

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LUANA CAROLINO DE FIGUEIREDO

**AVALIAÇÃO DE SOLDAS PRODUZIDAS POR ARAMES TUBULARES
DESENVOLVIDOS EM LABORATÓRIO DO TIPO BÁSICO COM ADIÇÃO DE
POLÍMERO COMO INGREDIENTE DO FLUXO**

BELO HORIZONTE

2016

LUANA CAROLINO DE FIGUEIREDO

**AVALIAÇÃO DE SOLDAS PRODUZIDAS POR ARAMES TUBULARES
DESENVOLVIDOS EM LABORATÓRIO DO TIPO BÁSICO COM ADIÇÃO DE
POLÍMERO COMO INGREDIENTE DO FLUXO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Maria Celeste Monteiro de Souza Costa

Coorientador: Cláudio Turani Vaz

BELO HORIZONTE

2016

LUANA CAROLINO DE FIGUEIREDO

AVALIAÇÃO DE SOLDAS PRODUZIDAS POR ARAMES TUBULARES
DESENVOLVIDOS EM LABORATÓRIO DO TIPO BÁSICO COM ADIÇÃO DE
POLÍMERO COMO INGREDIENTE DO FLUXO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais
do Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa

Prof. Cláudio Turani Vaz

Prof^ª. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar pela oportunidade de cursar Engenharia de Materiais no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e por desenvolver este trabalho.

O meu muito obrigado aos servidores do CEFET-MG, em especial ao Professor Carlos, que tanto me auxiliou nas etapas laboratoriais, cortando minhas peças, fazendo entalhes nos meus corpos de prova e, me emprestando a sua força física quando a minha deixou a desejar.

Ao professor Cláudio Turani Vaz, meu coorientador, o meu muito obrigada por aceitar me ajudar. Obrigada por todo o material disponibilizado, pela sua preocupação com o andamento do trabalho. Agradeço, também, por todas as conversas antes e depois das aulas e todas as dicas que me foram dadas ao longo desse semestre. Sem essa ajuda com certeza teria sido muito mais difícil.

Agradeço, principalmente, à minha orientadora, Maria Celeste Monteiro de Souza Costa por todo o seu empenho em me orientar, pelas correções, dicas, ensinamentos e pelo seu tão valioso tempo. Obrigada por não me deixar de lado quando não havia condições em continuar me orientando. Toda essa dedicação foi essencial para a realização e conclusão deste trabalho.

Por fim, agradeço aos meus pais, às minhas irmãs e ao meu namorado, Igor, por toda a força e compreensão. Obrigada por fazerem parte dessa conquista.

RESUMO

O processo de soldagem com arame tubular (FCAW) vem ganhando espaço no mercado industrial, principalmente devido a sua alta produtividade e facilidade de ser automatizado. Outra característica importante deste processo é a possibilidade de soldar a maioria dos metais. Esta facilidade se dá em função da liberdade de produzir arames com composições químicas bem específicas. Estudos recentes mostraram que soldas produzidas com eletrodos revestidos aglomerados com polímero apresentam baixos teores de hidrogênio difusível e consideráveis frações volumétricas de ferrita acicular na microestrutura, o que acarreta no aumento da tenacidade do cordão de solda. Esses resultados sugerem que também há perspectivas de se utilizar polímeros como ingrediente em fluxos de arames tubulares. Em função desta particularidade e por haver poucos estudos nesta área, o objetivo deste trabalho é analisar a geometria e às propriedades mecânicas (dureza e tenacidade) dos cordões de solda produzidos com arames tubulares desenvolvidos em laboratório, nos quais foram variados os tipos e composições de fluxos à base de revestimento de eletrodos revestidos de classe E7018 com e sem proteção gasosa externa durante a soldagem. Os resultados deste trabalho mostraram que os cordões de solda apresentaram uma grande quantidade de poros e inclusões de escória. Que a largura dos cordões de solda executados sem o uso de gás de proteção externa e com 5% de polímero tendeu a ser maior. Que a penetração do cordão de solda é maior quando se utiliza maior porcentual de polímero aliado a proteção gasosa externa. Que soldas executadas sem gás de proteção apresentaram um aumento na dureza quanto menor o percentual de polímero (5%).

Palavras-chave: Soldagem. Arame Tubular. Fluxo Polimérico. Ferrita Acicular.

ABSTRACT

The welding process with cored wire (FCAW) is becoming more popular in the industrial market, mainly due to its high productivity and a great facility to be automated. Another important feature of this process is the ability to weld most metals. This facility is a function of the potential to produce wires with very specific chemical compositions. Recent studies have shown that welds produced using electrodes coated with polymer agglomerates have low diffusible hydrogen content and considerable volume fractions of acicular ferrite in the microstructure, which results in increased toughness of the weld bead. These results suggest that there are prospects of using polymers as an ingredient in cored wires flows. Because of this feature and there are few studies in this area, the objective of this study is to analyze the geometry and mechanical properties (hardness and toughness) of the weld beads produced with cored wires developed in the laboratory, in which were varied types and compositions electrode coating based streams coated E7018 class with and without external shielding gas during welding. The results of this study showed that the weld beads showed a large amount of pores and slag inclusions. The width of the weld beads run without the use of external shielding gas and 5% polymer tended to be higher. The penetration of the weld bead is higher when using higher polymer percentage combined with external shielding gas. That welds performed without shielding gas showed an increase in hardness the lower the polymer percentage (5%).

Keywords: Welding. Tubular wire. Polymeric flow. Acicular Ferrite.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1	Processos de soldagens existentes	19
FIGURA 3.2	Esquema de soldagem com eletrodo revestido	20
FIGURA 3.3	Esquema de soldagem a arco com proteção gasosa	23
FIGURA 3.4	Esquema de soldagem com arame tubular	25
FIGURA 3.5	Geometrias usuais dos eletrodos tubulares	29
FIGURA 3.6	Esquema do processo de fabricação de arame tubular	30
FIGURA 3.7	Diagrama Fe – Fe ₃ C	39
FIGURA 3.8	Fotomicrografia da austenita	40
FIGURA 3.9	Fotomicrografia da ferrita	41
FIGURA 3.10	Micrografia da ferrita acicular	43
FIGURA 3.11	Comparação entre a ferrita acicular e a ferrita primária	44
FIGURA 3.12	Comparação entre a ferrita secundária e a ferrita acicular	44
FIGURA 3.13	Fronteira imaginária entre a ferrita primária e a ferrita secundária	45
FIGURA 3.14	Micrografia da perlita	46
FIGURA 3.15	Micrografia da bainita	47
FIGURA 3.16	Fotomicrografia da martensita	48
FIGURA 3.17	Ensaios mais importantes entre destrutivos	49
FIGURA 3.18	Ensaios mais importantes entre os não destrutivos	50
FIGURA 3.19	Representação esquemática do ensaio de dureza Brinell	53
FIGURA 3.20	Processo de aplicação de cargas no ensaio de dureza Rockwell comum ...	55
FIGURA 3.21	Equipamento para ensaio de impacto	60

FIGURA 3.22	Corpos de prova “Charpy” e “Izod”	62
FIGURA 3.23	Método de retirada do corpo de prova	63
FIGURA 3.24	Local de retirada do corpo de prova	63
FIGURA 3.25	Especificações das dimensões do corpo de prova e do entalhe	64
FIGURA 3.26	Localização do entalhe e posicionamento da peça na máquina	64
FIGURA 4.1	Procedimento experimental	65
FIGURA 4.2	Chapa com chanfro em “V”	66
FIGURA 4.3	Bancada utilizada para a execução das soldas	66
FIGURA 4.4	Microscópio metalográfico KONTROL modelo IM 713 utilizado para fazer as micrografias	67
FIGURA 4.5	Cordão de solda	68
FIGURA 4.6	Locais aonde foram realizadas as medições da ZTA	68
FIGURA 4.7	Microdurômetro utilizado para a realização do ensaio de microdureza ...	69
FIGURA 4.8	Regiões do metal de solda e do metal de base onde foram realizadas as medições da microdureza	69
FIGURA 4.9	Máquina de impacto VEB utilizada para o ensaio de impacto	70
FIGURA 5.1	Cordão de solda com 5% de PTFE e uso de gás de proteção	71
FIGURA 5.2	Cordão de solda com 5% de PTFE sem o uso de gás de proteção	71
FIGURA 5.3	Cordão de solda com 10% de PTFE e uso de gás de proteção	72
FIGURA 5.4	Cordão de solda com 10% de PTFE sem o uso de gás de proteção	72
FIGURA 5.5	Cordão de solda com 15% de PTFE e uso de gás de proteção	72
FIGURA 5.6	Cordão de solda com 15% de PTFE sem o uso de gás de proteção	72
FIGURA 5.8	5% PTFE e uso de gás de proteção.....	74
FIGURA 5.9	5% de PTFE sem o uso de gás de proteção.....	75

FIGURA 5.10	10% de PTFE e uso de gás de proteção.....	75
FIGURA 5.11	10% de PTFE sem o uso de gás de proteção.....	75
FIGURA 5.12	15% de PTFE e uso de gás de proteção.....	76
FIGURA 5.13	15% de PTFE sem o uso de gás de proteção.....	76

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 5.7	Valores de largura e profundidade para cada cordão de solda	73
GRÁFICO 5.14	Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 5% PTFE e uso de gás de proteção	78
GRÁFICO 5.15	Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 5% PTFE sem o uso de gás de proteção	78
GRÁFICO 5.16	Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 10% PTFE e uso de gás de proteção	80
GRÁFICO 5.17	Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 10% PTFE sem o uso de gás de proteção	80
GRÁFICO 5.18	Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 15% PTFE e uso de gás de proteção	82
GRÁFICO 5.19	Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 15% PTFE sem o uso de gás de proteção	82
GRÁFICO 5.20	Média dos valores de dureza encontrados na zona fundida de cada cordão de solda e seus respectivos desvios padrão	83
GRÁFICO 5.21	Médias calculadas para cada grupo de corpos de prova	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1	Especificações AWS para arames tubulares	31
TABELA 3.2	Escala de dureza Mohs	52
TABELA 3.3	Valores de P/D^2 e diâmetros da esfera recomendados no ensaio de dureza Brinell	54
TABELA 3.4	Valores de dureza em função da relação P/D^2 no ensaio de dureza Brinell..	54
TABELA 3.5	Escala de dureza Rockwell	57
TABELA 3.6	Comparação entre resultados de ensaio de dureza por diferentes métodos .	59
TABELA 5.1	Medidas relativas à geometria do cordão de solda e da ZTA	73
TABELA 5.2	Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 5% PTFE e uso de gás de proteção	77
TABELA 5.3	Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 5% PTFE sem o uso de gás de proteção	77
TABELA 5.4	Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 10% PTFE e uso de gás de proteção	79
TABELA 5.5	Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 10% PTFE sem o uso de gás de proteção.....	79
TABELA 5.6	Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 15% PTFE e uso de gás de proteção	81
TABELA 5.7	Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 15% PTFE sem o uso de gás de proteção	81
TABELA 5.8	Médias e desvios padrão das zonas fundidas de cada cordão de solda analisado.....	83

TABELA 5.9	Valores de energia absorvida no ensaio de impacto com os corpos de prova da soldagem com 5% de PTFE sem uso de gás de proteção.....	84
TABELA 5.10	Valores de energia absorvida no ensaio de impacto com os corpos de prova da soldagem com 5% de PTFE e uso de gás de proteção.....	84
TABELA 5.11	Valores de energia absorvida no ensaio de impacto com os corpos de prova da soldagem com 10% de PTFE sem uso de gás de proteção	85
TABELA 5.12	Valores de energia absorvida no ensaio de impacto com os corpos de prova da soldagem com 10% de PTFE e uso de gás de proteção	85
TABELA 5.13	Valores de energia absorvida no ensaio de impacto com os corpos de prova da soldagem com 15% de PTFE sem uso de gás de proteção	85
TABELA 5.14	Valores de energia absorvida no ensaio de impacto com os corpos de prova da soldagem com 15% de PTFE e uso de gás de proteção	85
TABELA 5.15	Novas médias calculadas para cada grupo de corpos de prova	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF	Ferrita Acicular
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCC	Estrutura cristalina Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Estrutura cristalina Cúbica de Faces Centradas
DBCP	Distância entre o bico de contato e a peça de trabalho
FC	Carboneto disperso
FCAW	Flux-Cored Arc Welding
FS	Ferrita Secundária
FS (A)	Ferrita com fase Secundária Alinhada
FS (NA)	Ferrita com fase Secundária Não Alinhada
GMAW	Gas Metal Arc Welding
HB	Dureza Brinell
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
MAG	Metal Active Gas
MB	Metal de Base
MIG	Metal Inert Gas
PF	Ferrita Primária

PF (G)	Ferrita Primária de Contorno de Grão
PF (I)	Ferrita Primária Poligonal Intragranular
PTFE	Politetrafluoretileno
SAE	Society of Automotive Engineers
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
TCC	Estrutura cristalina Tetragonal de Corpo Centrado
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo Geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	Histórico	18
3.2	Processos de soldagem	20
3.2.1	Processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW)	20
3.2.2	Processo de soldagem MIG-MAG (GMAW)	23
3.2.3	Processo de soldagem com arame tubular (FCAW)	25
3.2.3.1	Arames utilizados no processo FCAW	27
3.2.3.2	Processo de fabricação do arame tubular	29
3.2.3.3	Classificação dos arames tubulares	30
3.2.3.4	Características e funções dos elementos químicos dos fluxos dos arames tubulares	31
3.2.3.5	Utilização de fluxo com adição de polímero para soldagem	33
3.2.3.6	Aplicações dos arames tubulares	34
3.2.3.7	Variáveis dos processos de soldagem FCAW	35
3.2.3.7.1	Corrente de soldagem	35
3.2.3.7.2	Velocidade de soldagem	36
3.2.3.7.3	Tensão de soldagem	36
3.2.3.7.4	Taxa de deposição	36
3.2.3.7.5	Extensão do eletrodo energizado	37
3.2.3.7.6	Vazão do gás de proteção externa	37
3.2.3.7.7	Inclinação da tocha	37
3.3	Descontinuidades no cordão de solda	38
3.4	Microestrutura	38
3.4.1	Fases e Composições	40
3.4.1.1	Austenita (ferro γ)	40
3.4.1.2	Ferrita (ferro α)	40

3.4.1.3	Ferrita Acicular	41
3.4.1.4	Ferrita Secundária	43
3.4.1.5	Cementita	45
3.4.1.6	Perlita	45
3.4.1.7	Bainita	46
3.4.1.8	Martensita	47
3.5	Ensaio Macânicos e Não Destrutivos	48
3.5.1	Ensaio Não Destrutivos	50
3.5.1.1	Ensaio Visual	50
3.5.2	Ensaio Destrutivos	51
3.5.2.1	Ensaio de Dureza	51
3.5.2.1.1	Dureza Brinell	52
3.5.2.1.2	Dureza Rockwell	55
3.5.2.1.3	Dureza Vickers	58
3.5.3	Ensaio de Impacto	60
4	METODOLOGIA	65
4.1	Preparação dos cordões de solda para as análises metalográfica	66
4.2	Análise visual e da geometria do cordão	67
4.3	Análise das propriedades mecânicas	68
4.3.1	Testes de microdureza	68
4.3.2	Ensaio de Impacto.....	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5.1	Análise macrográfica e geometria dos cordões de solda	71
5.1.1	Medidas das geometrias cordões de solda	72
5.2	Análise Micrográfica dos cordões de solda.....	74
5.3	Análise das Propriedades mecânicas	77
5.3.1	Testes de microdureza	77
5.3.1.1	Análise das tabelas e gráficos	82
5.3.2	Ensaio de Impacto	84
6	CONCLUSÕES	88
7	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é considerada atualmente um dos métodos mais utilizados para união de metais na construção de peças e estruturas. Segundo Okumura *et al.* (1982) a utilização da soldagem na maioria dos processos de fabricação de estruturas metálicas é devido a sua simplicidade de execução além da econômica, uma vez que as juntas soldadas requerem pequena quantidade de metal de adição.

Estudos mostram que o processo de soldagem com eletrodo maciço e proteção gasosa reúne várias das necessidades atuais incluindo alta produtividade, boa qualidade e baixo custo. De fato, trata-se de um processo que produz soldas de qualidade. Os processos de soldagem são freqüentemente utilizados na forma semi-automática, além de permitir sua automação de forma relativamente fácil. Porém, com o crescimento acelerado da utilização de novas ligas de aço, particularmente os aços microligados e os aços de alta resistência e baixa liga em aplicações industriais, é necessário à evolução tecnológica de eletrodos e arames para a execução da soldagem.

Para atender a essa demanda, uma das possíveis formas é fabricar arames mais personalizados e acredita-se que isso pode ser conseguido com o arame tubular, pois este consumível permite que seja acrescentado em seu interior fluxos específicos que atendam as propriedades mecânicas desejadas, para cada tipo de aço.

Diante do exposto, este trabalho tem como proposta analisar as soldas produzidas por arame tubular utilizando como fluxo interno o revestimento do eletrodo revestido E7018 com adição de polímeros e estudar a influência da composição dos fluxos nas propriedades mecânicas (dureza e tenacidade) dos cordões de solda.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar as soldas produzidas com arames tubulares desenvolvidos em laboratório, nos quais foram variados as composições de fluxos à base de revestimento de eletrodos revestidos da classe E7018 e analisar os de cordões soldados, quanto à geometria e às propriedades mecânicas (dureza e tenacidade) contendo diferentes quantidades de polímero nas condições de soldagem com e sem proteção gasosa externa.

