragranular	PF(I)
Ferrita com segunda fase		FS
	Ferrita com segunda fase não-alinhada	FS(NA)
	Ferrita com segunda fase alinhada	FS(A)
	Placas laterais de ferrita (side plates)	FS(SP)
	Bainita	FS(B)
	Bainita superior	FS(UB)
	Bainita inferior	FS(LB)
Ferrita acicular		AF
Agregado ferrita carboneto		FC
Perlita		FC(P)
Martensita	Martensita em ripas	M(L)
	Martensita maclada	M(T)

Fonte: Colpaert (2008).

2.4 Ensaios não Destrutivos

Os Ensaios Não Destrutivos, também conhecidos como END's, são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, sendo aplicados nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção de equipamentos e estruturas.

Atualmente são bastante utilizados nos setores de petróleo, petroquímico, químico, aeronáutico, aeroespacial, siderúrgico e naval.

Os ensaios não destrutivos incluem métodos capazes de proporcionar informações sobre os defeitos presentes em um determinado produto, das características tecnológicas de um material, ou ainda, da monitoração da degradação em serviço de componentes, equipamentos e estruturas.

Os métodos mais usuais são: ensaio visual, líquido penetrante, partículas magnéticas, ultra-som, radiografia, correntes parasitas, análise de vibrações, termografia, emissão acústica, estanqueidade e análise de deformações. Nesse trabalho abordaremos apenas o ensaio Ultrassom TOFD (Time of Flight Diffraction), pois foi o ensaio utilizado para a inspeção das amostras utilizadas neste estudo.

2.4.1 Ensaio Ultrassom TOFD (Time of Flight Diffraction)

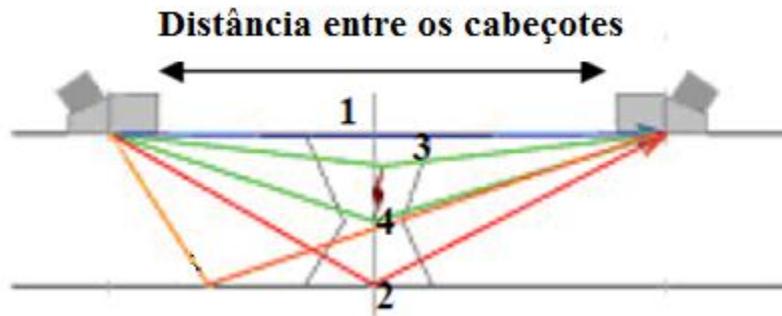
O ensaio Ultrassom TOFD é um método relativamente novo. A diferença entre este ensaio e os outros métodos de Ultrassom é que ele monitora apenas a energia difratada a partir das pontas de defeitos em vez das energias refletidas. Para isso, dois cabeçotes de ângulo de feixe largos são usados no modo transmissor-receptor. Pelo fato da técnica depender da detecção dos sinais difratados originados nas extremidades dos defeitos, a medição precisa do tamanho do defeito, localização e orientação são possíveis de ser realizadas (SOUZA,2009).

Este ensaio é bastante utilizado na inspeção de juntas soldadas de tanques de armazenamento, vasos de pressão, reatores e caldeiras. Os equipamentos necessários para inspeção, são:

- Dois cabeçotes ultra-sônicos com ângulo de incidência variando de 45° a 70° e frequência mínima de 5 MHz;
- Um porta-sondas (scanner) para posicionar / movimentar os cabeçotes;
- Placa de aquisição de dados;
- Computador e um software para aquisição de dados.

A técnica TOFD usa um transmissor e um receptor colocados sobre a superfície a ser inspecionada. A separação dos cabeçotes é ajustada de acordo com a espessura da parede da superfície inspecionada. O scanner com os cabeçotes é frequentemente movido paralelo à região provável de conter defeitos. Uma onda longitudinal é enviada pelo transmissor em direção ao receptor. O primeiro sinal que atinge o receptor corresponde à onda lateral que se propaga debaixo da superfície superior da peça. Se não houver nenhuma descontinuidade, o segundo impulso será o eco de fundo. Quaisquer outros sinais gerados a partir das descontinuidades será gravado entre a onda lateral e o eco de fundo porque correspondem respectivamente às trajetórias mais curtas e mais longa possíveis entre o transmissor e o receptor. Assim, o sinal a partir da extremidade superior da descontinuidade chega antes que a inferior (MOURA, 2005). A Figura 2.21 apresenta um esquema do ensaio TOFD identificando as principais ondas presentes durante a inspeção de um componente com a presença de um defeito.

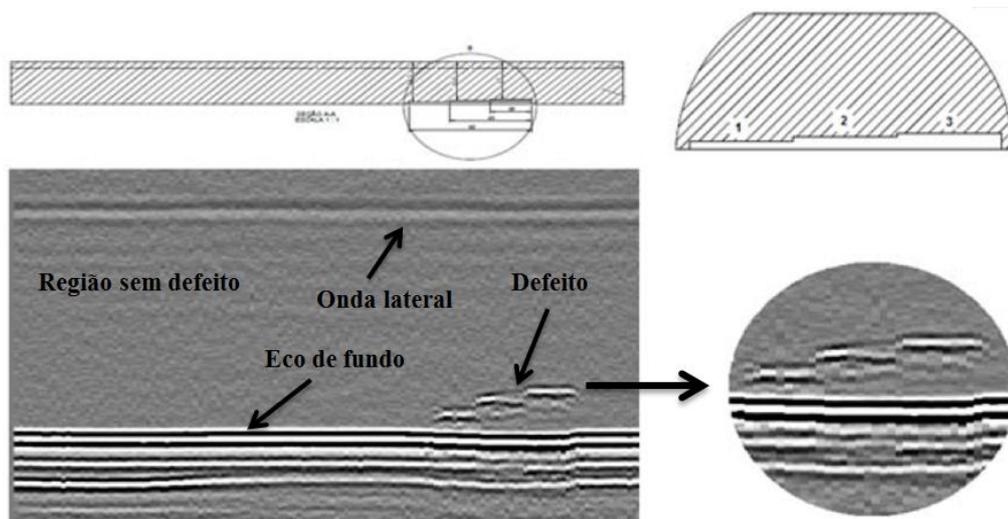
Figura 2.21- Desenho esquemático do ensaio TOFD: (1) Onda lateral, (2) Eco de fundo, (3) Difração superior do defeito, (4) Difração inferior do defeito.



Fonte: FLOTTÉ, 2005 apud SOUZA, 2009.

As imagens geradas durante a realização do ensaio são apresentadas em tons de cinza na tela do equipamento e o volume da solda é inspecionado em uma única varredura. A Figura 2.22 mostra uma imagem gerada na inspeção de um bloco escalonado. Nesta imagem é possível a identificação da onda lateral, do eco de fundo, da região sem irregularidade e região com irregularidade (escalonamento).

Figura 2.22- Resultado da inspeção de um bloco escalonado



Fonte: PASA - Physical Acoustics South America.

2.5 Ensaios Destrutivos

Ensaios destrutivos são aqueles que deixam algum sinal na peça ou corpo de prova submetido ao ensaio, mesmo que estes não fiquem inutilizados. Dentre os ensaios destrutivos utilizados nesta pesquisa, temos: ensaio de tração, ensaio de microdureza Vickers e metalográficos.

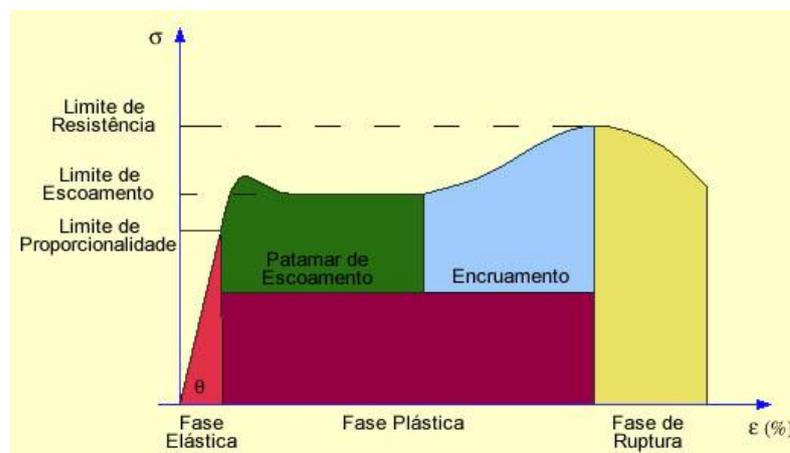
2.5.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração fornece dados relativos à capacidade de um material suportar solicitações quando aplicado um esforço que tende a alongá-lo em direção uniaxial de uma maneira constante ao longo do tempo até sua ruptura, sendo determinado o comportamento quantitativo das propriedades mecânicas, tais como: resistência à tração, o limite de escoamento, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, o coeficiente de Poisson, ductilidade, entre outros. Entre as várias normas utilizadas para padronização deste ensaio a norma ASTM E8/E8M (ASTM – American Society for Testing and Materials) é a mais utilizada.

Com os pontos das forças aplicadas e deformações sofridas pelo corpo de prova durante o ensaio até a ruptura, pode-se traçar um gráfico conhecido como diagrama Tensão x Deformação e seu formato é apresentado na Figura 2.23.

No ensaio de corpos de prova soldados, normalmente apenas o limite de resistência à tração é válido, pois neste tipo de corpo de prova, tensiona-se simultaneamente dois materiais de propriedades diferentes (metal de base e metal de solda).

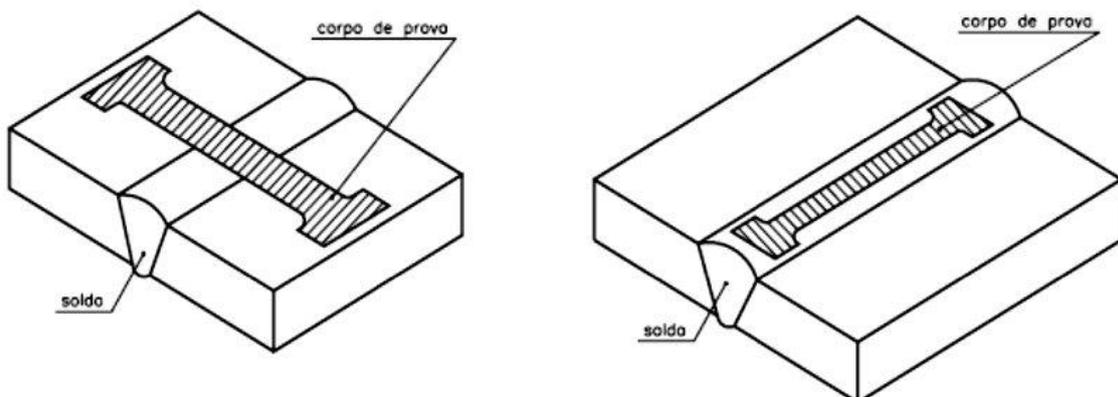
Figura 2.23- Diagrama tensão-deformação de um ensaio de tração e suas respectivas regiões para um determinado material.



Fonte: Internet (www.cesec.ufpr.br). Acesso em 06/01/2013.

Para confecção do corpo de prova para realização deste ensaio é necessário a consulta de normas para determinação das dimensões conforme sua seção transversal, que geralmente são circulares ou retangulares. Os corpos de prova destinados ao ensaio de tração podem ser retirados do material soldado no sentido transversal ou no sentido longitudinal do cordão de solda. A Figura 2.24 apresenta o esquema da retirada destes corpos de prova.

Figura 2.24- Modelo de retirada de corpos de prova soldados para o ensaio de tração (a) Transversal (b) Longitudinal.



Fonte: AWS (2003).

2.5.2 Ensaio de Microdureza Vickers

A dureza por penetração é o tipo de ensaio mais comum na caracterização das propriedades mecânicas.

Tratando-se de microdureza, este tipo de ensaio favorece situações onde as condições práticas necessitam determinar a dureza de corpos de prova de pequenas áreas ou na determinação da dureza individual de microconstituintes de uma estrutura metalográfica.

O ensaio de microdureza Vickers produz uma impressão de dimensões microscópicas através do uso de penetradores de diamante com formato piramidal de base quadrada e ângulo de 136°. As aplicações de carga podem ser de 100gf até 1Kgf. A realização do ensaio de microdureza Vickers de modo geral requer uma preparação cuidadosa do corpo de prova.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo, foram confeccionadas três juntas soldadas com chapas de aço-carbono de classificação ASTM A-36. A dimensão final das juntas soldadas foram de 300,0 X 300,0 X 19,0 mm seguindo a Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) elaborada pela empresa TOMÉ Engenharia para utilização na fabricação e reparo dos costados laterais e bocais dos tanques de armazenamento da Refinaria Abreu e Lima. A Figura 3.1 apresenta a montagem de uma das juntas antes do procedimento de soldagem.

Figura 3.1 - Montagem da junta para realização da soldagem.



Fonte: Autor (2013).

As amostras soldadas foram identificadas com as siglas TF, TE e EE que fazem referência aos processos utilizados na soldagem. A Tabela 3.1 apresenta os processos utilizados para o passe de raiz e para os passes de enchimento e acabamento.

Tabela 3.1- Processos de soldagem utilizados na confecção das amostras TF, TE e EE.

