

**SOLDAGEM DE TUBO DE AÇO ASTM A106 Gr.B PELO
PROCESSO A ARCO ELÉTRICO COM ARAME TUBULAR COM
ATMOSFERA PROTEGIDA (FCAW-G)**



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

**SOLDAGEM DE TUBO DE AÇO ASTM A106 Gr.B PELO
PROCESSO A ARCO ELÉTRICO COM ARAME TUBULAR COM
ATMOSFERA PROTEGIDA (FCAW-G)**

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

MESTRANDO: MÁRIO CÉSAR LIRA DA SILVA

Recife, 19 de junho de 2009.

S586s

Silva, Mário César Lira da.

Soldagem de tubo de aço ASTM A106 Gr.B pelo processo a arco elétrico com arame tubular com atmosfera protegida (FCAW-G) / Mário César Lira da Silva. – Recife: O Autor, 2009.

xv, 76 f.; il., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2009.

Inclui Referências Bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica. 2. ASTM A106 Gr.B. 3. Arame Tubular. 4. Propriedades de Juntas Soldadas. I. Título.

UFPE

621 CDD (22.ed.)

BCTG/2010-161

**SOLDAGEM DE TUBO DE AÇO ASTM A106 Gr.B PELO
PROCESSO A ARCO ELÉTRICO COM ARAME TUBULAR COM
ATMOSFERA PROTEGIDA (FCAW-G)**

MESTRANDO: MÁRIO CÉSAR LIRA DA SILVA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO

ORIENTADOR: PROF. DR. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO

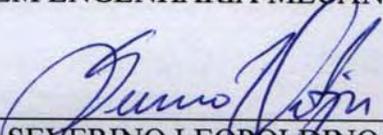
Recife, 19 de junho de 2009.

“AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM
ARAME TUBULAR EM TUBOS DE AÇO ASTM A106 GR. B”.

MARIO CÉSAR LIRA DA SILVA

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

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

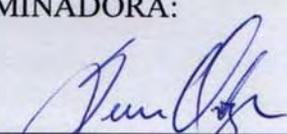


Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

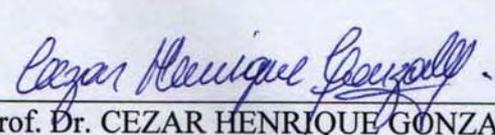


Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO
VICE-COORDENADOR DO CURSO

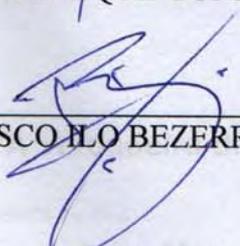
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO (UFPE)



Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ (UFPE)



Prof. Dr. FRANCISCO ILO BEZERRA (UPE)

... não está em aceitar ideias novas.
Está em escapar das ideias antigas.”

... John Maynard Keynes, 1883-1946, economista inglês

"A verdadeira dificuldade não está em aceitar idéias novas.
Está em escapar das idéias antigas."

John Maynard Keynes, 1883-1946, economista inglês

AGRADECIMENTOS

A minha mãe D. Lucila, pelo seu apoio, amor e dedicação.

A minha companheira Goretti Varella, pela compreensão da minha ausência, por seu amor, incentivo e amizade.

Ao meu filho Vinícius, por sua compreensão pela minha ausência, por seu amor, incentivo e amizade.

Aos meus irmãos, Sandra e Haroldo, Ana e Murilo, Luiza e Marcos, Marquinho e Ângela, pelo apoio e incentivo.

Ao meu amigo e irmão José Claudino, pelo apoio e incentivo cotidianos.

Ao meu tio Luiz Gonzaga, que sempre me estimulou profissionalmente.

Aos meus amigos Paulo Carvalho, Ricardo Guedes, Rosildo Rosa e Antonio Almir, pelo apoio, colaboração e estímulo.

Aos meus amigos Mariza Varella, Reynaldo Rubem e Helena, Reynaldo Rubem Filho e Joyce, João Barbalho, Geraldo Pinho, Elúzia Varella, Pedro Neto, pelo apoio e estímulo.

A minha amiga Clarisse Ferrão, pelo seu apoio e incentivo.

A Camila e Luiza.

A todos os meus amigos que compõem a Vórtice: Paulo e Péricles Macário, Mauro, André Lins, Eduardo Henrique, Eduardo Pontual, Leonardo Maia, Márcio, Ketoly, Jéssica, Fábio, Sr. Artur, Marcos Silva, Paloma, Jonatas, Lucas, Emmanuel, e aos que já compuseram, pelo apoio e incentivo.

Aos meus amigos Silas Ribeiro, Mário Aragão, Celso Mazolli, Wayne Guedes, Márcio Rollemberg, João Santos, Fábio Jazon.

Aos meus amigos de pedaladas Airton Júnior, Paulinho, André Bike, Gandhi e Odilon pelo apoio e estímulo.

Ao meu orientador, Prof^o Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho, pela paciência, colaboração e dedicação.

Ao Prof^o César Gonzales, pelo apoio e estímulo.

A Orlando e ao Prof^o Carlos, pelo apoio e colaboração.

Aos Professores Eduardo, Jeorge por terem dado todo apoio na execução das soldagens na unidade do SENAI do Cabo de Santo Agostinho - PE.

Ao Prof^o Armando Shinohara, pelo seu incentivo e por ter disponibilizado os laboratórios de ensaio de tração e microdureza.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE.

A Eliane Alves pelo apoio e estímulo.

A Rose Lima, pelo apoio.

Ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE pela oportunidade de cursar o mestrado.

A SEW, nas pessoas de Gustavo e Fábio, pela doação do acionamento do equipamento de giro.

Aos que fazem a METALMAQ, especialmente Tarcísio, pela fabricação e doação do equipamento de giro e dos corpos de prova.

A SERVMONT, especialmente a Josemar, pelo apoio na execução das soldagens.

Aos alunos de iniciação científica, Tiago, Manuella, Cidrack e Leandro, pela colaboração durante a preparação dos corpos de prova e utilização dos equipamentos.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a memória do meu Pai:
Mário Lira da Silva,
Pelos exemplos de Ética,
Competência e Determinação,
oferecidos aos seus filhos,
netos e amigos, durante toda a sua vida.

RESUMO

Nas indústrias de processo, os diversos equipamentos formam uma cadeia contínua, através da qual circulam os fluidos, o meio de ligação entre os mesmos dá atarvés de tubulações que são consideradas como equipamentos de processo. A falta ou paralisação de um único equipamento, sem que tenha sido programa, pode gerar perdas financeiras em grande escala. Neste ambiente, as tubulações são responsáveis pela condução dos fluidos, as quais operam em muitos casos em severas condições de serviço. Na ocasião da montagem, as tubulações passam por processos de soldagem nos seus diversos métodos de ligação, durante o processo de soldagem são geradas zonas de aquecimento localizadas nas juntas onde o material do tubo fica sujeito a variações na sua microestrutura, o que gera mudanças nas suas propriedades. O processo de soldagem mais utilizado na soldagem de tubulações nas montagens industriais é o da soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido. Este trabalho apresenta o resultado do estudo das propriedades mecânicas e estruturais de juntas de tubos soldadas com arame tubular. Para tanto, utilizou-se tubos confeccionados em aço ASTM A106 Gr B, recomendado para o transporte de fluidos em alta temperatura, soldado com o processo de soldagem por arco elétrico com Arame Tubular Protegido. As soldas de raiz foram feitas com dois diferentes processos: TIG e Arame Tubular, quando se utilizou arame tubular na raiz, este foi feito com o mesmo material de enchimento e acabamento. As soldas de enchimento e acabamento foram feitas com dois tipos de arame tubular, um rutilico e outro "metal cored". Foram realizados ensaios de microdureza e de tração, e análise microestrutural e macroestrutural das juntas soldadas para verificação das suas possíveis variações. Os resultados evidenciaram variações nas propriedades das juntas soldadas quando se realiza a solda nas diferentes amperagens adotadas neste trabalho, porém mostrou-se possível a utilização do processo estudado em pequenas juntas de peças que possam vir a serem fabricadas em canteiros de obra.

Palavras Chaves: ASTM A 106 Gr B, arame tubular, propriedades de juntas soldadas.

ABSTRACT

In continuous process industries, line production is configured by great quantity of equipments mounted according a sequential way and connected each other by pipes where all fluids' process flows inside up to the final production stage. In this arrangement, even pipes are considered like one of the very important equipment of process, which for many times running under very hard environments and process conditions. Because fluids needs flows continuously in line, if just one of equipments brakes or need to stop for some not programmed reason, all the process line stops and great financial losses takes place. To be mounted, pipes are submitted to several welding technologies process where heating zones that occurs in joints' welding points might affect the pipes' microstructures and changes in their physical properties take form. One of the welding technology processes for pipes more used in industrial assemblies is the electric arc welding with covered electrode. The goal of this paper is analyze the mechanical and physical properties of pipes' welding joints. For that, tests were developed with ASTM A106 Gr B tubes, which ones are recommended to high temperature fluids. They were welded by electric arc welding process with wire Tubular Protected. It was employed two welding technologies in this study: GIT and Tubular Wire. When tubular wire was used at the welding root, same material was employed for filling and finishing. Additionally, filling and finishing welds were carried out with two types of tubular wires, a rutile and other "metal cored". Micro hardness and tensile, and micro structural and macro structural analysis of welded joints were performed to identify variations happenings. The results of the study offer evidences of variations in the properties of welded joints when performed with different welding amperages adopted in this study. But these findings also proved that is possible to employ the welding technology proposed to small joints of parts executed in mounting site.

Keywords: ASTM A 106 Gr B, tubular wire, properties of welded joints.

LISTA DE TABELAS

PAG.

Tabela 3.1 Composição química do material ASTM A-106 Gr.B (% em massa)	23
Tabela 3.2 Propriedades mecânicas do material ASTM A-106 Gr.B	23
Tabela 3.3 Propriedades químicas da vareta TIG – AWS/ASME SFA-5.28	25
Tabela 3.4 Propriedades mecânicas da vareta TIG – AWS/ASME SFA-5.28	25
Tabela 3.5 Propriedades químicas do arame tubular – ASME SFA-5.23	25
Tabela 3.6 Propriedades mecânicas do arame tubular – ASME SFA-5.23	25
Tabela 3.7 Propriedades químicas do arame tubular – ASME SFA-5.20	26
Tabela 3.8 Propriedades mecânicas do arame tubular – ASME SFA-5.20	26
Tabela 3.9 Condições gerais de soldagem para o processo TIG	34
Tabela 3.10 Condições de soldagem da raiz por TIG	34
Tabela 3.11 Condições gerais de soldagem para arame tubular com enchimento metálico	35
Tabela 3.12 Condições de soldagem por passe entre as mostras com arame tubular com enchimento metálico	36
Tabela 3.13 Condições gerais de soldagem com arame tubular rutílico	37
Tabela 3.14 Condições de soldagem por passe entre as amostras com arame tubular rutílico	38
Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados na soldagem preliminares da junta MRA1	47
Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados na soldagem preliminares da junta MAB1	48
Tabela 4.3 - Parâmetros utilizados na soldagem das juntas com Arame Tubular com enchimento Rutílico – MAR2 e MAR3	50

Tabela 4.4 - Parâmetros utilizados na soldagem das juntas com Arame Tubular com enchimento metálico “Metal Cored” - MAB2 e MAB3	51
Tabela 4.5 – Identificação dos ensaios e respectivos corpos de prova	52
Tabela 4.6 - Média dos resultados do limite de resistência do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Metálico	55
Tabela 4.7 - Média dos resultados do limite de resistência do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Rutílico	56
Tabela 4.8 - Média dos resultados do módulo de elasticidade do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Metálico	58
Tabela 4.9 - Média dos resultados do módulo de elasticidade do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Rutílico	59
Tabela 4.10 - Média dos resultados do módulo de elasticidade do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Metálico	60
Tabela 4.11 - Gráfico 4.5 - Média dos resultados do módulo de elasticidade do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Rutílico	61
Tabela 4.12 - Média dos resultados da microdureza Vickers das juntas soldadas com Arame Tubular Metálico	63
Tabela 4.13 - Média dos resultados da microdureza Vickers das juntas soldadas com Arame Tubular Rutílico	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tubulações de uma indústria de processos, fonte Petrobras.	6
Figura 2.2 - Laminador oblíquo com mandril, Catálogo Vallourec e Mannesmann Tubes	7
Figura 2.3 - Soldagem por fusão (esquemático) [19].	7
Figura 2.4 - Esquema de soldagem com arame tubular pelo processo FCAW-G, adaptado de Welding Handbook, 1995.	10
Figura 2.5 - Esquema de soldagem com arame tubular pelo processo FCAW-S, adaptado de Welding Handbook, 1995	11
Figura 2.6 - Secções dos arames tubulares [21]	13
Figura 2.7 - Processos de conformação final de arames tubulares (diminuição da seção do eletrodo), adaptado de [17].	15
Figura 2.8 - Microestrutura do metal de solda não alterado mostrando diferentes constituintes microestruturais [IIW Sub-commission IXJ Doc. IX-1533-88].	19
Figura 3.1 - Foto destacando as marcações da junta (junta nº 2 soldada com arame tubular “metal cored” - AB2)	22
Figura 3.2 - Foto de uma junta montada sobre o girador	23
Figura 3.3 - Fotos da estação de soldagem fabricada pela Kemppi	27
Figura 3.4 - Foto do alimentador de arame ProMig 501 da Kamppi	29
Figura 3.5 - Foto da tocha MB 36 KD refrigerada a gás	29
Figura 3.6 - Fotos do retificador Origo Arc 456 da ESAB, utilizado para soldagem das raízes das juntas com TIG.	30
Figura 3.7 - Vista do desenho em 2D e 3D do Girador (Projeto)	31
Figura 3.8 - Vista do desenho em 3D do Girador (Projeto)	31

Figura 3.9 - Foto do Girador acionado por motoredutor e inversor de frequência (equipamento projetado e fabricado para a experiência)	32
Figura 3.10 - Foto do conjunto Girador e Estação de Solda	32
Figura 3.11 - Desenho da junta utilizada nos experimentos.	39
Figura 3.12 - Foto acoplamento das juntas feito por pontos de solda.	39
Figura 3.13 - Identificação dos quadrantes marcados nas juntas soldadas.	40
Figura 3.14 - Foto do painel de controle da fonte durante a soldagem.	40
Figura 3.15 - Foto do espaçador para execução dos pontos de acoplamento.	41
Figura 3.16 - Item (a) da figura QW-461-4 do ASME Seção 9 Posição 5G (Girando).	41
Figura 3.17 - Foto da tocha na posição de soldagem 5G (giro anti-horário).	42
Figura 3.18 - Desenho do corpo de prova para ensaio de tração.	42
Figura 3.19 - Desenho do corpo de prova para ensaio de macrografia, micrografia e microdureza.	43
Figura 3.20 - Foto do corpo de prova para ensaio de macrografia, micrografia e microdureza.	43
Figura 3.21 - Posição de retirada dos corpos de prova para ensaio de tração (ASME Seção 9 Edição 2003) (ASME Seção 9 Edição 2003).	44 33
Figura 3.22 - Máquina de tração EMIC Linha DL 10.000.	45
Figura 3.23 - Foto do microdurômetro Shimadzu.	46
Figura 3.24 - Esquema da marcação dos pontos para ensaio de microdureza.	46
Figura 3.25 - Foto do microscópio utilizado para as macrografias.	47
Figura 3.26 - Foto do microscópio utilizado para as micrografias.	48

Figura 3.27 - Esquema da marcação dos pontos para a micrografia.	48
Figura 4.1 - Foto da junta onde observa-se a perfuração das bordas da junta.	49
Figura 4.2 - Foto da junta onde observa-se a perfuração do material de base.	49
Figura 4.3 - Foto da junta soldada, onde observa-se penetração irregular da raiz	49
Figura 4.4 - Foto da junta soldada, onde observa-se penetração irregular da raiz	50
Figura 4.5 - Foto da junta MAR1, 2º quadrante, vista externa da raiz da solda	51
Figura 4.6 - Foto da junta MAR1, 2º quadrante, vista interna da raiz da solda.	51
Figura 4.7 - Foto da junta MAR1, 2º quadrante, vista do cordão de enchimento/acabamento.	52
Figura 4.8 - Foto da junta MAB1 2º quadrante, vista externa da raiz da solda.	52
Figura 4.9 - Foto da junta MAR1, 2º quadrante, vista interna da raiz da solda.	52
Figura 4.10 - Foto da junta MAB1, 2º quadrante, vista do cordão de enchimento/acabamento.	53
Figura 4.11 - Foto dos corpos de prova após o ensaio de tração, agrupados para análise visual das fraturas e outros aspectos	55
Figura 4.12 - Foto da fratura do corpo de prova R31T	56
Figura 4.13 - Foto da fratura do corpo de prova B22T	56
Figura 4.14 – Macrografias dos corpos de prova soldados com: Raiz e Acabamento com Arame Tubular com enchimento Metálico (2,2x).	66

Figura 4.15 – Macrografias dos corpos de prova soldados com: Raiz em TIG e Acabamento com Arame Tubular com enchimento Metálico (2,2x).	66
Figura 4.16 – Macrografias dos corpos de prova soldados com: Raiz e Acabamento com Arame Tubular com enchimento Rutílico (2,2x).	67
Figura 4.17 – Macrografias dos corpos de prova soldados com: Raiz em TIG e Acabamento com Arame Tubular com enchimento Rutílico (2,2x).	67
Figura 4.18 - Macrografia do corpo de prova B24M (2,2x)	68
Figura 4.19 - Micrografias do corpo de prova B24M	68
Figura 4.20 - Macrografia do corpo de prova B31M (2,2x)	69
Figura 4.21 - Micrografias do corpo de prova B31M	69
Figura 4.22 - Macrografia do corpo de prova R22M (2,2x)	70
Figura 4.23 - Micrografias do corpo de prova R22M.	70
Figura 4.24 - Macrografia do corpo de prova R34M (2,2x).	71
Figura 4.25 - Micrografias do corpo de prova R34M.	71

LISTA DE SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	- American Iron and Steel Institute
ASME	- American Society Mechanical Engineers
ASTM	- American Petroleum Institute
API	- American Society for Testing and Materials
AWS	- American Welding Society
ISO	- International Standardization Organization
IIW	- International Institute Welding
NBR	- Norma Brasileira
SAE	- Society of Automotive Engineers
m	- Metro
mm	- Milímetro
µm	- Micrometro
Å	- Angstrom
Ø	- Diâmetro
λ	- Comprimento de onda
m³/h	- Metros cúbicos por hora
m/s	- Metros por segundo
°C	- Grau Celsius
%	- Percentual
Kg/h	- Quilograma por hora
kW	- Quilowatt
TIG	- Tugsten Inert Gas (Gas Tungsten Arc Welding - GTAW)
FCAW	- Soldagem com Arame Tubular (Flux Cored Arc Welding)
MIG/MAG	- MIG (Metal Inert Gás) - MAG (Metal Active Gás)
SMAW	- Soldagem com Eletrodo revestido (Shielded Metal Arc Welding)
min	- minuto
A	- Ampere
V	- Volt
DC	- Corrente contínua (direct current)
W	- Wolt
Ar	- Argônio
CO₂	- Dióxido de Carbono

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1 Apresentação do problema e motivação	2
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo geral	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Apresentação	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Soldagem como elemento de ligação entre tubos metálicos	5
2.2 Tubos de aço para altas temperaturas	6
2.2.1 Fabricação de tubos sem costura	6
2.3 Soldagem por fusão	7
2.4 Soldagem com arame tubular (FCAW - Flux Cored Arc Welding)	8
2.4.1 Soldagem com arame tubular protegido (FCAW-G)	10
2.4.2 Soldagem com arame tubular autoprotégido (FCAW-S)	11
2.5 Consumíveis na soldagem FCAW	12
2.5.1 Eletrodos	12
2.5.2 Gases de proteção	14
2.6 Equipamentos	15
2.7 Parâmetros de soldagem	15
2.8 Temperatura de preaquecimento	16
2.9 Carbono equivalente	16
2.10. Ensaio mecânicos	17
2.10.1 Ensaio de tração	17
2.11 Macro e microestrutura da região soldada	18
2.12 Microdureza da região soldada	20
3. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	21
3.1 Marcação das juntas	21
3.2 Material	22
3.2.1 Material de base	22
3.2.2 Verificação do carbono equivalente (Ceq)	24
3.2.3 Material de adição	24
3.2.3.1 Material utilizado para soldagem da raiz das juntas AR3 e AB3	24
3.2.3.2 Material utilizado para soldagem da raiz e no acabamento da junta AR2 e no acabamento da junta AR3	25
3.2.3.3 Material utilizado para soldagem da raiz e do acabamento da junta AB2 e no acabamento da junta AB3	26
3.2.4 Gás de proteção	26
3.3 Equipamentos para soldagem com arame tubular	27
3.3.1 Fonte	28
3.3.2 Alimentador de arame	28
3.3.3 Tocha	29
3.4 Equipamentos para soldagem com TIG	29
3.5 Girador do Tubo	30
3.6 Planejamento experimental	33
3.6.1 Parâmetros de soldagem da raiz com TIG	34

3.6.2	Parâmetros de soldagem com arame tubular com enchimento metálico “metal cored”	35
3.6.3	Parâmetros de soldagem com arame tubular rufílico	37
3.6.4	Preparação das juntas	39
3.7	Acompanhamento da soldagem	40
3.7.1	Execução da soldagem da raiz	41
3.7.2	Execução de soldagem do enchimento e do acabamento	41
3.8	Corpos de prova	42
3.8.1	Corpo de prova para ensaio de tração	42
3.8.2	Corpo de prova para ensaios de macrografia, micrografia e microdureza	43
3.8.3	Critérios para retirada dos corpos de prova	43
3.8.4	Marcação dos corpos de prova	44
3.8.5	Ensaio de tração	45
3.8.6	Ensaio de microdureza	46
3.8.7	Caracterização das macroestruturas	47
3.8.8	Caracterização das microestruturas	48
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	Parâmetros de soldagem	48
4.2	Resultados dos ensaios de tração	54
4.2.1	Resultados do limite de resistência LR	57
4.2.2	Resultados do limite de escoamento LE	60
4.2.3	Resultados do alongamento ϵ	62
4.3	Ensaio de microdureza	64
4.4	Caracterização das macroestruturas	65
4.5	Caracterização das microestruturas	67
5.	CONCLUSÕES	72
6.	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	73
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

Capítulo 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Apresentação do Problema e Motivação

As indústrias em geral necessitam de fluidos (líquidos ou gasosos), quer sejam utilizados como insumo (processo), quer sejam para operacionalização dos equipamentos (movimentação, aquecimento, resfriamento, limpeza, instrumentação e etc.). Neste contexto, a tubulação torna-se um elemento imprescindível para o deslocamento dos fluidos.