2.2 Objetivos específicos

- Análise da geometria dos cordões de solda (largura, penetração e reforço).
- Análise micrográfica dos cordões de solda.
- Análise das propriedades mecânicas dos cordões de solda por meio de ensaio de microdureza e ensaio de impacto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Histórico

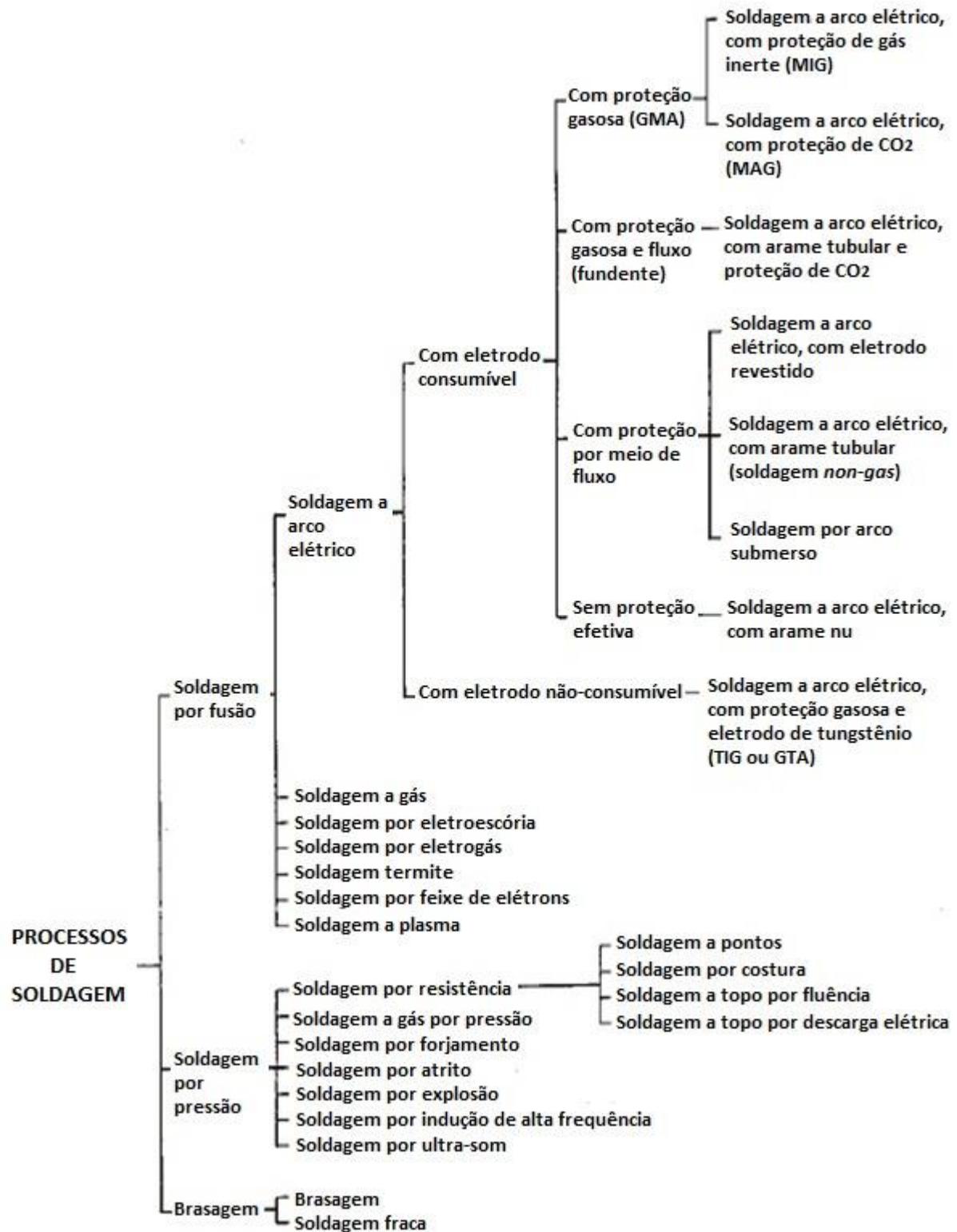
De acordo com a American Welding Society (AWS, 1991) soldagem é a operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição.

Durante toda a história humana encontrou-se indícios da presença de soldagem, principalmente por forjamento, na produção de armas, instrumentos, e outros artefatos. Apenas no começo do século XIX iniciou-se a fase histórica da soldagem, pois em 1801 Humphry Davy criou o arco elétrico entre terminais de um circuito e em 1836 Edmund Davy descobriu o combustível acetileno, logo em seguida, fontes produtoras de energia elétrica foram desenvolvidas, possibilitando soldagem por fusão. Desse modo a soldagem começou a se desenvolver alcançando uma grande variedade de formas de se soldar duas peças o que permitiu fazer a união de uma alta gama de materiais diferentes.

A primeira Guerra Mundial teve um papel muito importante para o avanço das tecnologias existentes. Foi o período que impulsionou o crescimento tecnológico e principalmente o crescimento da soldagem, devido à necessidade de grande produção de navios e aviões. Foi nesta época que a soldagem passou a ser um processo de produção e não somente um processo com técnicas de reparos (MODENESI; MARQUES, 2000).

Com o passar dos anos, vários métodos de soldagem foram sendo desenvolvidos e aprimorados, alcançando, atualmente, mais de 100 processos de soldagem. A figura 3.1 apresenta uma retrospectiva do número acumulado de processos de soldagem desenvolvidos em função do tempo (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982 e GEARY; MILLER, 2011).

Figura 3.1 – Processos de soldagens existentes



Fonte: OKUMURA; TANIGUCHI, 1982 (Imagem Adaptada).

3.2 Processos de soldagem

Dentre os processos de soldagem a arco elétrico existentes, encontram-se alguns processos mais utilizados como o Shielded Metal Arc Welding (SMAW) conhecido como soldagem com eletrodo revestido, Gas Metal Arc Welding (GMAW), conhecido como MIG -MAG e o Flux-Cored Arc Welding (FCAW), conhecido como soldagem com arame tubular.

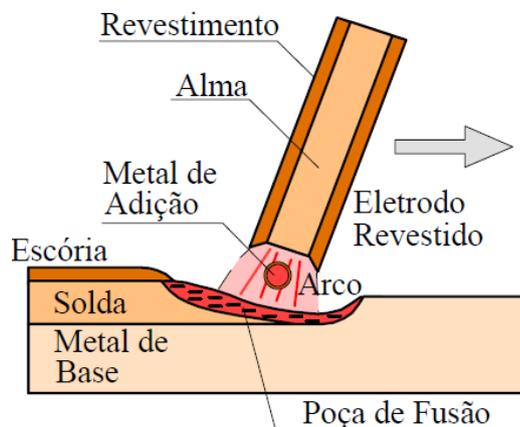
3.2.1 Processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW)

Conhecido por soldagem a arco com eletrodo revestido este processo utiliza um arco elétrico, estabelecido entre um eletrodo metálico e a peça a ser soldada, para aquecer os metais estabelecendo a solda.

De acordo com Modenesi et. al. (2000), o eletrodo revestido possui um núcleo metálico, conhecido por “alma”, com diâmetro que varia entre 1,5 e 8,0 mm e comprimento entre 23 e 45 mm e, um revestimento externo a este núcleo metálico.

Este revestimento consiste de camadas de minerais como argila, carbonetos e fluoretos ou, também, materiais do tipo celulose, ligas ferrosas, entre outros. A alma metálica conduz a corrente elétrica e fornece metal de adição para a solda. Na Figura 3.2 pode-se observar um esquema de soldagem com eletrodos revestidos.

Figura 3.2 – Esquema de soldagem com eletrodo revestido



Fonte: Marques; Modenesi, 2000.

Quando o arco elétrico é aberto, o revestimento do eletrodo é fundido produzindo um gás que protege o arco elétrico da atmosfera. Juntamente com o gás de proteção são produzidos gases

desoxidantes que levam a purificação do metal fundido. Uma escória é formada a partir do revestimento do eletrodo, ela se mostra muito importante visto que ao se solidificar protege o metal fundido da oxidação. Ao final do processo, essa escória sólida é facilmente removível (GEARY; MILLER, 2011).

Esse processo de soldagem é bastante vantajoso quando comparado a outros, pois o mesmo permite desenvolver formulações específicas para o revestimento, o que faz dele mais versátil, ou seja, ser utilizado para unir vários tipos de ligas. Ainda se destaca pelo custo relativamente baixo, se comparado a outros processos, principalmente devido à simplicidade do equipamento de soldagem, além da possibilidade de seu uso em locais abertos.

As limitações da soldagem com eletrodo revestido encontram-se na baixa produtividade do método, na necessidade de horas de treinamento específico para o soldador e na quantidade de gases e fumos gerados durante o processo de solda, o que pode acarretar problemas para a saúde do operador da solda (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

A soldagem SMAW pode ser usada para a maior parte das ligas metálicas, como ferros fundidos, aços carbono, aços inoxidáveis, cobre, alumínio e níquel. Porém, o mesmo não acontece com as ligas de baixo ponto de fusão, como chumbo, zinco e estanho devido à intensa energia gerada pelo arco elétrico. Nem para as ligas extremamente reativas, como titânio ou zircônio por o método não oferecer proteção eficaz contra contaminação e devido à possibilidade de reação do metal fundido com os gases da atmosfera (MACHADO, 2007).

A composição do revestimento do eletrodo, o fluxo, pode influenciar na composição química e nas propriedades mecânicas da solda além de determinar as características operacionais dos eletrodos. Existe no mercado uma elevada gama de eletrodos disponíveis, estes procuram atender um conjunto de exigências necessárias para cada tipo de aplicação, sendo assim, podendo ser aplicáveis em diferentes materiais e produzir soldas cada qual com a sua peculiaridade (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Segundo Okumura et al. (1982), Mesmo com tamanha variedade de composição de revestimentos, os eletrodos conseguem ser agrupados em oito classes genéricas:

- i. Eletrodo do tipo celulósico: composição com aproximadamente 30% de materiais orgânicos gerando grande quantidade de gases que protegem a poça de fusão, há grande penetração do arco. A escória produzida é fina e facilmente descartável. Esse

- tipo de eletrodo gera muitos respingos resultando em um aspecto ruim do cordão de solda;
- ii. Eletrodo do tipo rutílico: composição com elevado teor de óxido de titânio (TiO_2), também conhecido por rutila. Arco gerado é suave e a sua penetração é relativamente baixa. O aspecto do cordão é muito bom. Utilizado em chapas de pequena espessura e como passe de acabamento e chapas grossas;
 - iii. Eletrodo do tipo básico: composto principalmente por cal e fluorita, este revestimento proporciona um metal depositado com baixo teor de hidrogênio. Sendo assim, apresenta baixa sensibilidade ao trincamento e a fissuração. O arco gerado é relativamente instável necessitando treinamento prévio do operador;
 - iv. Eletrodo do tipo ácido, com pó de ferro: ingredientes principais são silicato e pó de ferro, em quantidades entre 15 e 50%. Há poucos respingos e a escória é removida facilmente. A velocidade de deposição é alta. Bastante utilizado na soldagem de canto, por gravidade e na indústria naval;
 - v. Eletrodo do tipo ácido, com alto teor de óxido de ferro: o óxido de ferro é o composto principal de sua composição levando a um arco concentrado com elevada penetração;
 - vi. Eletrodo do tipo rutílico, com pó de ferro: a presença do pó de ferro na composição leva a uma alta eficiência de soldagem. Possui um arco suave e o aspecto superficial do cordão é muito bom. Muito utilizado em soldagem na posição plana e soldas de canto horizontais;
 - vii. Eletrodo do tipo ilmenítico: a composição do seu revestimento é basicamente de ilmenita, que consiste em aglomerados de óxido de titânio, ferro e manganês. O arco elétrico produzido é potente, permitindo alta penetração. A escória possui alta fluidez, assim como as propriedades mecânicas do metal depositado. Também é conhecido por eletrodo de múltiplas finalidades sendo, portanto, muito utilizado;
 - viii. Eletrodo do tipo cal-titânio: composto por cal e rutilo. O metal depositado possui excelentes propriedades mecânicas, superadas, apenas, pelo eletrodo do tipo básico. A penetração não é tão profunda, mas a aparência do cordão de solda é boa. Pode ser utilizado em qualquer posição de soldagem, porém, é especialmente recomendado nas posições vertical e sobrecabeça.

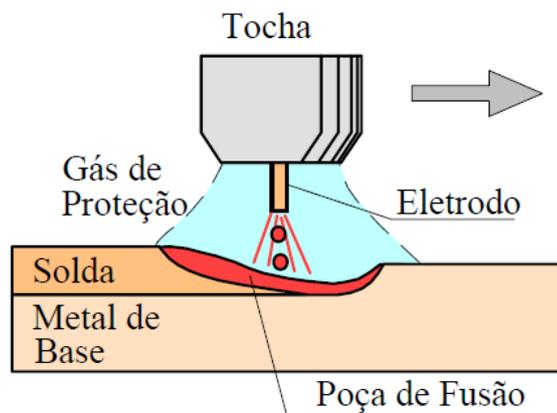
De acordo com Geary et al. (2011), no processo de soldagem com eletrodo revestido a fonte pode fornecer corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). Estas fornecem a potência com os valores de corrente e da tensão adequados para manter o arco elétrico.

Para Okumura et al. (1982), todos os eletrodos revestidos podem operar com CC, o mesmo não acontece para CA. A soldagem com fonte de corrente alternada é mais econômica, de fácil manutenção e operação. No caso da corrente contínua o arco elétrico possui maior estabilidade o que provoca seu uso em operações mais delicadas, como soldagem de chapas muito finas.

3.2.2 Processo de soldagem MIG-MAG (GMAW)

Marques et al. (2009) define a soldagem a arco com proteção gasosa como o processo que une peças metálicas com base no aquecimento destas por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça. Nesse caso, a proteção do arco e da poça de fusão é feita por um gás ou uma mistura de gases que podem ou não serem ativos. Se a mistura gasosa for reativa, esse tipo de soldagem é chamada de MAG (Metal Active Gas), se a mistura gasosa for inerte a soldagem GMAW é denominada MIG (Metal Inert Gas). A Figura 3.3 demonstra o esquema de soldagem GMAW.

Figura 3.3 – Esquema de soldagem a arco com proteção gasosa



Fonte: MARQUES;MODENESI, 2000.

As vantagens proporcionadas por esse tipo de soldagem são várias, é um processo utilizado para soldar a maior parte dos metais, podendo ser operado em todas as posições, a sua taxa de deposição metálica é alta assim como a penetração, é um processo com alimentação contínua do arame e exige pouca limpeza após a soldagem, pois ele não gera escória. Entretanto, o custo de consumíveis e equipamentos é muito elevado, pode gerar elevadas quantidades de respingos, a proteção do arco é sensível as correntes de ar e pode haver dificuldade ao tentar soldar juntas de acesso restrito em função do bocal da tocha de soldagem (MARQUES;MODENESI, 2000).

Para a proteção do metal fundido da atmosfera, os gases inertes são comumente empregados tanto na soldagem de metais e ligas não ferrosas. Os gases inertes mais utilizados neste processo são o hélio e o argônio. Já os gases ativos mais empregados neste processo são o dióxido de carbono ou uma mistura de argônio, oxigênio e dióxido de carbono, estes são normalmente utilizados na soldagem de aços carbonos e, no caso da mistura de gases inertes com pequenos teores de gases ativos o uso é para solda em aços ligados (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Segundo Okumura et al. (1982), o processo MIG possui as seguintes características:

- i. Arco estável gerando poucos respingos e operação de modo simples;
- ii. Pequena formação de escória;
- iii. Velocidade de deposição do metal é alta, o que aumenta a eficiência do processo;
- iv. Solda com características superiores às obtidas em outros processos como, tenacidade, elasticidade, resistência a propagação de trincas, entre outras;
- v. Transferência de metal para a poça de fusão ocorre por spray ou, também conhecido por névoa;
- vi. Custo é mais elevado principalmente devido à utilização de gás inerte no processo.

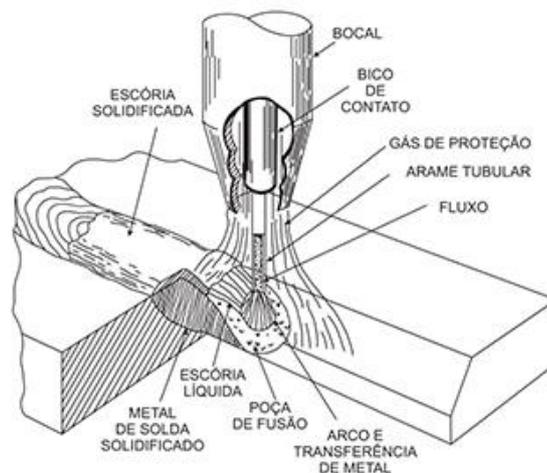
Ainda de acordo com Okumura et al. (1982), as particularidades do processo MAG em relação ao processo MIG são:

- i. Custo inferior;
- ii. No caso do uso de gás CO_2 a sua utilização é em aços devido ao gás de proteção ser oxidante;
- iii. A transferência do metal fundido para a poça de fusão é feita por transferência globular e curto-circuitos, o que causa uma instabilidade no arco e leva a formação de respingos;
- iv. Velocidade de deposição é superior à soldagem com eletrodos revestidos fazendo com que este processo seja mais utilizados em função da sua alta eficiência.

3.2.3 Processo de soldagem com arame tubular (FCAW)

Dentre os modos de soldagem com uso de arco elétrico existentes, encontra-se a soldagem com arame tubular, conhecido processo de soldagem FCAW (Flux Cored Arc Welding). Neste processo a união se dá pelo aquecimento dos eletrodos por um arco elétrico estabelecido entre a ponta do arame tubular e a peça de trabalho. O metal presente no arame tubular é transferido para a peça a ser soldada devido à grande quantidade de calor gerado. O eletrodo tubular é composto por um fluxo localizado internamente, este fluxo desempenha as funções próximas ao revestimento do eletrodo da soldagem por eletrodos revestidos, ou seja, o fluxo interno tem como objetivo estabilizar o arco, ajustar a composição da solda, proteger o metal fundido, entre outras (MARQUES; MODENESI, 2000). A Figura 3.4 representa o esquema de soldagem FCAW.

Figura 3.4 – Esquema de soldagem com arame tubular



Fonte: MARQUES et al., 2009.

Para Machado (2007), há duas maneiras básicas de soldagem com arame tubular, a primeira é o método auto-protegido onde toda a proteção do cordão de solda é conseguida pela escória e os gases gerados no processo e, o modo em que se faz necessário um gás de proteção adicional, em geral o gás é o CO₂ ou este misturado com argônio ou oxigênio.

Quando a soldagem é realizada com auxílio de proteção gasosa, o arame surge fazendo o contato elétrico e há um tubo que forma uma coifa onde o gás de proteção flui exercendo a sua função. Já na soldagem auto-protegida o arame está em um tubo eletricamente isolado ocasionando um contato elétrico mais distante da extremidade do arame (BRACARENSE, 2000).

Esse método de soldagem tem os princípios de funcionamento e equipamentos muito semelhantes ao processo GMAW, ou seja, possui elevado rendimento, alta taxa de deposição, alto fator de trabalho do soldador trazendo grande produtividade. Mas, no quesito metalúrgico, a soldagem FCAW é bem próxima da soldagem com eletrodos revestidos, deste modo, o processo oferece possibilidade de ajuste da composição química do metal de solda, alta versatilidade e facilidade de operação em campo. A união desses fatores faz com que a soldagem com arame tubular, às vezes, tenha desempenho superior aos outros dois processos já comparados (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Bracarense (2000) distingue a soldagem com arame tubular em três características principais:

- i. Produtividade ao se utilizar arames contínuos;
- ii. Fluxo interno do arame proporcionando benefícios metalúrgicos;
- iii. Escória interferindo na forma e no aspecto da solda.