Amostra	Passe de raiz	Passes de enchimento e acabamento
TF	GTAW	FCAW
TE	GTAW	SMAW
EE	SMAW	SMAW

3.1 Materiais

3.1.1 Metal de base

O aço ASTM A-36 é um aço estrutural bastante utilizado nas refinarias, cuja composição química e propriedades mecânicas informadas por sua norma estão apresentadas nas Tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2- Composição química em % do aço ASTM A-36.

%C (máx.)	% Mn	%P (máx.)	% S	% Si	% Cu (mín.)*
0,25	0,80 – 1,20	0,04	0,05	0,40	0,20

* Quando solicitado

Fonte: ASTM A-36/ A-36M (2008).

Tabela 3.3- Propriedades mecânicas do aço ASTM A-36.

Limite de Escoamento, mín. (MPa)	Limite de Resistência (MPa)
250	400 – 550

Fonte: ASTM A 36/ A36M (2008).

3.1.2 Consumíveis

Para o processo de soldagem arame tubular (FCAW) foi utilizado o eletrodo de classificação E71T-1 com CO₂ para proteção da poça de fusão, para o processo de soldagem TIG (GTAW) foi utilizada a vareta de classificação ER70S-3 com Argônio para proteção da poça de fusão e para o processo de soldagem eletrodo revestido (SMAW) foi utilizado o eletrodo de classificação E7018.

3.1.2.1 Arame Tubular AWS E71T-1

O arame utilizado segue a classificação AWS 5.20. Segundo esta classificação o arame AWS E71T-1 tem fluxo rutilico e é utilizado em soldagem simples ou de multipasse de aços carbono, carbono manganês e tipos similares incluindo os de grãos finos utilizando gás de proteção 100% CO₂ ou gás mistura Ar + CO₂. Entre as principais qualidades deste arame, podem ser citadas: excelente soldabilidade em todas as posições e facilidade de remoção de escória.

Este consumível é bastante utilizado na fabricação de estruturas navais e offshore devido a sua elevada velocidade de soldagem. As Tabelas 3.4 e 3.5 apresentam respectivamente a composição química e as propriedades mecânicas do metal depositado informado no catálogo do fabricante.

Tabela 3.4- Composição química do metal depositado.

% C	% Si	% Mn	% P	% S
0,03	0,06	1,40	<0,025	<0,025

Fonte: Internet (www.bohlersoldabrasil.com.br). Acessado em 12/08/2012.

Tabela 3.5- Propriedades mecânicas do metal depositado.

(*)	u	u1
Limite de Escoamento (MPa)	550	642
Limite de Resistência (MPa)	610	690
Alongamento (%)	24	22
Impacto Charpy Joule (J) a 0°C	>47	97
Impacto Charpy Joule (J) a -20°C	>27	-

(*) u: Sem tratamento, como soldado – gás de proteção 100% CO₂

u1: Sem tratamento, como soldado – gás de proteção Ar + 18% CO₂

Fonte: Internet (www.bohlersoldabrasil.com.br). Acessado em 12/08/2012.

3.1.2.2 Vareta AWS ER70S-3

Este consumível segue a classificação AWS A5.18 e foi desenvolvida para execução de passes de raiz. Ela é utilizada para soldas de elevada integridade e possui um baixo teor de Si que confere a este consumível a possibilidade de soldar juntas que serão submetidas aos processos de pintura e galvanização. As Tabelas 3.6 e 3.7 apresentam respectivamente a

composição química e propriedades mecânicas do metal depositado informada no catálogo de seu fabricante.

Tabela 3.6- Composição química do metal depositado.

% C	% Si	%Mn
0,1	0,6	1,2

Fonte: Internet (www.bohlersoldabrasil.com.br). Acessado em 12/08/2012.

Tabela 3.7- Propriedades mecânicas do metal depositado.

(*)	u
Limite de Escoamento (MPa)	500
Limite de Resistência (MPa)	660
Alongamento (%)	32
Impacto Charpy Joule (J) a -20°C	256
Impacto Charpy Joule (J) a -50°C	178

(*) u: Sem tratamento, como soldado – gás de proteção 100% Argônio

Fonte: Internet (www.bohlersoldabrasil.com.br). Acessado em 12/08/2012.

3.1.2.3 Eletrodo AWS E7018

O eletrodo AWS E7018 segue a classificação AWS A5.1. Trata-se de um eletrodo com revestimento básico que possui baixo teor de hidrogênio e adição de quantidades consideráveis de pó de ferro ao revestimento que aumentam a deposição.

Outra característica deste eletrodo é a boa estabilidade do arco, e a possibilidade de soldagem em todas as posições. As Tabelas 3.8 e 3.9 apresentam a composição química e as propriedades mecânicas do metal depositado informado pelo catálogo do fabricante.

Tabela 3.8- Composição química do metal depositado.

% C	% Si	% Mn
0,07	0,50	1,30

Fonte: Catálogo ESAB.

Tabela 3.9- Propriedades mecânicas do metal depositado.

Limite de Escoamento (Mpa)	Limite de Resistência (Mpa)	Alongamento (%)
≥399	≥482	≥22

Fonte: Internet (www.esab.com.br). Acessado em 12/08/2012.

3.1.2.4 Gás de proteção

Na soldagem das amostras TF e TE foram utilizados os seguintes gases:

- **TF:** Para o processo FCAW 100% de CO₂ e para o processo GTAW 100%

Ar;

- **TE:** Para o processo GTAW 100% de Ar.

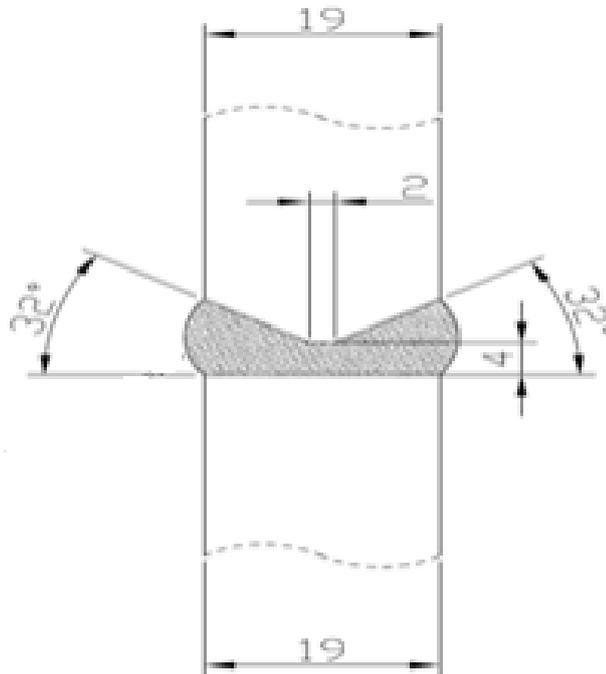
3.2 Métodos

3.2.1 Procedimento de soldagem

A soldagem de todas as amostras foram de topo com chanfro tipo K na posição horizontal (2G) e com deslocamento em uma única direção por um soldador qualificado da empresa TOMÉ Engenharia. Este tipo de chanfro é utilizado na fabricação de tanques de armazenamento com espessura maior que 9,5mm e quando é possível a soldagem nos dois lados, pois ele distribui melhor as tensões térmicas minimizando assim as distorções geradas durante a soldagem.

As juntas foram soldadas com profundidade de preparação 8,5 mm, Garganta efetiva de 10,5, ângulo do Chanfro de 32°, abertura de raiz de 4,0 mm, face de raiz 2,0 mm, como apresentado na Figura 3.2.

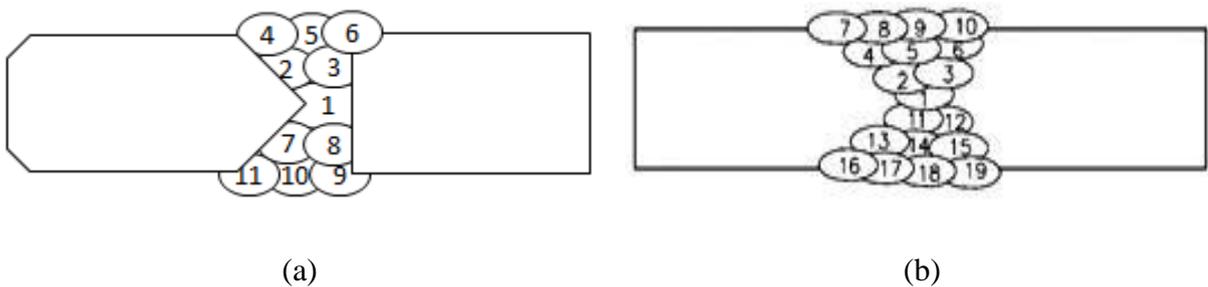
Figura 3.2- Geometria do chanfro.



Fonte: Autor (2013).

Em cada amostra foram realizados soldas multipasses cujos croquis são apresentados na Figura 3.3, sendo o passe número 1 o de raiz e o restante dos passes de enchimento e acabamento. Após a realização de cada passe de enchimento, o soldador removeu a escória da solda utilizando uma esmerilhadeira.

Figura 3.3- (a) Croqui da amostra TF e (b) Croqui das amostras TE e EE.



Fonte: Autor (2013).

3.2.2 Amostra TF

Na soldagem da amostra TF, os valores obtidos pela medição da tensão e corrente e os valores calculados a partir da equação 1 para energia de soldagem estão apresentados nas Tabelas 3.10 e 3.11.

Tabela 3.10- Parâmetros utilizados na soldagem da amostra TF.

CONSUMÍVEIS					
CAMADA	PROC.	DIÂMETRO CLASSIF.		TENSÃO	CORRENTE
		(mm)			
RAIZ	GTAW	3,2	ER70S-3	26	135-140
ENCHIMENTO	FCAW	1,2	E71T-1	27	180-230
ACABAMENTO	FCAW	1,2	E71T-1	26	170-182

Fonte: Autor (2013).

Tabela 3.11- Variação da energia de soldagem por passe na amostra TF.

	Número do Passe	Variação da energia de soldagem (J/mm)
Raiz	1	1104-1251
Enchimento	2	1794-2254
Enchimento	3	1794-1897
Acabamento	4	1740-1897
Acabamento	5	1740-1897
Acabamento	6	1485-1550
Enchimento	7	1485-1550
Enchimento	8	1485-1550
Acabamento	9	1485-1550
Acabamento	10	1485-1550
Acabamento	11	1485-1550

Fonte: Autor (2013).

3.2.3 Amostra TE

Na soldagem da amostra TE, os valores obtidos pela medição da tensão e corrente e os valores calculados a partir da equação 1 para energia de soldagem estão apresentados nas Tabelas 3.12 e 3.13.

Tabela 3.12- Parâmetros utilizados na soldagem da amostra TE.

CONSUMÍVEIS					
CAMADA	PROC.	DIÂMETRO CLASSIF.		TENSÃO (V)	CORRENTE (A)
		(mm)			
RAIZ	GTAW	3,2	ER70S-3	13	168-175
ENCHIMENTO	SMAW	2,5	E7018	26	96-100
ACABAMENTO	SMAW	3,2	E7018	22	132-136

Fonte: Autor (2013).

Tabela 3.13- Variação da energia de soldagem por passe na amostra TE.

	Número do Passe	Variação da energia de soldagem (J/mm)
Raiz	1	1104-1251
Enchimento	2	1629-2087
Enchimento	3	1629-2087
Enchimento	4	1684-2153
Enchimento	5	1345-1868
Enchimento	6	1789-2289
Acabamento	7	941-1248
Acabamento	8	955-1281
Acabamento	9	1035-1387
Acabamento	10	1002-1348

Enchimento	11	1629-2087
Enchimento	12	1629-2087
Enchimento	13	1684-2153
Enchimento	14	1345-1868
Enchimento	15	1789-2289
Acabamento	16	1516-1903
Acabamento	17	941-1248
Acabamento	18	1035-1387
Acabamento	19	1002-1348

Fonte: Autor (2013).

3.2.4 Amostra EE

Na soldagem da amostra EE, os valores obtidos pela medição da tensão e corrente e os valores calculados a partir da equação 1 para energia de soldagem estão apresentados nas Tabelas 3.14 e 3.15.

Tabela 3.14- Parâmetros utilizados na soldagem da amostra EE.

CONSUMÍVEIS					
CAMADA	PROC.	DIÂMETRO CLASSIF.		TENSÃO	CORRENTE
		(mm)			
RAIZ	SMAW	2,5	E7018	32	90-96
ENCHIMENTO	SMAW	2,5	E7018	28	100-108
ACABAMENTO	SMAW	3,2	E7018	25	148-153

Fonte: Autor (2013).

Tabela 3.15- Variação da energia de soldagem por passe na amostra EE.