Nas indústrias de processo, onde as tubulações chegam a custar até 25% do valor de empreendimento, destes, cerca de 50% são relativos a montagem, tornando a soldagem um elemento significativo na composição desses custos posto que é um dos principais meios de ligação entre os tubos e acessórios.

Grande parte das tubulações são compostas de aços e em menor intensidade em polímeros, cerâmicas e outros materiais, normalmente utilizados em vedações e sedes de válvulas.

Com a retomada do desenvolvimento industrial no Nordeste do Brasil com a perspectiva de instalação de refinarias de petróleo em Pernambuco, Ceará e Maranhão, haja vista que este tipo de indústria trás consigo uma outra série de empreendimentos tais como: indústrias petroquímicas e de processos, que de um modo geral são grandes utilizadores de instalações de tubulações industriais.

A necessidade por maior produtividade tem levado empresas de montagem a buscarem alternativas para soldagem de componentes em geral, sobretudo, de tubulação e estruturas já que estes são, de modo geral, os principais consumidores de solda nas montagens industriais.

A soldagem encontra-se presente em, basicamente, todos os meios de ligação de tubos, exceto em tubulações roscadas e/ou outros casos específicos aqui não listados.

Atualmente, para a soldagem de tubulações em campo, o processo de soldagem com eletrodo revestido, ou combinação deste com outros processos, sobretudo TIG, são os mais utilizados. Devido as suas características de facilidade e operacionalidade, de fácil manuseio dos equipamentos e da facilidade de controle das influências do ambiente externo.

Dentro de uma visão de eficiência competitiva, apresenta-se como alternativa a utilização do processo de soldagem com Arame Tubular (FCAW) na soldagem de peças, fabricadas nos pipe shops instalados nos canteiros de obra de montagem mecânicas, onde são fabricadas peças compostas de tubos e acessórios de diversos tamanhos e geometrias. Nas figuras 1.1 e 1.2 observa-se algumas exemplos de peças que são fabricadas nas condições citadas.



Figura 1.1 – Tubulações preparadas para solda num canteiro de obras (pipe shop), fonte Vórtice Engenharia.



Figura 1.2 – Pequenas peças tubulares “spools” soldas num canteiro de obras (pipe shop), fonte Vórtice Engenharia.

No cenário atual, nas empresas de montagem eletromecânicas atuantes, sobretudo no Nordeste do Brasil, existe uma mística quanto a impossibilidade da utilização da soldagem com o processo de Arame Tubular (FCAW) na obra. Observa-se que isto ocorre, entre outros fatores por:

- ✓ Falta de conhecimento sobre o processo;
- ✓ Falta de pessoal treinado (tanto soldadores como inspetores);
- ✓ Falta de indicadores de produtividade em relação a utilização específica;
- ✓ Crença de que os custos são muito mais elevados que os da soldagem por Eletrodo Revestido (SMAW);
- ✓ Falta de estudos que possam provar as potencialidades da utilização do processo de soldagem com Arame Tubular.

Tendo em vista nossa experiência em acompanhamento de montagens de tubulações industriais observamos a necessidade e a possibilidade de aplicação de novos processos de fabricação que levassem a um maior desempenho das empresas do setor de montagem industrial locais, visto que diante dos novos investimentos haverá um maior assédio a este setor na região.

Aproveitamos a oportunidade da realização deste estudo para que o mesmo fosse aproveitado, de modo sucinto diante da grandeza do assunto, como uma contribuição ao desenvolvimento da indústria local.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Estudar a soldagem de tubos com o processo a arco elétrico com Arame Tubular Protegido (FCAW-G) com arames com enchimentos rutilico e metálico na soldagem em tubos de aço para altas temperaturas (ASTM A-106 Gr.B), caracterizando as propriedades mecânicas e metalúrgicas das juntas soldadas, objetivando apresentar este processo como uma alternativa favorável no tocante a produtividade e a qualidade e, conseqüentemente, a minimização dos custos em relação ao processo com eletrodo revestido na soldagem de tubos metálicos, hoje utilizado nas montagens mecânicas dentro das indústrias.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Apresentar como alternativa complementar nas montagens eletromecânicas da utilização do processo de soldagem com Arame Tubular Autoprotegido (FCAW) na fabricação de peças em canteiros de obra;
- ✓ Avaliar o comportamento mecânico de juntas de tubos de aço carbono soldadas com arames tubulares com enchimentos metálico e rutilico;
- ✓ Validar a utilização de arame tubular para soldagem de juntas tubulares de pequenas dimensões que podem ser realizadas em pipe shops dos canteiros de obra de montagens mecânicas;
- ✓ Construir um equipamento para girar os tubos com controle da velocidade de soldagem com a utilização de um inversor de frequência, para controle do parâmetro de velocidade de soldagem.

1.3 Apresentação

Para atender aos objetivos propostos, esta dissertação foi estruturada por capítulos. No capítulo 1 é apresentada uma introdução ao trabalho, com a motivação para sua realização. O capítulo 2 refere-se a revisão bibliográfica com a fundamentação teórica necessária para suporte à pesquisa realizada. No capítulo 3, são apresentados os equipamentos e o planejamento experimental para realização da pesquisa. Já o capítulo 4 aborda os resultados e as discussões da pesquisa. O capítulo 5 as conclusões. No capítulo 6 são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros. Ao final da dissertação, no capítulo 7, são relacionadas as referências bibliográficas consultadas.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Soldagem como Elemento de Ligação entre Tubos Metálicos

A soldagem é um dos mais importantes processos de fabricação na construção de equipamentos e dutos para a indústria petroquímica, sobretudo, na de montagem mecânica de tubulações e estruturas.

Os equipamentos de processo podem ser classificados em três grupos [25]:

- ✓ Equipamentos de caldeiraria (tanques, vasos, trocadores de calor etc.);
- ✓ Máquinas (compressores, bombas, chillers etc.);
- ✓ Tubulações.

Chama-se de tubulação a um conjunto de tubos e acessórios (conexões, válvulas, suportes e etc.). Usam-se a tubulações para o transporte de todos os materiais capazes de escoar, sendo eles fluidos líquidos ou gasosos, pastosos e fluídos com sólidos em suspensão, todos em todas as faixas de variação de pressão e temperatura usuais na indústria. A importância dos tubos na indústria de processos é enorme, sendo dos equipamentos industriais o de uso mais generalizado. Estima-se que os custos com a tubulação dentro da indústria de processos fiquem próximos de 15 a 20% do custo total das instalações [25].

As tubulações de um modo geral classificam-se em:

Dentro das instalações industriais (ver figura 2.1):

- ✓ Tubulações de processo;
- ✓ Tubulações de utilidades;
- ✓ Tubulações de instrumentação;
- ✓ Tubulações de drenagem.

Fora das instalações industriais:

- ✓ Tubulações de transporte;
- ✓ Tubulações de drenagem.



Figura 2.1 – Tubulações de uma indústria de processos, fonte Petrobras.

2.2 Tubos de Aço para Altas Temperaturas

Os tubos para condução de fluidos a alta temperatura são fabricados sem costura pelos processos de laminação, extrusão e de trefila.

O início da faixa de fluência dos aços carbono de baixa liga se dá a partir de 370° C. Para serviços em temperaturas superiores a 420° C recomenda-se que sejam empregados somente aços totalmente acalmados com Silício que ocasionam um grão grosso, ao contrário dos acalmados com Alumínio que diminuem o tamanho do grão e favorecem a grafitização, que é a decomposição da cementita e liberação do carbono livre, que se precipita em forma de grafite na malha cristalina do material, fragilizando-o e tornado-o quebradiço, principalmente nas regiões próximas as soldas [26].

As temperaturas limites de resistência a fluência e ao início de formação de carepa são 450 e 530° C respectivamente, sendo que a temperatura de início de formação de carepa não deve ser ultrapassada, sobretudo, em serviços contínuos [25].

2.2.1 Fabricação de tubos sem costura

Os tubos utilizados nas indústrias de processos podem ser fabricados com e sem costura, sendo os tubos sem costura os aplicados em condições de maiores solicitações (tubulações de processo e de utilidades). Os tubos sem costura (Extrudados, Trefilados e Laminados), são tubos que não apresentam emendas em sua seção transversal, são obtidos de tarugos por meio de

laminação, trefilaria ou extrusão. Os tubos laminados são os mais aplicados (com limite de fabricação no Brasil de diâmetros até 355 mm), por ser entre os três processos o mais difundido e o que tem uma gama maior de dimensões e por caracteriza-se pela alta performance em condições extremas de uso tais como: altas temperaturas, altas pressões de trabalho e corrosões.

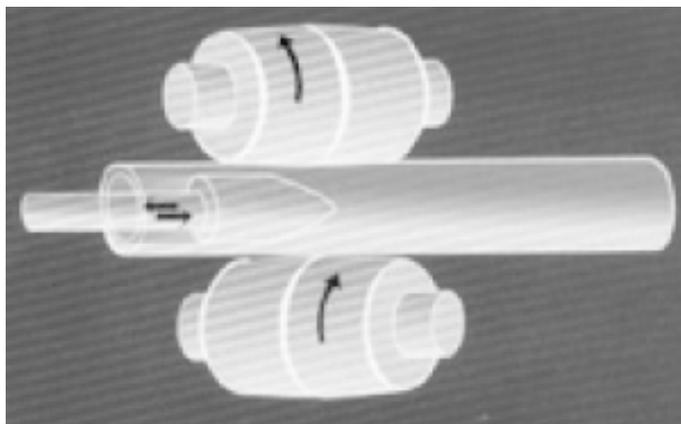


Figura 2.2 – Laminador oblíquo com mandril, Catálogo Vallourec e Mannesmann Tubes.

2.3 Soldagem por fusão

Consistem na aplicação localizada de calor na região de união para a sua fusão e do metal de adição (quando este for utilizado), produzindo a ligação após a solidificação do metal fundido e, portanto, a destruição das interfaces, figura 2.3 ilustra este processo [19].

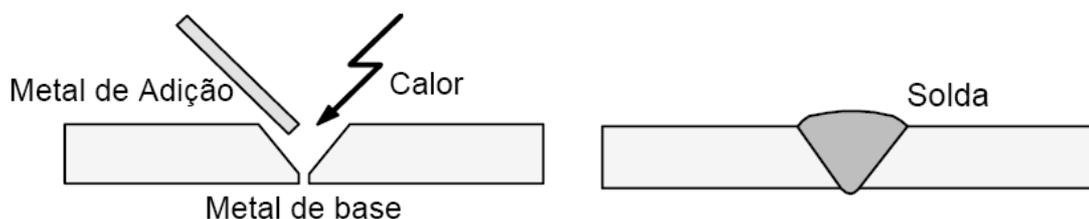


Figura 2.3 – Soldagem por fusão (esquemático) [19].

2.4 Soldagem com Arame Tubular (FCAW - Flux Cored Arc Welding)

A exploração comercial deste processo remonta à 1920, sendo que antes de 1930 várias estruturas de grande porte foram construídas na Alemanha através de sua utilização. Porém, naquela época ainda não era comum a fabricação de arames com o diâmetro reduzido para serem enrolados em bobinas, sendo o consumível fabricado, portanto, em pequenas extensões. A maior dificuldade a ser contornada, se refere à proteção que a escória líquida deve fornecer ao metal, quando esse é transferido desde o eletrodo para a poça de fusão. Estes problemas impediram uma maior popularização desse processo, até que o advento do processo de proteção por gás inerte (MIG - Metal Inert Gas), em torno de 1950, fez renascer o interesse pelo mesmo, além do uso de constituintes pré-fundidos e adição de compostos básicos em fluxo rutílico [11].

Por volta da década de 1980, finalmente, alguns fabricantes resolveram os inconvenientes existentes, tanto que este processo se apresenta atualmente como uma excelente alternativa para alta produtividade, com qualidade [21].

No processo de soldagem com Arame Tubular (FCAW - Flux Cored Arc Welding), a coalescência dos metais é ocasionada por um arco elétrico que é estabelecido entre um eletrodo metálico tubular contínuo e a peça a ser soldada. A proteção do arco é feita pelo fluxo interno do arame, podendo ser complementada por um gás de proteção. A escória formada, além de atuar metalurgicamente, protege a solda durante a solidificação.

A soldagem com Arame Tubular é um processo que acumula as principais vantagens da soldagem com arame sólido e proteção gasosa (MIG-MAG), como alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição e rendimento, resultando em maior produtividade e qualidade da solda. Inclui também as vantagens da soldagem manual a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW), como alta versatilidade e facilidade de operação em ambientes abertos [2,17].

As duas variações neste processo são: numa a proteção do arco e do cordão de solda é feita por um fluxo sólido contínuo contido no interior do eletrodo tubular complementado por um fluxo de gás fornecido por uma fonte externa (FCAW-G); na outra a atmosfera protetora é feita somente pelo fluxo interno do arame que é decomposto durante a fusão do mesmo, sem a necessidade de uma fonte externa de gás (FCAW-S).

Alguns dos benefícios ocasionados na utilização da soldagem com o processo de Arame Tubular são [4,17]:

- ✓ Alta qualidade do metal depositado;
- ✓ Alta produtividade;
- ✓ Ótima aparência da solda (solda uniforme);
- ✓ Excelente contorno em soldas de ângulo;
- ✓ Solda vários tipos de aços e em grandes faixas de espessuras;
- ✓ Fácil operação;

- ✓ Alta taxa de deposição;
- ✓ Economiza engenharia para projeto de juntas;
- ✓ Arco visível;
- ✓ Requer menor limpeza do que no processo de eletrodo revestido (SMAW);
- ✓ Distorção reduzida sobre o processo com eletrodo revestido;
- ✓ O uso de eletrodos autoprotégidos elimina a necessidade do uso de aparelhos de gás além de ser mais tolerante para condições ao ar livre;
- ✓ Alta tolerância com relação a contaminantes que podem originar trincas;
- ✓ Resistente a trincas no cordão.

Algumas limitações da soldagem são [4,17]:

- ✓ Limitado a soldagem de metais ferrosos e liga a base de níquel;
- ✓ Necessidade de remoção de escória;
- ✓ O arame tubular é mais caro na base de peso do que o arame de eletrodo revestido, entretanto, a medida que aumentam os elementos de ligas esta relação diminui;
- ✓ O equipamento é mais caro se comparado ao utilizado para soldagem pelo processo SMAW, mas a alta produtividade compensa;
- ✓ Restrição da soldagem ao ar livre, somente para soldagem com gás de proteção (FCAW-G);
- ✓ O alimentador de arame e a fonte de energia devem estar próximos ao local de trabalho;
- ✓ São gerados mais fumos do que os processos MIG-MAG e Arco Submerso.

A soldagem com arame tubular possui inúmeras semelhanças com relação ao processo MIG (GMAW - Gas Metal Arc Welding) no que diz respeito aos equipamentos e princípios de funcionamento. Este fato lhe permite compartilhar o alto fator de trabalho e taxa de deposição característicos da soldagem GMAW. Por outro lado, através da soldagem com arame tubular é possível obter a alta versatilidade da soldagem como nos eletrodos revestidos no ajuste de composição química e facilidade de trabalho em campo [21].

O método a ser usado depende do tipo de eletrodo desenvolvido, das propriedades mecânicas exigidas, do tipo de junta, do tipo de adaptador e etc [4].

Aplicações do processo [14]:

- ✓ Soldagem de aços carbonos e ligados;
- ✓ Soldagem de aços patináveis;
- ✓ Soldagem de aços cromo-molibidênio;
- ✓ Soldagem de aços inoxidáveis;
- ✓ Soldagem de ligas de Níquel;

2.4.1 Soldagem com Arame Tubular Protegido (FCAW-G)

O processo de soldagem a arco elétrico com Arame Tubular com Atmosfera Protegida (FCAW-G) utiliza gás auxiliar para a proteção da poça de fusão, conduzido pelo bocal da tocha, que é a mesma utilizada para o processo MIG-MAG (ver figura 2.1). Uma variação deste processo reside no uso do arame tubular com alma metálica, que contém em seu fluxo somente ingredientes metálicos, sendo seu principal constituinte o pó-de-ferro [21], o que melhora sua soldabilidade.

A proteção do arco e do cordão de solda é feita por um fluxo de soldagem contido dentro do eletrodo e pode ser complementada por um fluxo de gás de proteção contido e conduzido através da tocha. No processo FCAW-G, a parte metálica do arame é a principal responsável pela condução da corrente elétrica formadora do arco e da poça de fusão [4].

A soldagem com o arame tubular de alma metálica resulta em pouca escória, formada por pequenas ilhas superficiais de silício, sendo este fato favorável à soldagem em múltiplos passes, pois aumenta a eficiência do processo, inexistindo a necessidade de remoção da escória formada [21].

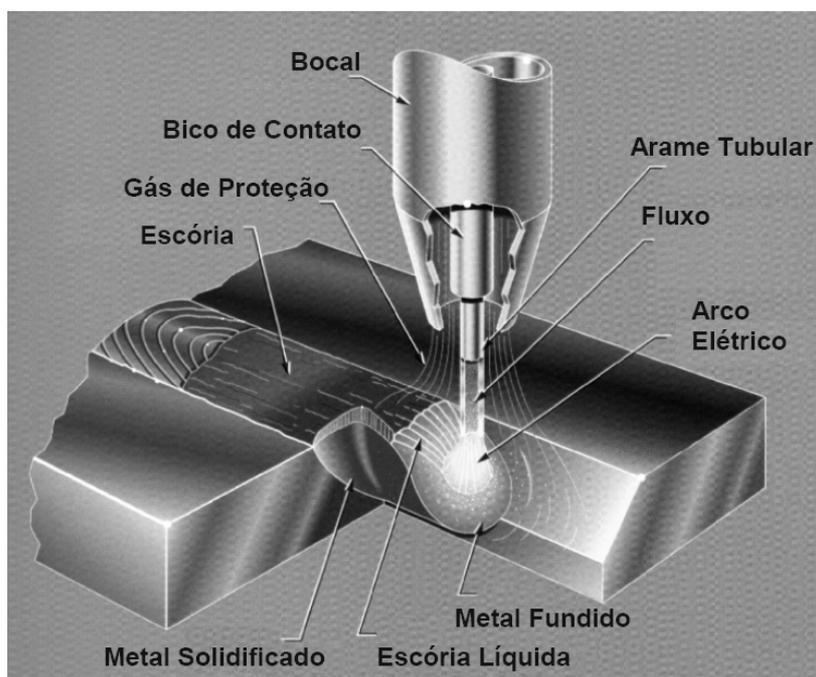


Figura 2.4 – Esquema de soldagem com arame tubular pelo processo FCAW-G, adaptado de Welding Handbook, 1995.

2.4.2 Soldagem com Arame Tubular Autoprottegido (FCAW-S)

No processo de soldagem com arame tubular autoprotetido não é utilizado o gás de proteção. A proteção do metal de transferência é realizada pela fusão do fluxo interno do arame tubular, que gera gás protetor. Além desta função, o fluxo é responsável pela estabilização do arco elétrico, pela transferência de elementos de liga adicionais e pelo controle da escória. Portanto, uma composição adequada do fluxo é fundamental, pois pode gerar restrições em sua utilização [4].

Arares tubulares autoprotetidos dependem somente dos componentes do fluxo para proteger o arco da atmosfera, purificando o metal de solda e proporcionando os compostos formadores de escória necessários para proteger a poça de fusão contra a reoxidação. Esses arames tubulares não dependem de um gás de proteção externo e, portanto, podem funcionar mais efetivamente em ambientes exteriores sem a necessidade de cabines de proteção contra correntes de ar [13].

A Fig.2.2 mostra esquematicamente a soldagem realizada pelo processo FCAW-S. Observa-se que não há a representação do bocal da tocha e do fluxo do gás de proteção, pois este não é utilizado.