Segundo Marques et al. (2009), o equipamento utilizado para a soldagem com arames tubulares é semelhante ao usado na soldagem MIG/MAG. Nesse caso, para arames de maiores diâmetros, a fonte utilizada é de corrente constante e os alimentadores de velocidade são variáveis, este apresenta melhores resultados e o comprimento do arco se aproxima ao da soldagem com proteção por gás. Se os arames possuírem menores diâmetros as fontes utilizadas possuem tensão constante e alimentador de velocidade constante.

De acordo com Machado (2007), o tipo de tocha varia caso seja necessário o uso de gás de proteção. A fonte de energia pode ser corrente alternada, porém, esta raramente é empregada. No caso da utilização de corrente contínua, para diâmetros acima de 1,2 mm, é preciso o uso de um controle sensível externo para que o comprimento do arco fique estável. Corrente pulsada também pode ser usada o que torna o arco mais estável, melhor controle da geometria do cordão, maior taxa de deposição e possibilidade de soldar em todas as posições.

Machado (2007) ressalta, ainda, que algumas diferenças operacionais e de acessórios também se relacionam com o uso, ou não, do gás de proteção. No caso do eletrodo tubular auto-protegido a tocha usada é a mais simples devido a uma profundidade de penetração inferior a quando se utiliza gás de proteção como o CO₂. Já quando há a necessidade de proteção por gás que aumente a penetração do cordão, o bico de contato da tocha deve ser maior, então a tocha é mais robusta porque a intensidade da corrente empregada é maior, similar à utilizada no processo MIG.

Para Bracarense (2000), o processo FCAW possui inúmeras vantagens quando comparado ao processo SMAW, no caso do processo GMAW, essas vantagens existem, porém não tão pronunciadas. Entre as vantagens deste processo encontram-se:

- i. Solda uniforme;
- ii. Boa qualidade do metal depositado;
- iii. Eficiência na deposição do metal;
- iv. Possibilidade de soldar vários tipos de aços e espessuras;
- v. Facilidade de operação;
- vi. Bom contorno em soldas de ângulo;
- vii. Alta taxa de deposição;
- viii. Arco visível;
- ix. Maior tolerância para soldagem em ambiente livre;
- x. Requer menor limpeza;
- xi. Cordão com elevada resistência a trincas.

Marques et al. (2000) também destacam a possibilidade de soldagem em todas as posições, o custo relativamente baixo da solda. Mas, de acordo com ele, o processo também possui limitações como a quantidade elevada de fumos que este pode gerar e o equipamento relativamente caro.

Bracarense (2000) cita outras limitações:

- i. Escória precisa ser removida;
- ii. O arame consumível é mais caro em relação ao eletrodo revestido;
- iii. A soldagem se limita a metais ferrosos e ligas a base de níquel;
- iv. A fonte de energia e o alimentador de arame devem estar localizados próximos ao local em que se realizará a solda.

Os consumíveis utilizados no processo são os gases de proteção, os produtos antirespingos, quando necessário e, os arames tubulares com os seus respectivos fluxos (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

3.2.3.1 Arames utilizados no processo FCAW

A soldagem com arame tubular tem dois grupos principais de arames a serem utilizados quando comparadas as suas dimensões:

- i. Arames com maiores diâmetros: diâmetros variam de 2,4 a 3,2 mm, estes possuem maiores quantidades de elementos estabilizadores e, sendo assim, podem utilizar a corrente do tipo alternada. Essa é uma das grandes vantagens do método. Como contraponto, a velocidade de deposição é menor do que a deposição realizada com arames sólidos e, a soldagem só pode ser feita na posição plana;
- ii. Arames com menores diâmetros: diâmetros variam de 1,2 a 2,4 mm, produz arco estável e com poucos respingos e é tão eficiente quanto a soldagem com arames sólidos (OKUMURA, 1982).

Em contrapartida, Marques et al. (2009) revela que, a partir da década de 90, foram desenvolvidos arames com diâmetros ainda menores, com valores inferiores a 1,0 mm. Isso possibilitou a soldagem adequada em qualquer posição e as espessuras soldáveis e as técnicas aplicáveis se tornaram semelhantes à soldagem GMAW.

Estes consumíveis estão disponíveis em várias dimensões, de acordo com Machado (2007), são encontrados diâmetros de 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 3,2 e 4,0 mm, os quais os mais usuais são os arames de diâmetros 1,2 e 1,6 mm e os mais difíceis de fabricar são os dois arames mais finos.

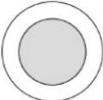
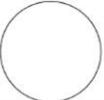
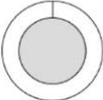
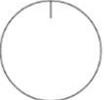
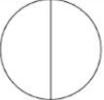
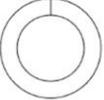
Se caso comparados quanto ao seu fluxo interno, segundo Vieira (2006), os arames tubulares podem ser do tipo “Metal Cored” ou “Flux Cored”. No primeiro caso, os arames são preenchidos com um fluxo composto principalmente por pó de ferro, ferro-ligas e desoxidantes, o que leva a um cordão de solda praticamente sem cobertura de escória. Já os arames “Flux Cored” possuem em seu interior um fluxo de minerais se assemelhando ao revestimento de eletrodo revestido.

Vieira (2006), ainda subdivide os arames “Flux Cored” em dois tipos especiais, os rufílicos e os básicos.

Os arames tubulares podem possuir diversas formas e, Rodrigues(2010) relata que as formas mais complexas de arames apresentam efeitos secundários por produzirem o início do arco em vários pontos e por pré-aquecerem com maior eficiência o fluxo fundindo-o em uma maior taxa o que torna o arco mais suave.

Na Figura 3.5 estão apresentadas as diferentes geometrias que os arames tubulares podem assumir.

Figura 3.5 – Geometrias usuais dos eletrodos tubulares

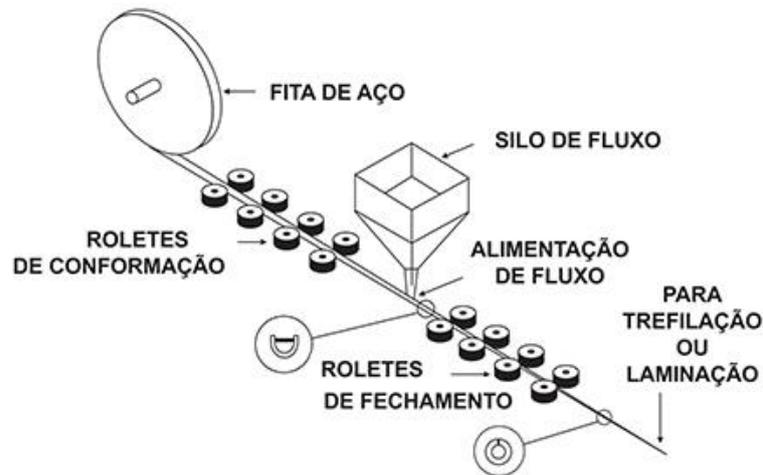
Tipo Nº.	Seção	Símbolo	Descrição
1			Sem costura
2			De topo
3			Sobreposto
4			Dobra simples
5			Dobra múltipla
6			Dobra dupla

Fonte: International Institute of Welding, 1986.

3.2.3.2 Processo de fabricação do arame tubular

O processo de fabricação de arame tubular se inicia com a escolha adequada da fita ou o fio que será conformado, normalmente de aço baixo carbono. Essa fita passa por um conjunto de rolos de conformação até que sua seção interna possua um perfil em “U”, em seguida, ocorre a alimentação do arame com o fluxo interno. Após alimentado a fita continua o seu percurso na máquina passando por outro conjunto de rolos de conformação que fecharão o arame até uma seção circular. O arame segue para uma unidade de trefilação para que se consiga deixá-lo no diâmetro adequado, esse processo é realizado por feiras ou por rolos. Alguns lubrificantes devem ser utilizados para auxiliar o processo de trefilação, estes são queimados em forno posteriormente (BRACARENSE, 2000). A Figura 3.6 esquematiza o processo.

Figura 3.6 – Esquema do processo de fabricação de arame tubular



Fonte: Marques et al., 2009.

Normalmente, os arames são produzidos em altas velocidades, ou seja, muitos metros por segundo e, ao final da trefilação o arame é enrolado em uma bobina, embalado e identificado ficando pronto para ser comercializado (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

3.2.3.3 Classificação dos arames tubulares

Segundo Geary et al. (2011) os eletrodos mais usados na soldagem a gás são os de ferro fundido, aço ligado e aço ao carbono. Não possuem custo elevado e são utilizados amplamente na soldagem de todos os tipos de aço com baixo carbono.

Há várias especificações de consumíveis destinadas à soldagem pelo processo FCAW de acordo com a American Welding Society, (AWS, 1991). Para Marques et al. (2009), muitos são os fatores são analisados para a classificação dos eletrodos como o tipo de fluxo – pó metálico ou fluxo convencional –, a necessidade do uso de gás de proteção, as posições de soldagem, tipo de corrente, composição química e propriedades mecânicas do cordão de solda. Na Tabela 3.1 podem ser visualizadas as especificações AWS dos arames tubulares para a soldagem FCAW.

Tabela 3.1 – Especificações AWS para arames tubulares

Especificação	Consumível
AWS A 5.9	Arames de aço inoxidável com pó metálico interno
AWS A 5.15	Arames para soldagem de ferro fundido
AWS A 5.18	Arames tubulares de aço carbono com pó metálico interno
AWS A 5.20	Arames tubulares de aço carbono com fluxo interno
AWS A 5.21	Arames para revestimento
AWS A 5.22	Arames tubulares para soldagem de aço inoxidáveis
AWS A 5.29	Arames de aço de baixa liga com fluxo interno

Fonte: Marques et al., 2009 (Imagem Adaptada).

A especificação para aços carbonos e baixa liga é composta pelos dígitos EXXT-XM J HZ, onde o E refere-se a eletrodo, o primeiro X indica o limite de resistência mínimo em 10000 psi, o segundo X indica as posições de soldagem – 0 para posição plana e horizontal e 1 para todas as posições –, T refere-se a usabilidade do eletrodo, já o M indica o gás com qual o eletrodo foi classificado, J à resistência ao impacto especial e, por fim, a sigla HZ que indica o máximo de hidrogênio difusível permitido. Caso o eletrodo seja de baixa liga, após a letra T acrescenta-se um número que indica a composição química do metal depositado (BRACARENSE, 2000).

Ainda segundo Bracarense (2000), a especificação para os eletrodos de aços inoxidáveis é composta pelos dígitos EXXTX-X em que E indica o eletrodo, o conjunto de três X relata a composição do metal depositado, o T refere-se a arame tubular, logo após, o X indica a posição de soldagem recomendada e, por fim o último X que indica a proteção externa (gás).

3.2.3.4 Características e funções dos elementos químicos dos fluxos dos arames tubulares

Geary et al. (2011) define o fluxo como o material utilizado para se prevenir, dissolver ou facilitar a remoção de óxidos e outras substâncias não desejáveis na área soldada. A escolha do fluxo deve ser adequada para o tipo de metal de base de serviço.

Machado (2007) relata em seus estudos que o fluxo presente nos arames tubulares possui função similar ao revestimento dos eletrodos revestidos, ou seja:

- i. Estabilizar o arco elétrico;
- ii. Auxiliar na geometria do cordão;
- iii. Desoxidar o metal de solda;
- iv. Formar escória e gás de proteção;
- v. Aumentar taxa de deposição, através do pó de ferro e;
- vi. Transferir elementos de liga.

Os fluxos podem ser compostos por vários elementos, sendo assim, são adequados para atender algum requisito especial. Isso é realizado alterando-se a formulação e o percentual do fluxo. A seleção correta do arame tubular determinará a qualidade da solda, pois composição do fluxo determinará a soldabilidade do arame e as propriedades mecânicas do metal de adição (RODRIGUES, 2010).

O método de soldagem mais usual é o que faz uso do gás de proteção, pois, mesmo possuindo maior custo, este aumenta a tolerância do processo e as propriedades mecânicas da solda acarretando em redução de custos totais. A soldagem FCAW com gás de proteção pode ser realizada com três de arames tubulares: rutilico, básico e fluxo metálico (MACHADO, 2007).

Souza (2011) revela que o eletrodo com fluxo metálico tem a função de unir os elementos do interior do eletrodo com o metal de solda aumentando-se, assim, a resistência do material depositado e desoxidando-o. Já Rodrigues (2010) destaca que o eletrodo com fluxo metálico contém, principalmente, pó de ferro e ferro liga, e que a escória gerada é insignificante favorecendo a soldagem em múltiplos passes e aumentando a eficiência do processo. É mais indicado quando a soldagem é mecanizada e em alta velocidade.

O fluxo rutilico é composto por dióxido de titânio. Com o uso deste, é possível se controlar a viscosidade e o ponto de fusão da escória, sendo assim, a escória pode ser consistente para a soldagem na posição vertical ou fluida para a soldagem na posição plana em altas velocidades (SOUZA, 2011). Rodrigues (2010) relata que a excelente soldabilidade deste eletrodo se manifesta devido ao rutilo e destaca as principais características deste:

- i. Escória de fácil remoção;
- ii. Arco mais estável em uma variada quantidade de correntes de soldagem;

- iii. Ótimo desempenho operacional e baixa produção de respingos;
- iv. Excelentes propriedades mecânicas;
- v. Bom formato da gota possibilitando a soldagem em todas as posições.

Os arames tubulares básicos produzem soldas com excelente tenacidade e ductilidade. Comparativamente com o eletrodo rutílico, o básico gera uma maior quantidade de respingos e um cordão mais convexo. O modo de transferência é mais globular e sua soldabilidade não é tão boa. Este é utilizado quando se deseja melhores propriedades mecânicas e baixo nível de depósito de hidrogênio (RODRIGUES, 2010). De acordo com Souza (2011), este tipo de eletrodo não é usado fora de posição devido ao modo de transferência metálica – globular – que necessita da gravidade para completar sua transferência e devido às baixas correntes de soldagem.

Machado (2007) apresenta em seus estudos as composições típicas dos fluxos utilizados em soldagem FCAW auto-protegida, estes são chamados de Fluorita-Alumínio, Fluorita-Titânia e Fluorita-Óxido de Cálcio-Titânia.

O material presente no interior do eletrodo tubular possui entre 15% e 30% do seu peso, porém, esse valor depende das funções a ser desempenhada pelo fluxo, como em casos de arames especiais com menor seção metálica do tubo esse valor pode alcançar 50%. Os arames tubulares auto-protegidos possuem maior quantidade de fluxo comparativamente aos arames tubulares com proteção gasosa (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

3.2.3.5 Utilização de fluxo com adição de polímero para soldagem

A implementação de novos materiais em um processo tão antigo como a soldagem é proveniente da constante busca da melhoria do processo concomitantemente com a redução do custo para a realização do mesmo.

Os fluxos utilizados nos arames tubulares, assim como os revestimentos presentes nos eletrodos revestidos podem ter várias composições. Devido à busca de novas características em um cordão de solda, é interessante a implementação de outros tipos de materiais no fluxo ou revestimento utilizado. A presença de polímero na composição do revestimento de eletrodos revestidos se mostrou interessante, beneficiando o processo de soldagem.

Vaz (2014) relata que em seus estudos vários fatores foram ocasionados pela soldagem realizada com eletrodo E7018 revestido com adição de polímeros:

- i. Aumento da presença da ferrita acicular no material, sendo este o constituinte predominante no cordão de solda;
- ii. Aumento da profundidade do cordão de solda o que ocasionou a uma maior diluição do metal de base;
- iii. O teor de carbono se elevou bastante havendo incorporação do mesmo na poça de fusão. Esse fator é explicado pela atmosfera rica em carbono proveniente da decomposição do material polimérico;
- iv. Proteção gasosa mais eficaz, reduzindo a incorporação de elementos externos à poça de fusão, inclusive de nitrogênio;
- v. Redução na absorção de nitrogênio às gotas. As gotas transferidas são menores resultando em uma transferência metálica de maneira rápida. Como a transferência é mais ágil não há tempo suficiente para a gota formada absorver grandes quantidades de nitrogênio.

Vaz (2014) comenta, ainda, que o boro e o nitrogênio são os principais agentes da alteração da microestrutura do material soldado com eletrodo revestido com PTFE. O boro, importante elemento para a formação da ferrita acicular, é proveniente do aglomerante polimérico utilizado no fluxo utilizado. A condição para formação da ferrita acicular envolve a permanência de boro em solução. Tal elemento torna os sítios de nucleação nos contornos de grão austeníticos impotentes promovendo, assim, a formação da ferrita acicular. Já o nitrogênio foi apontado como elemento que eleva a fração de ferrita acicular quando presente em concentrações inferiores a 70 ppm, o que condiz com a quantidade existente quando o material é soldado com arame revestido com polímero.

3.2.3.6 Aplicações dos arames tubulares

Segundo Marques et al. (2009), as características da soldagem FCAW e o desenvolvimento de novos consumíveis proporcionou um grande crescimento da sua utilização no mundo e no Brasil, inclusive.

Modenesi et al. (2000) restringe a aplicação de arames tubulares a soldagem de parte de veículos, soldagem de aços carbono e ligados e soldagem na fabricação, manutenção e montagem ao ar livre. Em contraponto, Marques et al. (2009) inclui o seu uso na indústria naval e nuclear, assim como na construção de plataformas petrolíferas marítimas e a soldagem de aços inoxidáveis.

Há alguns metais base que possibilitam a soldagem pelo método FCAW. Bracarense (2000) lista-os como:

- i. Aços temperados;
- ii. Aços inoxidáveis;
- iii. Aços baixo carbono;
- iv. Aços médio carbono, tratados termicamente e baixa liga;
- v. Aços com teores de níquel;
- vi. Ligas de níquel;
- vii. Aços estruturais resistentes a corrosão atmosférica;
- viii. Aços cromo-molibidênio.

3.2.3.7 Variáveis dos processos de soldagem FCAW

3.2.3.7.1 Corrente de soldagem

A corrente de soldagem é uma das principais variáveis dos processos de soldagem, ela está relacionada com vários outros parâmetros como, por exemplo, velocidade de soldagem e características do eletrodo. Caso esses parâmetros sejam mantidos constantes, uma alteração na corrente pode influenciar diretamente no aspecto do cordão de solda. Quando se aumenta a corrente de soldagem, há um aumento na penetração no cordão de solda, assim como um aumento na taxa de deposição. Quando a corrente é baixa o processo tende a ficar mais instável gerando uma quantidade excessiva de respingos e porosidade no cordão (BRACARENSE, 2000).