	Número do Passe	Variação da energia de soldagem (J/mm)
Raiz	1	2594-3243
Enchimento	2	1629-2087
Enchimento	3	1629-2087
Enchimento	4	1684-2153
Enchimento	5	1345-1868
Enchimento	6	1789-2289
Acabamento	7	941-1248
Acabamento	8	955-1281
Acabamento	9	1035-1387
Acabamento	10	1002-1348
Enchimento	11	2097-2740
Enchimento	12	517-1941
Enchimento	13	1537-1967
Enchimento	14	1244-1599
Enchimento	15	1506-1937
Acabamento	16	1516-1903
Acabamento	17	955-1281
Acabamento	18	1035-1387
Acabamento	19	1002-1348

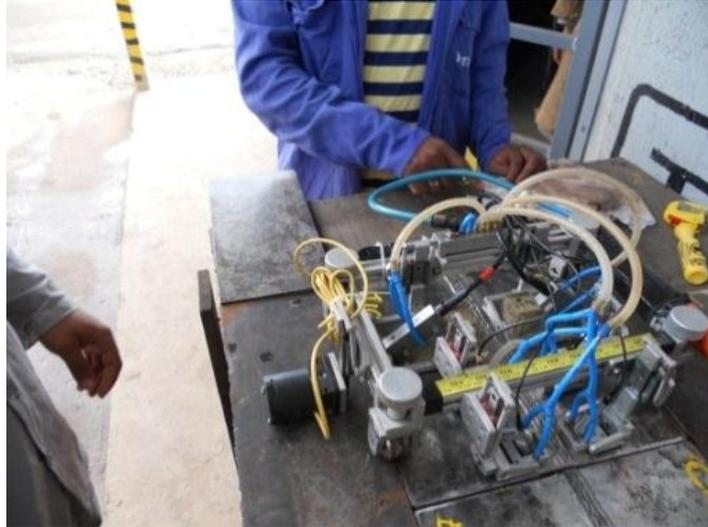
Fonte: Autor (2013).

3.2.5 Inspeção dos corpos de prova por Ultrassom TOFD

Após a soldagem das amostras TF, TE e EE os cordões de solda foram inspecionadas por Ultrassom TOFD com equipamento da marca OLYMPUS modelo OMNISCAN MX tendo

como acoplante a solução metil celulose. A Figura 3.4 apresenta uma imagem da montagem do equipamento em uma das amostras para realização do ensaio.

Figura 3.4- Montagem para realização do ensaio Ultrassom TOFD.



Fonte: Autor (2013).

3.2.6 Análise da composição química

Foi realizado no metal de base das amostras análise química por espectrometria de emissão ótica em um equipamento da marca ARL Metal Analyzer modelo 3460-MA-090 com certificado de calibração. Esta análise teve como objetivo a determinação dos teores dos principais elementos presentes no metal de base.

3.2.7 Retirada dos corpos de prova

Para retirada dos corpos de prova das amostras TF, TE e EE para realização dos ensaios de tração, impacto Charpy, microdureza Vickers e preparação metalográfica as amostras foram cortadas em seções transversais ao cordão de solda e no intuito de se obter corpos de prova da região na qual tenha ocorrido homogeneização da temperatura durante o processo de soldagem foram desprezadas a seção inicial e final distanciando 30 mm das extremidades.

3.2.8 Caracterização microestrutural

A preparação metalográfica foi iniciada com o corte em região perpendicular ao cordão de solda em uma serra de fita e logo em seguida levado para cortadora metalográfica para regularização das dimensões, ambas sob-refrigeração. Após os procedimentos de corte foi realizado o lixamento das amostras com lixas de granulometrias na sequência 180, 220,

320, 400, 600 e 1200. Após o lixamento foi realizado o polimento utilizando pastas abrasivas de alumina com granulometrias e sequência de 1 μm e $\frac{1}{4}$ μm , seguido do ataque químico por imersão com Nital 2% durante 15s. Em seguida, os corpos foram lavados com água destilada e acetona e secados com o auxílio de um soprador térmico.

A observação da microestrutura das regiões da solda para caracterização do cordão de solda foi realizada em um microscópio ótico com aumentos de 20X, 50X, 100X, 200X, 500X e 1000X.

As regiões analisadas nesta etapa foram: metal de base, zona entre passes, zona termicamente afetada e zona fundida.

3.2.9 Caracterização macroestrutural

Para a caracterização macroestrutural foram utilizados os mesmos corpos de prova da caracterização microestrutural no lado oposto do corpo de prova.

Estes corpos de prova passaram pelo mesmo procedimento da preparação para caracterização microestrutural, mas seu ataque foi realizado com Nital 10% durante 15 segundos.

Para registros das imagens dos corpos de prova foi utilizada uma câmera OLYMPUS modelo SP-600UZ.

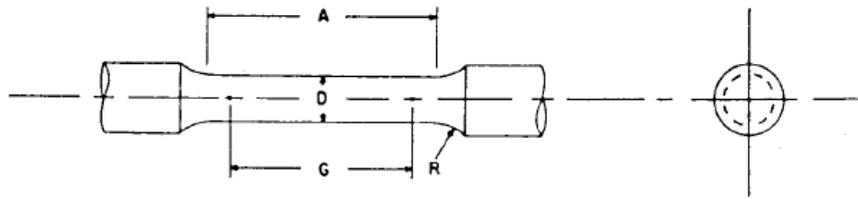
Nestes corpos de prova foram analisados a deposição do material de adição, a presença de inclusões, porosidade e trincas.

3.2.10 Ensaio de tração

Para a confecção dos corpos de prova para realização do ensaio de tração, as juntas soldadas foram cortadas no sentido transversal à solda utilizando uma serra de fita com refrigeração. Em seguida, as amostras retiradas das juntas soldadas foram pré-usinadas em um torno mecânico convencional e logo em seguida em torno CNC (Comando Numérico Computadorizado), com as dimensões e tolerâncias especificados na norma ASTM E8 e apresentadas na figura 3.5.

De cada amostra (TF, TE e EE) foram retirados três corpos de prova totalizando nove corpos de prova.

Figura 3.5- Dimensões dos corpos de prova segundo a Norma ASTM E8 para realização do ensaio de tração.



Fonte: ASTM E8 (2011).

Onde:

$A = 56,0 \text{ mm}$; $G = 50,0 \pm 0,1 \text{ mm}$; $D = 12,5 \pm 0,2 \text{ mm}$ e $R = 10,0 \text{ mm}$

A Figura 3.6 apresenta uma imagem de três dos nove corpos de prova confeccionados.

Figura 3.6- Corpos de prova para ensaio de tração.



Fonte: Autor (2013).

Os ensaios de tração foram executados em corpos de prova de tração transversal, onde o eixo longitudinal do corpo de prova é perpendicular ao eixo longitudinal do cordão de solda em temperatura ambiente e com taxa de deformação de 1,0 mm/min.

Os testes foram realizados em uma máquina EMIC modelo DL-10000, com célula de carga com capacidade de 100 kN e controle por meio do software TESC Versão 3.04. A célula de carga utilizada para este ensaio possui certificado de calibração.

A Figura 3.7 mostra um dos corpos de prova fixo na máquina para realização do ensaio.

Figura 3.7- fixação do corpo de prova para realização do ensaio de tração.

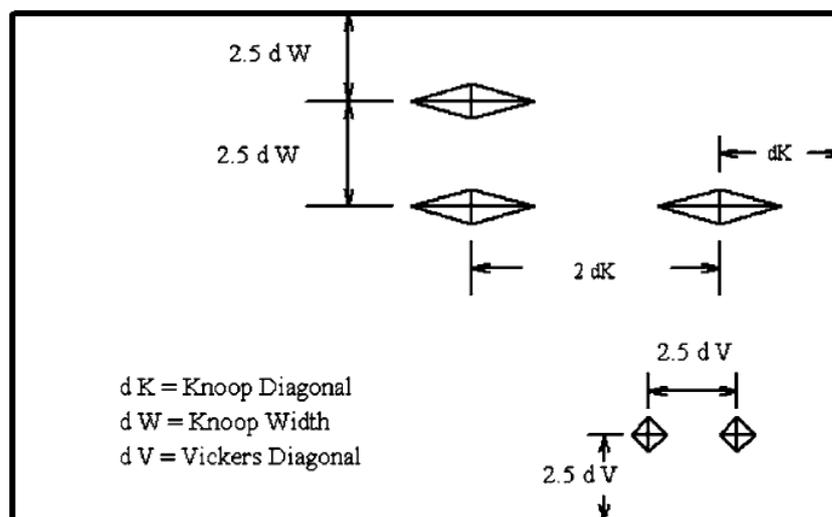


Fonte: Autor (2013).

3.2.11 Ensaio de Microdureza Vickers

Para as medições de dureza foi utilizado um microdurômetro preparado para medir microdureza Vickers da marca Insize com seleção de carga para 300gf e tempo de permanência de 15s. Neste ensaio foi utilizado um penetrador piramidal de diamante com base quadrada e ângulo de 136° , e distanciamento entre indentações de no mínimo 2,5 vezes a diagonal do prisma formado pela penetração do penetrador seguindo orientação da norma ASTM E384. A Figura 3.8 apresenta a recomendação mínima da distância entre indentações sugerida pela Norma ASTM E384.

Figura 3.8- Espaçamento mínimo entre indentações segundo a Norma ASTM E384.



Fonte: ASTM E384 (2011).

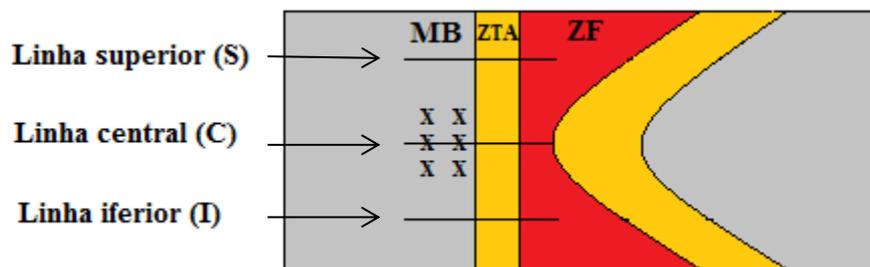
De cada amostra foi extraído um corpo de prova para realização deste ensaio.

A preparação dos corpos de prova para a análise de microdureza seguiu os mesmos procedimentos da caracterização microestrutural.

Para realização do ensaio foram tomados como referência três linhas identificadas como: superior (S), central (C) e inferior (I). O distanciamento utilizado entre cada indentação foi de 0,3 mm garantindo assim a recomendação da norma, já que a média das diagonais das indentações eram de 50 μm . As regiões analisadas foram o metal de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF). A Figura 3.9 apresenta o esquema de como foram realizados as medições de dureza no corpo de prova.

Para cada ponto de medição em nas linhas S, C e I foram obtidos três valores de dureza e ao final calculado a média.

Figura 3.9- Esquema para ensaio de microdureza Vickers.



Fonte: Autor (2013).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise da composição química

Os resultados fornecidos a partir da análise da composição química do metal de base estão apresentados na Tabela 4.1.

Neste ensaio foi observado que os teores de Carbono, Manganês e Silício estão abaixo dos valores especificados pela norma (Tabela 3.2), já que a mesma informa que para cada redução de 0,01% no teor de Carbono deve ser acrescido o valor de 0,06% no teor máximo especificado para o Manganês.

Estes elementos são importantes, pois segundo Modenesi (2010) tem influencia no limite de resistência dos materiais.

Tabela 4.1- Resultado da análise química no metal de base das amostras

%C	%Si	%Mn	%P	%Cr	%Ni	%Cu	%Al	%W	%Ti	%Nb	%S	%Fe	C _{eq}
0,19	0,26	0,65	0,015	0,01	0,01	0,01	0,045	0,001	0,002	0,001	0,007	98,8	0,303

Fonte: Autor (2013).

4.2 Macrografia

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam as macrografias das juntas soldadas das amostras TF, TE e EE. Nessas imagens não foram encontrados defeitos como falta de fusão, trincas e poros, mas a Figura 4.3 referente ao corpo de prova EE apresentou uma assimetria quando comparado com as juntas dos corpos de prova TF e TE. Essa assimetria pode ter ocorrido devido a excessiva remoção de escória entre os passes durante o enchimento da junta.

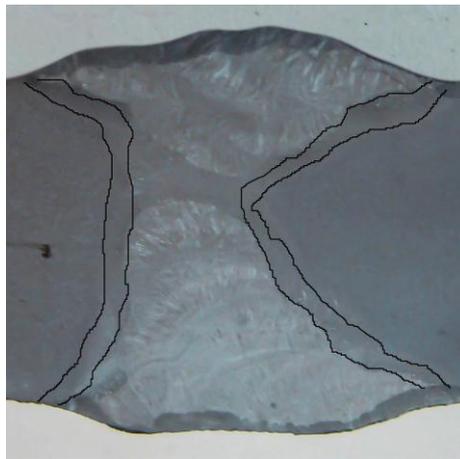
Foi observado na Figura 4.1 um menor número de passes para o preenchimento da junta soldada da amostra TF que utilizou o processo FCAW, possivelmente por ser um processo semiautomático tendo assim uma maior produtividade, além de se obter pouca produção de escória necessitando de menos limpeza e conseqüentemente menos retirada de material depositado quando comparado com as amostras TE e EE que utilizaram o processo SMAW.

Em medição realizada nos corpos de prova da macrografia foi constatado que a ZTA do corpo de prova TF era menor do que as dos corpos de prova TE e EE, apesar da utilização de energias de soldagem semelhantes para todas as amostras, podendo ser atribuído segundo Albuquerque et al. (2010), a maior velocidade de soldagem com o processo FCAW por ser

um processo semiautomático, obtendo-se menores ciclos térmicos em relação ao processo SMAW que foi manual.