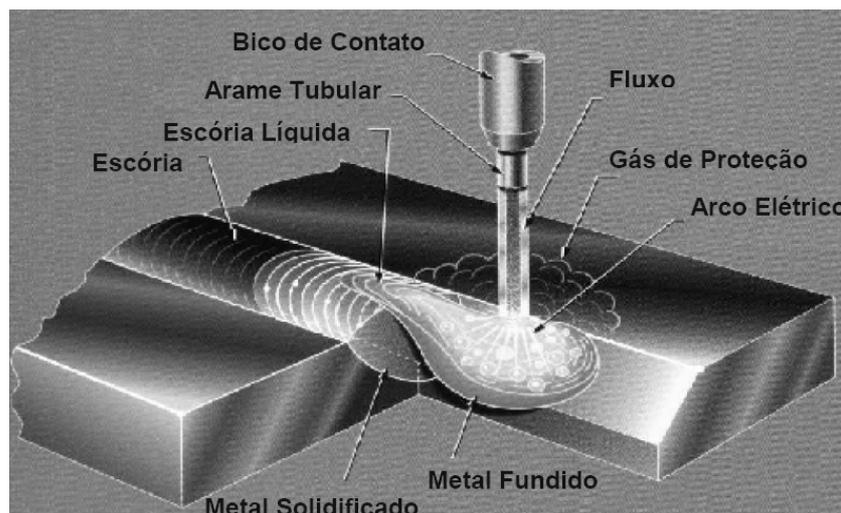


Figura 2.5 – Esquema de soldagem com arame tubular pelo processo FCAW-S, adaptado de Welding Handbook, 1995.

Este processo de soldagem é adequado para situações de soldagem em campo, onde a influência de ventos brandos não afeta a qualidade do cordão de solda.

2.5 Consumíveis na soldagem com Arame Tubular (FCAW)

Os consumíveis no processo de soldagem em questão são os eletrodos (arames tubulares) e os gases de proteção.

2.5.1 Eletrodos

No processo de fabricação de arames tubulares uma fita ou fio máquina passa por um conjunto de rolos de conformação até sua secção transversal possuir o perfil "U", a seguir o fluxo interno é alimentado e outro conjunto de rolos de conformação fecha sua secção. Posteriormente, o arame tem seu diâmetro reduzido até atingir a dimensão desejada. Esta redução pode ser através da trefilação utilizando fieiras ou rolos (roller dies). Durante este processo, caso a redução da secção seja efetuada por trefilação, são utilizados lubrificantes que serão posteriormente queimados em fornos para remoção do excesso [4].

Além da função de proteger o arco da contaminação pela atmosfera, o fluxo interno do arame pode também atuar como desoxidante através da escória formada, acrescentar elementos de liga ao metal de solda e ajudar a estabilizar o arco.

São arames tubulares ocos com alma formada por um fluxo fusível de baixo teor de hidrogênio. Quando o gás protetor for de natureza ativa, devem estar presentes na composição química do eletrodo elementos desoxidantes, tais como o Mn, e o Si. No caso dos arames autoprotetidos, existe na composição química do fluxo a presença do Al [21].

As especificações AWS A5. 20 e A5.29 classificam arames tubulares para aços C-Mn e baixa liga respectivamente. Para aços inoxidáveis são utilizados arames classificados pela AWS A5.22.

Existem dois tipos de arames tubulares:

- ✓ Autoprotetido – onde a proteção do arco e da poça de fusão é feita unicamente pela queima do fluxo em pó, contido no núcleo do arame. O arame tubular autoprotetido possui no seu interior uma quantidade maior de fluxo, o que proporciona durante a sua queima uma produção de gases e fumos suficiente para atuar tanto nas características de fusão, quanto na proteção global da poça de fusão durante a soldagem.
- ✓ Com Proteção adicional de gás – onde, além dos gases gerados pelo fluxo, é utilizado um gás adicional para a proteção, que flui pelo mesmo bocal de onde emerge o arame tubular.

Na soldagem por arame tubular com proteção gasosa, a queima e vaporização do revestimento proporcionam a estabilização do arco elétrico, bem

como a melhoria das características do metal depositado. No entanto, sendo pouca a quantidade de revestimento, a sua queima não permite obter o volume necessário de gases para proteção global do banho de fusão, sendo necessário utilizar uma proteção adicional de gás. Os gases normalmente utilizados são: inertes, como argônio e hélio ou, então, ativos como dióxido de carbono ou mesmo podendo ocorrer a mistura destes [17].

A razão entre as massas do fluxo e do metal do tubo depende da espessura da parede do mesmo, sendo usual que se encontre entre 0,15 e 0,30. Por outro lado, os eletrodos tubulares autoprotégidos não podem utilizar tão efetivamente a decomposição do fluxo para formar gás de proteção, como no caso dos eletrodos revestidos. Como é inevitável alguma absorção de oxigênio e nitrogênio do ambiente, torna-se necessário que o fluxo contenha fortes desoxidantes e formadores de nitratos, como o alumínio [13].

O percentual de fluxo no interior do arame pode variar de 15 a 50% do seu peso. Este percentual vai depender, entre outros fatores, das funções a serem desempenhadas pelo fluxo. Arames tubulares auto-protégidos possuem percentuais de fluxo consideravelmente superiores aos que utilizam proteção gasosa [21].

Com relação a composição do fluxo interno os arames podem ser básicos, rutilícos ou metálicos ("metal cored"). Os básicos produzem soldas com excelentes propriedades mecânicas e baixos teores de hidrogênio, os rutilícos proporcionam uma soldagem "suave" e um cordão com excelente aspecto visual e os metálicos, que possuem alto percentual de pó de ferro em sua composição, proporcionam altas taxas de deposição e rendimento [13].

Cada fabricante de arames tubulares possui suas fórmulas próprias para os componentes do fluxo. A composição do fluxo pode ser variada para proporcionar arames tubulares para aplicações específicas. Outro aspecto relativo ao fabricante é o tipo de seção do eletrodo que varia conforme a tecnologia aplicação na sua confecção (ver figura 2.6).

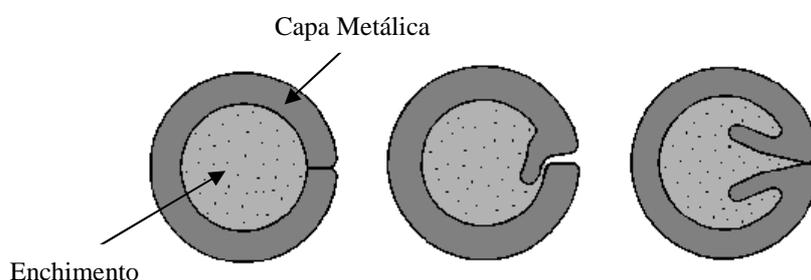


Figura 2.6 – Secções dos arames tubulares [21].

As funções básicas dos componentes do fluxo são [28]:

- ✓ Desoxidante e formador de nitretos - como o nitrogênio e o oxigênio podem causar porosidade e fragilidade, são adicionados desoxidantes como o manganês e o silício. No caso de arames tubulares autoprottegidos, são adicionados formadores de nitretos como o alumínio. Ambos auxiliam na purificação do metal de solda;
- ✓ Formadores de escória - compostos formadores de escória como óxidos de cálcio, potássio, silício, ou sódio, são adicionados para proteger a poça de fusão da atmosfera. A escória ajuda a melhorar o perfil do cordão de solda, e escórias de rápida solidificação ajudam a suportar a poça de fusão na soldagem fora de posição. A escória também reduz a taxa de resfriamento, ação especialmente importante quando se soldam aços de baixa liga;
- ✓ Estabilizadores do arco - elementos como o potássio e o sódio auxiliam na obtenção de um arco suave e reduzem a quantidade de respingos;
- ✓ Elementos de liga como o molibdênio, cromo, carbono, manganês, níquel e vanádio são empregados para aumentar a resistência, a ductilidade, a dureza e a tenacidade;
- ✓ Geradores de gases — minerais como a fluorita e o calcário são normalmente usados para formar uma atmosfera protetora nos arames tubulares autoprottegidos.

2.5.2 Gases de Proteção

As funções principais do gás de proteção são proteger a poça de fusão, o arame tubular e o arco elétrico contra a ação dos gases atmosféricos, principalmente o oxigênio, e promover uma atmosfera conveniente e ionizável para o arco elétrico. Caso haja contato de ar atmosférico com o metal aquecido em processo de solidificação, muitas descontinuidades serão geradas, prejudicando a integridade e as propriedades mecânicas da junta soldada [13].

O ar atmosférico é expulso da região de soldagem pelo gás de proteção com o objetivo de evitar a contaminação da poça de fusão. A contaminação é causada principalmente pelo nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂) contidos no de vapor d'água (H₂O) presente na atmosfera.

Na seleção de gases de proteção adequados para soldagem de metais alguns fatores devem ser considerados, tais como: composição química do material, espessura da junta, posição de soldagem e tipo de corrente, entre outros.

Os gases de proteção são distinguidos entre os Inertes, que não reagem com o metal líquido da poça de fusão: Ar e He (Argônio e Hélio). E, os Reativos, aqueles que reagem com o metal líquido, sendo classificados como Ativos: CO₂ e O (dióxido de Carbono e Oxigênio), e o Redutor: H₂ (Hidrogênio).

2.6 Equipamentos

Os equipamentos para soldagem pelo processo FCAW são similares aos utilizados para na soldagem pelo processo GMAW (MIG/MAG). Poucas mudanças são necessárias na adequação de um equipamento que está utilizando arame sólido para utilizar arame tubular, exceto na soldagem com arame autoprotégido.

De modo geral são constituídos por fonte de energia, sistema de alimentação de arame e tocha. Na soldagem com gás de proteção são utilizados cilindros de contenção (a soldagem FCAW-G pode ser automática ou semi-automática).

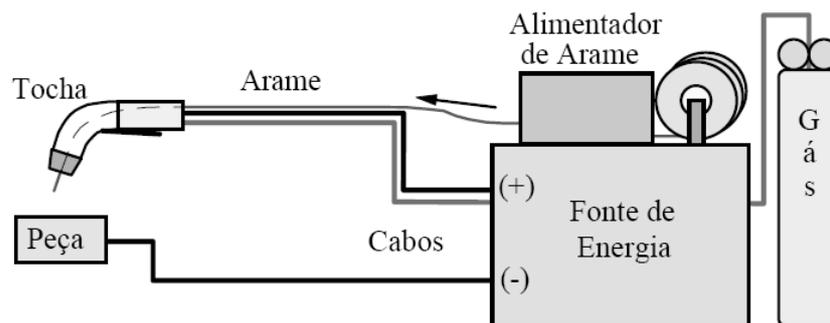


Figura 2.7 – Processos de conformação final de arames tubulares (diminuição da seção do eletrodo), adaptado de [17].

2.7 Parâmetros de Soldagem

Nas soldagens a arco com eletrodos consumíveis, a eficiência, a confiabilidade e a qualidade da soldagem estão diretamente relacionadas aos parâmetros de soldagem envolvidos. A corrente de soldagem e a tensão do arco elétrico, a velocidade de soldagem, a distância bico de contato peça e o ângulo de deslocamento da tocha estão entre os principais parâmetros de soldagem, que são responsáveis pela forma da transferência metálica, pelo nível de respingos gerados, pela estabilidade do arco, interferindo diretamente nas características da junta soldada [21], bem como, pelo aporte térmico que é responsável pelas transformações metalúrgicas das regiões afetadas termicamente, ocasionando mudança de estrutura e concentração de tensões.

2.8 Temperatura de Preaquecimento

O pré-aquecimento e o aquecimento entre os passes destina-se a aumentar o tempo de resfriamento das soldas, procurando-se diminuir a formação de martensita, que resultaria de um resfriamento rápido, e apressar a liberação do Hidrogênio retido que provocaria o surgimento de trincas [26].

O aquecimento do conjunto soldado anteriormente à operação de soldagem (preaquecimento), promove uma alteração no ciclo térmico da ZTA e do metal fundido, reduzindo a taxa de resfriamento, e é utilizado para proporcionar uma variedade de efeitos. Estes efeitos incluem: o relaxamento das tensões residuais, a redução de distorções, a prevenção do trincamento em juntas restringidas, alterações metalúrgicas como diminuição da dureza e aumento da tenacidade à fratura, a redução ou eliminação da tendência do trincamento por hidrogênio (trinca a frio), e alterações na morfologia e microestrutura do cordão de solda e da ZTA [21].

Para a correta aplicação do preaquecimento, vários fatores devem ser analisados: composição química e propriedades físicas do metal base, insumo de calor, tipo de eletrodo, grau de restrição da soldagem e espessura da junta soldada. Para o cálculo da temperatura de preaquecimento é necessário que se obtenha o valor do Carbono Equivalente [21].

2.9 Carbono Equivalente

As trincas a frio na zona termicamente afetada das estruturas soldadas de aço geralmente ocorrem na região da estrutura martensítica. Dessa maneira, deve-se preferir os aços que contêm em sua composição química baixos teores de elementos que tendem a promover seu endurecimento [20].

A influência dos elementos de liga na suscetibilidade a trincas a frio na zona termicamente afetada é geralmente estimada por meios do índice de Carbono Equivalente (Ceq), pode ser calculado através equação (2.1):

Equação formulada pelo IWW [20]:

$$Ceq = \%C + \frac{1}{6}Mn + \frac{1}{5}(Cr + Mo + V) + \frac{1}{15}(Ni + Cu)(\%) \quad (2.1)$$

A necessidade de pré e pós aquecimento é dada a partir do $Ceq > 0,53$.

As temperaturas de pré e pós-aquecimento são dadas a partir do carbono equivalente do metal de base e da espessura da peça a ser soldada,

considerando a menor espessura da junta. Na prática, utiliza-se as equações 2.2 e 2.3.

$$CeqTotal = 0,005 \times Ceq \times Espessura \text{ (mm)} \quad (2.2)$$

$$Temp.pre / pós - aquecimento (^{\circ}C) = 350 \times \sqrt{CeqTotal} - 0,25 \quad (2.3)$$

2.10. Ensaios Mecânicos

2.10.1 Ensaio de Tração

A aplicação de uma força num corpo sólido promove uma deformação do material na direção do esforço. O ensaio de tração consiste em submeter um material a um esforço que tende a alongá-lo até sua ruptura.

Quando um corpo de prova metálico é submetido a um ensaio de tração, pode-se construir um gráfico tensão-deformação, pelas medidas diretas da carga (ou tensão) e da deformação que crescem continuamente até quase o fim do ensaio [21].

As propriedades mecânicas, geralmente obtidas por médio do ensaio de tração, são as seguintes [21]:

- ✓ Limite de resistência (LR), que é a tensão máxima suportada pelo metal;
- ✓ Limite de escoamento (LE), que é a tensão que marca a transição do metal da zona de deformação elástica para a zona de deformação plástica;
- ✓ Limite de escoamento convencional (Ln), que é calculado por médio do gráfico tensão-deformação, quando não é possível calcular diretamente o limite de escoamento;
- ✓ Alongamento total do corpo de prova (ϵ), é expresso em %;
- ✓ Estricção (ϕ), que é expressa em %, calcula a diminuição da seção transversal do corpo de prova.

O limite de escoamento é mais usado nos projetos do que o limite de resistência, para os metais dúcteis. Entretanto, o limite de resistência serve para especificar o material, do mesmo modo que a análise química identifica o material. Por ser fácil de se calcular e ser uma propriedade bem determinante, o limite de resistência é especificado sempre com as outras propriedades mecânicas dos metais e ligas [7].

2.11 Macro e Microestrutura da Região Soldada

As fases resultantes da decomposição da austenita são basicamente: ferrita, cementita e martensita. Além destas, pequenas quantidades de austenita podem permanecer inalteradas (austenita retida) e diferentes precipitados (outros carbonetos, nitretos, etc.) e inclusões podem existir. Estas fases podem aparecer na forma de diferentes constituintes, nem sempre de fácil identificação, a qual é ainda mais dificultada pela grande diferença de aparência destes constituintes em relação aos do metal base, com os quais os técnicos estão, em geral, mais habituados. Estas dificuldades causaram, há algumas décadas, a proliferação de terminologias diferentes e conflitantes para descrever a microestrutura do metal de solda. Há cerca de 20 anos, o Instituto Internacional de Soldagem (IIW) desenvolveu um sistema de classificação para os constituintes do metal de solda, baseado na sua observação com o microscópio ótico, que se tornou o mais aceito atualmente (ver figura 2.8). Segundo este sistema, os constituintes mais comuns da zona fundida podem ser classificados como [16]:

- ✓ Ferrita Primária de Contorno de Grão – *PF(G)*: É o primeiro produto a se formar na decomposição da austenita, formando-se por difusão nos contornos de grão da austenita primária. O aumento da taxa de resfriamento e a inclusão de boro no aço tende a diminuir a formação deste tipo de ferrita, que por ser frágil e estar no contorno dos grãos pode facilitar a propagação de trincas.
- ✓ Ferrita Poligonal Intragranular – *PF(I)*: Nucleia-se internamente ao grão da austenita primária, tendo a forma poligonal ou equiaxial. Também é denominada de Ferrita Idiomórfica.
- ✓ Ferrita Acicular – *AF*: Nucleia-se internamente ao grão da austenita primária, principalmente em inclusões intragranulares e é formada por finas ripas de ferrita com cementita entre estas ripas (Mei & Silva, 1988), apresentando uma microestrutura de granulação fina e entrelaçada.
- ✓ Ferrita com Segunda Fase Alinhada – *FS(A)*: Microconstituente formado de grãos grosseiros que crescem ao longo de um plano, formando duas ou mais ripas de ferrita paralelas.
- ✓ Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada – *FS(NA)*: Formada por ferrita circundando microconstituintes ou ripas de ferrita acicular. Não se apresenta em forma paralela.
- ✓ Martensita – *M*: Microconstituente formado como produto final de transformação da austenita sob condições de alta taxa de resfriamento e elevado teor de carbono. Apesar do alto valor da dureza normalmente apresentado e conseqüente fragilidade, o auto revenimento propiciado pelo aumento da temperatura na ZTA pode melhorar a resistência mecânica desta fase.
- ✓ Agregado Ferrita-Carboneto – *FC*: Microconstituente com estrutura fina de ferrita e carbonetos, incluindo perlita e ferrita com interfaces de carboneto.

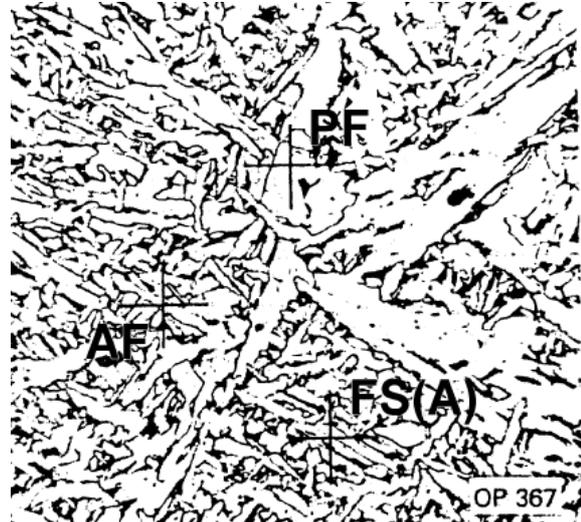
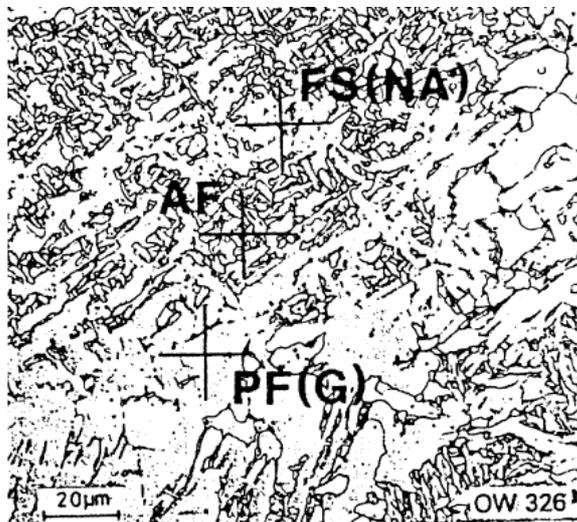
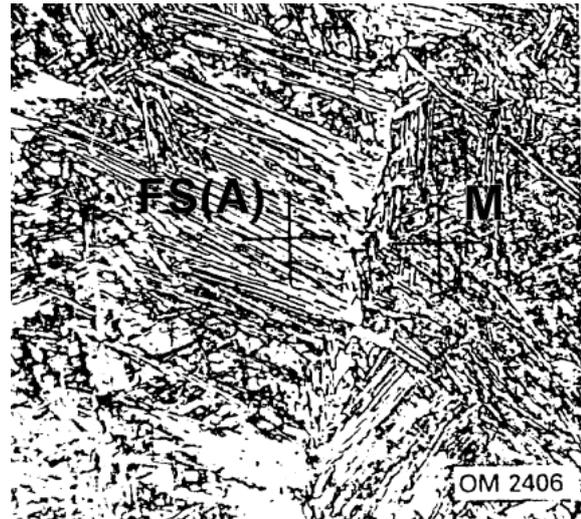
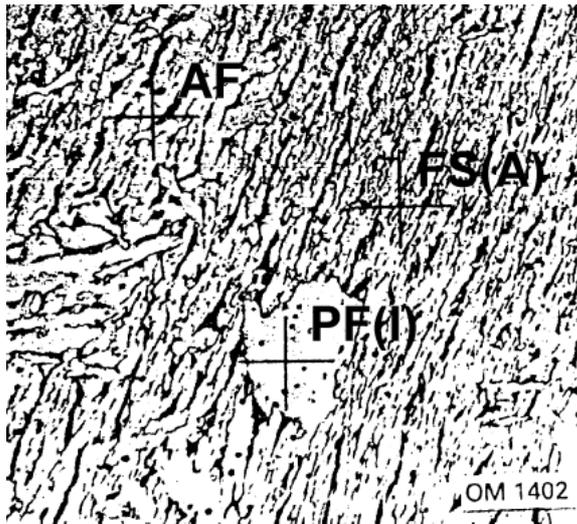


Figura 2.8 – Microestrutura do metal de solda não alterado mostrando diferentes constituintes microestruturais [IIW Sub-commission IXJ Doc. IX-1533-88].