Machado (2007) assume a corrente como responsável pela penetração determinando, também, a taxa de deposição e o modo de transferência metálica. Ressalta, ainda, que quando alterada a corrente a tensão também deve ser ajustada para que o arco elétrico permaneça estável.

De acordo com Souza (2011), a velocidade de soldagem e a corrente aplicada possuem relação direta entre si e com a taxa de fusão do arame, sendo assim, um aumento na corrente acarretará em aumento da velocidade de soldagem que levará, conseqüentemente, a uma elevação na taxa de fusão do arame.

3.2.3.7.2 Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem está relacionada com a corrente de soldagem. Para Bracarense (2000), esta variável influencia na penetração e no contorno do cordão de solda. Uma baixa velocidade de soldagem pode acarretar em inclusão de escória e falta fusão do metal de base.

Rodrigues (2010) relaciona a elevada velocidade de alimentação com a formação de mordeduras na peça, formato e morfologia irregular do cordão de solda.

3.2.3.7.3 Tensão de soldagem

A tensão de soldagem é diretamente proporcional ao comprimento de arco. Para Bracarense (2000), a tensão do arco afeta a penetração, a aparência e as propriedades do cordão de solda. Na soldagem FCAW, quando o eletrodo é auto-protegido, um aumento na tensão pode ocasionar no aumento da absorção de hidrogênio levando a aumento de porosidade ou trincas. Quando se reduz a tensão de soldagem o arco, o cordão de solda terá menor penetração, será estreito e a soldagem terá um excesso de respingos.

Machado (2007) assume em seus estudos que o aumento da tensão leva a um alargamento do cordão de solda e, caso esse aumento seja significativo, haverá a formação de um cordão irregular. Já a redução da tensão resulta em cordão convexo ou até, em casos de tensão muito baixa, o arco pode se extinguir ou acarretar no mergulho do eletrodo na poça de fusão e toque do mesmo no metal base prejudicando a solda.

A escolha da melhor tensão se relaciona com o aspecto desejado do cordão de solda, o tipo de arame, do gás de proteção e, principalmente, do valor da corrente a ser aplicada para que o arco elétrico seja estável (SOUZA, 2011).

3.2.3.7.4 Taxa de deposição

Esse parâmetro é a quantidade de eletrodo depositado por unidade de tempo. Essa taxa é dependente de vários parâmetros do eletrodo, como extensão, composição, diâmetro do eletrodo e também da corrente de soldagem.

3.2.3.7.5 Extensão do eletrodo energizado

O comprimento do eletrodo energizado faz parte da distância entre o bico de contato e a peça de trabalho (DBCP). Quando a alimentação do eletrodo é constante, um aumento no comprimento do eletrodo reduz a corrente de soldagem. Esse aumento no comprimento do eletrodo também faz com que o arco fique mais instável e pode gerar uma deposição excessiva de metal (SOUZA, 2011).

Machado (2007) revela que um aumento da DBCP aumenta também a temperatura do bico que entra em contato com a peça, devido ao efeito Joule, resultando em queda de tensão e afetando a taxa de deposição, estabilidade do arco e penetração. O valor dessa distância entre o bico de contato e a peça se relaciona com a aplicação do eletrodo e das recomendações do fabricante, mas, geralmente, o tamanho adequado é de 20 a 40 mm. Para eletrodos auto-protégidos se utiliza eletrodos de 20 a 90 mm.

3.2.3.7.6 Vazão do gás de proteção externa

Quando se faz uso da proteção gasosa externa, essa variável deve ser controlada por afetar a qualidade do metal depositado. A determinação da vazão do gás de proteção depende do tipo e do diâmetro do bocal da tocha, da distância do bocal à peça de trabalho e do ambiente de trabalho. A baixa quantidade de gás de proteção leva a formação de poros e oxidação por deficiência na proteção da poça de fusão. Já um uso exagerado da vazão do gás de proteção pode haver turbulência e aumento de impurezas no metal depositado (BRACARENSE, 2000).

3.2.3.7.7 Inclinação da tocha

A manipulação e o posicionamento da tocha são importantes na soldagem. Estes influenciam no controle da escória e do perfil de depósito do cordão de solda, impedindo a formação de escória na frente da poça de fusão e a inclusão da mesma por ficar contida. O ângulo de inclinação da tocha é formado perpendicularmente ao plano de deslocamento, este é positivo caso a inclinação concorde com o sentido de deslocamento da soldagem (arame aponte para cordão já formado) ou, negativo, caso a inclinação seja no sentido contrário ao deslocamento (RODRIGUES, 2010).

Rodrigues (2010) afirma que na inclinação positiva se obtêm grandes penetrações. Ao contrário da inclinação negativa que a penetração é menor, gera maior quantidade de respingos, um cordão mais plano e largo.

3.3 Descontinuidades no cordão de solda

De acordo com Bracarense (2000), o processo FCAW tem destaque por apresentar solda com metal depositado de alta qualidade e boa aparência visual, mas alguns itens afetam diretamente essa qualidade. Estes itens são chamados de descontinuidades. Os tipos mais comuns de descontinuidades localizadas no cordão de solda são descritos por Bracarense (2000) como:

- i. Porosidade: causada por correntes de ar, quantidade inadequada de fluxo de gás, composição do gás utilizado, metal de base ou alimentador de arame contaminado, tensão alta, velocidade de soldagem excessiva, entre outras causas;
- ii. Falta de penetração ou fusão incompleta: ocasionada por parâmetros inadequados, solda com perfil inadequado e tocha posicionada de maneira errada;
- iii. Trinca: causada por juntas com restrição excessiva, eletrodo inadequado, desoxidantes insuficientes no fluxo do arame;
- iv. Falha de alimentação: defeito relacionado à conduíte sujo, fusão do bico de contato, contato excessivo do arame no bico.

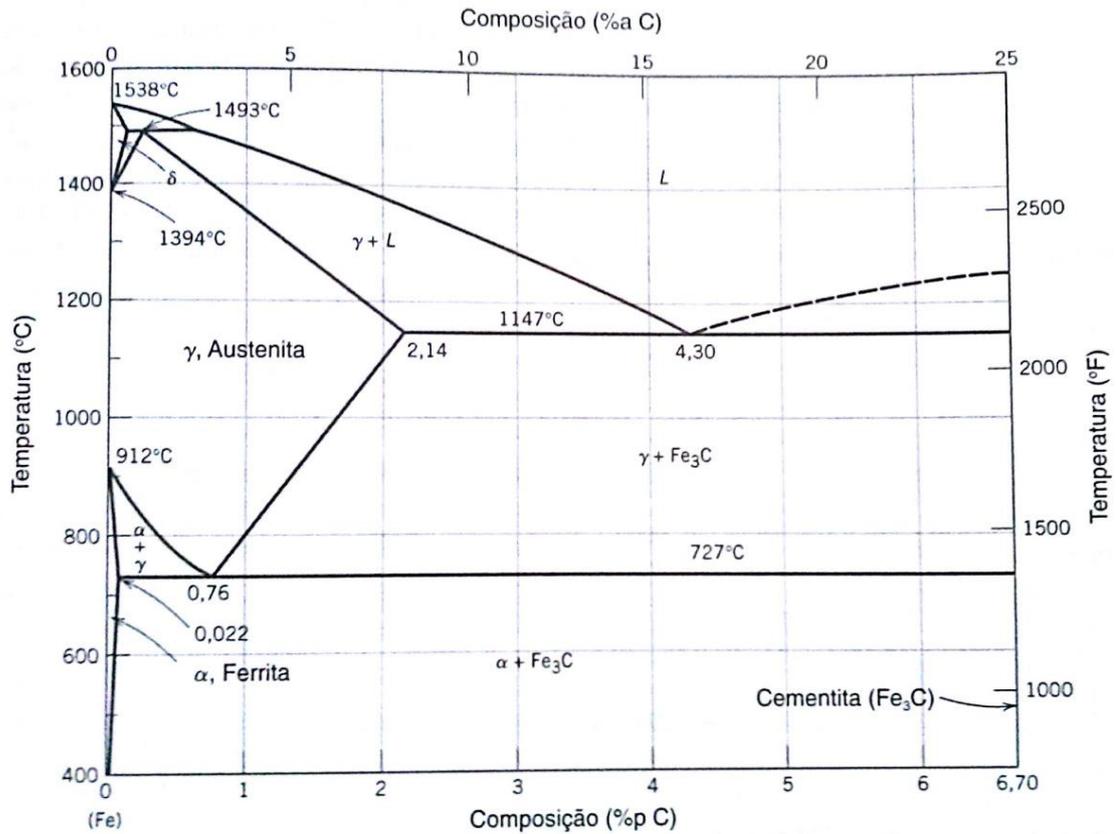
3.4 Microestrutura

De acordo com Heck (2012), a microestrutura de um material se compõe das características físicas desse material quando observadas em um microscópio. São as fases presentes no material e a forma como estão arrançadas. Características estruturais se enquadram na microestrutura. Essas características estruturais, como tamanho e disposição dos grãos são responsáveis pelas propriedades dos materiais.

Para se determinar o tipo de microestrutura presente em um material é fundamental a utilização de um diagrama de fases. Esse diagrama determina qual a fase presente em uma dada temperatura para uma composição específica (SHACKELFORD, 2008).

Ao se trabalhar com aço, o diagrama de fases utilizado é o diagrama Ferro - Carbono (Fe - Fe₃C), uma parte desse diagrama pode ser observado na Figura 3.7. O sistema pode ser dividido em uma porção rica em ferro e outra rica em cementita, onde há 6,70% de carbono. O diagrama é limitado em 6,70%p C devido aos aços e ferros fundidos possuírem teores de carbono inferiores a esse valor.

Figura 3.7 - Diagrama Fe – Fe₃C



Fonte: CALLISTER, 2008, p.211.

Como pode ser observado na Figura 3.7, à temperatura ambiente, a forma estável do ferro é chamada de ferrita, ou ferro α . A ferrita possui uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). Ao se elevar a temperatura a 912°C, a ferrita sofre uma transformação para austenita, ou ferro γ . Essa nova fase, denominada austenita, possui estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC). Ao alcançar 1394°C a estrutura do ferro volta a ser cristalina CCC e a fase presente é conhecida como ferrita δ . Na temperatura de 1538° há a fusão do ferro (CALLISTER, 2008).

Ao longo do gráfico, ao se aumentar a quantidade de carbono presente no ferro, é possível encontrar a fase Fe₃C, conhecida como cementita. A cementita pode ser encontrada junto com a ferrita, originando um constituinte denominado perlita. Esse constituinte é presente apenas até uma temperatura de 727°C. Ao se elevar essa temperatura a cementita é encontrada com a austenita, isso ocorre até a temperatura de 1147°C, em seguida, em temperaturas mais altas, começa a ocorrer a fusão do material.

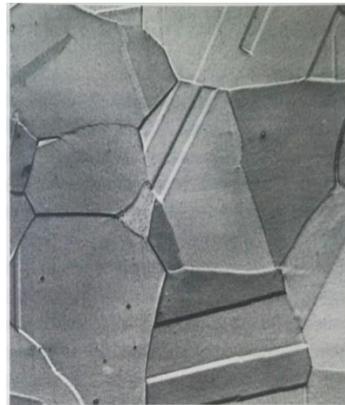
3.4.1 Fases e Composições

3.4.1.1 Austenita (ferro γ)

Van Vlack (2000) esclarece que a austenita é a fase estável do ferro puro entre as temperaturas de 912°C e 1394°C. A austenita possui estrutura cubica de faces centradas (CFC). Essa fase não é ferro magnética em nenhuma faixa de temperatura. Quando estável é mole e dúctil, sendo assim, é bem adequada para os processos de fabricação.

Somente em aços austeníticos a austenita aparece estável em temperatura ambiente. É deformável e apresenta grande resistência ao desgaste (VENSON, 2014). Na Figura 3.8, pode-se observar a microestrutura da austenita.

Figura 3.8 – Fotomicrografia da austenita



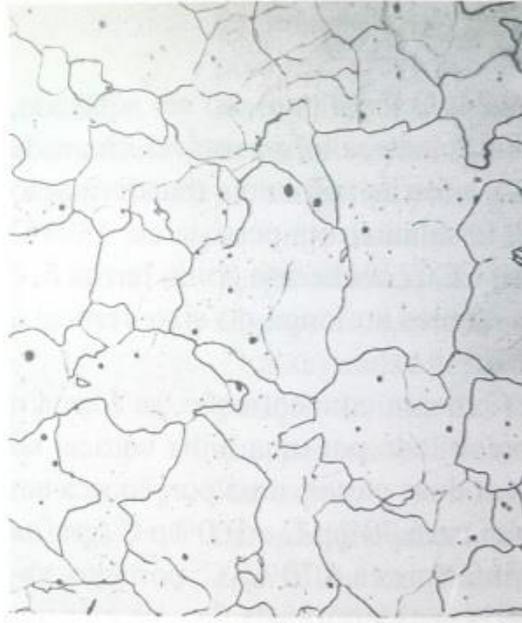
Fonte: CALLISTER, 2008, p.212 (Imagem Adaptada).

3.4.1.2 Ferrita (ferro α)

A ferrita é formada por difusão, nucleando-se, em sua maioria, nos contornos dos grãos austeníticos. Ao se aumentar a taxa de resfriamento, a ferrita passa a se nuclear, também, no interior dos grãos (SILVA; MEI, 1988). É uma fase com excelente tenacidade e ductilidade, além de ser um material ferro magnético em temperaturas inferiores a 766°C.

Possui uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), sendo que os espaços interatômicos são pequenos e alongados. Desse modo, é difícil a acomodação de átomos de carbono nos interstícios e o átomo de carbono, também, não é grande o suficiente para a formação de uma solução sólida substitucional. Conclui-se, então, que esta é uma fase de baixa solubilidade de carbono (0,008%) (VAN VLACK, 2000). A Figura 3.9 representa a microestrutura da ferrita.

Figura 3.9 – Fotomicrografia da ferrita



Fonte: CALLISTER, 2008, p.212 (Imagem Adaptada).

A ferrita pode ser definida como ferrita primária. Perdigão (1987) relata que a ferrita primária pode ocorrer sobre duas formas:

- i. Ferrita de contorno de grão – PF (G): presente em veios ou grãos poligonais ligados à contornos de grãos antigamente austeníticos;
- ii. Ferrita poligonal intragranular – PF (I): grão de ferrita encontrado dentro dos grãos de austenita prévia. A largura da PF (I) são maiores que o triplo da largura média das ripas da ferrita acicular e da ferrita secundária.

3.4.1.3 Ferrita Acicular

Esse constituinte é especialmente importante no caso de materiais soldados. De acordo com a revisão realizada por Vaz (2014), percebeu-se que a ferrita acicular tem papel importante na melhoria das propriedades mecânicas do metal de solda, influenciando na microestrutura, resistência e tenacidade do metal de solda. Esse comportamento provém da morfologia dos alongados grãos ferríticos emaranhados, separados por contornos de alto ângulo e com grande quantidade de discordâncias (GALLEGO; VENTRELLA, 2014). A propagação de trincas é dificultada quando a microestrutura é caótica, o que acontece na ferrita acicular. A micrografia da ferrita acicular pode ser observada na Figura 3.10.

Ainda segundo Gallego e Ventrella (2014), a formação da ferrita acicular pode ser ocasionada de duas formas:

- i. Nucleação heterogênea das ripas de ferrita acicular sobre inclusões não metálicas existentes no metal de solda;
- ii. Nucleação autocatalítica.

O surgimento de sítios de nucleação intragranulares é favorecido pela elevada densidade de inclusões não metálicas na região soldada. Esses sítios de nucleação levam à formação da estrutura acicular. Essa estrutura é muito próxima da bainítica.

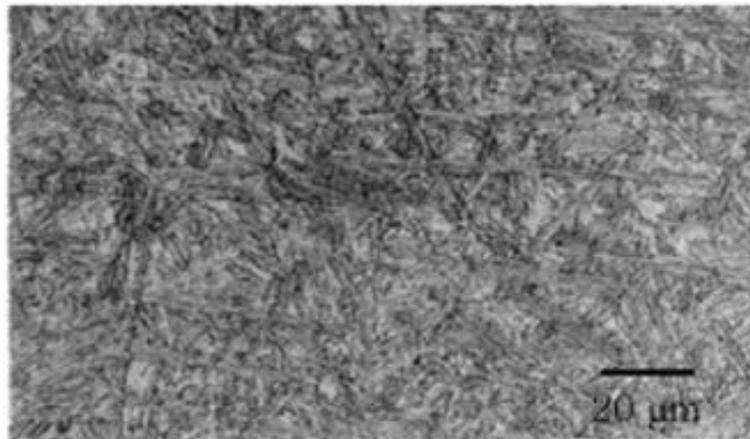
A ferrita acicular (AF) e a bainita se diferem, principalmente, no sítio de nucleação e direção de crescimento do grão. Sendo que a ferrita acicular se nucleia em regiões intragranulares e cresce em várias orientações, se mostrando uma estrutura “caótica”, enquanto a bainita se nucleia em contornos de grãos e cresce como um feixe de placas paralelas, acompanhando a direção de crescimento da austenita (CASTRO, 2012).

Para que haja a formação de ferrita acicular várias variáveis devem ser analisadas. De acordo com a revisão realizada por Vaz (2014), os principais critérios para a formação dessa microestrutura são:

- i. Taxa de resfriamento no metal de solda: o ciclo térmico deve favorecer a formação da estrutura, pois como a ferrita acicular é uma estrutura próxima à bainita, é necessário que haja um super-resfriamento;
- ii. Composição química: ao se variar a quantidade de carbono presente no aço de 0,045 a 0,145% observa-se uma diminuição da presença de ferrita poligonal e ferrita de contorno de grão e um aumento da incidência de ferrita acicular. O aumento da quantidade de manganês para até 1,8% também favorece a nucleação dessa microestrutura. O níquel também desempenha este papel, porém, quando em teores entre 1,8% a 3,5% a formação principal é a de martensita. Outros elementos, como molibdênio, alumínio e titânio, também influenciam a formação de ferrita acicular;
- iii. Inclusões não metálicas: elementos como o TiO_2 e $\text{Al}_2\text{O}_3\text{MnO}$ são agentes nucleantes da ferrita acicular. Sendo que o TiO_2 , por possuir uma número maior de partículas, é mais eficiente na nucleação. A composição da alma do eletrodo e do fluxo presente em seu interior irá interferir diretamente na quantidade de ferrita acicular desenvolvida no material soldado;

- iv. Tamanho do grão austenítico: grãos auteníticos maiores possuem uma maior chance de se transformar em ferrita acicular. Isso porque há a diminuição da densidade de sítios de nucleação nos contornos de grão;
- v. Ferrita alotromórfica: a presença dessa estrutura ferrítica reduz a quantidade de contornos de grão austeníticos e limita a nucleação de bainita, promovendo, então, um maior surgimento de ferrita acicular;
- vi. Deformação plástica: de acordo com a quantidade de deformação plástica diferentes efeitos são observados sobre a microestrutura podendo favorecer ou desfavorecer a formação da ferrita acicular.