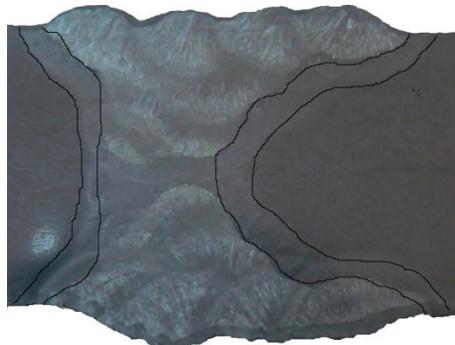
Percebeu-se também nos corpos de prova TE e EE que utilizaram o processo SMAW para preenchimento da junta soldada que as regiões entre passes sofreram uma maior influência devido aos ciclos térmicos gerados pelo passe subsequente quando comparado com o corpo de prova TF que utilizou o processo FCAW. Segundo Albuquerque et al., (2010) os tratamentos térmicos ocorridos devido os ciclos térmicos entre os passes são importantes em relação à tenacidade, pois os grãos equiaxiais refinados pelos passes subsequentes proporcionam melhores valores de tenacidade quando comparados com grãos colunares que não foram afetados por estes ciclos.

Figura 4.11- Macrografia corpo de prova TF.



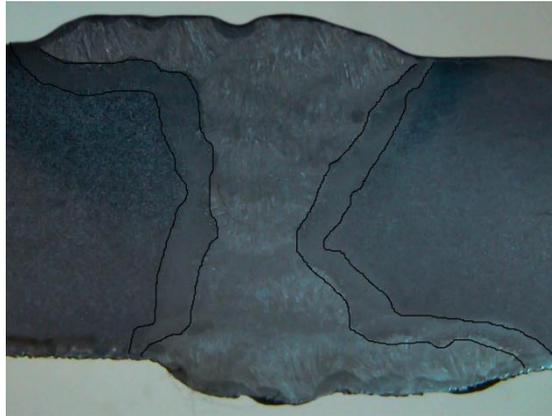
Fonte: Autor (2013).

Figura 4.2- Macrografia corpo de prova TE.



Fonte: Autor (2013).

Figura 4.3- Macrografia corpo de prova EE.



Fonte: Autor (2013).

4.3 Micrografia

4.3.1 Micrografia Metal de Base

Nas Figuras 4.4 e 4.5 foi observado a ocorrência do fenômeno conhecido como bandejamento. Segundo Krauss (2003), o bandejamento é uma condição microestrutural desenvolvida principalmente em aços ligados e de resfriamento lento, aos quais apresentam bandas alternadas de ferrita e perlita, paralelas ao sentido de laminação.

Este bandejamento representa uma forte influência para as microestruturas, mas principalmente para as propriedades mecânicas, pois os materiais podem apresentar um comportamento de caráter anisotrópico com variações de propriedades mecânicas de acordo com a posição de solicitação.

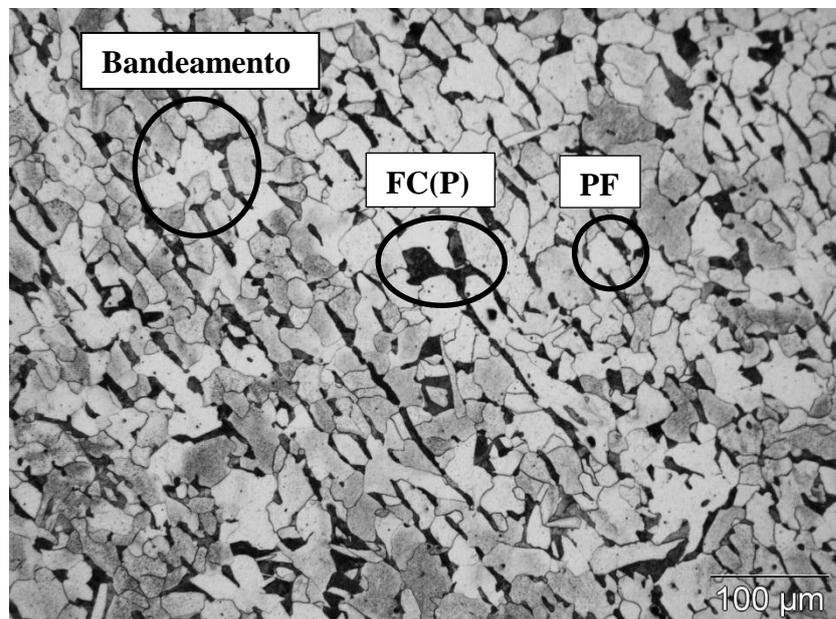
Na figura 4.5 é apresentado em destaque o bandejamento no metal de base. Esse fenômeno também foi encontrado por Lessa et al. (2011), em seu estudo utilizando um aço C-Mn.

Figura 4.4- Micrografia com aumento de 50X do aço ASTM A-36 utilizado como metal de base para confecção das amostras TF, TE e EE. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autor (2013).

Figura 4.5- Micrografia com aumento de 200X do aço ASTM A-36 utilizado como metal de base para confecção dos corpos de prova TF, TE e EE. Ataque Nital 2%.



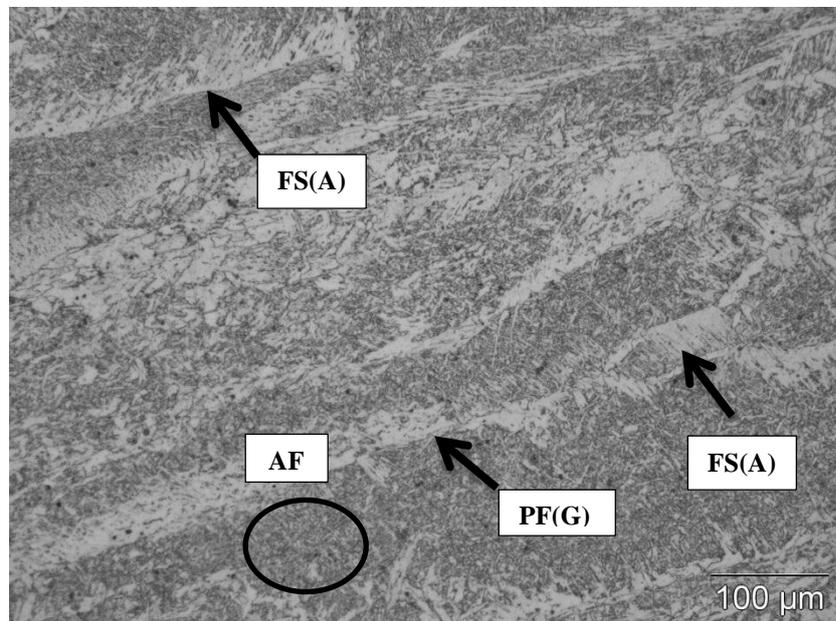
Fonte: Autor (2013).

4.3.2 Micrografia da Zona Fundida do corpo de prova TF

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam as microestruturas encontradas na região da zona fundida obtida no passe de acabamento do corpo de prova TF. Nestas imagens observou-se que a região da zona fundida do corpo de prova TF apresentou uma microestrutura composta

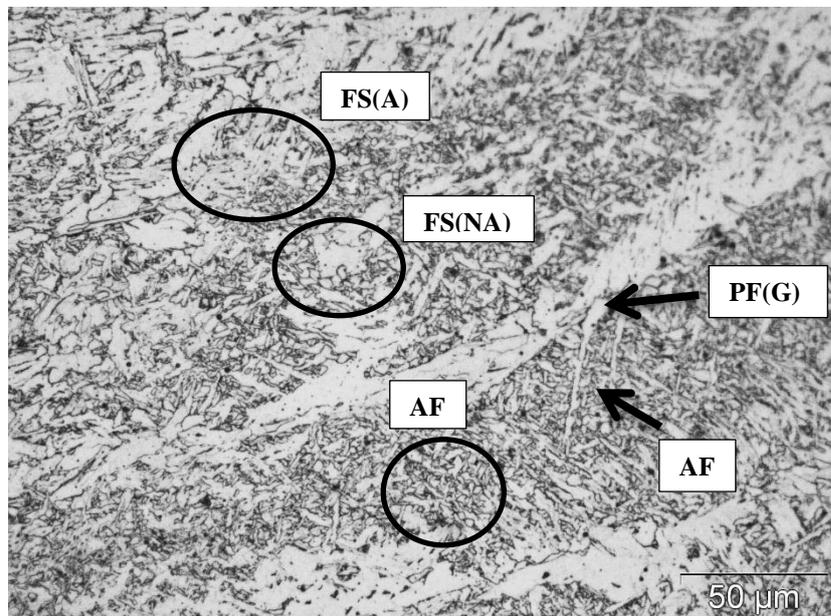
por: Ferrita Acicular (AF), Ferrita de Contorno de grão (PF(G)) e regiões com ferrita com segunda fase (FS).

Figura 4.6- Micrografia com aumento de 200X da zona fundida do corpo de prova TF. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autor (2013).

Figura 4.7- Micrografia com aumento de 500X da zona fundida do corpo de prova TF. Ataque Nital 2%



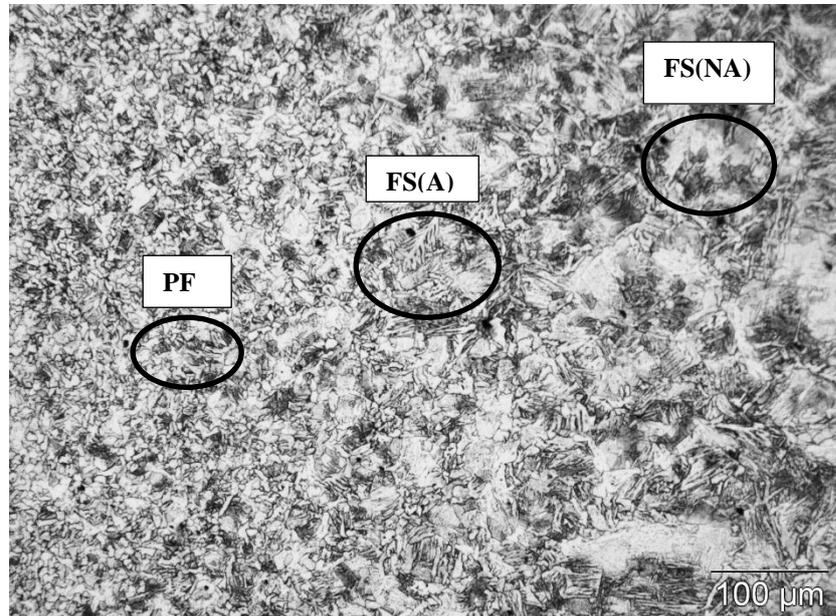
Fonte: Autor (2013).

4.3.2 Micrografia Zona Termicamente Afetada (ZTA) corpo de prova TF

Nas Figuras 4.8 e 4.9 é apresentada a região da Zona Termicamente Afetada obtida do lado reto do chanfro do corpo de prova TF com aumentos de 200X e 500X respectivamente.

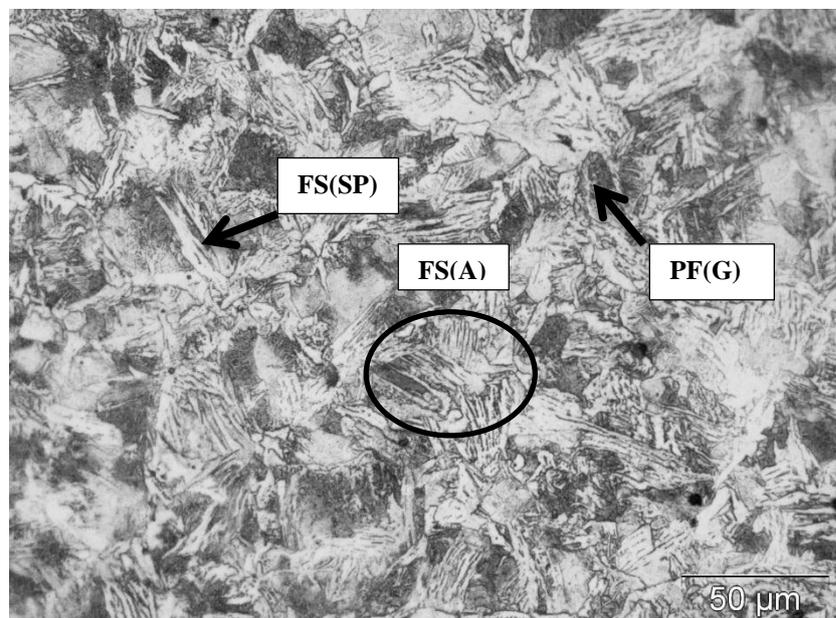
Nesta região não há formação de ferrita acicular.

Figura 4.8- Micrografia com aumento de 200X da zona termicamente afetada do corpo de prova TF. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autor (2013).

Figura 4.9- Micrografia com aumento de 500X da zona termicamente afetada do corpo de prova TF. Ataque Nital 2%.