2.12 Microdureza da Região Soldada

A dureza de um metal é a resistência que ele oferece à penetração de um corpo duro.

Na soldagem, a dureza é influenciada pela composição química do metal de base e do metal de adição, pelos efeitos metalúrgicos do processo de soldagem, pelo grau de encruamento do metal de base e pelo tratamento térmico [22].

A dureza por penetração é o método mais largamente utilizado e citado nas especificações técnicas. Os ensaios de microdureza por penetração mais comuns são: Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop e Meyer e a dureza por choque Shore [24].

A dureza na junta soldada pode apresentar vários comportamentos, dependendo dos ciclos térmicos impostos durante a soldagem, a composição química dos metais de adição e a equivalência entre as propriedades mecânicas do metal de adição e o metal de base [22].

Capítulo 3

MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Marcação das Juntas

Para controle da manipulação das juntas e extração dos corpos de prova, foi elaborado um procedimento para marcação das juntas conforme descrito a seguir:

Juntas soldadas com Arame Tubular Metal Cored:

AB2 Junta soldada com Arame Tubular Metal Cored na raiz e no acabamento

AB3 Junta soldada com Vareta TIG na raiz e Arame Tubular Metal Cored no acabamento

Juntas soldadas com Arame Tubular Rutílico:

AR2 Junta soldada com Arame tubular Rutílico na raiz e no acabamento

AR3 Junta soldada com Vareta TIG na raiz e Arame Tubular Rutílico no acabamento

As marcações nas juntas foram feitas com marcador industrial amarelo com tinta a base de epóxi para suportar a temperatura da junta durante a soldagem, conforme apresentado na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Foto destacando as marcações da junta (junta nº 2 soldada com arame tubular “metal cored” - AB2)

3.2 Material

Devido termos tido acesso e, ao alto custo da elaboração de uma EPS (Especificação de Procedimento de Soldagem), decidimos estabelecer os parâmetros de soldagem a partir das recomendações dos fabricantes e de experimentos realizados na prática. Para iniciarmos as atividades estabelecemos alguns critérios que serão apresentados a seguir.

3.2.1 Material de Base

O aço ASTM A-106 Gr.B caracteriza o tubo de alta qualidade com médio Carbono, acalmado com Silício, com variação dos diâmetros de 1/8" a 26", desenvolvido para a fabricação de tubos de aço carbono sem costura para condução fluidos que trabalham a temperaturas elevadas (limites máximos de temperatura de 430°C e 590°C segundo as normas ANSI B.31.1 e ANSI B.31.3 respectivamente) [5].

O material utilizado para este estudo foi um tubo com diâmetro nominal de 4", SCH 40, laminado, sem costura, fabricado pela da Vallourec & Mannesmann Tubes (V & M do Brasil S.A.), possuindo qualificação de Tri-norma atendendo as normas API-5L, ASTM-A-106 e ASTM-A-53 com grau B.

A composição química e propriedades mecânicas deste material são apresentadas nas tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente:

Tabela 3.1 Composição química do material (ASTM A-106 Gr.B Ed. 2008) % em massa

C	Mn	P	S	Si
0,30	0,29-1,06	0,035	0,035	0,10
Cr	Cu	Mo	Ni	V
0,40	0,40	0,15	0,40	0,08

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do material (ASTM A-106 Gr.B Ed. 2008)

Limite de Escoamento – LE (MPa)	Limite de Resistência – LR (MPa)	Relação LE/LR	Alongamento (%)
240	415	0,58	33

Como material de base foram utilizados recortes de 150 mm de comprimento, ficando a peça com um comprimento total de 300mm (ver figura 3.2). Os recortes foram retirados de uma vara de tubo de 6 m de comprimento.



Figura 3.2 - Foto de uma junta montada sobre o girador

3.2.2 Verificação do Carbono Equivalente (Ceq)

A partir do cálculo do carbono equivalente Ceq verifica-se a necessidade de pré e pós-aquecimento. Para tanto foi utilizada a equação formulada pelo IWW:

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

A necessidade de pré e pós aquecimento se dá a partir do CE > 0,53.

Conforme os dados coletados na tabela 3.1, obtivemos:

$$Ceq = 0,30 + \left\{ \frac{1,06}{6} + \frac{(0,4 + 0,15 + 0,08)}{5} + \frac{(0,4 + 0,4)}{15} \right\} = 0,656$$

O ceqTotal deverá ser maior que 0,25, do contrário não será possível calcular a temperatura de pré-aquecimento.

$$CeqTotal = 0,005 \times Ceq \times (\text{espessura da parede do tubo em mm}) = 0,005 \times 0,656 \times 6,02 = 0,02$$

Como o CeqTotal ficou abaixo de 0,25 não foi necessário fazer o pré-aquecimento.

3.2.3 Material de Adição

Abaixo serão descritos os materiais de adição utilizados nos cordões de solda das juntas.

3.2.3.1 Material utilizado para soldagem da raiz das juntas AR3 e AB3

Vareta TIG, cobreada, ligado ao cromo-molibidênio (1%Cr-0,5%Mo), classificação AWS/ASME SFA-5.18, diâmetro de 2,4 mm, destinado a soldagem de vasos e tubulações, as propriedades químicas estão na tabela 3.3 e mecânicas na tabela 3.4.

Tabela 3.3 Propriedades químicas da Vareta TIG – AWS/ASME SFA-5.28

Arame Comercial	C	Mn	Si	Cr	Mo
Tigrod 13.12 ESAB	0,10	1,00	0,60	1,2	0,5

Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas da Vareta TIG – AWS/ASME SFA-5.28

Limite de Escoamento LE (MPa)	Limite de Resistência LR (MPa)	Relação LE/LR	Alongamento (%)
560	720	0,78	26%

3.2.3.2 Material utilizado para soldagem da raiz e do acabamento da junta AB2 e no acabamento da junta AB3 soldada com Arame Tubular Metal Cored

Arame Tubular com enchimento metálico tipo “metal cored”, classificação ASME SFA-5.23, diâmetro de 1,2 mm, destinado a soldagem de estruturas diversas, cujas propriedades químicas estão na tabela 3.5 e mecânicas na tabela 3.6.

Tabela 3.5 - Propriedades químicas do Arame Tubular - ASME SFA-5.23

Arame Comercial	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu
OK Tubrod WS ESAB	0,03	1,10	0,55	0,50	0,45	0,55

Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas do Arame Tubular - ASME SFA-5.23

Limite de Escoamento – LE (MPa)	Limite de Resistência – LR (MPa)	Relação LE/LR	Alongamento (%)
550	620	0,89	25

3.2.3.3 Material utilizado para soldagem da raiz e no acabamento da junta AR2 e no acabamento da junta AR3 soldadas com Arame Tubular Metal Rutilico

Arame Tubular com enchimento Rutilico, classificação ASME SFA-5.20, diâmetro de 1,2 mm, destinado a soldagem de estruturas diversas, homologação ABS nº 3SA, 3YSA H10 (CO₂ e 75%Ar + 25% CO₂), suas propriedades químicas são apresentadas na tabela 3.7 e mecânicas na tabela 3.8.

Tabela 3.7 - Propriedades químicas do Arame Tubular - ASME SFA-5.20

Arame Comercial	C	Mn	Si
OK Tubrod 71 Ultra ESAB	0,055	1,50	0,60

Tabela 3.8 - Propriedades mecânicas do Arame Tubular - ASME SFA-5.20

Limite de Escoamento – LE (MPa)	Limite de Resistência – LR (MPa)	Relação LE/LR	Alongamento (%)
630	670	0,94	24

3.2.4 Gás de Proteção

Na soldagem por arame Tubular com proteção gasosa, a queima e vaporização do revestimento proporcionam a estabilização do arco elétrico, bem como a melhoria das características do metal depositado. No entanto, sendo pouca a quantidade de revestimento, a sua queima não permite obter o volume necessário de gases para proteção global do banho de fusão, sendo necessário utilizar uma proteção adicional de gás.

Os gases utilizados para soldagem com arame Tubular são basicamente os mesmos utilizados na soldagem MIG/MAG com arame sólido, sendo os mais utilizados o dióxido de carbono como gás ativo e Argônio ou Hélio como gases inertes, podendo também utilizar-se a mistura destes, de acordo com as especificações do fabricante do arame.

No nosso caso foi utilizado o gás Stargold TUB da White Martins, sendo este uma mistura de gases Argônio e o Dióxido de Carbono (Ar + 20-25% CO₂), com a vazão de 10 L/min. a pressão de 150 kgf/mm² para todos os passes.

Segundo o fabricante, as principais aplicações são:

- ✓ Indicado para soldagem de Arame Tubular gerando transferência spray;
- ✓ Indicado para soldagem de aço carbono e aço de baixa liga;

Vantagens e benefícios:

- ✓ Alta penetração;
- ✓ Baixa incidência de respingos;
- ✓ Excelente estabilidade do arco.

3.3 Equipamentos para soldagem com Arame Tubular

O equipamento para soldagem da raiz e acabamento das juntas AR2 e AB2, e do acabamento das juntas AR3 e AB3, foi utilizada estação de soldagem multi-processo modelo da Kamppi, gentilmente cedida pela escola técnica do SENAI do Cabo de Santo Agostinho – PE, ver figura 3.3.



Figuras 3.3 - Fotos da estação de soldagem fabricada pela Kemppi

3.3.1 Fonte

Para a execução da soldagem foi utilizada a fonte Pro 3200 Evolution da Kemppi com as seguintes características:

Faixa de corrente	A	5-320
Tensão	V	10-36
Ciclo de trabalho a 20°C	A	320 (100%)
Ciclo de trabalho a 40°C	A	320 (100%)
Voltagem de conexão 3~	V	400
Voltagem do circuito aberto	V	65
Grau de proteção		IP23C

3.3.2 Alimentador de Arame

O alimentador de arames utilizado foi o básico modelo ProMig 501 da Kemppi conforme figura 3.4 e características abaixo descritas:

Voltagem conexão	V DC	50
Potência Nominal	W	100
Ciclo de trabalho		
60 %	A	520
100 %	A	440
Princípio de operação		4 roldanas
Faixas de diâmetro do arame		
Aços, Aço Inox.	mm	0,6-2,4
Tubular	mm	0.8-2,4
Al	mm	1.0-2,4
Diâmetro Max./peso da Bobina	mm / kg	300 / 20
Velocidade do arame	m/min	0-18



Figuras 3.4 - Foto do alimentador de arame ProMig 501 da Kamppi

3.3.3 Tocha

Foi utilizada uma tocha modelo MB 36 KD (DIN EMN 439: 1994), refrigerada a gás com capacidade de 300 A com CO₂ e 270 A com Ar/CO₂, ciclo de trabalho de 60%, ver figura 3.5.



Figura 3.5 - Foto da tocha MB 36 KD refrigerada a gás

3.4 Equipamentos para soldagem com TIG

As soldas da raiz com TIG foram executadas com um retificador Origo Arc 456 da ESAB, gentilmente cedido pela escola técnica do SENAI do Cabo de Santo Agostinho – PE, ver figura 3.6 e características abaixo descritas:

Faixa de corrente/tensão	A / V	60 / 23 e 425 / 37	
Potência Aparente Nominal	KVA	37	
Ciclo de trabalho	60 %	A	300
	100 %	A	230



Figura 3.6 - Fotos do retificador Origo Arc 456 da ESAB, utilizado para soldagem das raízes das juntas com TIG.

3.5 Girador do Tubo

Para execução da experiência, foi desenvolvido o projeto e a fabricação de um equipamento girador de tubos com acionamento elétrico com inversor de frequência, de modo a obter-se um controle total da velocidade periférica da junta a ser soldada, ver figuras 3.7 e 3.8.

O projeto levou em consideração aspectos tais como:

- ✓ Girar tubos com diâmetros variando entre 3 e 12”;
- ✓ Comprimento das juntas de até 300 mm;
- ✓ Variação das velocidades periféricas (0,1 a 0,8 m/min.);
- ✓ Transportabilidade (peso máximo de 20 kgf).

A utilização do girador como ferramenta dos experimentos teve como objetivo, além do controle da velocidade periférica do tubo, a padronização das condições de soldagem (posição de soldagem, rotação do tubo, aterramento, posição do equipamento em relação ao soldador), de modo que pudessemos controlar o maior número de variáveis possíveis dos experimentos.

O projeto foi desenvolvido e doado pela Vórtice Engenharia, o acionamento e o sistema de controle por inversor de frequência foi doado pela SEW do Brasil e sua fabricação foi executada e o equipamento doado pela Metalúrgica Metalmaq Equipamentos Industriais Ltda.

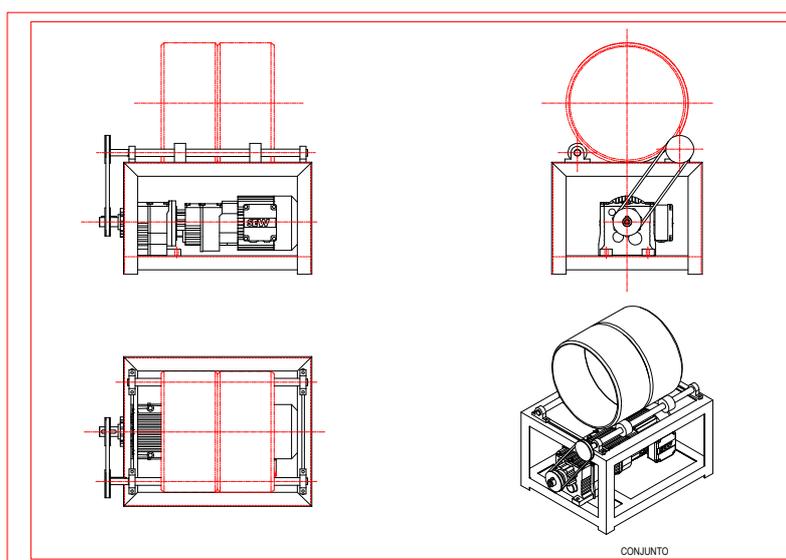


Figura 3.7 - Desenho em 2D e 3D do Girador (Projeto)

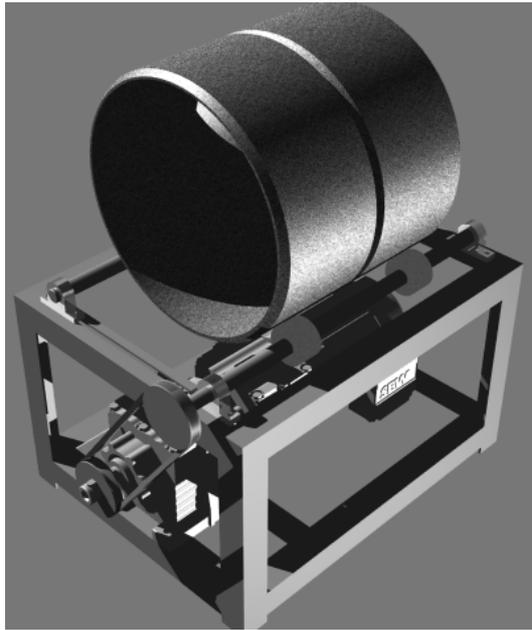


Figura 3.8 - Vista do desenho em 3D do Girador (Projeto)

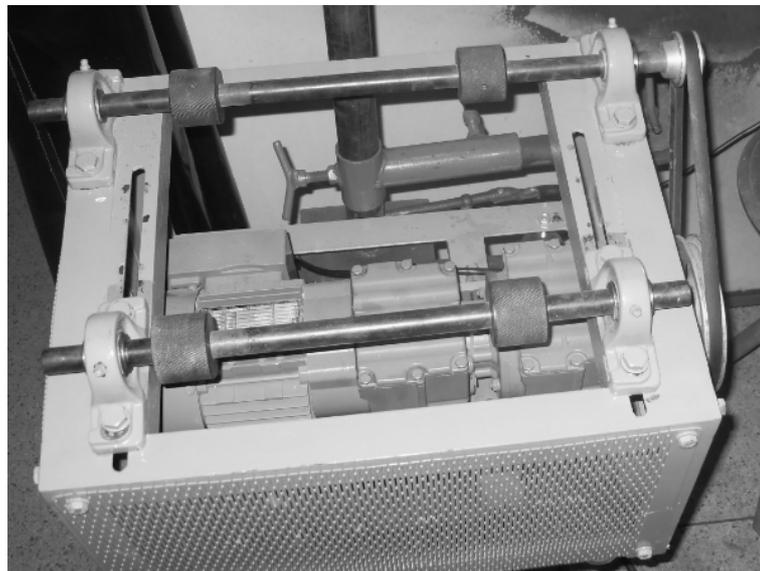


Figura 3.9 - Foto do Girador acionado por motoredutor e inversor de frequência (equipamento projetado e fabricado para a experiência)



Figura 3.10 - Foto do conjunto Girador e Estação de Solda

3.6 Planejamento Experimental

Os parâmetros de soldagem utilizados como referência para o caso em estudo, foram elaborados a partir da soldagem de várias juntas soldadas com os mesmos materiais em estudo, tomando como referência os dados fornecidos pelo fabricantes dos arames.

Para realização da solda da raiz, houve uma controvérsia, sobre qual o processo mais adequado para executá-la, pois achava-se que devido a pequena espessura do tubo em estudo (6,02 mm) e, devido a baixa diluição por parte do arame tubular, o mesmo não seria o mais adequado para esta função. Para dirimir a dúvida, foram soldadas várias juntas com a raiz em TIG e o acabamento em Arame Tubular.

3.6.1 Parâmetros de Soldagem da Raiz com TIG

Os parâmetros estabelecidos foram extraídos dos catálogos do fabricante dos consumíveis, ver tabelas 3.9 e 3.10.

Tabela 3.9 - Condições Gerais de Soldagem para o processo TIG

Material de Base	Diâmetro nominal	4" (114,3 mm externo)
	Espessura	6,02 mm (SCH. 40)
	Material	ASTM A-106 Gr.B
	Quantidade de juntas	2 (AB3 e AR3)
Método	Processo de Soldagem	TIG
	Posição de Soldagem	1G
	Direção de Soldagem da Raiz	Descendente
	Equipamento de Soldagem da Raiz	Origo Arc 456 ESAB
	Gás de Proteção	Argônio (100%) ONU 1006
	Forma de acoplamento	Ponto de solda
	Remoção do acoplamento	Não aplicável
	Método de limpeza do passe da Raiz	Escova manual
	Método de limpeza dos demais Passes	Escova manual

Tabela 3.10 Condições de Soldagem da Raiz por TIG

Descrição		Passe de Raiz
Consumível	Especificação AWS/ASME	SFA-5.28
	Marca comercial	Tigrod 13.12 ESAB
	Diâmetro (mm)	2,4
Parâmetros de Soldagem	Processo	TIG
	Polaridade	CC-
	Corrente de Base (A)	80
	Tensão (V)	23-28

3.6.2 Parâmetros de Soldagem com Arame Tubular com Enchimento Metálico “Metal Cored”

Para execução da soldagem das juntas foram utilizados os parâmetros apresentados nas tabelas 3.11 e 3.12.

Tabela 3.11 - Condições Gerais de Soldagem para Arame Tubular com Enchimento Metálico

Material de Base	Diâmetro nominal	4" (114,3 mm externo)
	Espessura	6,02 mm (SCH40)
	Material	ASTM A-106 Gr.B sem costura
	Quantidade de juntas	2 (AB2 e AB3)
Método	Processo de Soldagem	MAG – CC+
	Posição de Soldagem	5G
	Direção de Soldagem da Raiz	Ascendente
	Direção de Soldagem dos demais Passes	Ascendente
	Equipamento de Soldagem da Raiz	Kemppi Pro Evolutions 3200
	Equipamento de Soldagem dos demais Passes	Kemppi Pro Evolutions 3200
	Tocha	MB 36 KB
	Forma de acoplamento	Ponto de solda
	Remoção do acoplamento	Não aplicável
	Método de limpeza do passe da Raiz	Escova manual
	Método de limpeza dos demais Passes	Escova manual

Tabela 3.12 - Condições de soldagem por passe entre as mostras com Arame Tubular com Enchimento Metálico

Descrição		Passe de Raiz	Passe de Acabamento
Consumível	Especificação AWS/ASME	SFA-5.23	SFA-5.23
	Marca comercial	TUBROD WS (ESAB)	TUBROD WS (ESAB)
	Diâmetro (mm)	1,2	1,2
Parâmetros de Soldagem	Processo	FCAW	FCAW
	Polaridade	CC+	CC+
	Gás de Proteção	Ar + 20-25% CO2 ONU 1956	Ar + 20-25% CO2 ONU 1956
	Vazão do Gás (L/min.)	10	10
	Pressão do gás (kgf/cm ²)	150	150
	Tensão (V)	20	19
	Corrente (A)	120	130
	Velocidade do Arame (m/min.)	2,7	2,9
Taxa de Deposição (kg/h)	2,3	2,5	
Distância da Tocha ao Tubo (mm)	21	21	

3.6.3 Parâmetros de Soldagem com Arame Tubular Rutílico

Para execução da soldagem das juntas foram utilizados os parâmetros apresentados nas tabelas 3.13 e 3.14.