Figura 3.10 – Micrografia da ferrita acicular



Fonte: LEE, BHADESHIA E LEE, 2003, p. 251 (Imagem Adaptada).

Para Perdigão (1987) a ferrita acicular é composta de pequenos grãos não alinhados localizados no interior da austenita prévia. Morfologicamente se assemelha a estrutura de Widmanstätten e algumas ripas isoladas de comprimento superior a largura.

3.4.1.4 Ferrita Secundária (FS)

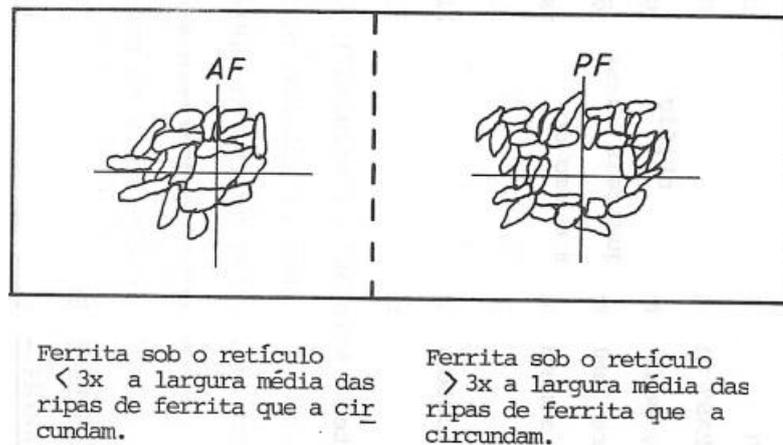
Ocorre em duas formas principais:

- i. Ferrita com fase secundária alinhada – FS (A): conjunto de ripas de ferrita paralelas, porém, a relação comprimento/largura deve ser superior a 4/1. Caso isso não ocorra a ferrita será acicular ou primária;
- ii. Ferrita com fase secundária não alinhada – FS (NA): ferrita que circunda totalmente os microconstituintes ou ripas de ferrita acicular (PERDIGÃO, 1987).

As Figuras 3.11, 3.12 e 3.13 são comparações entre os três tipos de ferrita discutidos.

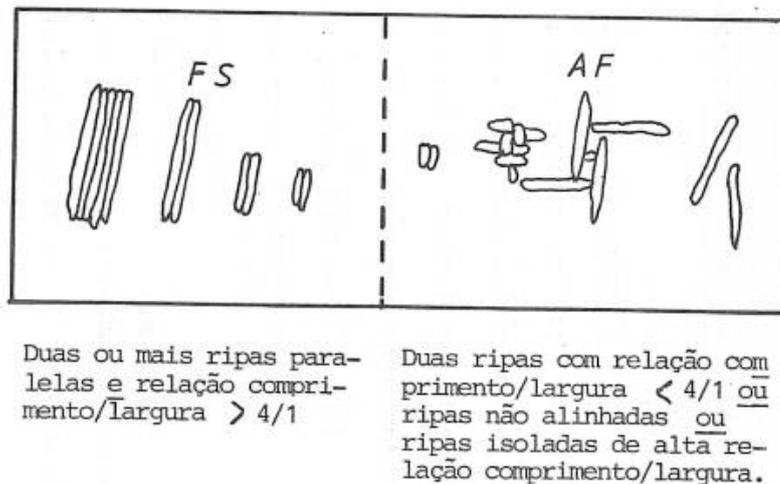
Perdigão (1987) descreve ainda sobre o agregado de ferrita, também conhecido por carboneto disperso – FC, esse constituinte é composto por estrutura de ferrita fina/carbonetos incluindo ferrita com interfase de perlita e carbonetos.

Figura 3.11 – Comparação entre a ferrita acicular e a ferrita primária



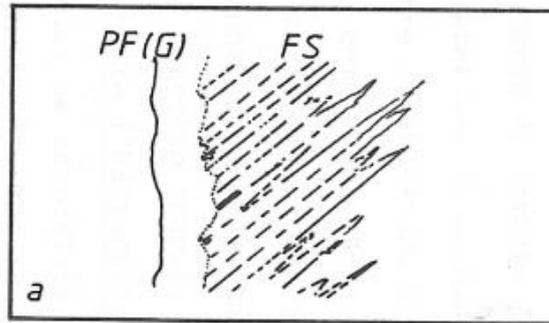
Fonte: PERDIGÃO, 1987 (IMAGEM ADAPTADA).

Figura 3.12 – Comparação entre a ferrita secundária e a ferrita acicular



Fonte: PERDIGÃO, 1987 (IMAGEM ADAPTADA).

Figura 3.13 – Fronteira imaginária entre a ferrita primária e a ferrita secundária



Fronteira imaginária entre a PF(G) e a FS.

Fonte: PERDIGÃO, 1987 (IMAGEM ADAPTADA).

3.4.1.5 Cementita

Conhecida por cementita ou carbeto de ferro, possui fórmula química Fe_3C . Callister (2008) relata em seu livro que a cementita é um composto duro e frágil que eleva a resistência de alguns aços quando presente. Segundo Venson (2014), este composto é muito resistente ao cisalhamento e é ferro magnético em baixas temperaturas até alcançar $212^{\circ}C$, quando perde esta propriedade. É muito rica em carbono e se forma a partir da saturação de carbono na formação da estrutura ferrítica (SILVA; MEI, 1988).

3.4.1.6 Perlita

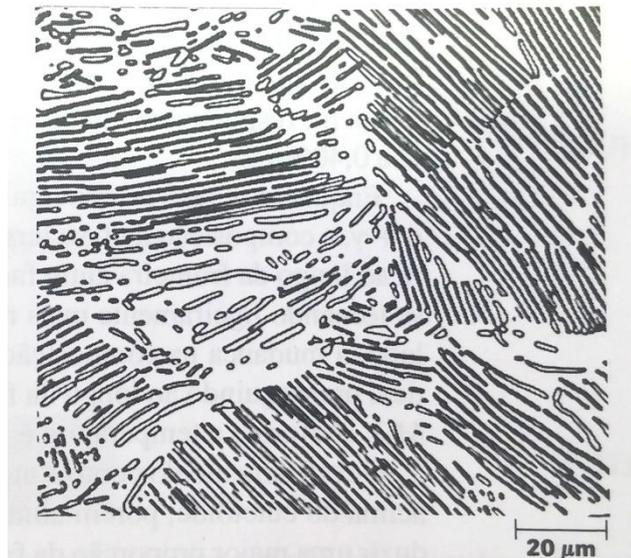
A perlita é um composto derivado de um resfriamento lento. Esse modo de resfriamento permite que as condições estejam em equilíbrio. A perlita se consiste em camadas alternadas, lamelas, de duas fases, a ferrita e cementita. Essas fases se formam simultaneamente durante a transformação de fase. São grãos, também denominados de colônias, em que as camadas são orientadas em uma mesma direção. Sendo que essa direção provavelmente variará de colônia para colônia. Suas propriedades são intermediárias entre a ferrita (macia e dúctil) e a cementita (dura e frágil) (CALLISTER, 2008).

Em seu livro, Silva e Mei (1988) falam sobre a nucleação da perlita que ocorre preferencialmente nos contornos de grão da austenita, podendo se originar, também, no interior do grão austenítico quando este apresenta gradientes de concentração de carbono ou partículas dispersas.

Silva e Mei (1988) ainda descrevem sobre o processo de formação da perlita. De acordo com o crescimento da partícula de cementita há uma redução da quantidade de átomos de carbono presentes na região favorecendo a formação de ferrita. O crescimento da ferrita leva a segregação de carbono na austenita até se atingir o nível de carbono suficiente para o desenvolvimento da cementita ocorrendo a nucleação da mesma. E o ciclo continua até a completa formação da perlita.

Na Figura 3.14, pode-se observar a microestrutura da perlita, onde a parte mais clara, branca, corresponde a ferrita e a parte escura corresponde a cementita.

Figura 3.14 – Micrografia da perlita



Fonte: CALLISTER, 2008, p.213 (Imagem Adaptada).

3.4.1.7 Bainita

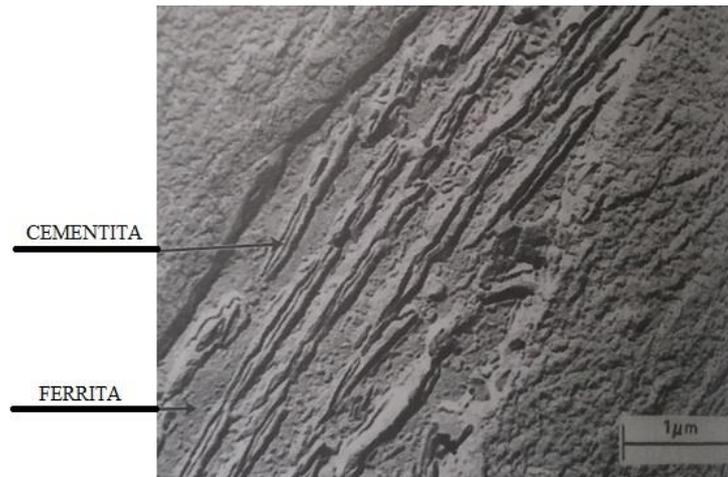
A bainita é um microconstituente que provém da transformação austenítica. Possui, também, duas fases, a ferrita e a cementita. A bainita ocorre em formatos semelhantes a de agulhas ou placas dependendo da sua temperatura de resfriamento. Essa estrutura ocorre em temperaturas abaixo da temperatura de formação da perlita (CALLISTER, 2008).

Precisa-se resfriar o aço carbono rapidamente e mantê-lo em uma temperatura adequada para que a bainita se forme. Ela pode ser dividida entre bainita superior ou inferior dependendo da temperatura em que se forma (SILVA; MEI, 1988).

Venson (2014) relata que a bainita é constituída por agulhas alargadas de ferrita que contém placas finas de carbeto. Um constituinte de elevada dureza, entre 40 e 60 HRC.

Na Figura 3.15, podem ser observadas as fases ferrita e cementita formando o composto denominado bainita.

Figura 3.15 – Micrografia da bainita



Fonte: CALLISTER, 2008, p.238 (Imagem Adaptada).

3.4.1.8 Martensita

De acordo com Silva e Mei (1988), a martensita é uma solução sólida supersaturada de carbono com uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC). Essa estrutura TCC é a principal responsável pela elevada dureza da microestrutura. A martensita se apresenta em formas de ripas quando o aço é baixo carbono ou, em formas de agulhas, em aços com alto teor de carbono.

A martensita é uma estrutura monofásica que não se encontra em equilíbrio. Assim como a bainita, a martensita é um microconstituente formado quando ligas ferro-carbono austenitizadas são resfriadas rapidamente, porém, desta vez, até uma temperatura relativamente baixa, próxima à temperatura ambiente. O resfriamento deve ser rápido de tal forma que não haja difusão do carbono, pois essa difusão resultará na formação de ferrita e cementita (CALLISTER, 2008).

A transformação de fase ocorre por cisalhamento da estrutura. Ao se alcançar uma temperatura que a austenita se torne instável a formação de perlita é favorecida. Porém, para que a perlita se forme, há a necessidade de um tempo que permita a difusão do carbono. Se

não houver tempo para a formação da perlita, ou seja, caso o resfriamento seja rápido, haverá a formação da estrutura martensítica que é metaestável. Mas essa formação dependerá da velocidade do resfriamento e da temperatura de início de resfriamento (SILVA; MEI, 1988).

Venson (2014) define as propriedades da martensita como resistência a tração entre 170 – 250 kg/mm², dureza entre 50 – 60 HRC, magnética e taxa de alongamento de 0,5%. Na Figura 3.16, pode-se observar uma fotomicrografia da martensita, onde ela é representada pelos grãos com formato de agulha e as regiões brancas correspondem à estrutura austenítica que não se transformou durante o resfriamento.

Figura 3.16 – Fotomicrografia da martensita



Fonte: CALLISTER, 2008, p.240 (Imagem Adaptada).

3.5 Ensaios Mecânicos e Não Destrutivos

De acordo com Silva e Mei (1988), ensaios mecânicos são testes realizados nos materiais que nos geram resultados importantes para a determinação das propriedades mecânicas dos materiais, além de ser um procedimento muito importante para assegurar o controle de qualidade do produto após a realização de processos de fabricação nos materiais. Os autores ainda comentam que ensaios mecânicos devem ser realizados em condições padronizadas o que permite a comparação das propriedades mecânica encontradas nos ensaios com valores específicos das propriedades estabelecidos na literatura.

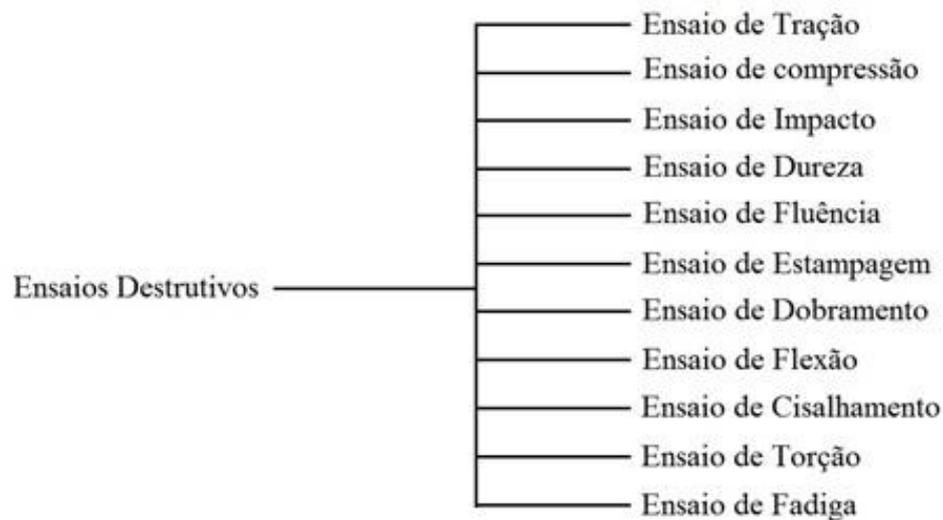
Os ensaios mecânicos são realizados em função da geometria da peça, do processo de fabricação utilizado e das normas técnicas vigentes para o ensaio em questão. Os ensaios

mecânicos podem ser realizados na própria peça fabricada, em modelos, em amostras ou em corpos de prova retirados de parte da estrutura fabricada (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Costa (2000) descreve que os ensaios mecânicos podem ser classificados como ensaios não destrutivos e ensaios destrutivos. Os ensaios não destrutivos são os ensaios que após a sua realização não deixam marcas ou sinais no corpo de prova ou peça utilizada. Desse modo, não inutilizam o material. Muitas vezes são realizados em produtos já acabados para a detecção de falhas nos mesmos, já os ensaios destrutivos inutilizam as peças ou deixam marcas após o ensaio. O corpo de prova, quando utilizado, é retirado da própria peça.

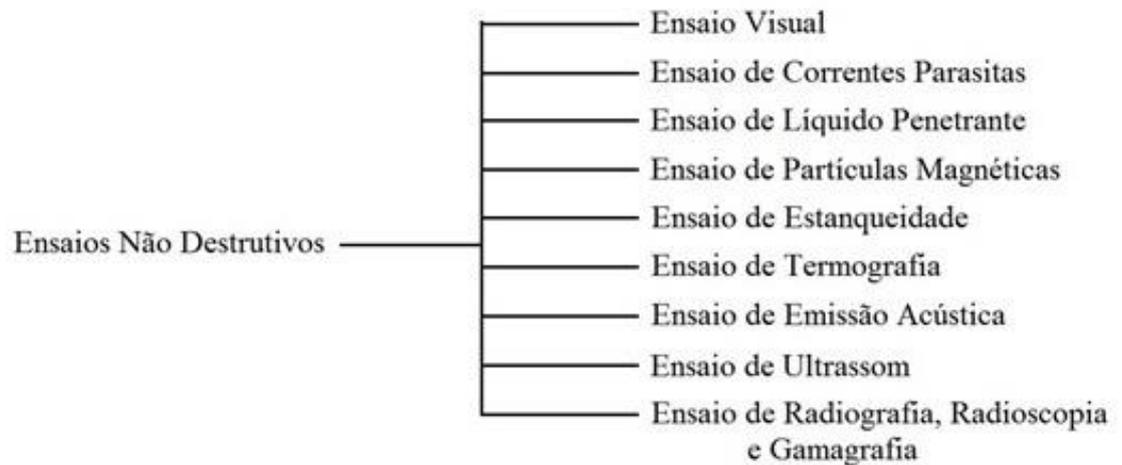
As figuras 3.17 e 3.18 representam de forma esquemática a divisão dos principais ensaios entre os ensaios destrutivos e não destrutivos. No presente trabalho serão executados apenas dois ensaios destrutivos, sendo o ensaio de impacto e o ensaio de dureza, e somente um ensaio não destrutivo que é o ensaio visual. Sendo assim, o foco de estudo se dará nesses três ensaios em questão.

Figura 3.17 – Ensaios mais importantes entre destrutivos



Fonte: CHIAVERINI, 1986 (Imagem Adaptada).

Figura 3.18 – Ensaaios mais importantes entre os não destrutivos



Fonte: CHIAVERINI, 1986 (Imagem Adaptada).

3.5.1 Ensaaios Não Destrutivos

3.5.1.1 Ensaio Visual

Costa (2000) em seu trabalho relata que o ensaio não destrutivo é o ensaio mais antigo realizado pelo homem. Dentro dessa categoria se encontra o ensaio de inspeção visual, o ensaio não destrutivo mais utilizado na indústria.

Quando se inspeciona visualmente uma peça se busca encontrar imperfeições como descontinuidades ou defeitos utilizando apenas a visão do operador. Como há vários problemas de visão e, também, o efeito da ilusão de ótica, a inspeção visual não é muito precisa, sendo necessária a utilização de réguas, lupas e espelhos para diminuir o erro.

Sampaio (2010) afirma que, a partir desse ensaio obtêm-se informações sobre a aparência superficial da peça, assim como suas dimensões, formatos e descontinuidades grosseiras sobre a mesma. Por meio da inspeção visual é possível selecionar os próximos ensaios que deverão ser realizados na peça. É importante ressaltar que a conclusão realizada apenas no exterior da peça não revela nada sobre o seu interior, podendo, ou não, haver descontinuidades internamente.