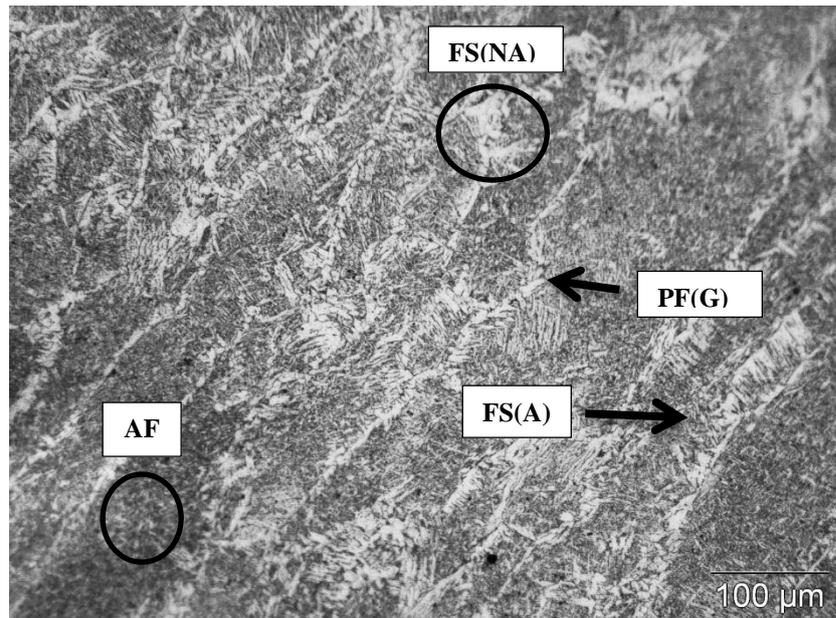
Fonte: Autor (2013).

4.3.3 Micrografia Zona Fundida (ZF) corpo de prova TE

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam as microestruturas encontradas nesta região.

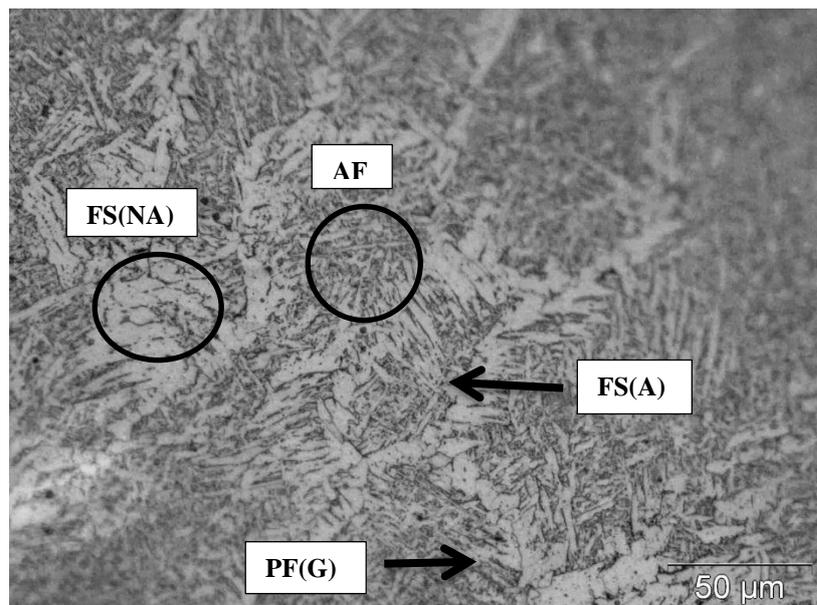
A região da zona fundida obtida no passe de acabamento do corpo de prova TE apresentou uma microestrutura composta por: Ferrita Acicular (AF), Ferrita de Contorno de grão (PF(G)) e regiões com ferrita com segunda fase (FS) a mesma microestrutura encontrada no corpo de prova TF.

Figura 4.10- Micrografia com aumento de 200X da zona fundida do corpo de prova TE. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autor (2013).

Figura 4.11- Micrografia com aumento de 500X da zona fundida do corpo de prova TE. Ataque Nital 2%.

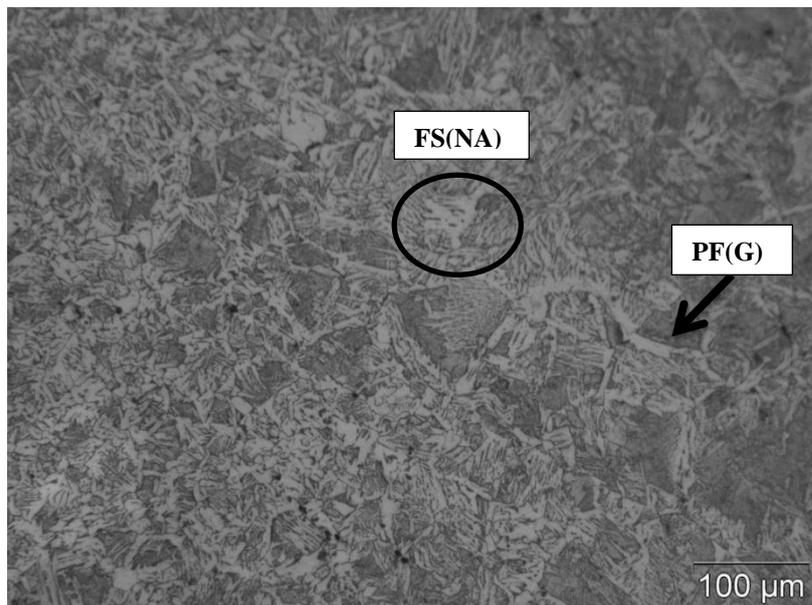


Fonte: Autor (2013).

4.3.4 Micrografia Zona Termicamente Afetada (ZTA) corpo de prova TE

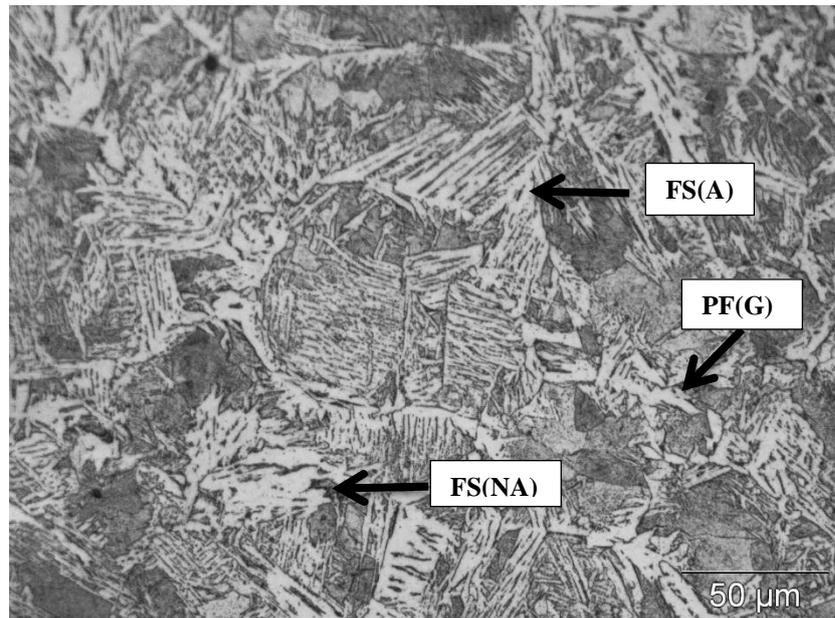
Nas Figuras 4.12 e 4.13 é apresentada região da Zona Termicamente Afetada obtida do lado reto do chanfro do corpo de prova TE com aumentos de 200X e 500X respectivamente. Nestas figuras percebe-se as mesmas microestruturas apresentadas na Zona Fundida da amostra, mas com grãos maiores e um aumento do número de ferrita com segunda fase (FS) em relação a Zona Fundida.

Figura 4.12- Micrografia com aumento de 200X da zona termicamente afetada do corpo de prova TE. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autor (2013).

Figura 4.13- Micrografia com aumento de 500X da zona termicamente afetada do corpo de prova TE. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autor (2013).

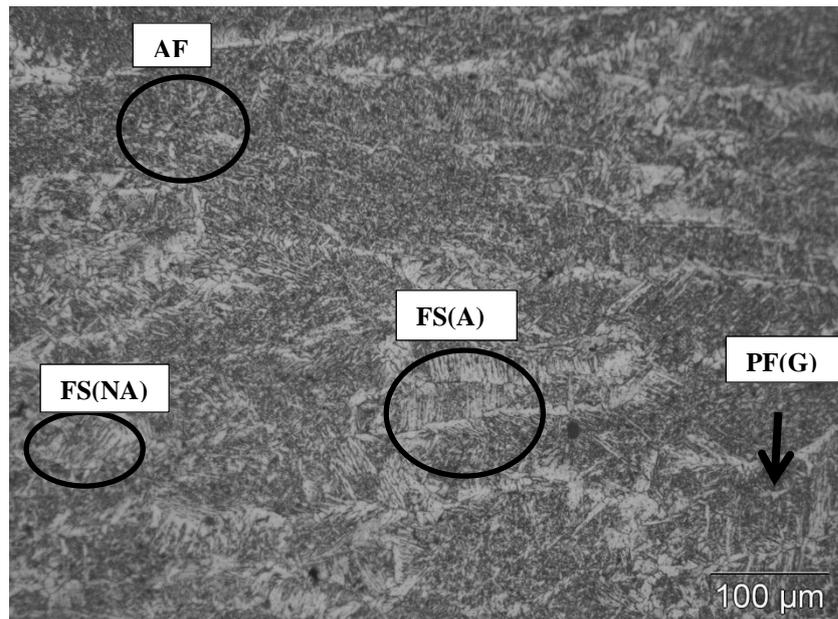
4.3.5 Micrografia Zona Fundida (ZF) corpo de prova EE

A região da zona fundida obtida no passe de acabamento do corpo de prova EE apresentou uma microestrutura composta por: Ferrita Acicular (AF), Ferrita de Contorno de grão (PF(G)) e regiões com ferrita com segunda fase (FS) a mesma microestrutura encontrada nos corpos de prova TF e TE.

Percebe-se na Figura 4.15 um maior número de ferrita com segunda fase quando comparado com os corpos de prova TF e TE.

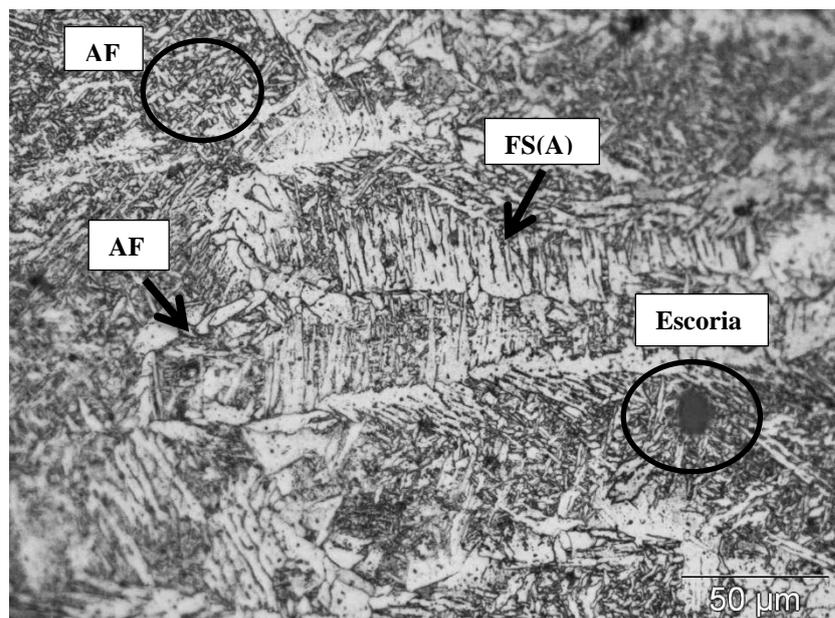
As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam as microestruturas encontradas nesta região.

Figura 4.14- Micrografia com aumento de 200X da zona fundida do corpo de prova EE. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autor (2013).

Figura 4.15- Micrografia com aumento de 500X da zona fundida do corpo de prova EE. Ataque Nital 2%.



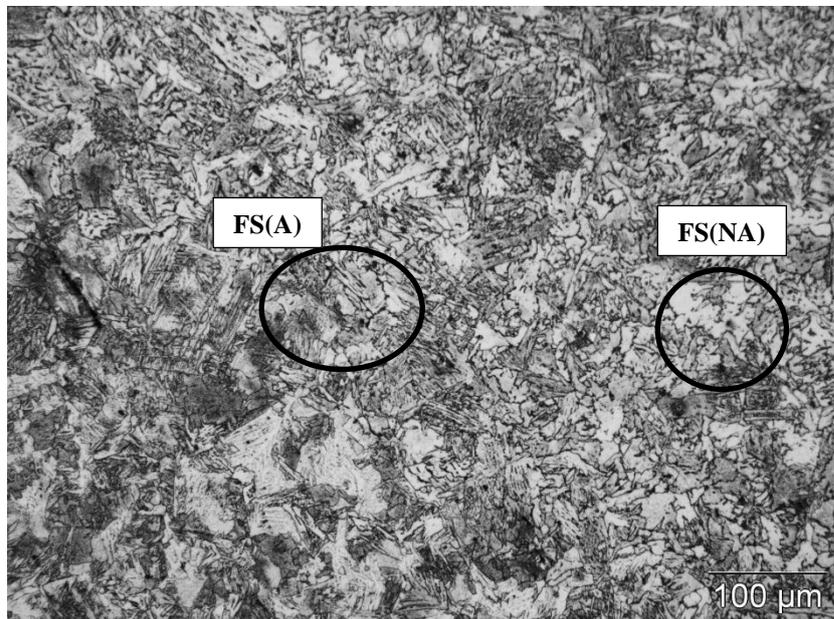
Fonte: Autor (2013).