Tabela 3.13 - Condições Gerais de Soldagem com Arame Tubular Rutílico

Material de Base	Diâmetro nominal	4" (114,3 mm externo)
	Espessura	6,02 mm (SCH40)
	Material	ASTM A-106 Gr.B sem costura
	Quantidade de juntas	2 (AR2 e AR3)
Método	Processo de Soldagem	MAG – CC+
	Posição de Soldagem	5G
	Direção de Soldagem da Raiz	Ascendente
	Direção de Soldagem dos demais Passes	Ascendente
	Equipamento de Soldagem da Raiz	Kemppi Pro Evolutions 3200
	Equipamento de Soldagem dos demais Passes	Kemppi Pro Evolutions 3200
	Tocha	MB 36 KB
	Forma de acoplamento	Ponto de solda
	Remoção do acoplamento	Não aplicável
	Método de limpeza do passe da Raiz	Escova manual
	Método de limpeza dos demais Passes	Escova manual

Tabela 3.14 - Condições de soldagem por passe entre as amostras com Arame Tubular Rutílico

Descrição		Passe de Raiz	Passe de Acabamento
Consumível	Especificação AWS/ASME	SFA-5.20	SFA-5.20
	Marca comercial	TUBROD 71 ULTRA (ESAB)	TUBROD 71 ULTRA (ESAB)
	Diâmetro (mm)	1,2	1,2
Parâmetros de Soldagem	Processo	FCAW	FCAW
	Polaridade	CC+	CC+
	Gás de Proteção	Ar + 20-25% CO2 ONU 1956	Ar + 20-25% CO2 ONU 1956
	Vazão do Gás (L/min.)	10	10
	Pressão do gás (kgf/cm ²)	150	150
	Velocidade do Arame (m/min.)	2,7	2,9
	Tensão (V)	20	19
	Corrente (A)	100	85
Taxa de Deposição (kg/h)	2,3	2,5	
Distância da Tocha ao Tubo (mm)	20	20	

3.6.4 Preparação das Juntas

Os bizéis das juntas foram confeccionados através de torneamento, conforme as dimensões apresentadas na figura 3.11.

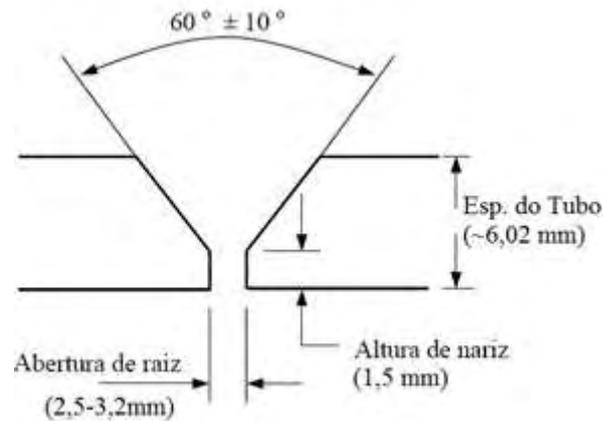


Figura 3.11 - Desenho da junta utilizada nos experimentos.

Devido a pequena espessura do tubo SCH.40 (6,02mm), tomou-se como procedimento não usar os lados externo e interno para montagem das juntas por entender-se que haveria uma perda substancial de material para o estudo em questão.

O acoplamento das peças para preparação da junta foram feitas por 4 (quatro) pontos de solda, distribuídos eqüidistantes circunferencialmente. Os pontos foram executados com o Eletrodo Arame Tubular Rutílico, ver Figura 3.12.



Figura 3.12 - Foto acoplamento das juntas feito por pontos de solda.

3.7 Acompanhamento da Soldagem

Para a identificação dos quadrantes foram feitas marcações com marcador industrial com os números de 1 a 4 onde ficam delineados os quadrantes para extração dos corpos de prova, após a soldagem de algumas juntas, e marcação do quadrante dói substituída por pontos conforme apresentado na figura 3.13, pois a marcação com número estava se deteriorando devido a temperatura da junta. Os pontos marcados foram colocados entre os traços que identificavam os pontos de solda para fixação das peças, de modo a identificar, após a soldagem, os quadrantes soldagem e os pontos de solda entre esses.



Figura 3.13 - Identificação dos quadrantes marcados nas juntas soldadas.



Figura 3.14 - Foto do painel de controle da fonte durante a soldagem.

3.7.1 Execução da Soldagem da Raiz

Para execução da soldagem da raiz as juntas foram limpas de qualquer elemento que pudesse prejudicar o processo. A limpeza interna foi feita com escova metálica e lixa e, a limpeza externa com lixadeira elétrica, ver Figura 3.15



Figura 3.15 - Foto do espaçador para execução dos pontos de acoplamento.

3.7.2 Execução de Soldagem do Enchimento e do Acabamento

As soldagens de enchimento e acabamento foram realizadas na Posição Plana 1G (QW 122.1), conforme o parágrafo QW-122 do ASME Seção 9 (edição 2000), onde “os tubos são colocados com os seus eixos no plano horizontal e são girados durante a soldagem, de forma que o metal de base seja depositado por cima.

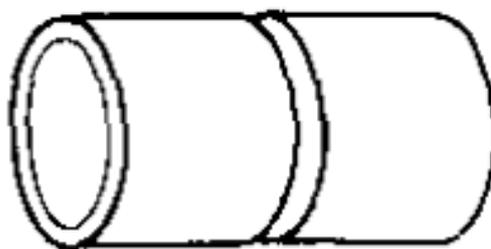


Figura 3.16 - Item (a) da figura QW-461-4 do ASME Seção 9
Posição 5G (Girando)



Figura 3.17 - Foto da tocha na posição de soldagem 5G (giro anti-horário).

3.8 Corpos de Prova

Devido ao pequeno diâmetro do tubo optou-se por fazer os corpos de prova de tração com a seção reduzida

3.8.1 Corpo de Prova para Ensaio de Tração

Devido ao pequeno diâmetro do tubo optou-se por fazer os corpos de prova de tração com a seção reduzida conforme proposto na figura QW-462.1 (c) da norma ASME Seção 9 e apresentado na figura 3.18.

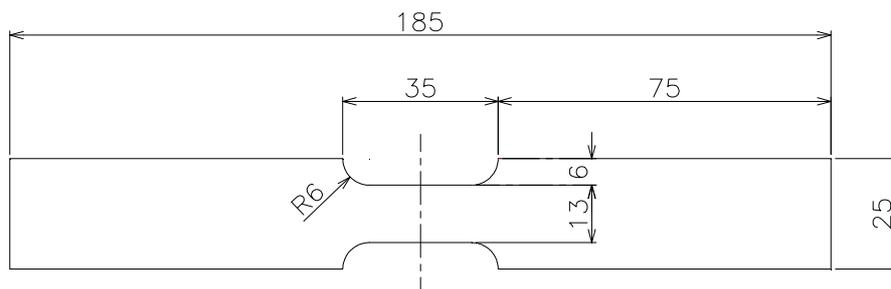


Figura 3.18 – Desenho do Corpo de Prova para Ensaio de Tração com Seção Reduzida (ASME Seção 9 Edição 2003)

3.8.2 Corpo de Prova para Ensaio de Macrografia, Micrografia e Microdureza

Os corpos de prova para ensaios de macro e micrografia e microdureza foram extraídos das juntas soldadas e preparados para ficarem nas dimensões de 10mm de largura e 70mm de comprimento, tendo sido marcados nas faces externas dos tubos e polidos em uma das faces cortadas (ver figuras 3.19 e 3.20).

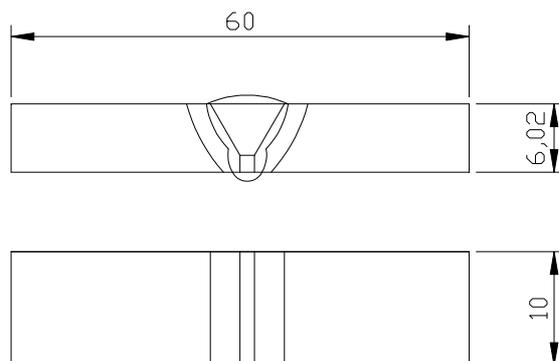


Figura 3.19 – Desenho do Corpo de Prova para macrografia e micrografia e ensaio de microdureza.



Figura 3.20 - Foto do corpo de prova para macrografia, micrografia e microdureza.

3.8.3 Critérios para Retirada dos Corpos de Prova

Devido ao pequeno diâmetro do tubo optou-se por fazer os corpos de prova de tração com a seção reduzida conforme proposto na figura QW-463.1 (d) da norma ASME Seção 9 e apresentado na figura 3.21 do presente trabalho.

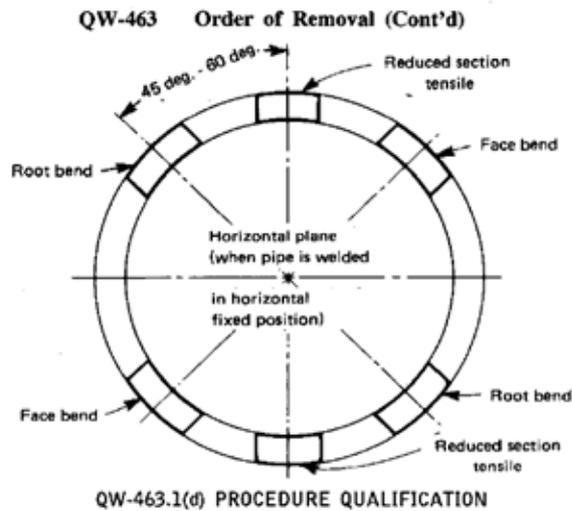


Figura 3.21 – Posição de retirada dos Corpos de Prova para Ensaio de Tração (ASME Seção 9 Edição 2003)

3.8.4 Marcação dos Corpos de Prova

Para manipulação e rastreamento dos corpos de prova, foi elaborado um procedimento para marcação dos mesmos conforme descrito abaixo:

Corpos de prova para ensaio de Tração:

B21T Corpo de prova para ensaio de Tração extraído da junta soldada com arame tubular com enchimento metálico (**B**), junta nº 2, 1º quadrante da junta soldada.

Corpos de prova para ensaios de Microdureza, Macrografia e Micrografia:

R34M Corpo de prova para ensaio de Macrografia, Micrografia e Microdureza extraído da junta soldada com arame tubular com enchimento rutilico (**R**), junta nº 3, 4º quadrante da junta soldada.

3.8.5 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram executados conforme a ASME Seção 9, em uma máquina de tração eletromecânica de marca EMIC DL 10000 com célula de carga Trd 28 com capacidade de 100 kN, a velocidade de deformação foi de 3 mm/min. com os dados foram capturados através do soft Tesc versão 3.01 no computador adaptado ao equipamento.

Foram gerados um gráfico com as curvas dos ensaios de tração e uma tabela com todos os dados capturados.



Figura 3.22 – Foto da Máquina de Tração EMIC Linha DL 10.000

3.8.6 Ensaio de Microdureza

Para as condições dos ensaios de microdureza foi utilizada uma carga de 980 mN, com penetrador Vickers, com tempo de penetração de 20s e de permanência de carga de 30 s para todas as amostras. Executado no micrômetro da marca Shimadzu HVM 2T conforme figura 3.23.



Figura 3.23 - Foto do microdurômetro Shimadzu.

A dureza de um metal pode ser determinada por meio de dois tipos de ensaio: microdureza e macrodureza. Foram realizados ensaios de microdureza Vickers. No ensaio de dureza Vickers (HV) o penetrador é uma pirâmide de diamante de base quadrada, com um ângulo de 136° entre as faces opostas.

Para cada corpo de prova foram feitas medições conforme apresentadas na figura 3.24.

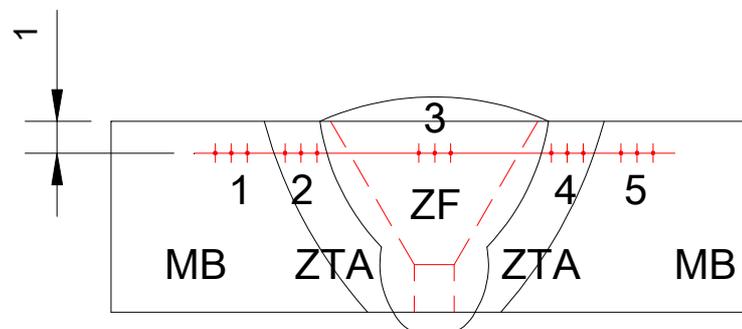


Figura 3.24 – Esquema da marcação dos pontos para ensaio de microdureza.

3.8.7 Caracterização das Macroestruturas

A preparação dos corpos de prova foi executada com o lixamento seguindo as granulometrias das lixas na seqüência de 300, 400, 600, 1200 e 1500. O polimento foi concluído com polimento num disco de tecido e colocação de pasta abrasiva de diamante com granulometria de 3, 1 e $\frac{1}{4}$ μm . Ao termino do polimento o ataque químico foi realizado com Nital com 2% de concentração em um tempo máximo de 15 segundos.

As macrografias foram executadas em um microscópio ótico Omãno com lentes 0,75x a 3,5x, ver figura 3.25.

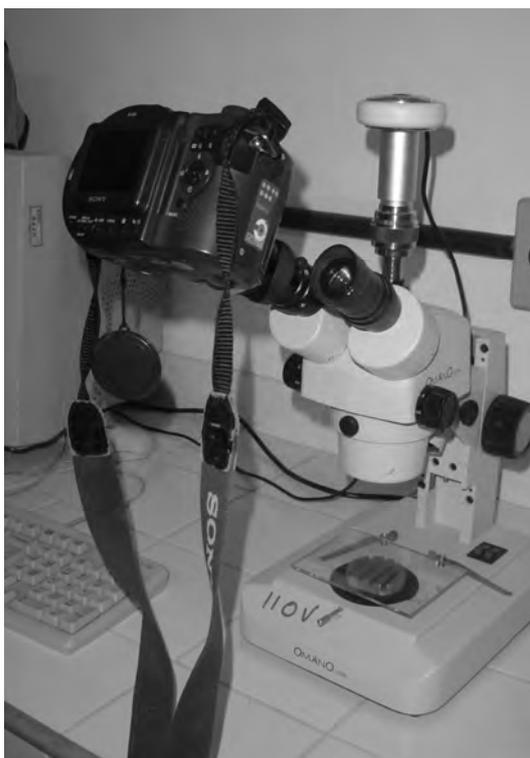


Figura 3.25 – Foto do microscópio utilizado para as macrografias.

3.8.8 Caracterização das Microestruturas

As micrografias foram executadas em um microscópio ótico Olympus BX51M com lentes 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x, ver figura 3.26.

As os pontos das regiões micrografadas estão apresentados na figura 3.27, foram elaboradas fotografias com 50x, 200x e 500x dos pontos onde observou-se maior heterogeneidade das estruturas.



Figura 3.26 – Foto do microscópio utilizado para as micrografias.

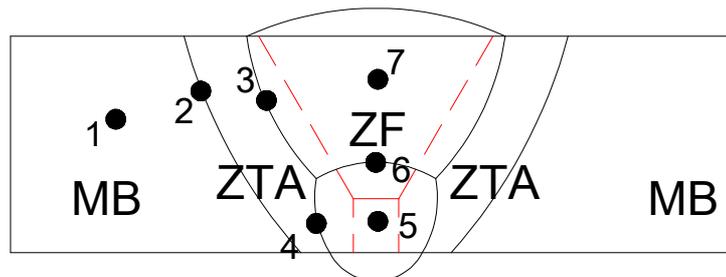


Figura 3.27 – Esquema da marcação dos pontos para a micrografia.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Parâmetros de soldagem

Foi utilizada corrente contínua com eletrodo negativo (CCEN - Polaridade direta), sendo que estas características de operação são determinadas pelo fabricante dos arames. O tipo de corrente e sua polaridade afetam a forma e dimensões da poça de fusão, a estabilidade do arco e a transferência de metal de adição. Geralmente, a polaridade direta (CCEN) produz maior penetração [14].

Houveram várias dificuldades quanto a utilização dos parâmetros de soldagem estabelecidos pelo fabricante, a começar pelos valores da corrente que quando utilizados resultaram em grandes taxas de diluição ocasionando um alargamento da junta (figura 4.1), e aporte térmico alto provocando perfurações do tubo (figura 4.2) e irregularidades na penetração da raiz (figura 4.3).

As juntas soldadas a partir dos parâmetros apresentados pelo fabricante dos arames foram analisadas in loco, junto com o soldador, onde foram vistos os aspectos operacionais tais como aporte térmico, velocidade do arame, rotação do tubo, quantidade e pressão do gás, as influências de cada variável foram discutidas e, aos poucos, foram sendo estabelecidos novos parâmetros conforme foram percebidas melhorias nos aspectos das juntas.

A princípio foi constatado, conforme foram sendo feitos os testes, que o Arame Tubular com enchimento Metálico (metal cored), apresentou melhores condições de soldagem, sobretudo quanto a menor quantidade de escória gerada, a maior estabilidade da tensão em função da corrente aplicada e ao controle da taxa de deposição. Tudo isso contribuiu para que os parâmetros fossem mais facilmente estabelecidos.

O Arame Rutilico gerou mais dificuldades, percebeu-se que pequenas variações da velocidade do arame contribuíam significativamente na variação da tensão e, conseqüentemente, no aporte térmico.

Após várias tentativas, foram estabelecidas e executadas as soldagens das juntas AR1 e AB1 conforme os parâmetros apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2, onde, a partir da sua utilização foram verificados e determinados os melhores condições que serviram como base para soldagem das juntas finais (AR2-AR3, AB2-AB3).

Havia dúvida quanto a influência da velocidade do arame na qualidade da solda, portanto, optamos por executar o passe de acabamento com a velocidade do arame diferente para cada dois quadrantes, 1º e 2º quadrantes com 3,2 m/s e 3º e 4º com 3,0 m/s.



Figura 4.1 - Foto da junta onde observa-se a perfuração das bordas da junta.



Figura 4.2 - Foto da junta onde observa-se a perfuração do material de base.

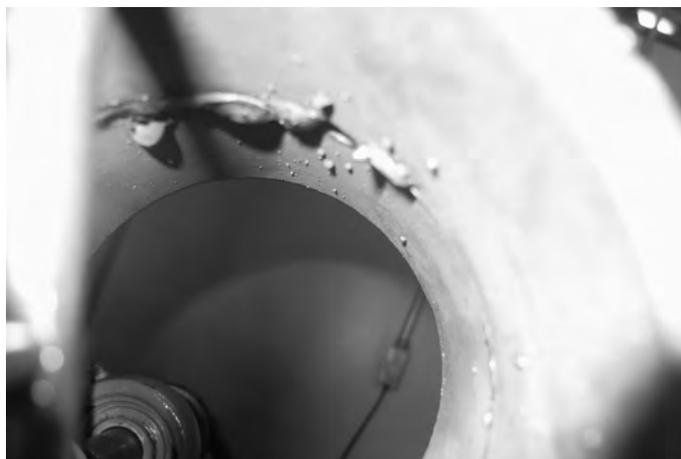


Figura 4.3 - Foto da junta soldada, onde observa-se penetração irregular da raiz.

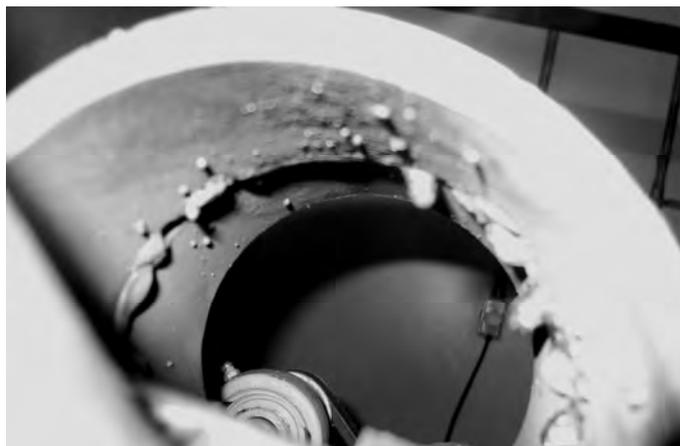


Figura 4.4 - Foto da junta soldada, onde observa-se penetração irregular da raiz.

Estão apresentadas nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7 as juntas soldadas com o Arame Tubular com enchimento Rutílico e nas figuras 4.8, 4.9 e 4.10 as juntas soldadas com Arame Tubular Metálico, executadas a partir dos parâmetros estabelecidos nas tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados na soldagem preliminares da junta AR1

JUNTA	PASSE	TIPO ARAME	ENCHIMENTO	Ømm	I	U	Vel. Tubo	Vel. Arame
					A	V	m/min.	m/min.
AR11	RAIZ	71 ULTRA	RUTÍLICO	1,2	101,0	20,0	0,117	3,60
	ENCH/ACAB				105,0	19,0	0,143	3,80
AR12	RAIZ	71 ULTRA	RUTÍLICO	1,2	83,0	20,0	0,117	3,00
	ENCH/ACAB				87,0	19,0	0,143	3,20
AR13	RAIZ	71 ULTRA	RUTÍLICO	1,2	67,0	20,0	0,117	2,40
	ENCH/ACAB				73,0	19,0	0,143	2,60
AR14	RAIZ	71 ULTRA	RUTÍLICO	1,2	66,0	18,0	0,117	2,40
	ENCH/ACAB				68,0	21,0	0,143	2,60

Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados na soldagem preliminares da junta AB1

JUNTA	PASSE	TIPO ARAME	ENCHIMENTO	Ømm	I	U	Vel. Tubo	Vel. Arame
					A	V	m/min.	m/min.
AB11	RAIZ	WS	METÁLICO	1,2	146,0	20,0	0,117	3,60
	ENCH/ACAB				151,0	19,0	0,143	3,80
AB12	RAIZ	WS	METÁLICO	1,2	147,0	20,0	0,117	3,00
	ENCH/ACAB				128,0	19,0	0,143	3,20
AB13	RAIZ	WS	METÁLICO	1,2	98,0	20,0	0,117	2,40
	ENCH/ACAB				107,0	19,0	0,143	2,60
AB14	RAIZ	WS	METÁLICO	1,2	106,0	18,0	0,117	2,40
	ENCH/ACAB				106,0	21,0	0,143	2,60



Figura 4.5 - Foto da junta AR1, 2º quadrante, vista externa da raiz da solda (Arame Rutílico).