Para Costa (2000), a visualização de descontinuidades na peça está sujeita a vários fatores como:

- i. Acabamento superficial;
- ii. Limpeza da superfície;
- iii. Maneira de iluminar a superfície;
- iv. Nível de iluminação da superfície;
- v. Contraste entre a superfície e o resto da peça.

A análise do cordão de solda também é observado medindo-se a largura, profundidade e reforço do cordão.

3.5.2 Ensaios Destrutivos

3.5.2.1 Ensaio de Dureza

Segundo Souza et al. (2009), a dureza da superfície é uma importante propriedade física dos materiais. Pode ser definida como sendo a resistência oferecida pelos materiais sólidos à penetração de uma ponta, podendo ser considerada como um indicativo indireto da resistência do material ao desgaste, resistência à abrasão, além da capacidade do material de resistir a esforços.

Segundo Callister (2002), a dureza é uma propriedade mecânica do material a qual está relacionada à facilidade ou dificuldade da deformação plástica localizada, ou seja, é a resistência que o material oferece às pequenas impressões ou riscos.

Van Vlack (1984) e William (2000) descrevem que a dureza é uma propriedade na qual se utilizam procedimentos específicos de medição e é definida como resistência à deformação permanente de uma superfície submetida a uma penetração.

De acordo com Souza (1982), o ensaio de dureza é dividido em três ensaios principais:

- i. Ensaio de dureza por penetração;
- ii. Ensaio de dureza por choque;
- iii. Ensaio de dureza por risco.

Garcia, Spim e Santos (2012) tratam o ensaio de dureza por risco como um ensaio pouco utilizado nos materiais metálicos. Sendo que sua aplicação de concentra na mineralogia.

A partir do ensaio de dureza por risco se estabelece uma relação de minerais mais ou menos duros. A Tabela 3.2 apresenta a escala Mohs, escala essa muito utilizada na mineralogia.

Tabela 3.2 – Escala de dureza Mohs

Escala Mohs		Extensão da Escala Mohs	
Dureza nº	Mineral de Referência	Dureza nº	Mineral de Referência
1	Talco	1	Talco
2	Gipsita	2	Gipsita
3	Calcita	3	Calcita
4	Fluorita	4	Fluorita
5	Apatita	5	Apatita
6	Feldspato (Ortósio)	6	Ortósio
7	Quartzo	7	Sílica pura Vidrosa
8	Topázio	8	Quartzo
9	Safira ou Corindo	9	Topázio
10	Diamante	10	Granada
		11	Zircônia fundida
		12	Alumina fundida
		13	Carboneto de silício
		14	Carboneto de boro
		15	Diamante

Fonte: CHIAVERINI, 1986 (Imagem Adaptada).

De acordo com Souza (1982), o ensaio de dureza por penetração e o ensaio de dureza por choque foram os primeiros tipos de ensaios de dureza para classificar os materiais metálicos. Entre os dois tipos, o ensaio de dureza por penetração é o mais utilizado.

O ensaio de dureza por penetração se subdivide em três métodos de realização do ensaio:

3.5.2.1.1 Dureza Brinell

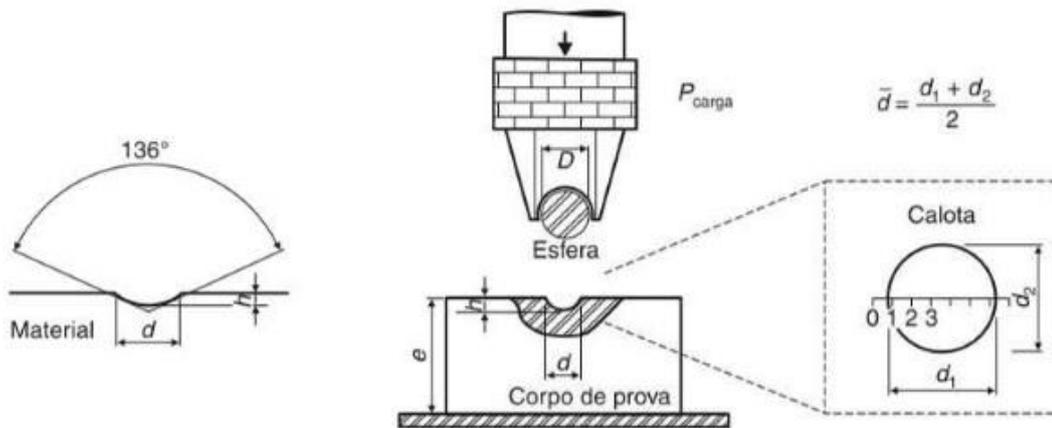
O ensaio de dureza Brinell foi o primeiro ensaio de dureza por penetração padronizado e reconhecido industrialmente. O ensaio consiste em comprimir uma esfera metálica padronizada na superfície do material ensaiado gerando uma calota esférica. A dureza Brinell é calculada pela carga normal aplicada dividida pela área da calota esférica impressa após a força ser retirada. A equação (1) representa esse cálculo.

$$HB = \frac{Q}{S} \quad (1)$$

onde, Q se refere à carga de impressão (N) e, S à área da calota esférica (mm^2) (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Na Figura 3.19 está a representação esquemática do ensaio de dureza Brinell.

Figura 3.19 – Representação esquemática do ensaio de dureza Brinell



Fonte: GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012, p. 120.

Costa (2000) relata a dificuldade de medição da profundidade da calota, evidenciando a equação matemática mais utilizada para o cálculo da dureza Brinell. Nesse cálculo é utilizada uma relação matemática entre a profundidade e o diâmetro da calota, como pode ser observado na equação (2).

$$HB = \frac{2Q}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$

HB representa o valor de dureza Brinell em Pascal, D (mm^2) equivale ao diâmetro da esfera do penetrador, Q é o valor da carga aplicada em Newton e, d (mm^2) é o diâmetro formado pela impressão da calota esférica.

A profundidade, h , em mm^2 é representada pela equação (3).

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \quad (3)$$

A dureza Brinell é a mais utilizada para ensaios em materiais como: aço, ferro fundido, produtos siderúrgicos em geral e peças não temperadas. Esse ensaio possui a limitação da esfera, sendo possível medir durezas até 500 HB para que a esfera não se danifique (COSTA, 2000).

As Tabelas 3.3 e 3.4 representam, respectivamente, os valores de P/D^2 e diâmetros recomendados no ensaio de dureza Brinell e os valores de dureza em função de P/D^2 no ensaio de dureza Brinell.

Tabela 3.3 - Valores de P/D^2 e diâmetros da esfera recomendados no ensaio de dureza Brinell

Diâmetro da esfera D, mm	$P = 30 D^2$ kgf	$P = 10 D^2$ kgf	$P = 5 D^2$ kgf	$P = 2,5 D^2$ kgf
10	3000	1000	500	250
5	750	250	125	62,5
2,5	187,5	62,5	31,2	15,6

Fonte: CHIAVERINI, 1986, p.141 (Imagem Adaptada).

Tabela 3.4 – Valores de dureza em função da relação P/D^2 no ensaio de dureza Brinell

P/D^2	Dureza, kgf/mm ²	Materiais Ensaçados
30	Entre 90 e 415	Aços e ferros fundidos
10	Entre 30 e 140	Cobre, alumínio e suas ligas mais duras
5	Entre 15 e 70	Ligas antifricção, cobre, alumínio e suas ligas mais moles
2,5	até 30	Chumbo, estanho, antimônio e metais patentes

Fonte: CHIAVERINI, 1986, p.140 (Imagem Adaptada).

Chiaverini (1986) ao relatar as limitações do ensaio comenta sobre a impossibilidade da realização do mesmo em peças finas ou em materiais muito duros. Outra limitação importante

é a lentidão do processo para a produção industrial e o grande tamanho da impressão obtida o que danifica as peças acabadas.

3.5.2.1.2 Dureza Rockwell

Zolin (2011) descreve o ensaio de dureza Rockwell e o ensaio de dureza Brinell como similares. Há, também, a aplicação de um penetrador com forma, dimensões e carga determinadas em uma peça ensaiada. A diferença maior se encontra na maneira de calcular a dureza que, nesse caso, é dada por um número proporcional à profundidade de penetração.

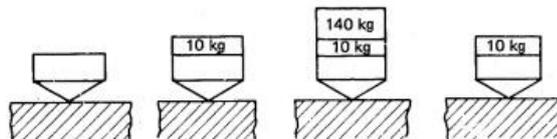
É o processo de ensaio de dureza mais utilizado por ser rápido, facilmente executável, não ocasiona erros pessoais, há elevada precisão, distinguindo até pequenas diferenças de dureza em aços temperados. As impressões obtidas são pequenas o que permite que o ensaio seja realizado em peças acabadas e prontas para serviço, pois não haverá danos na superfície (CHIAVERINI, 1986).

Garcia, Spim e Santos (2012) descrevem dois tipos de máquinas principais que podem ser utilizadas para a realização do ensaio. Essas máquinas se diferenciam apenas pela precisão do resultado. Com a máquina padrão realiza-se medição de dureza Rockwell comum e com a máquina mais precisa são feitas medições de dureza Rockwell superficial.

O ensaio consiste na aplicação de cargas em etapas. Inicialmente se aplica uma pré-carga (10 kgf), que garante um contato firme entre o penetrador e a peça. Em seguida aplica-se a carga que será utilizada no ensaio (COSTA, 2000).

A Figura 3.20, demonstra o processo de aplicação de cargas no ensaio Rockwell.

Figura 3.20 – Processo de aplicação de cargas no ensaio de dureza Rockwell comum



Fonte: CHIAVERINI, 1986, p.143 (Imagem Adaptada).

Segundo Lopes (2014), a pré-carga é necessária para eliminar a ação de defeitos superficiais, ajudar na fixação da amostra no suporte da máquina e causar uma pequena deformação permanente na peça para que se evite erros provenientes da deformação plástica.

A essência do ensaio está na profundidade de penetração de uma ponta, eliminando-se a recuperação elástica proveniente da retirada de uma carga maior e, da profundidade causada pela aplicação de uma carga menor (SOUZA, 1982).

Nesse processo, o penetrador pode ser um diamante esferocônico com ângulo de 120° e ponta ligeiramente arredondada de raio = 0,2 mm, esse penetrador também é conhecido como “penetrador Brale”. Ou, pode ser, também, uma esfera de aço endurecido ou carboneto de tungstênio, com diâmetros de 1,59 mm (1/16”), 3,17 mm (1/8”), 6,35 mm (1/4”) e 12,70 mm (1/2”). Dentre esses diâmetros, o mais utilizado é o de 1,59 mm. De acordo com a norma vigente, ASTM E18:2007, somente as esferas de carboneto de tungstênio são recomendadas. As esferas de aço são indicadas apenas em caso de ensaios em filmes finos e materiais extremamente moles (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Há um mostrador acoplado à máquina com escala predeterminada adequada à faixa de dureza do material. Desse modo, a leitura do valor de dureza para cada ensaio é realizada diretamente no equipamento de medição. (COSTA, 2000).

Chiaverini (1986) descreve as três principais escalas Rockwell:

- i. Escala Rockwell A, para materiais muito duros. Nesse caso o penetrador possui ponta de diamante com carga de 60 kg;
- ii. Escala Rockwell B, para materiais de média dureza. O penetrador utilizado é uma esfera de aço de 1,59 mm de diâmetro e carga de 100 kg;
- iii. Escala Rockwell C, para mais duros, como aço temperado. O penetrador utilizado também é o de diamante, como na escala Rockwell A, porém, a carga utilizada é de 150 kg.

Existem outros tipos de combinações possíveis o que resulta em outras escalas Rockwell, essas combinações podem ser observadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Escala de dureza Rockwell

Escala	Penetrador	Carga, kg	Materiais Ensaitados
A	Brale	60	Material duro e outros muito duros, aço endurecido superficialmente com pequena espessura de camada
B	Esfera de 1/16"	100	Aços moles, ligas não-ferrosas duras (de cobre e alumínio)
C	Brale	150	Aços de alto limite de resistência à tração (acima de 60 kgf/mm ²); aços endurecidos superficialmente com camada espessa
D	Brale	100	Materiais com camada superficial endurecida média, tais como aços cementados; ferro maleável perlítico
E	Esfera de 1/8"	100	Materiais moles, ligas de alumínio e magnésio; ligas para mancais; ferro fundido
F	Esfera de 1/16"	60	Ligas cobre recozidas; chapas metálicas finas moles
G	Esfera de 1/16"	150	Bronze fosforoso; ligas Cu-Be; ferro maleável
H	Esfera de 1/8"	60	Alumínio, chumbo, zinco

Fonte: CHIAVERINI, 1986, p.142 (Imagem Adaptada).

Ainda Chiaverini (1986) comenta sobre o ensaio de dureza Rockwell superficial. Utilizado para caracterizar a dureza de peças com camada superficial dura e de pequena espessura. A pré-carga aplicada possui menor valor do que no ensaio convencional, sendo apenas de 3 kgf. Nesse método há duas escalas mais utilizadas:

- i. Escala Rockwell N, utiliza penetrador de Brale e cargas de 15, 30 ou 45 kgf.
- ii. Escala Rockwell T, utiliza penetrador esférico 1/16" e cargas de 15, 30 ou 45 kgf.

O ensaio de dureza Rockwell também possui limitações. Os materiais que possuem dureza no limite de uma escala e início de outra não são possíveis de serem comparados entre si quanto à dureza. Uma outra limitação é que o resultado de dureza encontrado não possui relação com o valor de resistência à tração, o que é possível ser verificado no ensaio de dureza Brinell (COSTA, 2000).

3.5.2.1.3 Dureza Vickers

Costa (2000) descreve a dureza Vickers como um método importante para atender às necessidades dos processos industriais. Esse método é mais sofisticado alcançar resultados de qualquer valor de dureza tanto em materiais muito duros, quanto em materiais muito moles. Isso é possível devido ao penetrador utilizado.

O penetrador utilizado é uma pirâmide de diamante de base quadrada que possui um ângulo de 136° entre as faces opostas. Com esse ângulo se obtém valores de impressão semelhante aos de dureza Brinell.

Praticamente não há deformação no penetrador devido ao material utilizado no mesmo, diamante. Independente do tamanho, todas as impressões são semelhantes entre si. A dureza Vickers é independente da carga utilizada, ou seja, para qualquer valor de carga aplicada no material o valor de dureza será o mesmo. Porém, se altera a carga para que a impressão na peça seja regular, sem deformação e de tamanho compatível para a medida de suas dimensões no visor da máquina. A carga varia de 1 a 100 ou 120 kgf. O formato de impressão é um losango regular (SOUZA, 1982).

Para Chiaverini (1986), o valor de dureza Vickers é dado pela divisão da carga aplicada pela área da impressão realizada na peça ensaiada. A equação (4) demonstra o cálculo da dureza Vickers (HV), sendo que P é a carga aplicada, L a diagonal da impressão e θ o ângulo entre as faces opostas do penetrador de diamante (136°).

$$HV = \frac{2P \operatorname{sen}(\theta/2)}{L^2} \quad (4)$$

Souza (1982) descreve sobre as vantagens do ensaio de dureza Vickers:

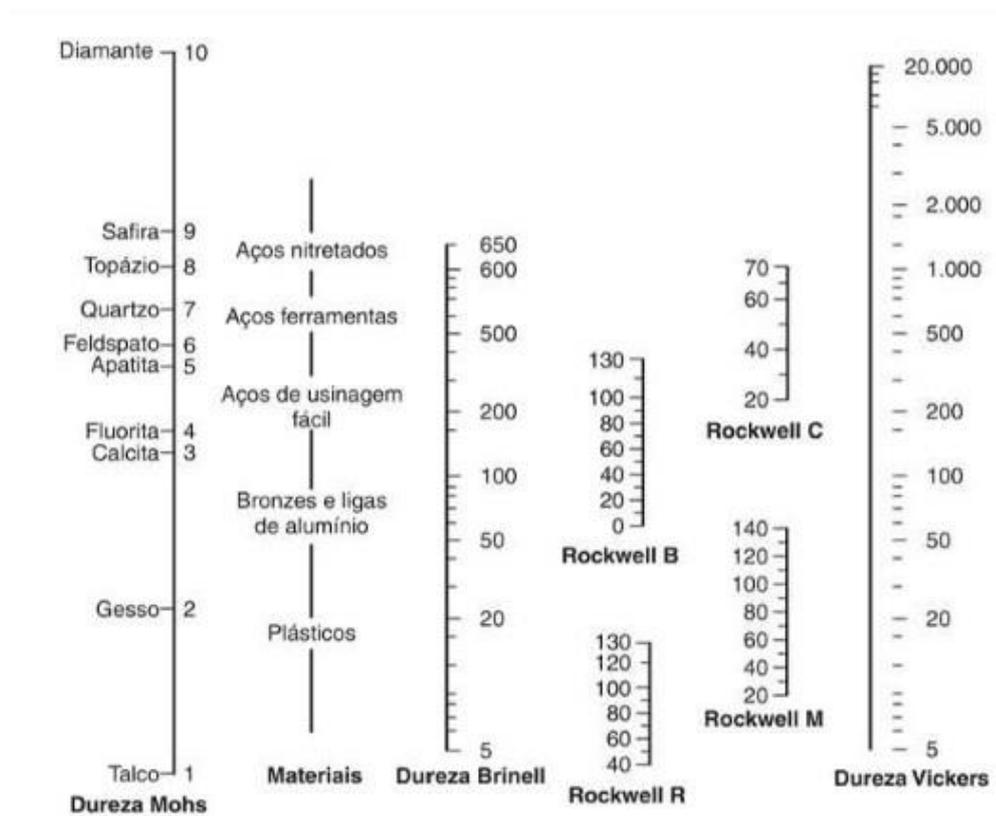
- i. Escala contínua e única;
- ii. Impressões extremamente pequenas, o que não inutiliza a peça ensaiada;
- iii. Grande precisão de medida;
- iv. Deformação nula do penetrador;
- v. Aplicação em qualquer dureza de material e em qualquer espessura desejada.

Costa (2000) relata algumas das limitações como:

- i. Necessidade de se preparar o corpo de prova (polimento);
- ii. Para cargas menores que 300 gf pode haver recuperação elástica, o que dificulta a medição das diagonais impressas;
- iii. A máquina requer aferição constante para que se evite erro;
- iv. O ensaio é lento, devido à preparação cuidadosa que deve ser feita no material ensaiado para que a impressão seja nítida.

A Tabela 3.6 relaciona as escalas de dureza descritas no presente trabalho.

Tabela 3.6 – Comparação entre resultados de ensaio de dureza por diferentes métodos



Fonte: GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012, p.117 (Imagem Adaptada).