4.3.6 Micrografia Zona Termicamente Afetada (ZTA) corpo de prova EE

Nas Figuras 4.16 e 4.17 é apresentada região da Zona Termicamente Afetada obtida do lado reto do chanfro do corpo de prova EE com aumentos de 200X e 500X respectivamente. Nestas imagens são observadas as mesmas microestruturas apresentadas na Zona Fundida da amostra, mas com grãos maiores e um aumento do número de ferrita com

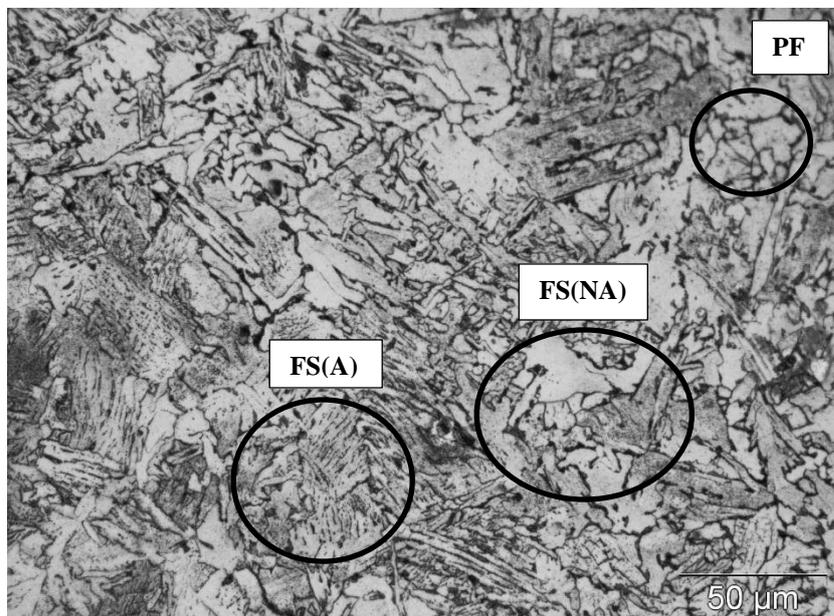
segunda fase não alinhada (FS(NA)) em relação a mesma região dos corpos de prova TF e TE.

Figura 4.16- Micrografia com aumento de 200X da zona termicamente afetada do corpo de prova EE. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autor (2013).

Figura 4.17- Micrografia com aumento de 500X da zona termicamente afetada do corpo de prova TF. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autor (2013).

Através das micrografias observa-se a heterogeneidade devido as diferentes microestruturas presentes no metal de solda e ZTA, com maior incidência dos seguintes microconstituintes: ferrita de contorno de grão (PF(G)), ferrita com segunda fase alinhada

(FS(A)), ferrita com segunda fase não alinhada (FS(NA)) e ferrita acicular (AF). Nesta região da zona fundida é desejado a predominância da ferrita acicular, pois este microconstituente apresenta granulação fina e entrelaçado composta por finas ripas de ferrita com cementita entre elas. Devido a distribuição aleatória deste microconstituente é possível conseguir melhores propriedades mecânicas. Foi observado nas micrografias que a amostra TF possuía uma maior quantidade de ferrita acicular quando comparada com as amostras TE e EE.

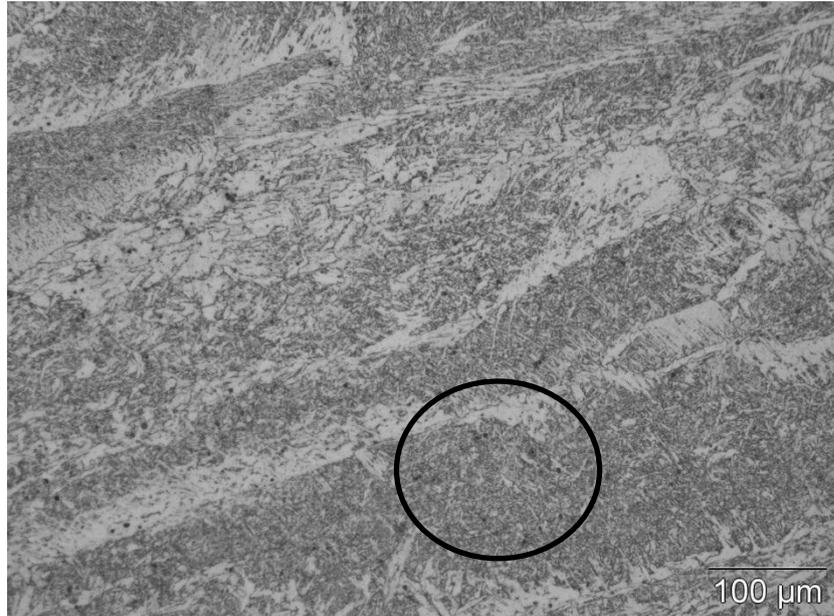
O corpo de prova TF que utilizou o processo de soldagem FCAW apresentou uma maior região colunar quando comparado com os corpos de prova TE e EE que utilizaram o processo de soldagem SMAW confirmando menores regiões de recristalizações entre passes possivelmente pelos menores ciclos térmicos gerados pelo processo.

Como visto nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 da análise macrográfica as amostras que utilizaram o processo com eletrodo revestido possuem uma maior ZTA. A extensão desta zona e sua granulometria são de fundamental importância no que diz respeito as propriedades mecânicas das juntas soldadas. Assim quanto menor a extensão e granulometria tem-se uma menor possibilidade de formação de microestruturas frágeis. Observa-se nas Figuras 4.13 e 4.17 maiores percentuais de ferrita de contorno de grão (PF(G)) e ferrita com segunda fase (FS). Estes microconstituintes segundo Bubnoff e Ventrella (2002) oferecem baixa resistência a propagação de trincas prejudicando a tenacidade e a resistência mecânica da junta soldada.

4.3.7 Inclusões nas amostras TF, TE e EE

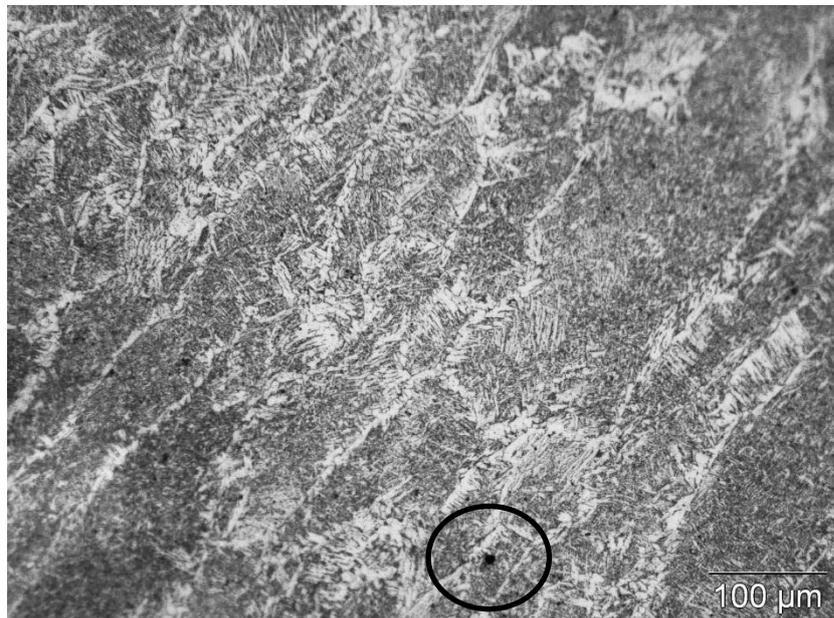
As figuras 4.18, 4.19 e 4.20 apresentam imagens das inclusões encontradas na zona fundida dos corpos de prova TF, TE e EE. Observa-se na Figura 4.18 que o corpo de prova TF apresentou uma maior quantidade de inclusões quando comparado com as Figuras 4.19 e 4.20 dos corpos de prova TE e EE respectivamente, mas o tamanho destas inclusões foi maior nos corpos de prova TE e EE que utilizaram o processo com eletrodo revestido. Essa quantidade de inclusões no corpo de prova TF pode ser justificada pela utilização do CO₂ como gás de proteção da poça de fusão. Esse gás produz um cordão de solda com maior penetração, porém sua baixa condutividade elétrica produz um arco instável e violento. Segundo Teske (2006), a aplicação de 100% CO₂ pode afetar de maneira negativa as propriedades mecânicas do metal depositado, pois o alto potencial de oxidação do arco pode causar a diminuição de elementos de liga do metal fundido e gerar grande quantidade de inclusões de óxidos.

Figura 4.18- inclusões encontradas no corpo de prova TF.



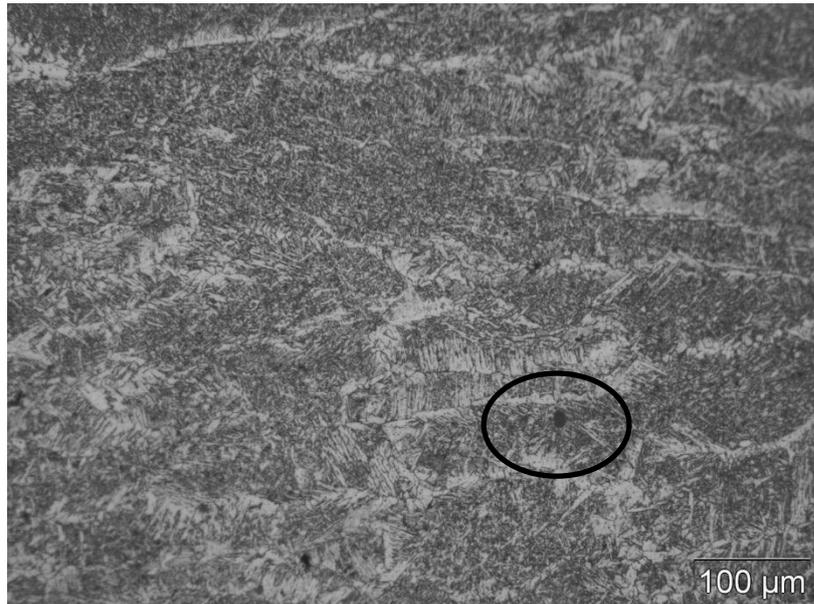
Fonte: Autor (2013).

Figura 4.19- inclusões encontradas no corpo de prova TE.



Fonte: Autor (2013).

Figura 4.20- Inclusões encontradas no corpo de prova EE.



Fonte: Autor (2013).

4.4 Inspeção de Soldas por TOFD

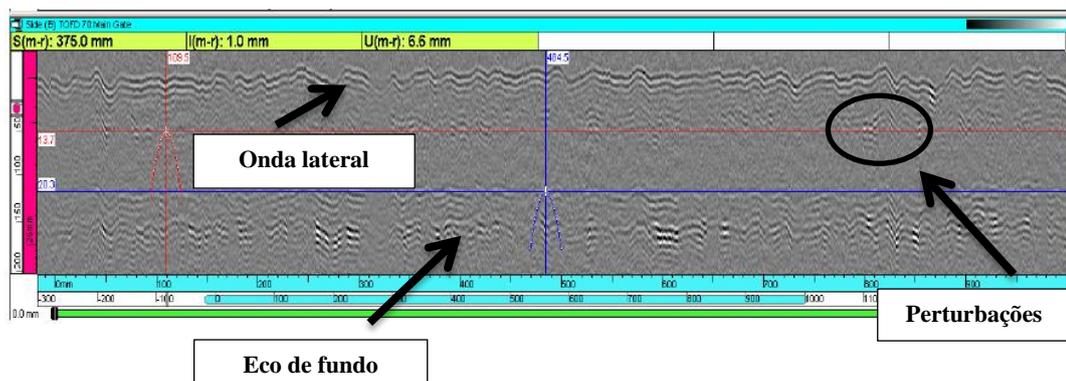
Nas Figuras 4.20 a 4.24 são apresentadas as regiões de ondas laterais, eco de fundo e possíveis defeitos nos corpos de prova TF, TE e EE.

Para realização dos ensaios o sistema foi calibrado segundo a norma ENV 583-6 que determina ângulos de cabeçote de 60° e 70° para inspeção de materiais com espessuras de 15 a 35mm.

Através da análise das figuras percebeu-se a ausência de poros, falta de fusão e trincas, no entanto, foram percebidas perturbações em alguns pontos da região analisada que são característicos da presença de escória. Segundo a norma API 650 as dimensões reduzidas observadas para as escórias não chegam a oferecer riscos à integridade da junta soldada.

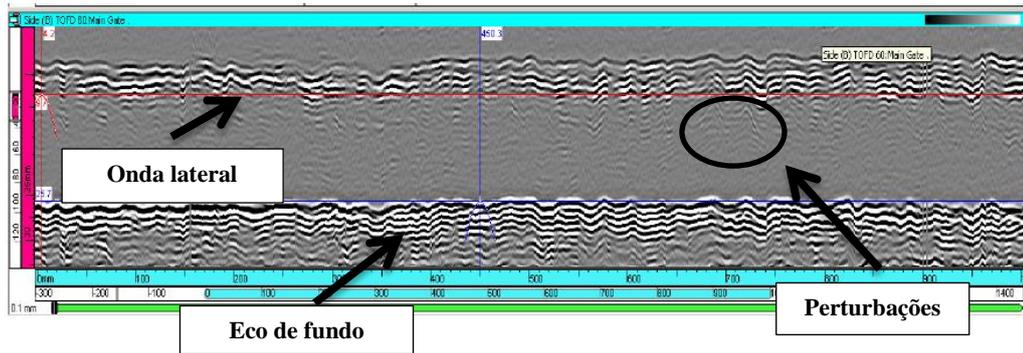
Foi observado na Figura 4.24 referente ao corpo de prova EE uma irregularidade na resposta da onda caracterizada como um eco de fundo, que pode ser justificado como uma região onde o acoplamento ocorreu de forma insuficiente. (RICHTER, 2009).