Figura 4.6 - Foto da junta AR1, 2º quadrante, vista interna da raiz da solda (Arame Metálico).

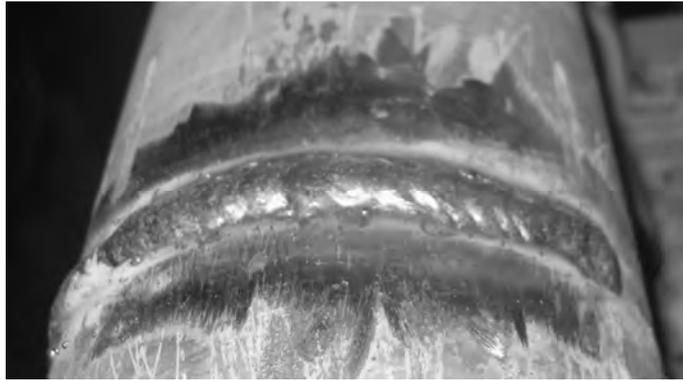


Figura 4.7 - Foto da junta AR1, 2º quadrante, vista do cordão de enchimento/acabamento (Arame Rutílico).

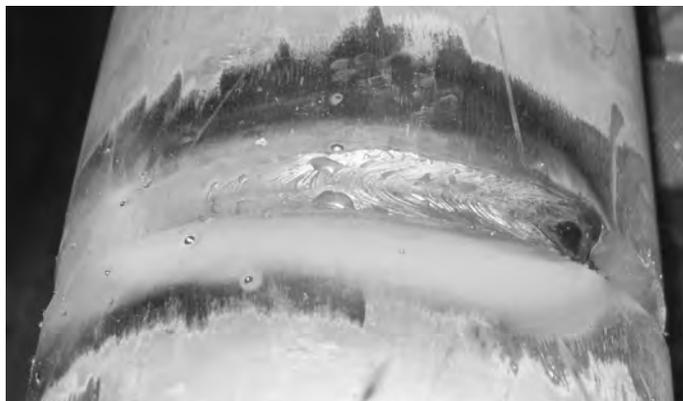


Figura 4.8 - Foto da junta AB1 2º quadrante, vista externa da raiz da solda (Arame Metálico).

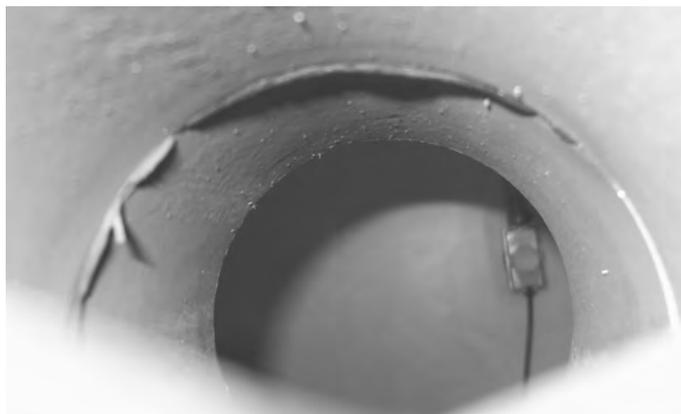


Figura 4.9 - Foto da junta AR1, 2º quadrante, vista interna da raiz da solda (Arame Metálico).

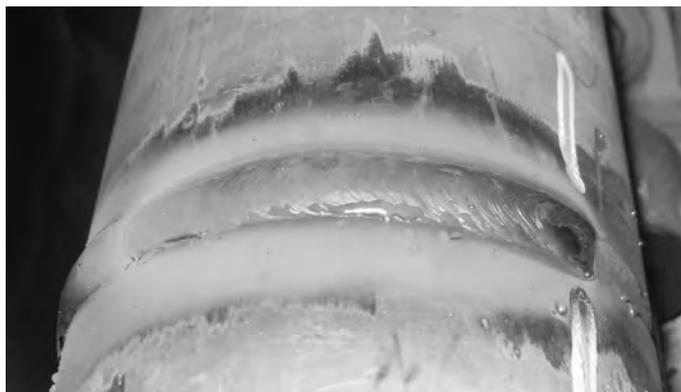


Figura 4.10 - Foto da junta AB1, 2º quadrante, vista do cordão de enchimento/acabamento (Arame Metálico).

Após a análise das juntas soldadas, foram analisadas visualmente quais as melhores soldas e definidos quais os parâmetros mais adequados para a soldagem das juntas definitivas, observamos que, coincidentemente, os padrões utilizados nos segundos quadrantes foram os que resultaram em uma solda de melhor qualidade e foram escolhidos como padrão para o estabelecimento dos parâmetros apresentados nas tabelas 4.3 e 4.4.

Tabela 4.3 - Parâmetros utilizados na soldagem das juntas com Arame Tubular com enchimento metálico "Metal Cored" - AB2 e AB3

JUNTA	PASSE	TIPO ARAME	ENCHIMENTO	Ømm	I	U	Vel. Tubo	Vel. Arame
					A	V	m/min.	m/min.
AB21	RAIZ	WS	METÁLICO	1,2	119,0	20,0	0,117	3,00
	ENCH/ACAB				129,0	19,0	0,143	3,20
AB22	RAIZ	WS	METÁLICO	1,2	119,0	20,0	0,117	3,00
	ENCH/ACAB				129,0	19,0	0,143	3,20
AB23	RAIZ	WS	METÁLICO	1,2	119,0	20,0	0,117	3,00
	ENCH/ACAB				129,0	19,0	0,143	3,00
AB24	RAIZ	WS	METÁLICO	1,2	119,0	20,0	0,117	3,00
	ENCH/ACAB				129,0	19,0	0,143	3,00
AB31	RAIZ	13.12	VARETA	2,4	95,0			
	ENCH/ACAB	WS	METÁLICO	1,2	130,0	19,00	0,14	3,20
AB32	RAIZ	13.12	VARETA	2,4	95,0			
	ENCH/ACAB	WS	METÁLICO	1,2	130,0	19,00	0,14	3,20
AB33	RAIZ	13.12	VARETA	2,4	95,0			
	ENCH/ACAB	WS	METÁLICO	1,2	130,0	19,00	0,14	3,00
AB34	RAIZ	13.12	VARETA	2,4	95,0			
	ENCH/ACAB	WS	METÁLICO	1,2	130,0	19,00	0,14	3,00

Tabela 4.4 - Parâmetros utilizados na soldagem das juntas com Arame Tubular com enchimento Rutílico – AR2 e AR3

JUNTA	PASSE	TIPO ARAME	ENCHIMENTO	Ømm	I	U	Vel. Tubo	Vel. Arame
					A	V	m/min.	m/min.
AR21	RAIZ	71 ULTRA	RUTÍLICO	1,2	86,0	20,0	0,117	3,00
	ENCH/ACAB				83,0	19,0	0,143	3,20
AR22	RAIZ	71 ULTRA	RUTÍLICO	1,2	86,0	20,0	0,117	3,00
	ENCH/ACAB				83,0	19,0	0,143	3,20
AR23	RAIZ	71 ULTRA	RUTÍLICO	1,2	84,0	20,0	0,117	3,00
	ENCH/ACAB				83,0	19,0	0,143	3,00
AR24	RAIZ	71 ULTRA	RUTÍLICO	1,2	84,0	20,0	0,117	3,00
	ENCH/ACAB				83,0	19,0	0,143	3,00
AR31	RAIZ	13.12	VARETA	2,4	90,0			
	ENCH/ACAB	71 ULTRA	RUTÍLICO	1,2	88,0	19,00	0,14	3,20
AR32	RAIZ	13.12	VARETA	2,4	90,0			
	ENCH/ACAB	71 ULTRA	RUTÍLICO	1,2	88,0	19,00	0,14	3,20
AR33	RAIZ	13.12	VARETA	2,4	90,0			
	ENCH/ACAB	71 ULTRA	RUTÍLICO	1,2	85,0	19,00	0,14	3,00
AR34	RAIZ	13.12	VARETA	2,4	90,0			
	ENCH/ACAB	71 ULTRA	RUTÍLICO	1,2	85,0	19,00	0,14	3,00

4.2 Resultados dos ensaios de tração

Os ensaios de tração foram executados para obtenção de dados que possibilitassem analisar a influência dos dois tipos de arames no comportamento da junta soldada quando submetida ao esforço de tração.

No gráfico 4.1 são apresentadas as curva de Tensão x Deformação de cara ensaio, e na tabela 4.5 são correlacionados os ensaios com os corpos de prova ensaiados.

Após realizados os ensaios, os corpos de prova foram organizados conforme os arame tubular empregado, ver figura 4.11, onde foi feita uma análise visual para verificação e identificação das características de cada fratura.

Como se pôde observar, os corpos de prova de tração tiveram fratura dúctil, por apresentar grande deformação plástica típica de um material dúctil, praticamente todas as amostras romperam fora da ZTA (zona termicamente afetada) na região do MB. Esse tipo de fratura é conhecida por taça e o cone é típico de metais dúcteis policristalinos, (ver figura 4.12). Excetua-se desta análise o corpo de prova B22T que apresenta uma cavidade na região da fratura resultante do desprendimento do material, conforme mostrado na figura 4.13.

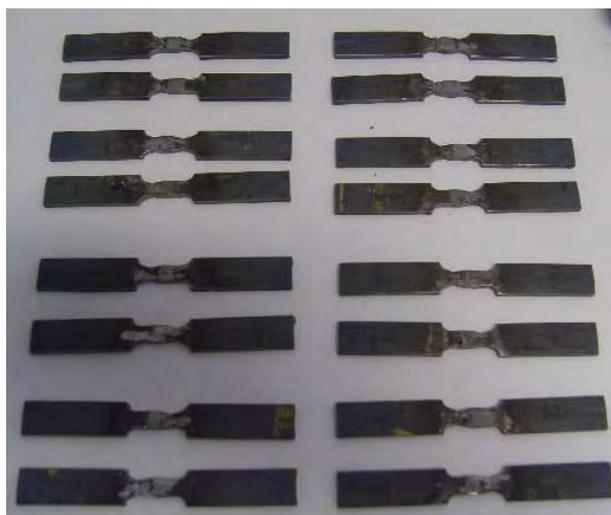


Figura 4.11 - Foto dos corpos de prova após o ensaio de tração, agrupados para análise visual das fraturas e outros aspectos

Gráfico 4.1 – Gráfico do Ensaio de Tração dos Corpos de Prova (máquina Emic DL 1000 – programa Test versão 3.01 – célula Trd 28)

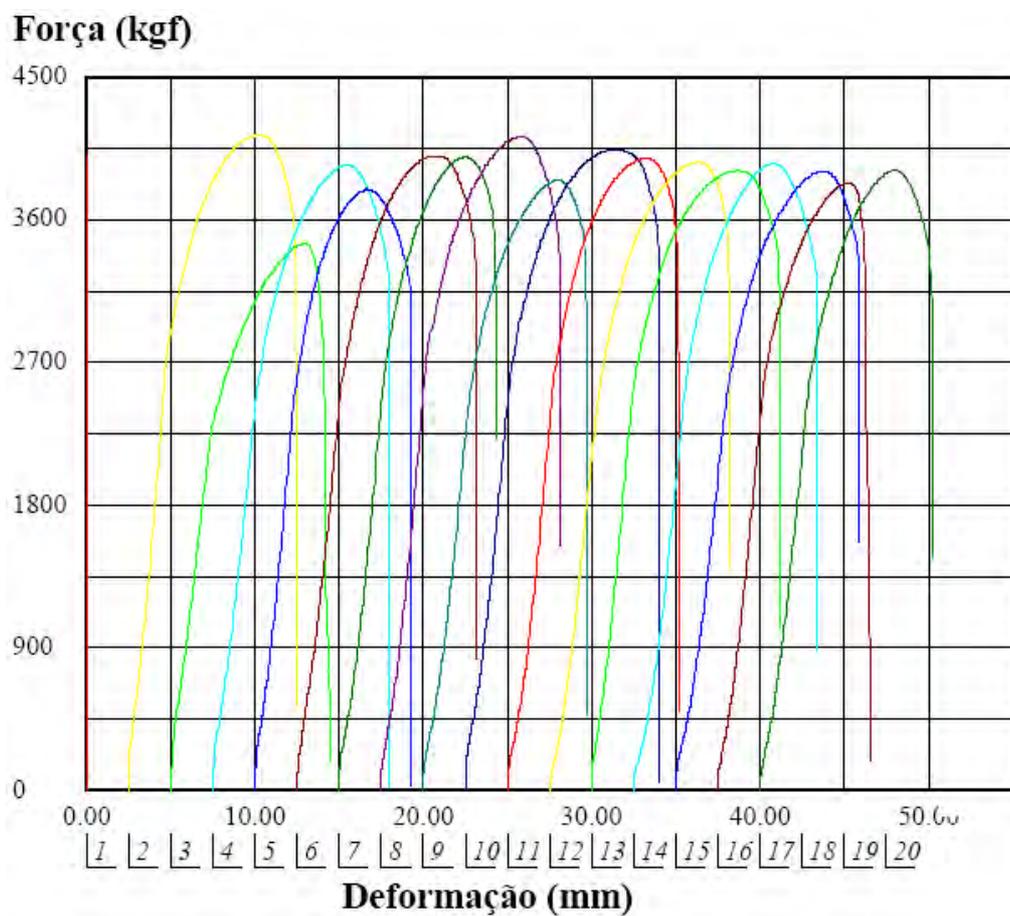


Tabela 4.5 – Identificação dos ensaios e respectivos corpos de prova

Nº do Ensaio	CP	Nº do Ensaio	CP
2	<i>B33T</i>	10	<i>B24T</i>
3	<i>B34T</i>	11	<i>B22T</i>
4	<i>R31T</i>	12	<i>B23T</i>
5	<i>R24T</i>	13	<i>B31T</i>
6	<i>R23T</i>	14	<i>R34T</i>
7	<i>R21T</i>	15	<i>R33T</i>
8	<i>R32T</i>	16	<i>R22T</i>
9	<i>B21T</i>	17	<i>B32T</i>

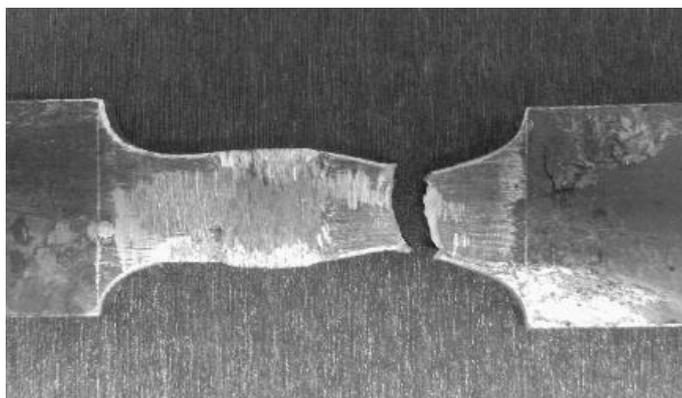


Figura 4.12 - Foto da fratura do corpo de prova R31T



Figura 4.13 - Foto da fratura do corpo de prova B22T

As propriedades consideradas de interesse para análise deste trabalho foram coletados da norma API 5L (2000) para especificação do material. São elas: Limite de resistência (LR), limite de escoamento (LE) e alongamento percentual (ϵ).

Os resultados do limite de resistência e limite de escoamento foram avaliados em termos dos requisitos especificados pela norma API 5L (2000), para análise de comportamento do material. Para validação dos ensaios de tração, foi utilizada a norma API 1104 (1994) requisitos 2.6.2.3 e 3.5.3. Estes requisitos são considerados suficientes para analisar essas duas propriedades, porque a região que apresentou o comportamento crítico foi a do metal de base (MB) e não a junta soldada (ZF e ZTA), que demonstraram ter maior resistência, exceto o corpo de prova R31T que teve sua ruptura na ZTA (ver figura 4.14), aparentemente por defeito de falta de fusão.

4.2.1 Resultados do limite de resistência LR

Analisando os dados da tabela 4.6 e 4.7, e dos gráficos 4.2 e 4.3, observamos que todos os valores do limite de resistência estão acima do mínimo 415 MPa, requerido pela norma ASTM A106, o que nos faz crer que de modo geral o material de base utilizado teve sua composição química alterada para valores, provavelmente influenciado pela soldagem, com a difusão do material do material de solda no sentido do metal de base.

As juntas totalmente soldadas com arame metálico (AB2) tiveram o limite de resistência com um diferencial de valores menor que os da soldada com vareta TIG na raiz e enchimento com arame rutilico (AB3).

Os dois arames tubulares (rutilico e metálico) utilizados possuem suas propriedades mecânicas de limite de resistência (670 e 620 MPa, respectivamente), bem a cima do metal de base cujo limite de resistência é de 415 MPa.

Os valores apresentados no ensaio de tração, em todas as juntas, teve como média 466,73 MPa, acima do metal de base, o que demonstra a influência destes valores na definição da região de ruptura do material o que é ocasionado pela abundância de elementos de liga do metal de solda e que tendem a promover microestruturas mais resistentes.

Tabela 4.6 - Média dos resultados do limite de resistência do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Metálico

CP	<i>Limite de Resistência LR</i> (MPa)
B21T/B22T	474,31
B23T/B24T	470,57
B31T/B32T	464,61
B33T/B34T	473,48
MB	456,84

Gráfico 4.2 - Média dos resultados do limite de resistência LR do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Metálico

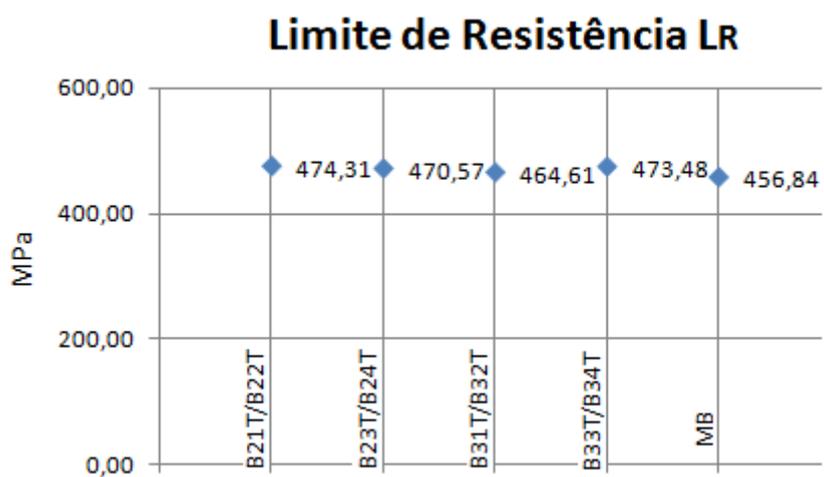
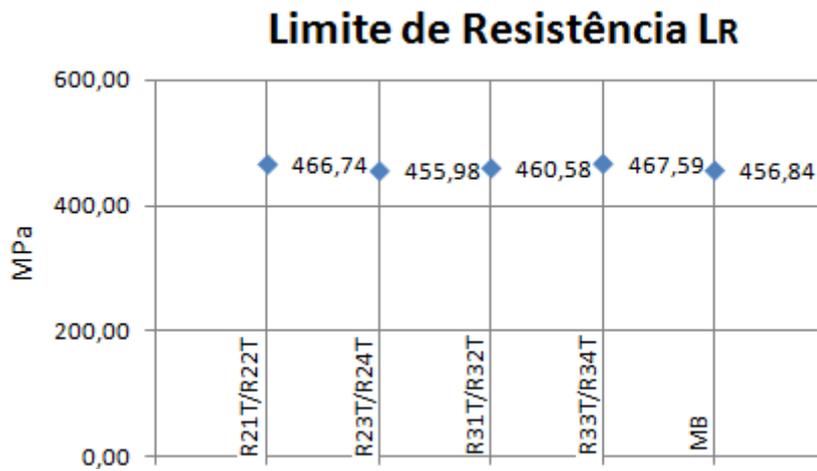


Tabela 4.7 - Média dos resultados do limite de resistência do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Rutilico

CP	<i>Limite de Resistência LR</i> (MPa)
R21T/R22T	466,74
R23T/R24T	455,98
R31T/R32T	460,58
R33T/R34T	467,59
MB	456,83

Gráfico 4.3 - Média dos resultados do limite de resistência LR do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Metálico



4.2.2 Resultados do Limite de Escoamento LE

Os limites de escoamento de 630 e 550 MPa para os arames rutilico e metálico, respectivamente, tem seus valores bem a cima do metal de base cujo limite de escoamento do material deve estar entre 240 MPa (mínimo) e 448 MPa (máximo).

Para as soldas realizadas com os dois diferentes tipos arames tubulares, os resultados dos ensaios de tração para análise do limite de escoamento (LE) são apresentados na tabela 4.8 e 4.9 e nos gráficos 4.4 e 4.5.