3.5.3 Ensaio de Impacto

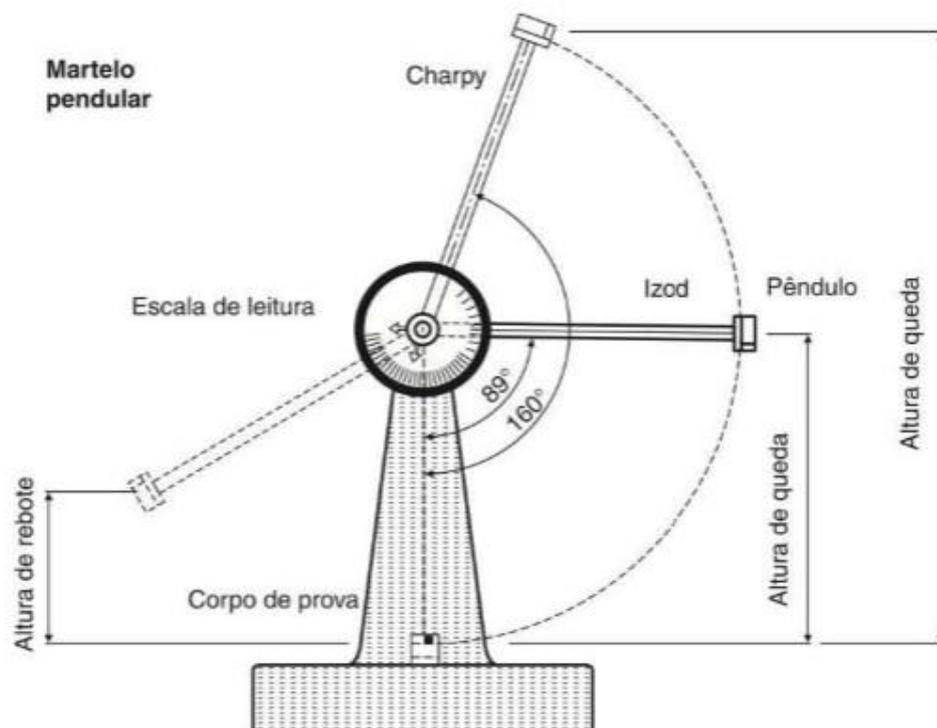
De acordo com Souza (1982), o ensaio de impacto é um dos ensaios mais empregados para estudar a fatura frágil dos materiais metálicos. É conhecido também como ensaio de choque e, normalmente, é realizado em baixas temperaturas.

Lopes (2014) descreve o resultado do ensaio de impacto como sendo a representação da energia absorvida pelo corpo de prova. Não há fornecimento do comportamento de toda uma estrutura em condições de serviço. Porém, por esse ensaio consegue-se observar a diferença de comportamento entre os materiais.

O método mais comum para realizar o ensaio de impacto é o do golpe realizado por um peso em oscilação. O pêndulo, ou martelo, é levado a uma posição inicial, adquirindo, então, uma energia inicial. Ao se liberar o martelo, ele se choca contra o corpo de prova que é rompido e, continua sua trajetória até certa altura. A altura máxima atingida pelo pêndulo após o contato com o corpo de prova corresponde à posição final do pêndulo e energia final do processo (COSTA, 2000).

A Figura 3.21 representa o equipamento utilizado para a realização do ensaio de impacto.

Figura 3.21 – Equipamento para ensaio de impacto



Fonte: SOUZA, 1982, p. 245.

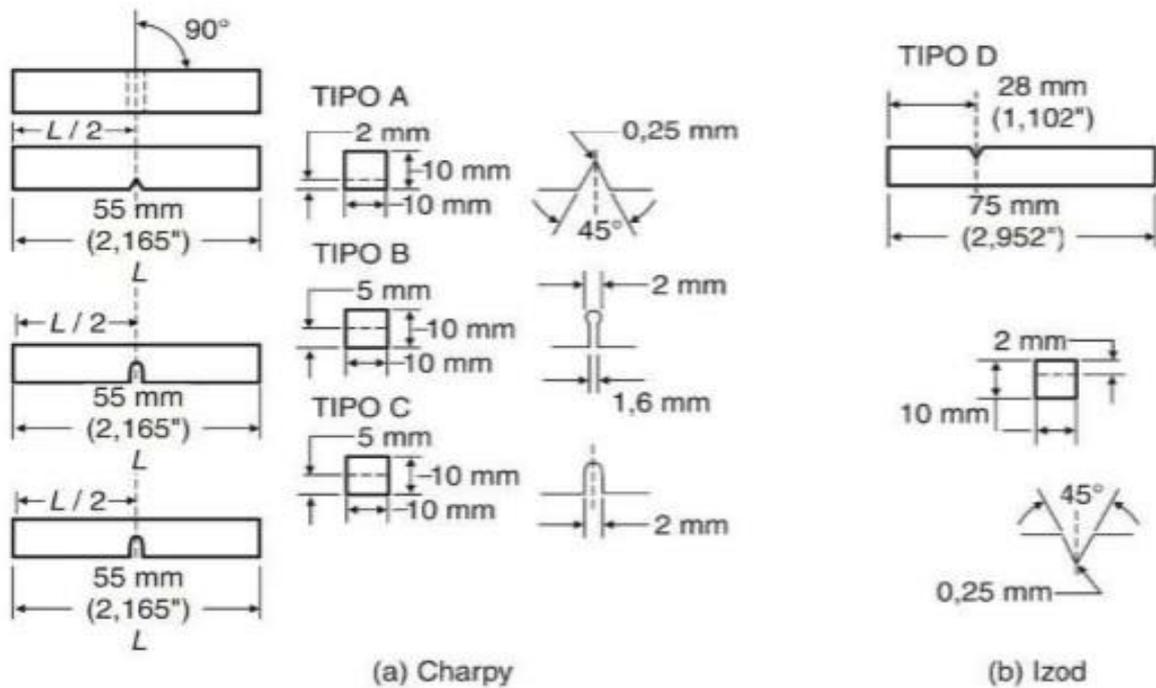
O ensaio mede, então, a tendência que o material tem de se comportar de maneira frágil. Padroniza-se um corpo de prova com um entalhe especificamente posicionado, o qual será um concentrador de tensões, o que localiza a ruptura do corpo de prova. A energia absorvida pelo corpo de prova é medida pela diferença entre a altura atingida pelo martelo antes e após o impacto, multiplicada pelo peso do martelo. Esse valor, em geral, pode ser lido na própria máquina através de um ponteiro em uma escala graduada. Através da medida da área da seção entalhada do corpo de prova obtém-se a energia absorvida por unidade de área. Quanto menor a energia absorvida maior o comportamento frágil do material (SOUZA, 1982).

Costa (2000) distribui os ensaios de impacto em dois tipos principais:

- i. Ensaio de Impacto “Charpy”, o golpe proveniente do pêndulo ocorre na face oposta ao entalhe. Há três tipos de entalhes, A, B e C, variando a severidade, sendo que o C é o mais severo, ou seja, maior concentrador de tensões. Os entalhes são todos centralizados no corpo de prova. Quando se posiciona o corpo de prova ele é apenas apoiado na máquina.
- ii. Ensaio de Impacto “Izod”, possui entalhe em “V”, igual ao “Charpy A”, porém o entalhe não é centralizado. O golpe do pêndulo oscilante é realizado no mesmo lado do entalhe. O corpo de prova é engastado na máquina, justificando seu maior comprimento.

A Figura 3.22 mostra a diferença entre os dois tipos de corpos de prova e suas dimensões segundo a ASTM E23-94a.

Figura 3.22 – Corpos de prova “Charpy” e “Izod”



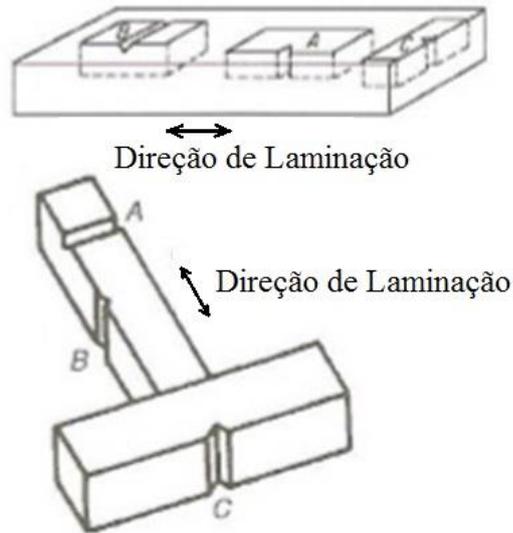
Fonte: GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012, p. 253.

Zolin (2011) chama atenção para a temperatura do ensaio, pois a variação da temperatura tem grande influência na resistência ao choque. Quando a temperatura é muito baixa, a energia absorvida é pequena levando a uma fratura frágil. Ao se realizar o ensaio acima da temperatura crítica as fraturas, para um mesmo metal, se tornam dúcteis aumentando a absorção de energia.

Para Souza (1982), não é adequado realizar conclusões quando o ensaio de impacto é realizado apenas com um corpo de prova. Como os resultados obtidos com vários corpos de prova são muito diferentes entre si, é necessário realizar pelo menos três ensaios para se conseguir uma média aceitável.

A retirada dos corpos de provas influenciam significativamente os resultados do ensaio. Sendo assim, a não ser que haja alguma especificação específica para o tipo de material ou processo utilizado, o método mais adequado para a retirada de um corpo de prova é o método A presente na Figura 3.23 (LOPES, 2014).

Figura 3.23 – Método de retirada do corpo de prova

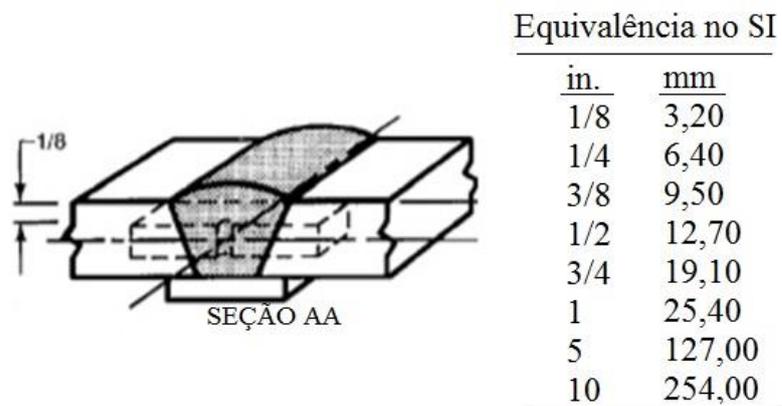


Fonte: LOPES, 2014, p. 235 (Imagem Adaptada).

No caso de materiais soldados há algumas normas estabelecidas para a execução do ensaio de impacto.

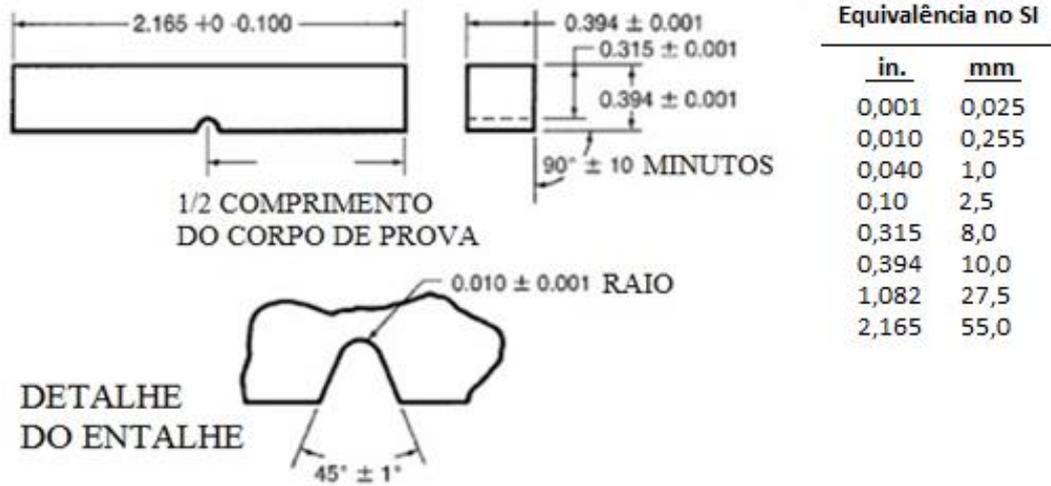
Segundo a AWS (1998), o corpo de prova deve ser retirado da parte central da peça soldada, como demonstrado na Figura 3.24. As especificações das dimensões dos corpos de prova, formato e dimensões do entalhe estão detalhados na Figura 3.25. Em outra norma da AWS (2007) há a localização do entalhe em um corpo de prova retirado de uma peça soldada e, também, o seu posicionamento na máquina, informações que podem ser observadas na Figura 3.26.

Figura 3.24 – Local de retirada do corpo de prova



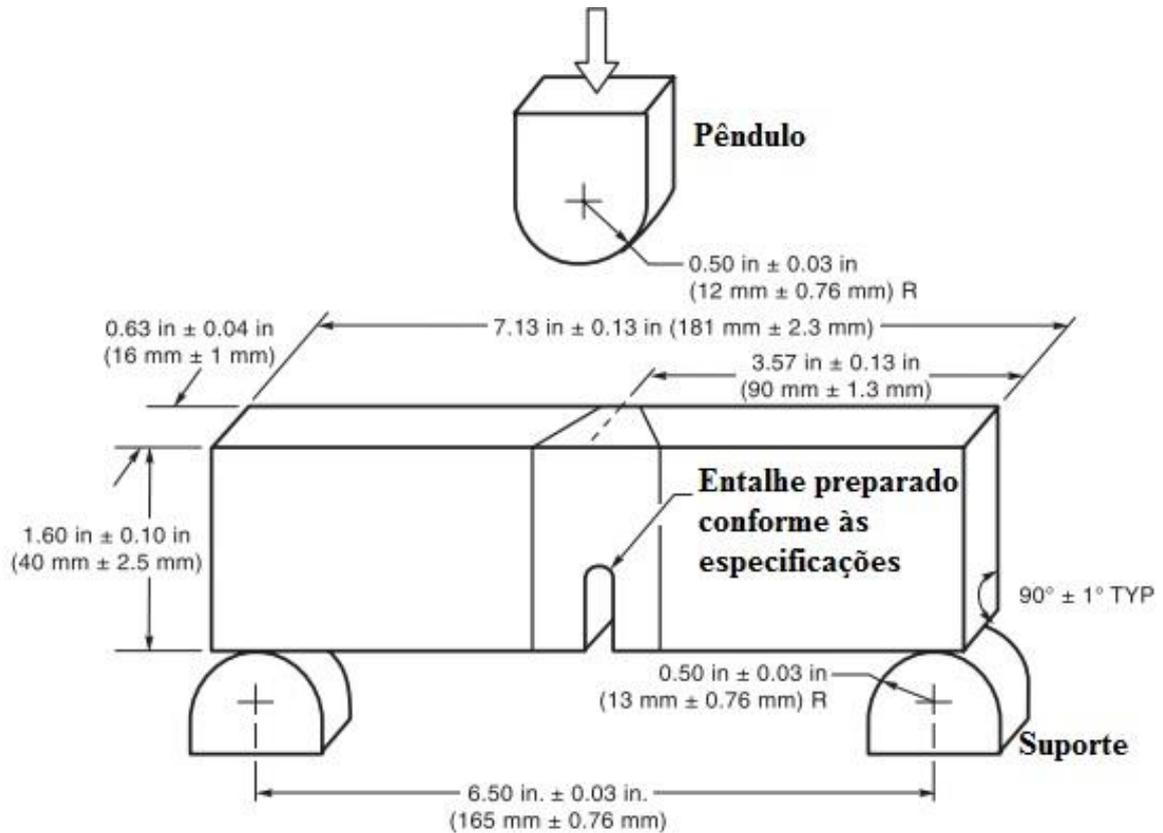
Fonte: AMERICAN WELDING SOCIETY, 1998 (Imagem Adaptada).

Figura 3.25 – Especificações das dimensões do corpo de prova e do entalhe



Fonte: AMERICAN WELDING SOCIETY, 1998 (Imagem Adaptada).

Figura 3.26 – Localização do entalhe e posicionamento da peça na máquina

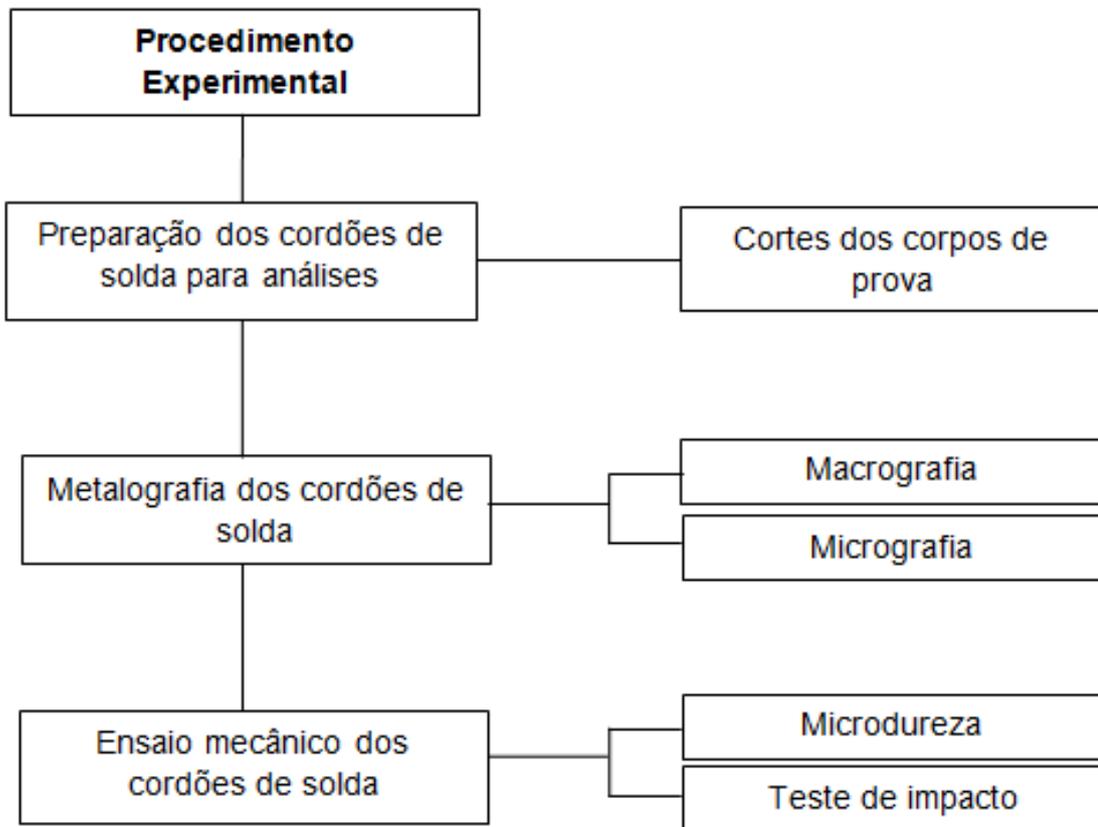


Fonte: AMERICAN WELDING SOCIETY, 2007 (Imagem Adaptada).