Figura 4.21- ensaio Ultrassom no corpo de prova TF a 70° .



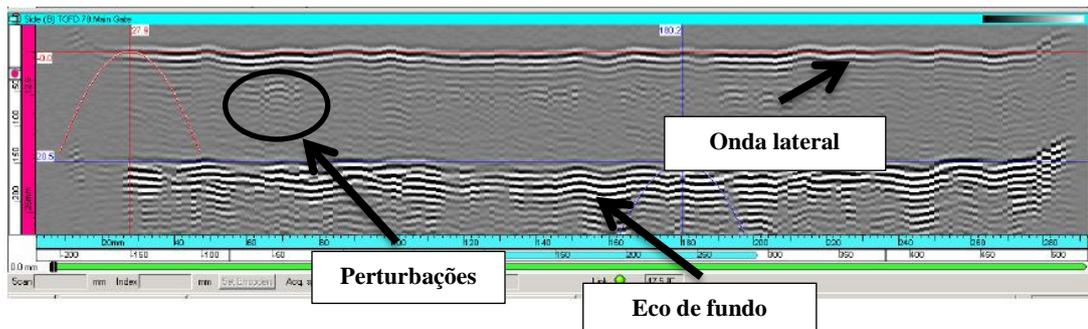
Fonte: Autor (2013).

Figura 4.22-ensaio Ultrassom no corpo de prova TF a 60°.



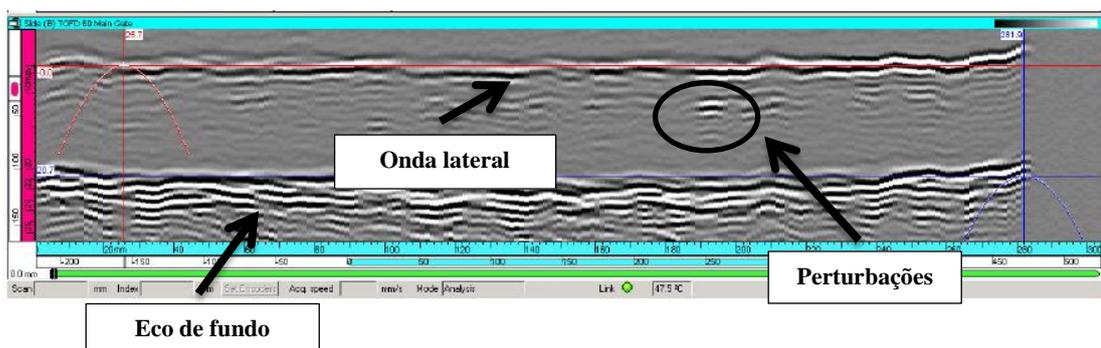
Fonte: Autor (2013).

Figura 4.23- ensaio Ultrassom no corpo de prova TE a 70°.



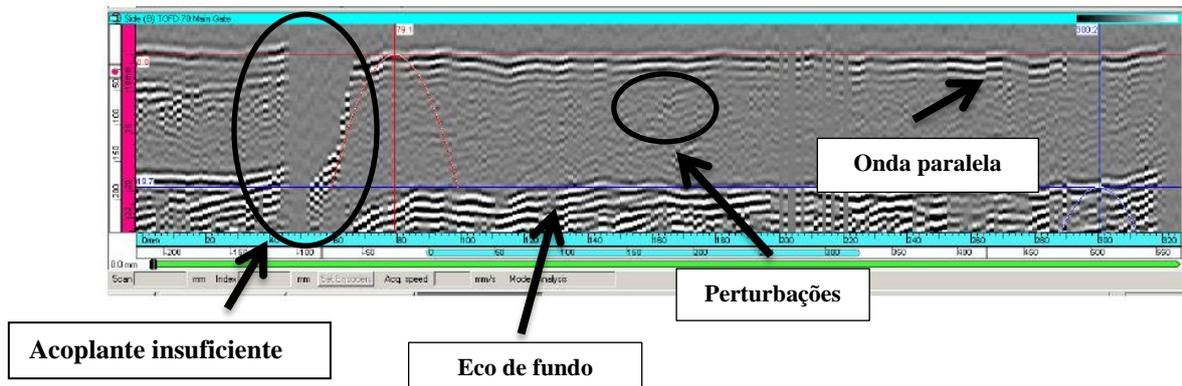
Fonte: Autor (2013).

Figura 4.24- ensaio Ultrassom no corpo de prova TE a 60°.



Fonte: Autor (2013).

Figura 4.25- ensaio Ultrassom no corpo de prova EE a 70°.



Fonte: Autor (2013).

4.5 Ensaio de tração

Os valores apresentados pela norma ASTM A-36, como visto anteriormente na Tabela 3 da seção 3.1.1 para o metal de base, são: Limite de Escoamento mínimo de 250 MPa, Limite de Resistência mínimo de 400 MPa e máximo de 550 MPa e alongamento variando de acordo com a espessura do material e com o comprimento útil do corpo de prova escolhido, com 21% para 200 mm e 24% para 50 mm.

Na Tabela 4.2 estão apresentados os resultados das médias dos resultados dos três corpos de prova por amostra.

Tabela 4.2- Médias dos resultados obtido no ensaio de tração.

Corpo de Prova	Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (mm)
TF	403,10 ± 6,21	260,43 ± 21,57	21,42 ± 0,25
TE	404,49 ± 6,38	252,43 ± 17,77	24,79 ± 2,35
EE	407,59 ± 5,19	271,65 ± 24,80	25,37 ± 2,02

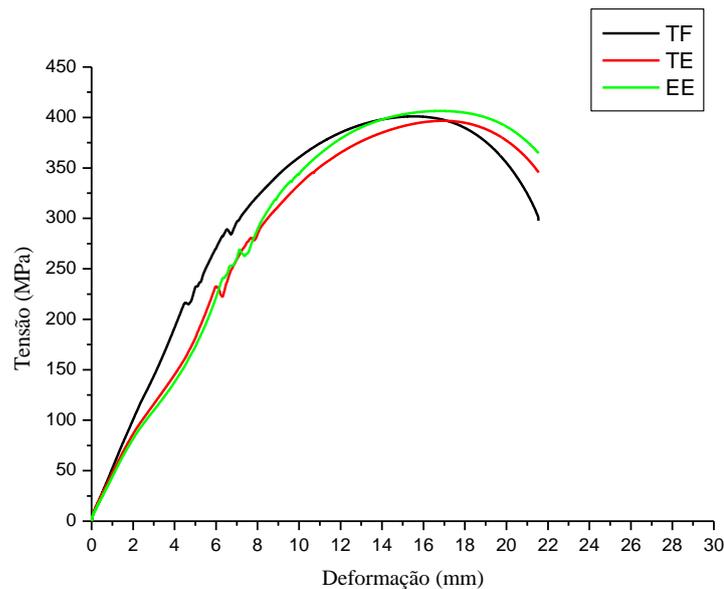
Fonte: Autor (2013).

Os resultados apresentados na Tabela 4.2 foram considerados todos validos já que todos os corpos de prova romperam fora da região da solda e confirmam as exigências mínimas exigidas pela norma ASTM A-36. Os valores mínimos das propriedades mecânicas encontrados neste ensaio pode ser justificado pela quantidade abaixo do especificado de Mn

presente no metal de base, já que este elemento tem grande influencia nas propriedades mecânicas deste tipo de aço.

A figura 4.26 apresenta o gráfico construído através do cálculo das médias das tensões e deformações dos valores obtidos no ensaio de cada triplicata dos corpos de prova.

Figura 4.26- Curva Tensão x Deformação dos corpos de prova TF, TE e EE.



Fonte: Autor (2013).

4.6 Ensaio de Microdureza Vickers

As Figuras 4.27, 4.28 e 4.29 mostram os perfis de microdureza Vickers, em função da média aritmética dos valores encontrados nas linhas superior (S), central (C) e inferior (I) dos corpos de prova TF, TE e EE.

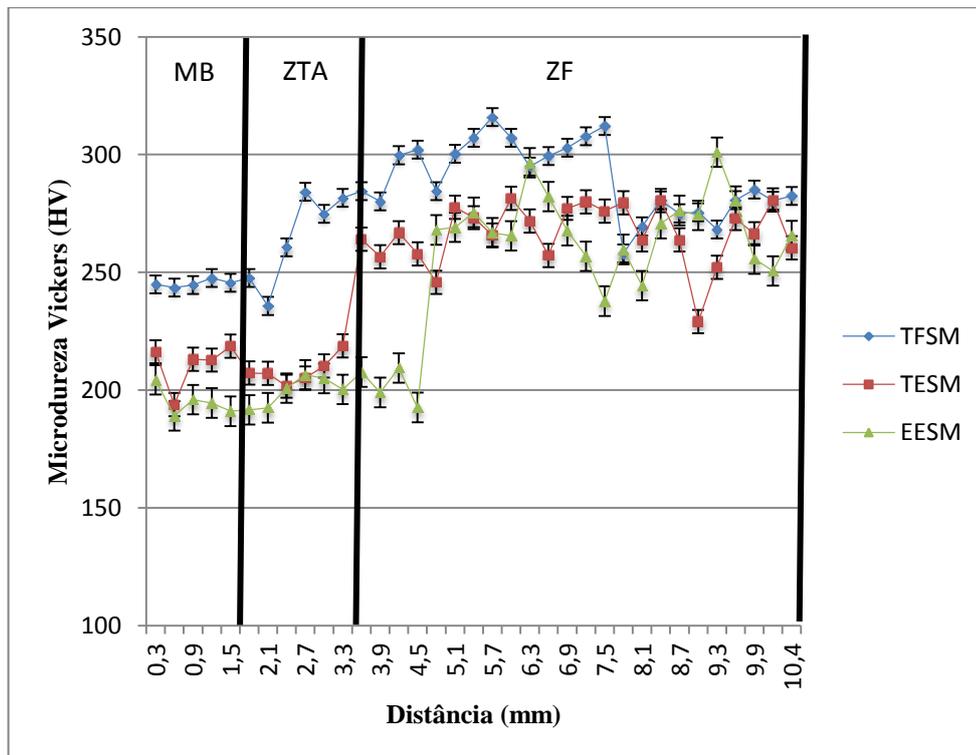
A microdureza foi medida a partir do metal de base até o centro da solda. O metal de base corresponde a distância 0,0 mm até 1,5 mm, a Zona termicamente afetada corresponde a distância de 1,8 mm até 3,0 mm e a Zona fundida de 3,3mm até 10,4mm.

Percebe-se nas Figuras 4.27, 4.28 e 4.29 que não houve mudança significativas nos perfis de microdureza dos três corpos de prova e que a dureza é mais baixa no metal de base por ser constituído por uma matriz de ferrita e perlita como apresentado na seção 4.3.1. A medida que o perfil avança, há um aumento na dureza devido o surgimento de diferentes fases e atinge seu valor máximo na Zona Fundida. Este comportamento pode ser justificado pela presença de ferrita acicular na zona fundida e a presença de Mn nos metais de adição utilizados nas operações de soldagem como mostrado nas Tabelas 3.4, 3.6 e 3.8, provocando

um endurecimento por solução sólida no metal de solda e aumentando a resistência mecânica nesta região (LESSA et al.; 2011).

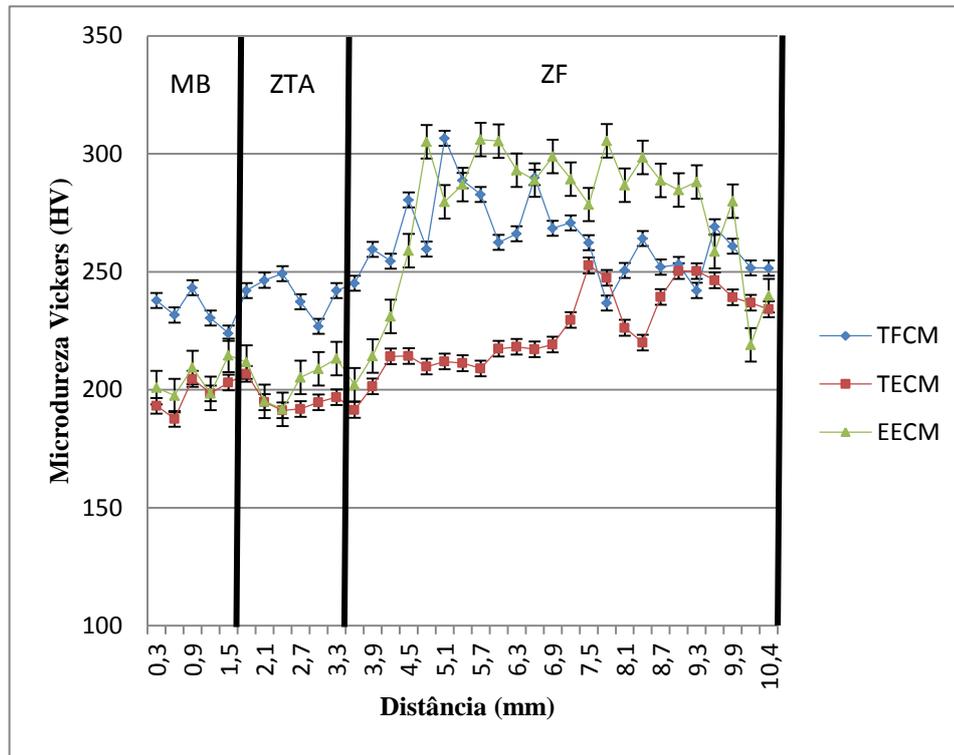
Na figura 4.28 percebe-se que a curva TECM permanece quase constante em todo perfil sendo justificado por uma região de recristalização como consequência dos ciclos térmicos gerados devido pela soldagem multipasses. O mesmo ocorre com a curva TFIM da Figura 4.29.