Tabela 4.8 - Média dos resultados do limite de escoamento do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Metálico

CP	Limite de Escoamento LE (MPa)
B21T/B22T	315,25
B23T/B24T	310,79
B31T/B32T	312,16
B33T/B34T	317,64
MB	288,59

Gráfico 4.4 - Média dos resultados do limite de escoamento do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Metálico

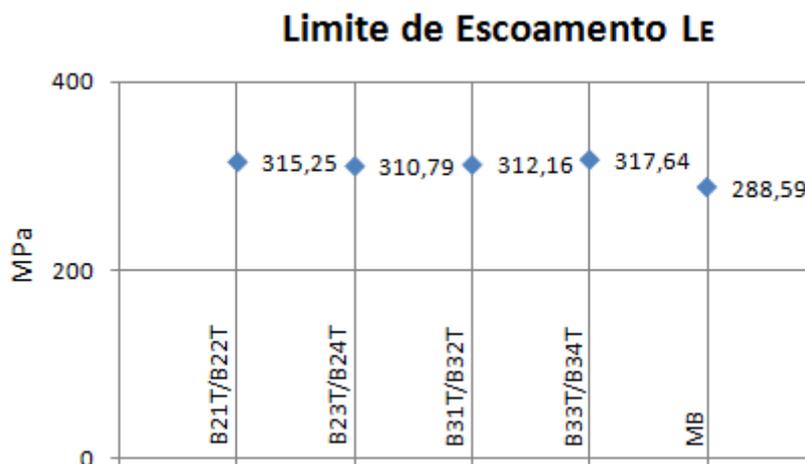
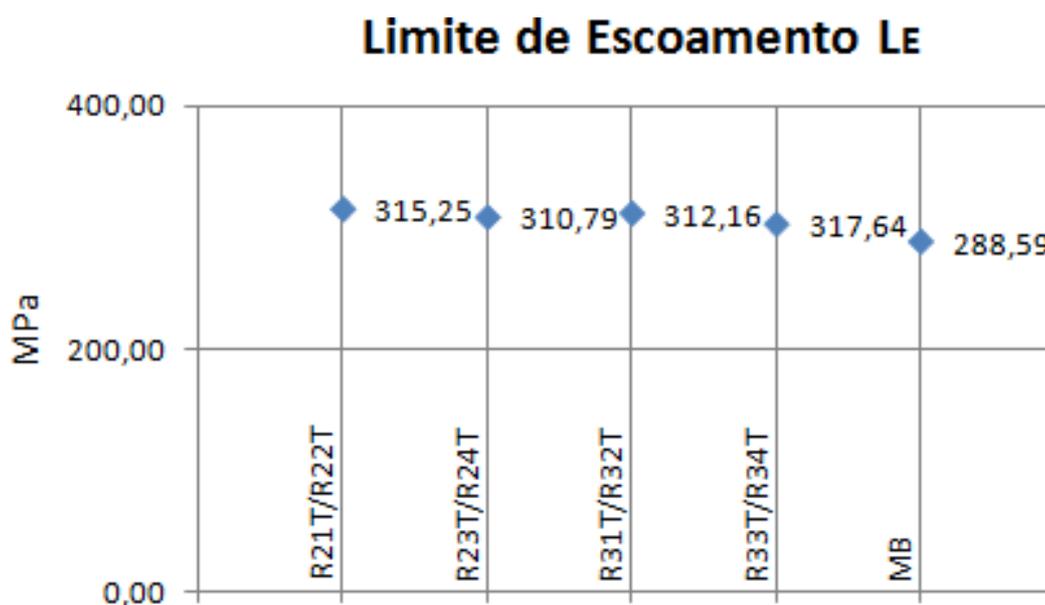


Tabela 4.9 - Média dos resultados do limite de escoamento do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Rutílico

CP	Limite de Escoamento LE (MPa)
R21T/R22T	314,83
R23T/R24T	308,33
R31T/R32T	311,55
R33T/R34T	302,78
MB	288,59

Gráfico 4.5 - Média dos resultados do limite de escoamento do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Rutílico



Analisando os dados das tabelas 4.8 e 4.9, observamos que os valores do limite de escoamento estão com suas médias bem próximas, o que pode caracterizar que o limite de escoamento não foi influenciado pela variedade de tipos de arames e, aparentemente pelos procedimentos executados na soldagem das juntas, ou seja, mesmo não tendo havido pré e pós-aquecimento, as temperaturas alcançadas durante a soldagem parecem não ter influenciado na ductibilidade dos materiais soldados.

4.1.3 Resultados do alongamento ϵ

O alongamento percentual do corpo de prova do material de base sem solda teve um valor médio de 66,32%, bem maior que os valores apresentados nos corpos de prova das juntas soldadas que tiveram valor máximo de 53,51%. O que comprova, mais uma vez, a diminuição da ductibilidade apresentada no ensaio de do módulo de elasticidade.

Tabela 4.10 - Média dos resultados do módulo de elasticidade do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Metálico

CP	Alongamento ϵ (%)
B21T/B22T	45,62
B23T/B24T	53,10
B31T/B32T	51,98
B33T/B34T	51,88
MB	66,32

Gráfico 4.6 - Média dos resultados do alongamento do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Metálico

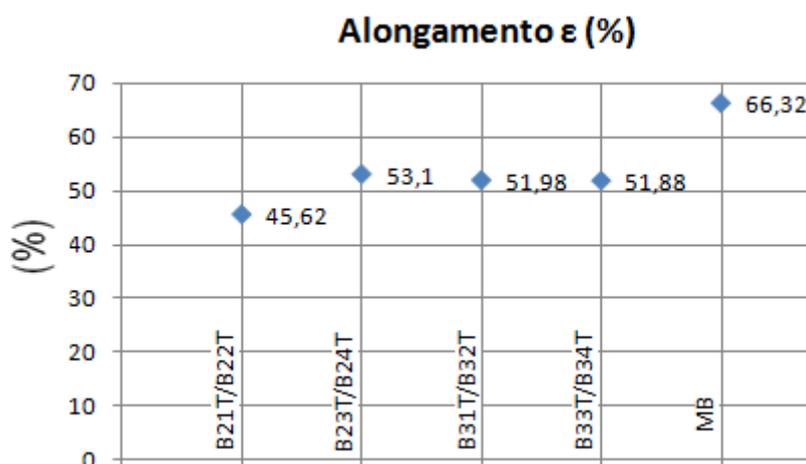
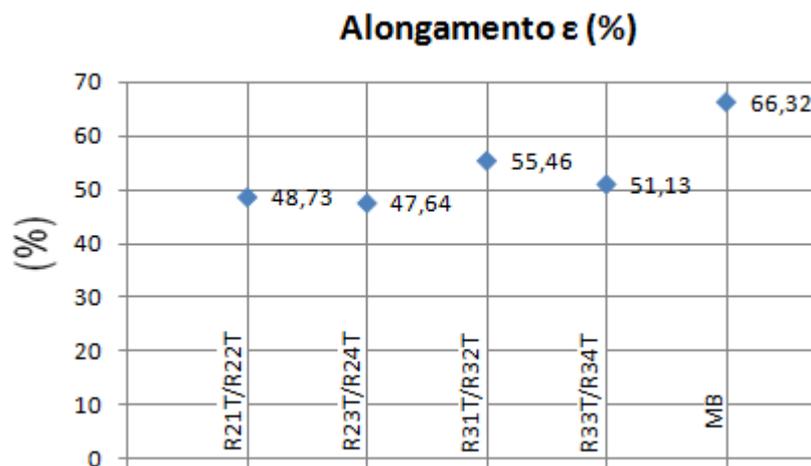


Tabela 4.11 - Gráfico 4.5 - Média dos resultados do módulo de elasticidade do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Rutilico

CP	<i>Alongamento ϵ</i> (%)
R21T/R22T	48,73
R23T/R24T	47,64
R31T/R32T	55,46
R33T/R34T	51,13
MB	66,32

Gráfico 4.7 - Média dos resultados do alongamento do ensaio de tração das juntas soldadas com Arame Tubular Rutilico



4.3 Ensaio de Microdureza

Para cada corpo de prova foram feitas medições conforme apresentadas na figura 3.24.

A tabela 4.12 e o gráfico 4.8 apresentam os resultados dos ensaios de microdureza realizados nas soldas executadas com arame tubular com enchimento metálico e a tabela 4.13 e o gráfico 4.9 apresentam os resultados dos ensaios de microdureza realizados nas soldas executadas com arame tubular com enchimento rutilico.

Observou-se que as regiões das soldas ZF e ZTA tiveram suas durezas com valores maiores que os do MB, caracterizado que pelo aumento dos grãos dessas regiões.

Tabela 4.12 - Média dos resultados da microdureza Vickers das juntas soldadas com Arame Tubular Metálico

CP	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
B21T/B22T	187,50	202,67	205,83	204,00	192,17
B23T/B24T	181,33	198,83	219,83	187,33	189,33
B31T/B32T	189,17	185,33	219,67	208,00	183,33
B33T/B34T	184,33	187,33	210,00	192,83	187,17

Gráfico 4.8 - Média dos resultados da microdureza Vickers das juntas soldadas com Arame Tubular Metálico

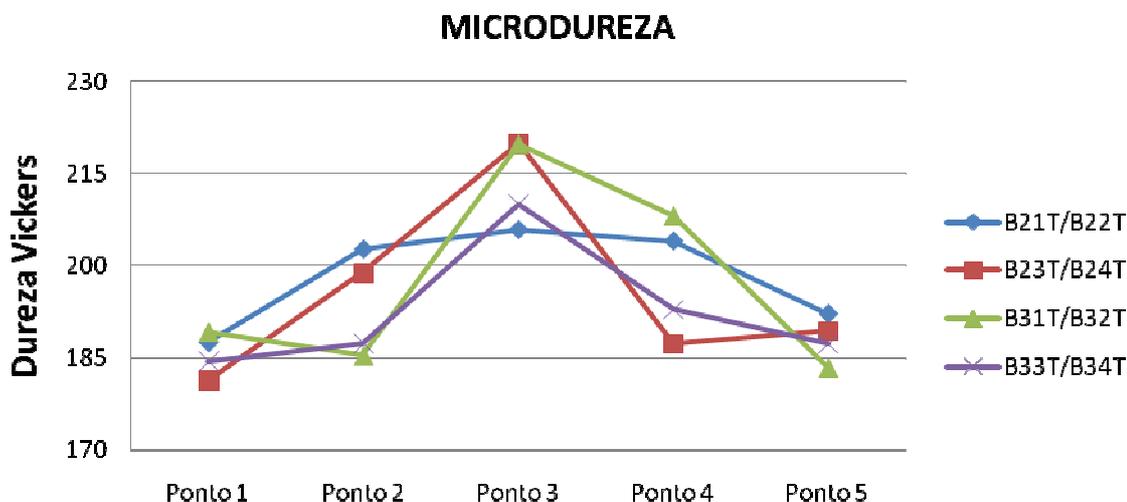
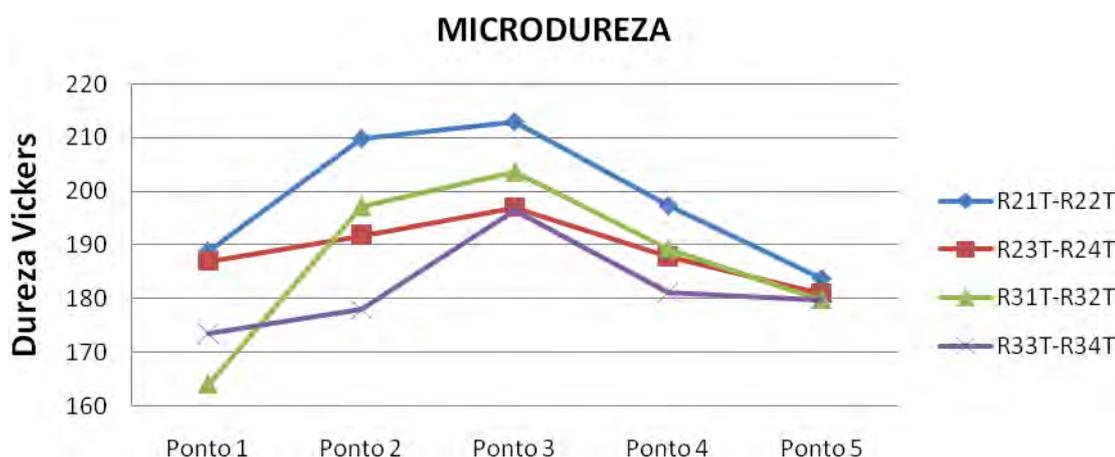


Tabela 4.13 - Média dos resultados dos ensaios da microdureza Vickers das juntas soldadas com Arame Tubular Rutílico

CP	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
R21T/R22T	188,83	209,83	213,00	197,33	183,67
R23T/R24T	187,00	191,83	197,00	187,83	181,00
R31T/R32T	164,00	197,17	203,67	189,33	179,83
R33T/R34T	173,50	178,00	196,50	181,17	179,83

Gráfico 4.9 - Média dos resultados dos ensaios da microdureza Vickers das juntas soldadas com Arame Tubular Rutílico



4.4 Caracterização das Macroestruturas

Nas micrografias realizadas por microscopia óptica, definem-se claramente as regiões das juntas soldadas, podendo ser constatado cada passe realizado e o crescimento colunar típico da solidificação nos processos de soldagem por fusão.

Todos os cordões de solda apresentaram penetração total da junta soldada. Pode-se observar, através das macrografias, que a abertura de raiz de 2,0 mm foi suficiente para impor um sobremetal de cordão de solda na parte interna da junta quando soldadas totalmente com arame tubular. Este sobremetal garantiu a penetração dos cordões.

As figuras 4.14 e 4.15 apresentam as macrografias das juntas soldas com Arame Tubular Metálico e as figuras 4.16 e 4.17 as das juntas soldadas com Arame Tubular Rutílico.

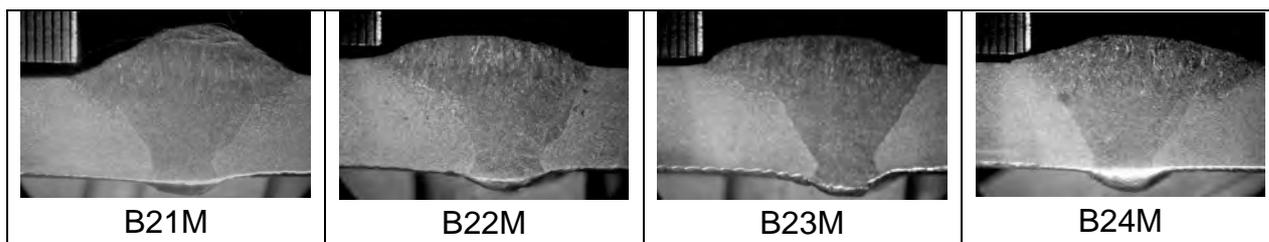


Figura 4.14 – Macrografias dos corpos de prova soldados com: Raiz e Acabamento com Arame Tubular com enchimento Metálico (2,2x).

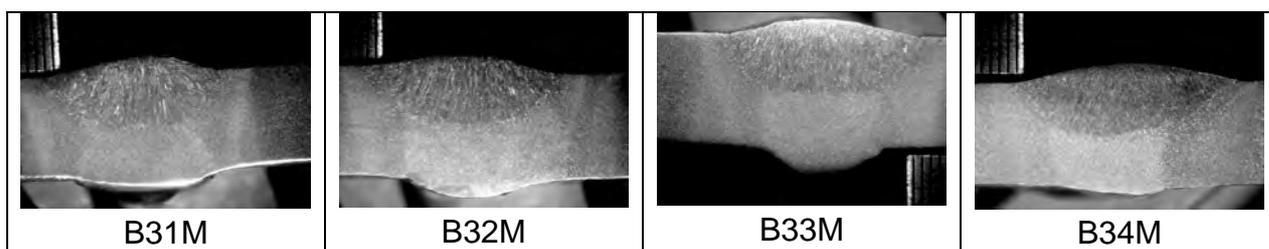


Figura 4.15 – Macrografias dos corpos de prova soldados com: Raiz em TIG e Acabamento com Arame Tubular com enchimento Metálico (2,2x).

Conforme pode-se observar, as juntas soldadas totalmente com arame, têm um aspecto visual mais uniforme apresentando uma taxa de diluição menor da junta, porém com uma ZTA de maior extensão. Os passes de acabamento apresentados nas fotos B221 e B22M apresentam um maior enchimento que os das fotos B23M e B24M, possivelmente por causa da menor velocidade do arame. Observa-se que existe uma tendência de direção do passe de enchimento para a borda da junta, possivelmente por causa da posição de soldagem.

Os cordões soldados com a união do processo TIG com Arame Tubular apresentam uma abertura maior da garganta da junta que deve ter sido ocasionado tanto pela maior abertura da junta como pelo diâmetro da vareta utilizado (\varnothing 2,4 mm), possivelmente, isto deve ser melhorado com a utilização de uma vareta de menor diâmetro. Observa-se também, que o material de acabamento apresenta uma heterogeneidade maior em relação ao material da vareta, talvez ocasionada pela velocidade de resfriamento por se tratar de um cordão de menor dimensão que o da junta anterior.

Em todas as juntas os passes de acabamento apresentam uma largura com dimensões próximas uma da outra, provavelmente por terem sido executados por arame tubular.

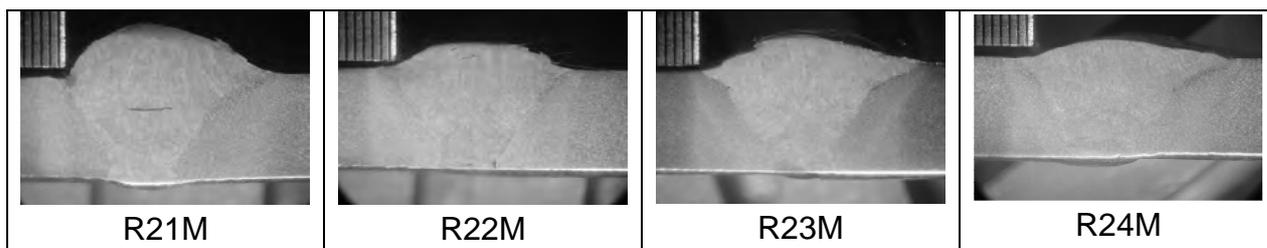


Figura 4.16 – Macrografias dos corpos de prova soldados com: Raiz e Acabamento com Arame Tubular com enchimento Rútílico (2,2x).

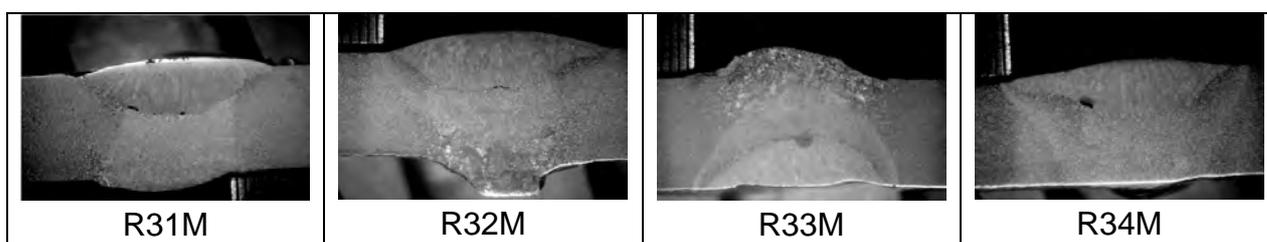


Figura 4.17 – Macrografias dos corpos de prova soldados com: Raiz em TIG e Acabamento com Arame Tubular com enchimento Rútílico (2,2x).

A foto R21M apresenta uma inclusão de um material, possivelmente resto de escória, além de um enchimento/acabamento com maior ressaltado. As demais juntas soldadas com arame/arame apresentam uma regularidade da geometria, bem como, uma taxa de diluição menor que as de TIG/Arame. As ZTAs diminuíram de tamanho em relação com as das juntas de arame metálico, havendo também, uma menor penetração da raiz.

As juntas executadas com TIG/Arame apresentam uma grande heterogeneidade entre os metais de adição e entre estes e o material de base. São apresentadas inclusões e, aparentemente, trancas e porosidades.

As juntas apresentadas nas fotos R31M e R32M apresentam irregularidades muito distintas do passe das raízes, o que deve ter acontecido por uma diferença na setagem da máquina.

4.5 Caracterização das Macroestruturas

A seguir serão apresentadas macro e micrografias de regiões específicas das juntas B24M, B31M, R22M e R34M, vistas nas figuras 4.14 a 4.31, onde são tecidos comentários sobre as microestruturas.

Na macrografia B24M a solda foi executada com arame tubular com enchimento metálico \varnothing 1,2 mm, na raiz e no enchimento/acabamento, na tabela 4.3 são apresentados os parâmetros de soldagem utilizados. Observa-se que a junta apresenta uma boa simetria, percebe-se pouca penetração do cordão da raiz, com um ressalto no cordão de acabamento. Ressalta-se a boa definição das zonas da solda – ZF (zona de fusão), ZTA (zona termicamente afetada) e MB (metal de base).