Figura 4.27 - Médias dos resultados obtidos no ensaio de microdureza Vickers na região superior do corpo de prova conforme Figura 3.9.



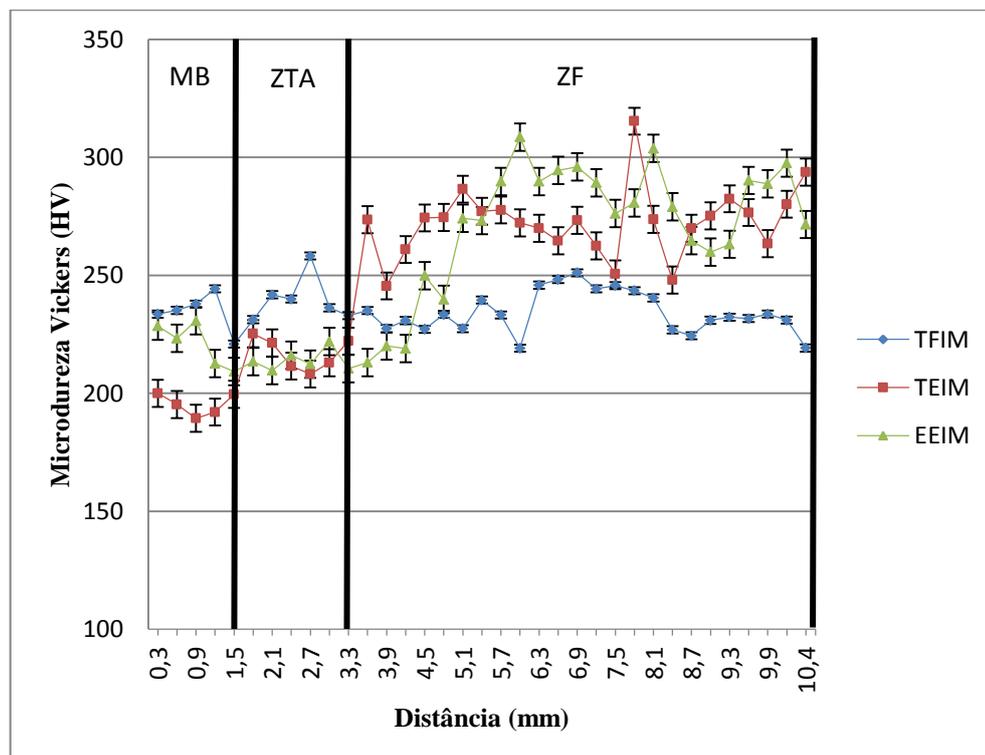
Fonte: Autor (2013).

Figura 4.28- Médias dos resultados obtidos no ensaio de microdureza Vickers na região central do corpo de prova conforme Figura 3.9.



Fonte: Autor (2013).

Figura 4.29- Médias dos resultados obtidos no ensaio de microdureza Vickers na região inferior do corpo de prova conforme Figura 3.9.



Fonte: Autor (2013).

5 CONCLUSÃO

- Na zona fundida foram encontrados microestruturas nas formas de ferrita primária (PF), ferrita de contorno de grão (PF(G)), ferrita acicular (AF) e ferrita com segunda fase (FS), com maior presença de ferrita acicular na amostra que utilizou o processo FCAW, possivelmente pelo ciclo térmico gerado, influenciando diretamente na taxa de resfriamento desta amostra;
- Na zona termicamente afetada foram encontradas ferrita primária (PF), ferrita de contorno de grão (PF(G)) e ferrita com segunda fase (FS), sendo que nas amostras que utilizaram o processo SMAW o tamanho destes microconstituintes eram maiores possivelmente devido aos ciclos térmicos gerados pela baixa velocidade de soldagem quando comparado com o processo FCAW;
- O processo FCAW apresentou menor número de passes para enchimento da junta soldada.
- O processo FCAW apresentou grãos de ferrita acicular em menores dimensões do que o processo SMAW possivelmente pela maior velocidade de soldagem por ser um processo semiautomático;
- As inclusões encontradas pelo ensaio de Ultrassom TOFD (Time of Flight Diffraction) nos corpos de prova estavam em níveis aceitáveis segundo a norma API 650 e não comprometeram a integridade da junta;
- Foi encontrado uma maior quantidade de inclusões na amostra que utilizou o processo FCAW, possivelmente pelo uso do CO₂ puro como gás de proteção;
- O resultados obtidos no ensaio de tração foram considerados todos válidos, já que todos os corpos de prova romperam fora da região da solda e atenderam as exigências mínimas exigidas pela norma ASTM A-36.
- Os baixos valores de resistência encontrados no ensaio de tração podem estar relacionados com os teores de C, Mn e Si presentes no metal de base;

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar a influência de diferentes proporções de CO₂ em misturas gasosas de proteção na formação de inclusões nas juntas soldadas utilizando o processo FCAW.

7 REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Handbook. Test Methods for Evaluation Welded Joints. USA: [s.n.]. 2003. 53p.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Handbook. – Welding Processes. Miami, 1995.

API STANDARD 650. Welded Steel Tanks for Oil Storage, 11th edition, february, 2012.

ASTM A 384. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials: Annual Book of ASTM Standards. USA: [s.n.]. 2011. 43p.

ASTM E8 / 8M. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]: Annual Book of ASTM Standards. USA: [s.n.]. , 2011. 28p.

ASTM A36 / 36M. Standard Specification for Carbon Structural Steel: Annual Book of ASTM Standards. USA: [s.n.]. 2008. 4p.

ALBUQUERQUE, S. F., MACIEL, T. M., SANTOS, M. A., BRACARENSE, A. Q., Avaliação da Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Metais de Solda Obtidos por Processos de Soldagem Manual e Automatizado utilizado na Soldagem de Aço API 5L X80, Soldag. Insp. São Paulo, Vol.16, No. 4, p.322-332, Out/Dez 2011.

Asselli, A. A. C., Gallego, J., Efeitos da Energia de Soldagem sobre a Microestrutura do Metal de Solda Depositado por Arco Submerso, 14º CREEM. FEMEC/UFU, Uberlândia-MG, 2007.

BOHLER. Arame Tubular, Catálogo de Soldagem. Disponível em: <http://www.bohlersoldabrasil.com.br> Acesso em: ago. 2012.

BOHLER. GTAW Varetas, Catálogo de Soldagem. Disponível em: <http://www.bohlersoldabrasil.com.br> Acesso em: ago. 2012.

CALLISTER JR, William D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2007.

Cardoso Junior, R., Bracarense, A. Q., Campos, F. R., Souza, C. S., Silveira, D. M., Lins, V. F. C., Avaliação da Soldagem Multipasse de Chapas Espessas de Aços Inoxidáveis Lean Duplex UNS S32304 soldadas pelos processos SMAW, GMAW e FCAW – Parte 1: Propriedades Mecânicas, Soldag. Insp. São Paulo, Vol. 17, Nº. 4, p.306-316, Out/Dez 2012.

CAMPOS, Paulo Tancredo. Caracterização mecânica e microestrutural de juntas Soldadas pelos processos MIG/MAG (GMAW) e arame tubular (FCAW). 2005. 75f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação Engenharia Mecânica. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba, 2005.

COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos Produtos Siderurgicos Comuns. 4ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

Cunha Junior, O. C., Terminologia de Soldagem para Técnicos em Mecânica. 2008. Disponível em: <http://www.ebah.com.br>. Acesso em: jan. 2012.

ESAB. OK – Eletrodos Revestidos, Catálogo de Soldagem. Disponível em: <http://www.esab.com.br>. Acesso em: ago.2012.

EVANS, G. M.; The Effect of Nickel on the Microestrutura and Proprieties of C-Mn All-Weld Metal Deposits. Welding Research Abroad Vol. XXVII No. 2, 3 Fev/ Mar 1991.

FARNESE, H. N., JORGE, C.F., SOUZA, L. G., BOTT I. S., Estudo Comparativo de Metais de Solda de Aços de Alta Resistência Obtido pelos Processos Eletrodo Revestido e Arame Tubular para AplicaçãoeEm Equipamentos de Amarração Offshore, Soldag. Insp. São Paulo, Vol.14, No. 2, p.151-160, Abr/Jun 2009.

FORTES, C. Arame Tubulares OK, Catálogo de Soldagem. 2004. Disponível em: <http://www.esab.com.br>. Acesso em: jan. 2012.

FORTES, C. Eletrodos Revestidos, Catálogo de Soldagem. 2004. Disponível em: <http://www.esab.com.br>. Acesso em: jan. 2012.

FONSECA, Ademir Soares. Soldagem TIG, Centro de Formação Profissional Aloysio Ribeiro de Almeida, Varginha – MG, 2004.

LESSA, Cleber Rodrigo de Lima. et al. Estudo da microestrutura formada no processo de soldagem por atrito em aço C-Mn com pino consumível, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, v.16, n. 1, p.002-011, set. 2012.

MARQUES, P. V. MODENESI, P.J. BRACARENSE, A. Q. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. 3.ed. Editora UFMG: Belo Horizonte, 2011.

MYRES, D. Metal Cored Wires: Advantages e Disadvantages, Welding Journal, v. 81, n. 9, pp.39 – 42, Sept. 2002.

MONDENESI, P. J. Soldabilidade dos Aços Transformáveis, UFMG: Belo Horizonte. 2010. Disponível em: www.embratecno.com.br. Acesso em: set. 2012.

MODENESI, P. J. Apostila – Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico, UFMG, 2001.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. dos. - Curso de Metalurgia de Soldagem. Universidade Federal de Minas Gerais, DEM, Belo Horizonte - MG, 1985.

OKUMURA, T. & TANIGUCHI, C. Engenharia de Soldagem e Aplicações, Rio de Janeiro, 1982.

PEDROSA, Igor Rafael Vilarouco. Influência do gás de proteção no modo de transferência do metal de adição e nas propriedades mecânicas das juntas soldadas pelos processos GMAW. 2008. 65f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

RODRIGUES, Emanuel Rezende. Influência de parâmetros do processo FCAW–G nas características da solda do Aço ASTM A-36. 2009. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

RODRIGUES, Lino Alberto Soares. Caracterização microestrutural e de propriedades mecânicas de soldas do aço ASTM A 131 pelos processos FCAW convencional e com adição de arame frio. 2011. 144f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Área de Concentração Materiais e Processos de Fabricação, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

RODRIGUES, Lucilene de Oliveira. Análise e otimização de parâmetros na soldagem com arame tubular. 2005. 97f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

SCOTTI, A., REIS, R. P., LISKEVYCH, O., Modelo Descritivo do Fluxo de Calor em Soldagem a Arco Visando o Conceito de Calor Imposto Efetivo, Soldag. Insp. São Paulo, Vol.17, Nº. 2, p.166-172, Abr/Jun 2012.

SOUZA, Ricson Rocha de. Dimensionamento de defeitos em blocos de aço carbono através da técnica de TOFD. 2009. 108f. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009

SOUZA, S. A. de. Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos. 5.ed. Edgard Blucher: São Paulo, 1982.

STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J., Avaliação da Transferência de Metal de Arames Tubulares, Soldagem Insp., Vol. 11, No. 3, Jul/Set. 2006.

Tatagiba, L. C. S., Gonçalves, R. B., Paranhos, R., Tendências no Desenvolvimento de Gases de Proteção Utilizados na Soldagem MIG-MAG, Soldag. Insp. São Paulo, Vol.17, Nº. 3, p.218-228, Jul/Set 2012.

TESKE, M.; ALLENSTEIN, C. L.; MARTINS, F. Influencia da composição do gás de proteção na resistência ao impacto do aço STM A516 grau 70 soldado pelo GMAW.

TESKE, Mario. Influência Da Composição Do Gás De Proteção Na Soldagem Do Aço Astm A516 Pelo Processo Gmaw. 2006. 120p. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

VIEIRA, Leonardo Augusto. Avaliação da tenacidade após tratamento térmico de alívio de tensões em soldas produzidas com arames tubulares rútilicos que contenham níquel. 2006. 79f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

WAINER, E., BRANDI, S. D. e MELLO, F. D. H de. Soldagem - Metalurgia e Processos, Edgard Blucher, São Paulo, 1992.

WELDING JOURNAL – SMAW Best Practice – v 85 n°5 Maio 2006.

WELDING WORKBOOK, Monitoring and Control of Welding Processes welding journal, v 86 n°3 – 2007.

ZEEMANN, Annelise. Energia de Soldagem. Rio de Janeiro. 2003. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos/metsol05.pdf>>. Acessado em: set.2012.