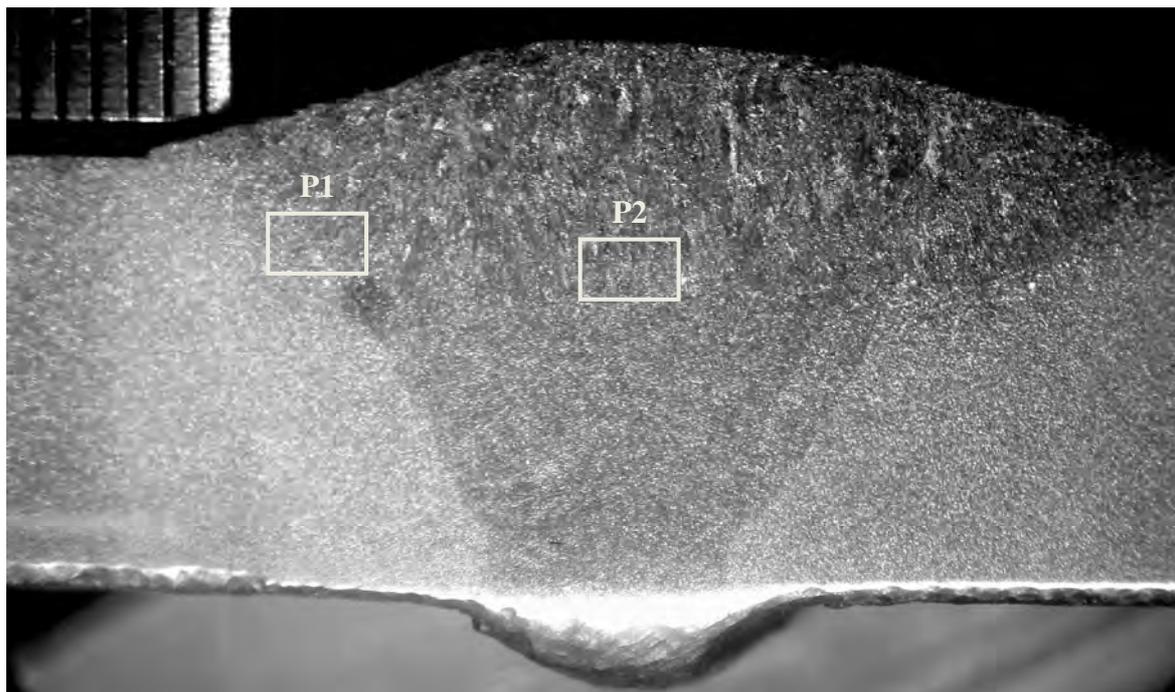
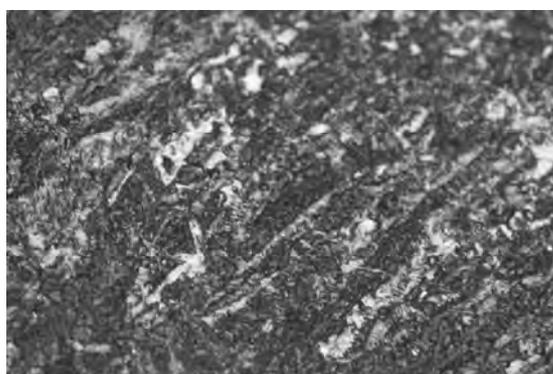
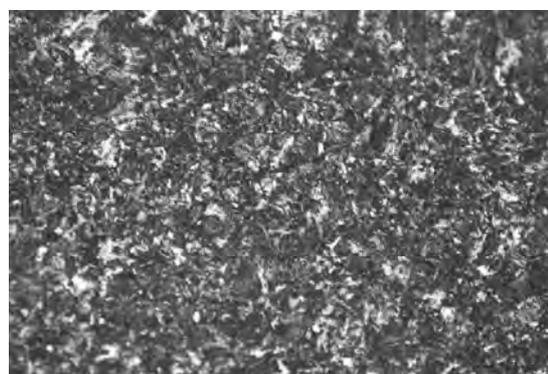


Figura 4.18 - Macrografia do corpo de prova B24M (2,2x)



Ponto P1 – Foto B24M 203 (200x)



Ponto P2 – Foto B24M 206 (200x)

Figura 4.19 - Micrografias do corpo de prova B24M

Na figura 4.20 é apresentada a macrografia da junta B31M, onde o cordão da raiz foi executado com vareta TIG Ø 2,4 mm e o de enchimento/acabamento com arame tubular metálico Ø 1,2 mm, na tabela 4.4 estão apresentados os parâmetros de soldagem utilizados. Observa-se que a junta apresenta uma boa simetria, percebe-se uma razoável penetração do cordão da raiz, com um ressalto no cordão de acabamento. Na figura 4.21 são mostrados os pontos citados com uma ampliação de 200x, onde são percebidas as estruturas ferrita e perlita com uma incidência de porosidade na região de fronteira entre os materiais.

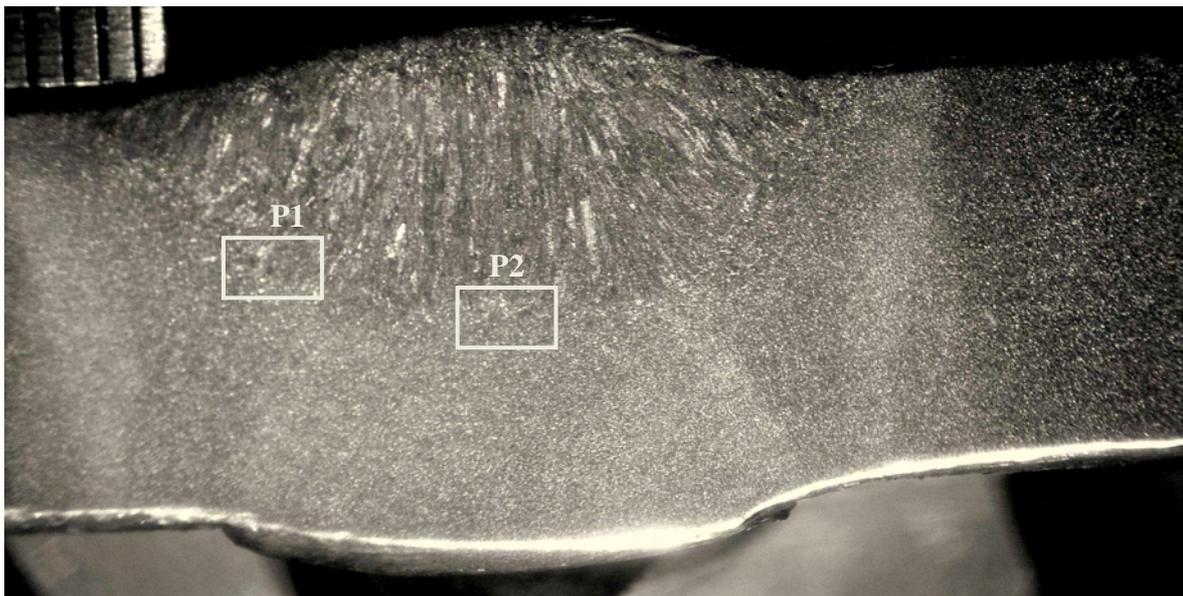
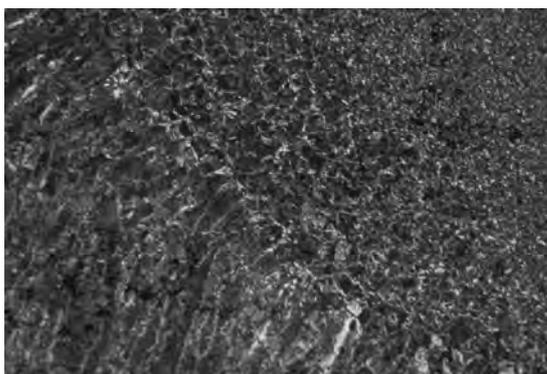
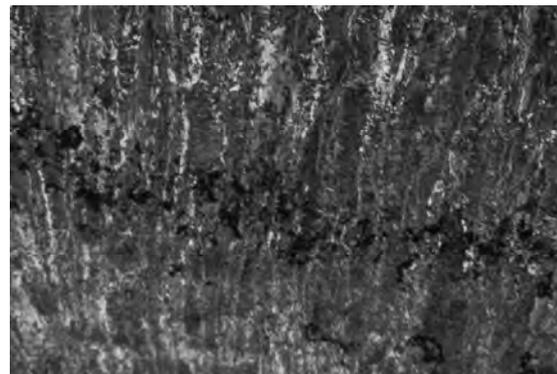


Figura 4.20 - Macrografia do corpo de prova B31M (2,2x).



Ponto P1 – Foto B31M 203 (200x)



Ponto P2 – Foto B31M 206 (200x)

Figura 4.21 - Micrografias do corpo de prova B31M.

Na macrografia da figura 4.22, soldada com arame tubular rutilico \varnothing 1,2 mm na raiz e no enchimento/acabamento conforme parâmetros apresentados na tabela 4.5, percebe-se uma incidência grande de poros, bem como, pouca penetração do cordão da raiz, com um ressalto excessivo no cordão de acabamento e um aparente resíduo de material que pode ser escória não retirada. Nas bordas do cordão de acabamento com uma aparente mordedura. No ponto P1 percebe-se uma transição regular entre os grãos dissolução boa entre os materiais. As estruturas predominantes são ferrita e perlita.

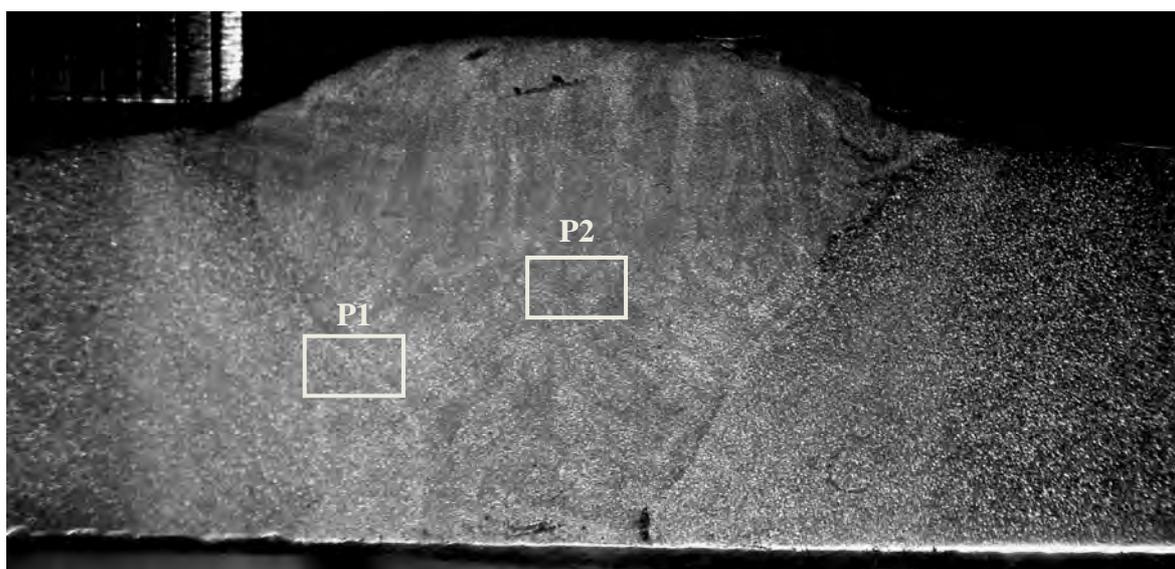
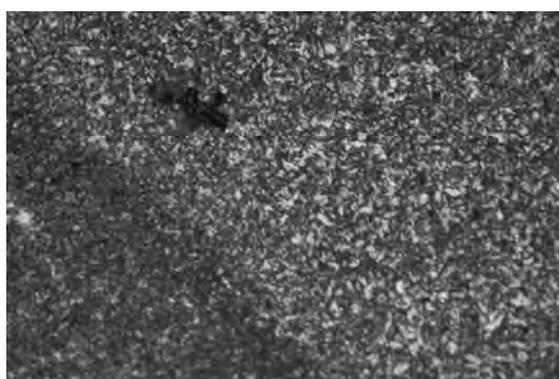
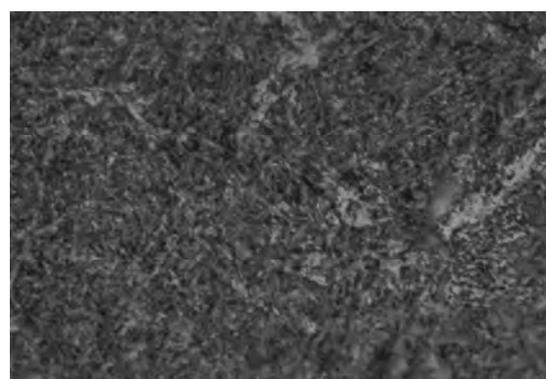


Figura 4.22 - Macrografia do corpo de prova R22M (2,2x)



Ponto P1 – Foto R22M 203 (200x)



Ponto P2 – Foto R22M 506 (500x)

Figura 4.23 - Micrografias do corpo de prova R22M.

Apesar das diferenças entre o material da raiz e do enchimento/acabamento, a junta R34M (figura 4.24) apresenta uma excelente geometria com uma boa definição diluição entre os materiais, esta junta foi executada vareta TIG na raiz e arame tubular rutilico Ø 1,2 mm no enchimento/acabamento, na tabela 4.6 são apresentados os parâmetros de soldagem utilizados. Observa-se que a junta apresenta uma boa simetria, percebe-se pouca penetração do cordão da raiz, com um pequeno ressalto no cordão de acabamento. Apresenta-se uma boa definição das zonas da solda – ZF (zona de fusão), ZTA (zona termicamente afetada) e MB (metal de base).

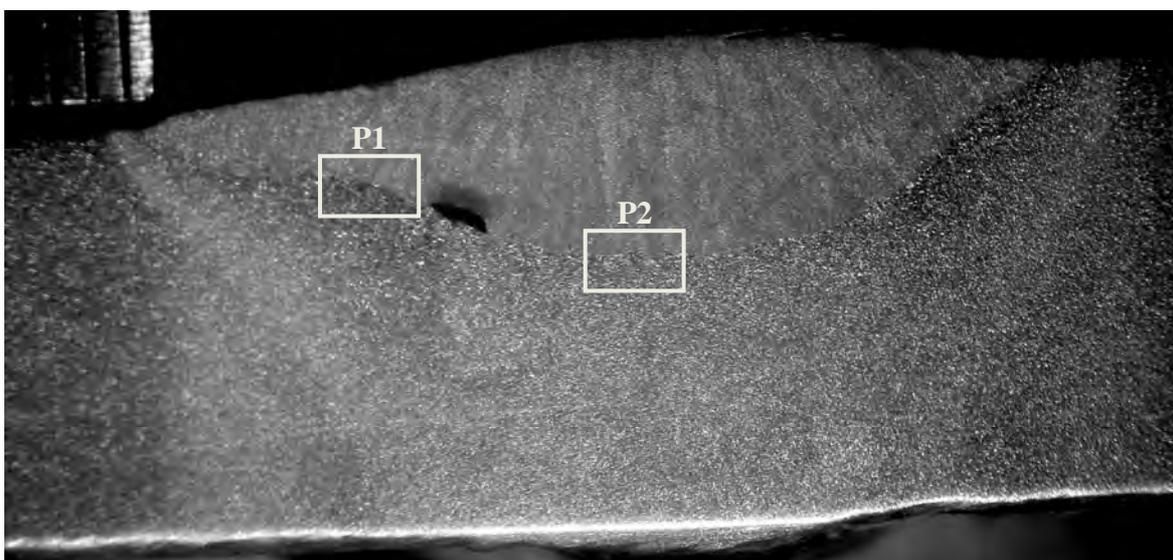
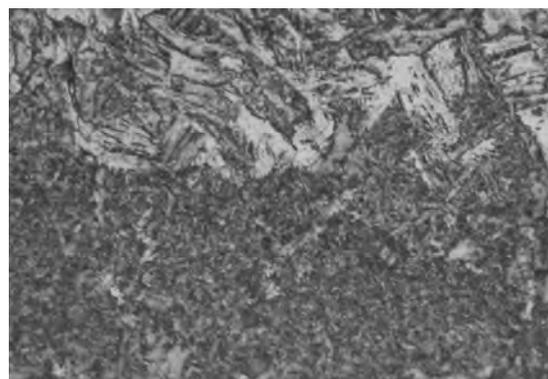


Figura 4.24 - Macrografia do corpo de prova R34M (2,2x).



Ponto P1 – Foto R34M 503 (500x)



Ponto P2 – Foto R34M 506 (500x)

Figura 4.25 - Micrografias do corpo de prova R34M.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

A partir dos resultados encontrados e das análises realizadas, no presente trabalho, podemos concluir que:

- ✓ É possível a obtenção de soldas com qualidade, utilizando arames tubulares tanto rutílicos como “metal cored” com proteção auxiliar de gás, dentro dos requisitos estabelecidos pelas normas ASTM para soldagem de tubos;
- ✓ A não utilização de pré e pós-aquecimento não influenciaram significativamente nas propriedades mecânicas das juntas soldadas para este caso, no entanto, a utilização destes artifícios deve melhorar a qualidade das juntas.
- ✓ O uso de arames tubulares com enchimento metálico mostrou-se mecanicamente apropriado para aplicação no tubo estudado.

Com relação aos resultados dos ensaios mecânicos, podemos concluir que:

- ✓ Em todos os casos, o metal de base apresentou uma menor dureza que as outras regiões das juntas soldadas, o que demonstra a formação de zonas com alta dureza no cordão de solda e na zona termicamente afetada.
- ✓ Em todos os casos, para o ensaio de tração, o desempenho do cordão de solda e da zona termicamente afetada foram superiores ao metal de base, comprovando a eficácia dos parâmetros de soldagem utilizados.

Capítulo 6

6. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Acreditamos ainda mais, a partir deste estudo, na possibilidade de utilização do processo de soldagem com Arame Tubular Protegido nas instalações de canteiros de obra de montagem mecânica para fabricação de peças metálicas. Porém, para que se possa argumentar de modo mais evidente a utilização deste processo, sugerimos que se façam estudos que possam complementar este trabalho, seriam eles:

- ✓ Aplicação dos parâmetros utilizados neste trabalho com a aplicação de ensaios não destrutivos (END), tais como Ultra-som e Raio X, para análise de trincas;
- ✓ Execução de teste hidrostático com temperaturas elevadas para análise de vazamentos e comportamento da junta a alta temperatura;
- ✓ Estudo de produtividade comparando o processo FCAW com o SMAW para juntas de mesmas dimensões e mesmas condições operacionais de soldagem.
- ✓ Elaboração de um estudo para desenvolvimento de um equipamento que atenda as necessidades de aplicação de peças mecânicas.

Capítulo 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM E 23-02: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. Philadelphia.
- [2] AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Handbook – Welding Processes. Miami, 1995.
- [3] AMERICAN WELDING SOCIETY. ANSI/AWS A5.20-95: Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding. Miami, 1995.
- [4] BRACARENSE, ALEXANDRE Q. Processo de Soldagem por Arame Tubular - FCAW, Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
- [5] CALLISTER, WILLIAN D. JR. - Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. Editora: LTC. Rio de Janeiro RJ, 2000.
- [6] CASTELLO BRANCO, J. F. et al. Soldagem circunferencial em tubos de aço da classe API X80. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, 2003, Rio de Janeiro. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. CD-Rom único, 10 p.
- [7] DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. Cap. 8,11.
- [8] ECO, UMBERTO. Como se faz uma tese. 19ª Ed. São Paulo: Editora Perspectiva, 2004.
- [9] GARCIA, AMAURI. Solidificação: fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora Unicamp, 2001.
- [10] LUZ, T. de S.; FERRARESI, V.A. & BALSAMO, P.S.S. Análise da transferência metálica do arame tubular com proteção gasosa cobef - 2007
- [11] MACHADO, I. G. Soldagem e Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996. 477 p.
- [12] MARQUES, P. V. Tecnologia da Soldagem. Belo Horizonte – MG, 1991: ESAB, 352 p.
- [13] FORTES, C.; Araujo, W. Arames Tubulares. Belo Horizonte – MG, 2004: ESAB, 103 p.
- [14] MARQUES, P. V.; MODENESI, P.J. & BRANCARENSE, A. Q. Soldagem; Fundamentos e Tecnologia, Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

- [15] MODENESI, P.J. Estimativa de Custo em Soldagem, Belo Horizonte: Editora DEMM-UFMG, 2001.
- [16] MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V. & SANTOS, D.B. Introdução à Metalurgia da Soldagem, Belo Horizonte: Editora DEMM-UFMG, 2004.
- [17] MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V. & SANTOS, D.B. Introdução aos Processos de Soldagem, Belo Horizonte: Editora DEMM-UFMG, 2005.
- [18] NAYYAR, MOHINDER L. Piping handbook. Editora: McGRAW-Hill. New York USA, 7th ed. 2000.
- [19] MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V. & SANTOS, D.B. Introdução a Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais, Belo Horizonte: Editora DEMM-UFMG, 2004.
- [20] OKUMURA, TOSHIE.; TANIGUCHI, CÉLIO. Engenharia de soldagem e aplicações, Editora: LTC, Rio de Janeiro – RJ, 1982.
- [21] ORDÓÑEZ, ROBERT EDUARDO COOPER. Soldagem e Caracterização das Propriedades Mecânicas de Dutos de Aço API 5L-X80 com Diferentes Arames Tubulares – Campinas – SP, 2004.
- [22] NETO, N. F. S. Caracterização de soldas em aços API 5L com diferentes arames tubulares e temperaturas de preaquecimento. 2003. 87 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2003.
- [23] SMITH, WILLIAM F. – Princípios de ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. Editora: McGRAW-Hill. Portugal, 1998.
- [24] SOUZA, S. A. Ensaaios mecânicos de materiais metálicos – Fundamentos teóricos e práticos, 5ª Ed. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda, 1982. 286 p.
- [25] TELES, PEDRO C. SILVA – Tubulações industriais: Materiais, Projeto, Montagem. Editora: LTC. Rio de Janeiro RJ, 2001.
- [26] TELES, PEDRO C. SILVA – Materiais para Equipamentos de Processo. Editora: Interciência. Rio de Janeiro RJ, 2003.
- [27] WAINER, E.; BRANDI, S.D. & DE MELLO, F.D.H. Soldagem: Metalurgia e Processos.: Editora: Edgard Blücher. São Paulo - SP, 1992.
- [28] FORTES, C.; Soldagem MIG-MAG. Belo Horizonte – MG, 2004: ESAB, 134 p.