4 METODOLOGIA

O desenvolvimento experimental deste trabalho foi dividido em três etapas. Na Figura 4.1 está esquematizado o procedimento experimental para se atingir o objetivo do trabalho, correlacionando-se cada etapa com a sequência de realização das atividades experimentais deste trabalho.

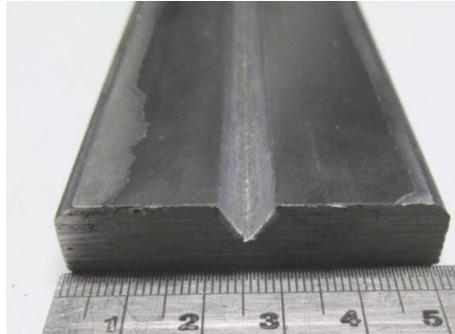
Figura 4.1 - Procedimento experimental



Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Os cordões para as análises foram feitos a partir da deposição de solda em chanfro no aço SAE 1020 com 12 mm de espessura, 50 mm de largura e 200 mm de comprimento, conforme Figura 4.2. As soldas foram executas com arames tubulares com fluxo a base E7018 com 0,5; 10 e 15% de adição de polímero. Foram utilizadas 4 chapas para cada tipo de arame, sendo 2 para soldagem com proteção gasosa externa e duas sem proteção gasosa.

Figura 4.2 – Chapa com chanfro em “V”



Fonte: foto tirada pela autora, 2016.

A fonte de soldagem utilizada foi a máquina de solda MTE DIGITEC 600 (Figura 4.3), que consiste em um conjunto semi-automático para soldagem MIG/MAG e com arames tubulares e compõe-se de uma fonte de energia com característica de tensão constante e um alimentador de arame. A velocidade de alimentação do arame pode ser ajustada na própria fonte e pode variar de 1,5 a 19 m/min. A tensão em vazio pode variar de 18V a 45V.

Figura 4.3 – Bancada utilizada para a execução das soldas



4.1 Preparação dos cordões de solda para as análises metalográfica

Os cordões de solda foram cortados com o auxílio de uma máquina de corte manual, refrigerada a água. Após os cortes dos corpos de prova as seções transversais dos cordões de solda foram embutidas a frio utilizando-se resina acrílica. Para o lixamento, foram utilizadas lixas d'água com granulometrias de #120, #240, #320, #400 e #600. O polimento foi feito

com álcool e panos de 9 μm , 3 μm e 1 μm . O ataque para revelação da microestrutura das amostras foi feito por aplicação utilizando o reagente nital 5% (solução alcoólica com 5% em volume de ácido nítrico) por 15 segundos.

As macrografias foram feitas com o auxílio de uma câmera fotográfica CANON e as micrografias foram feitas utilizando o microscópio metalográfico KONTROL modelo IM 713 com até 800 vezes de aumento, esse equipamento pode ser visto na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Microscópio metalográfico KONTROL modelo IM 713 utilizado para fazer as micrografias

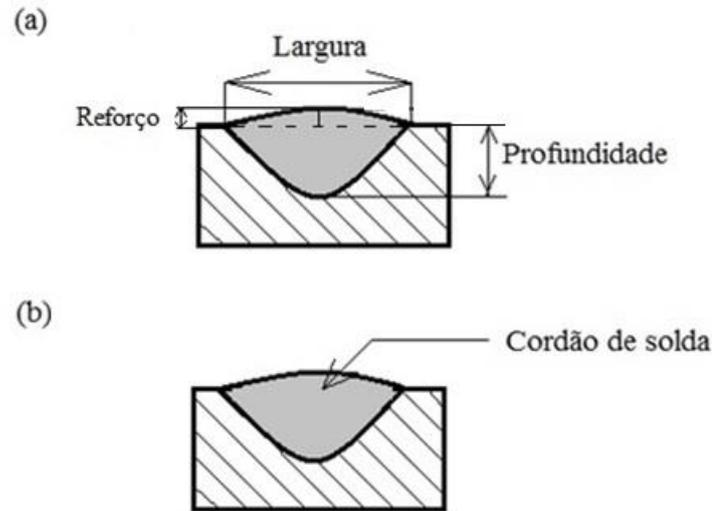


Fonte: foto tirada pela autora, 2016.

4.2 Análise visual e da geometria do cordão

Os cordões de solda produzidos foram analisados visualmente quanto à presença de defeitos e, em seguida, com o auxílio do microdurômetro Shimadzu, modelo HVM2T, foi verificada geometria do cordão de solda. Esse equipamento possui um par de micrômetros que permitiu a medição da largura, profundidade e reforço de cada cordão de solda produzido. Os locais em que as medidas foram realizadas podem ser observados na Figura 4.5 (a). A análise pelo aspecto e a busca por defeitos ocorreu na região que pode ser observada na Figura (b).

Figura 4.5 – Cordão de solda

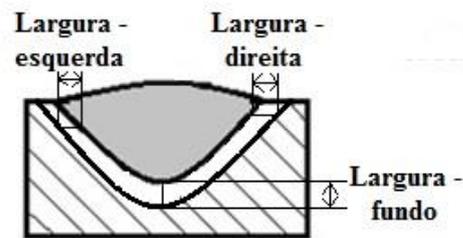


Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Legenda: (a) regiões de medição do cordão de solda (b) região de verificação de defeitos

A largura da zona termicamente afetada (ZTA) também foi verificada pelo mesmo procedimento de medição dos elementos do cordão de solda. A medição foi realizada a esquerda, a direita do cordão e, também, após o ponto mais profundo do cordão. Em seguida, o valor médio da largura da ZTA foi calculado. A Figura 4.6 é apresenta os locais das medições da ZTA de cada amostra.

Figura 4.6 – Locais aonde foram realizadas as medições da ZTA



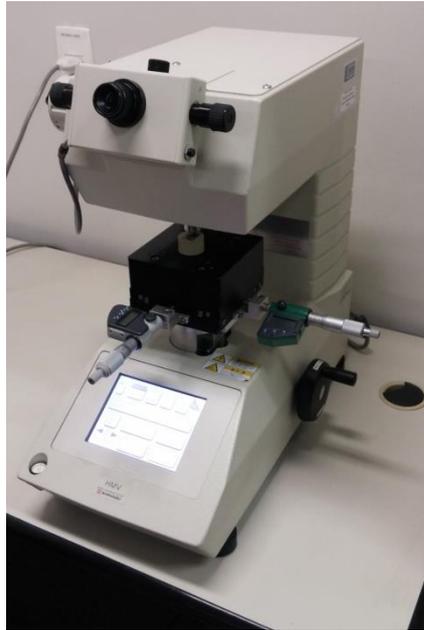
Fonte: elaborada pela autora, 2016.

4.3 Análise das propriedades mecânicas

4.3.1 Testes de microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado utilizando o microdurômetro da marca Shimadzu, modelo HMV2T com dois micrômetros digitais da marca Mitutoyo acoplados ao equipamento, pelo método Vickers, conforme recomendação da ASTM E92-82. Esse equipamento pode ser observado na Figura 4.7.

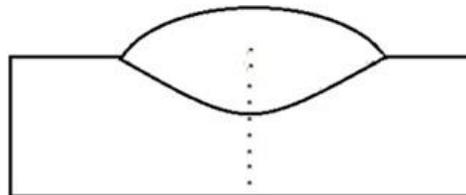
Figura 4.7 – Microdurômetro utilizado para a realização do ensaio de microdureza



Fonte: foto tirada pela autora, 2016.

A zona fundida analisada quanto à microdureza foi realizada conforme representação na Figura 4.8, com carga de 500 gf em pontos equidistantes de 0,5 mm e tempo de indentação de 15 segundos. O objetivo do teste de microdureza foi correlacionar a dureza obtida com a microestrutura analisada, comparando-se com os valores encontrados na literatura. Foram avaliados os valores de cada amostra quanto ao teor de polímero e o uso ou não de proteção gasosa externa.

Figura 4.8 – Regiões do metal de solda e do metal de base onde foram realizadas as medições da microdureza



Fonte: elaborada pela autora, 2016.

4.3.2 Ensaio de Impacto

Para a realização do ensaio de impacto os corpos de prova foram cortados com comprimento equivalente a 50,0 mm devido à largura da chapa de aço utilizada para soldagem. Para definir a espessura e a largura dos corpos de prova utilizou-se a norma AWS A5.1, sendo assim, o valor da espessura foi de 10,0 mm e para a largura 10,0 mm. O entalhe foi produzido através

de usinagem por fresamento, conforme a norma AWS A5.1 e para a realização do teste de impacto foi utilizada a norma AWS B4.0.

Foram necessários três corpos de prova para cada amostra soldada realizada, número mínimo para se realizar a média dos valores. Desse modo, 18 corpos de prova foram ensaiados.

O ensaio foi realizado na máquina de impacto WERKSTOFFPRÜFMACHINEN da marca VEB. A massa do pêndulo se equivale a 18,75 kg e seu comprimento a 825,0 mm. Na Figura 4.9 a máquina pode ser observada.

Figura 4.9 – Máquina de impacto VEB utilizada para o ensaio de impacto



Fonte: foto tirada pela autora, 2016.

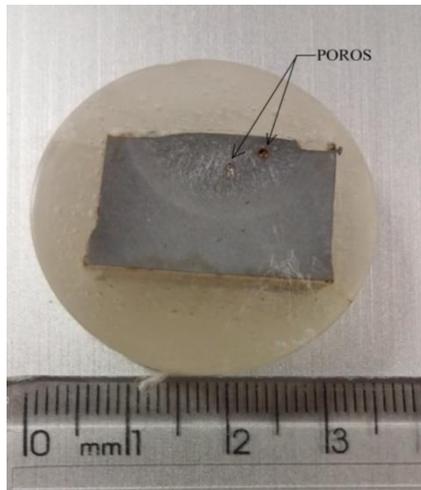
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise macrográfica e geometria dos cordões de solda

Após a preparação metalográfica dos cordões de solda, todas as amostras foram analisadas quanto ao seu aspecto visual e também quanto à sua geometria por meio da largura, profundidade, reforço e zona termicamente afetada (ZTA). As Figuras de 5.1 a 5.6 apresentam as fotografias das amostras que foram utilizadas para a análise visual, geométrica e também para a análise metalográfica.

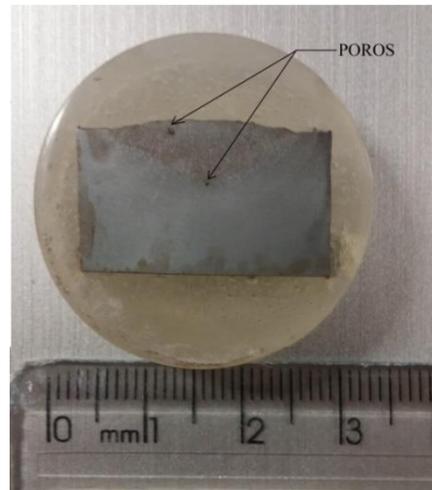
Ao observar todas as amostras a olho nu, pôde-se verificar uma grande quantidade de poros e inclusões de escória tanto nas soldas que foram feitas com a utilização do gás de proteção externa, quanto nas amostras sem a utilização do gás de proteção externa. Essas discontinuidades podem estar associadas aos parâmetros de soldagem utilizados, a falta de preenchimento do arame com fluxo durante a sua fabricação e formulação inadequada.

Figura 5.1 – Cordão de solda com 5% de PTFE e uso de gás de proteção



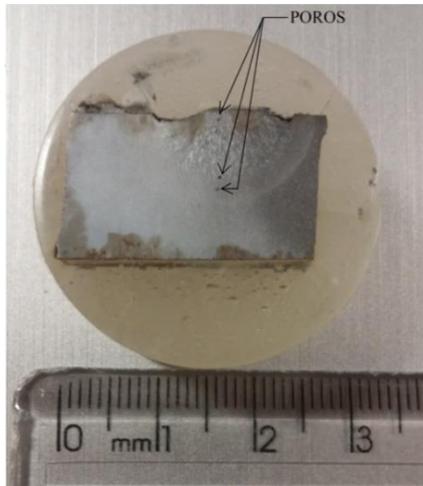
Fonte: foto tirada pela autora, 2016.

Figura 5.2 - Cordão de solda com 5% de PTFE sem o uso de gás de proteção



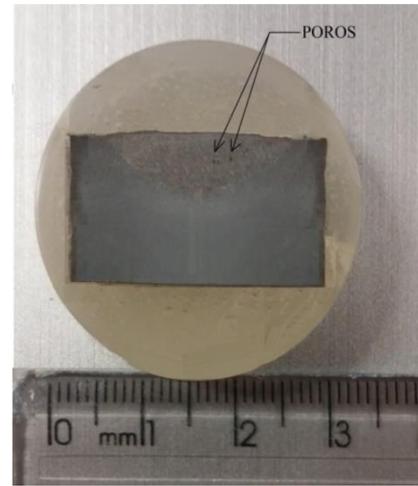
Fonte: foto tirada pela autora, 2016.

Figura 5.3 – Cordão de solda com 10% de PTFE e uso de gás de proteção



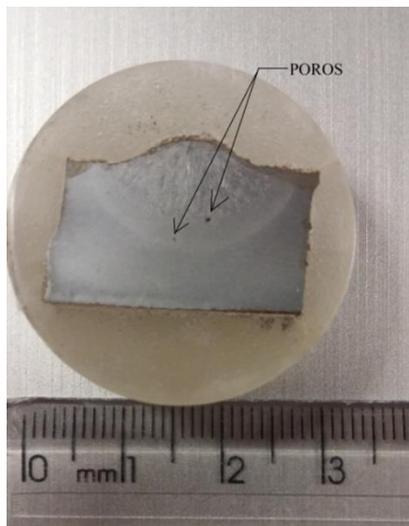
Fonte: foto tirada pela autora, 2016.

Figura 5.4 – Cordão de solda com 10% de PTFE sem o uso de gás de proteção



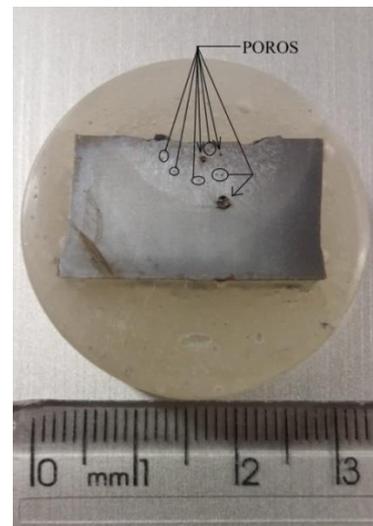
Fonte: foto tirada pela autora, 2016.

Figura 5.5 – Cordão de solda com 15% de PTFE e uso de gás de proteção



Fonte: foto tirada pela autora, 2016.

Figura 5.6 – Cordão de solda com 15% de PTFE sem o uso de gás de proteção



Fonte: foto tirada pela autora, 2016.

5.1.1 Medidas das geometrias cordões de solda

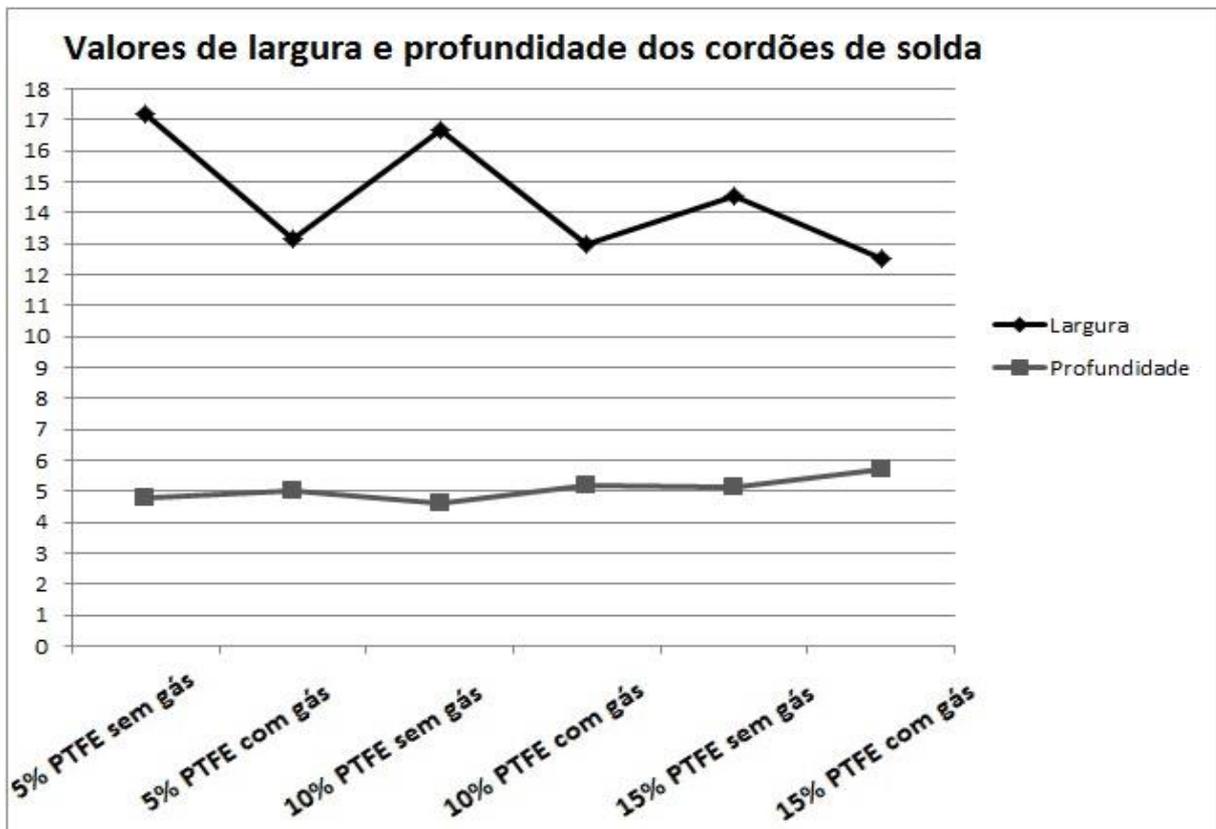
As medições relativas a geometria do cordão de solda de cada amostra estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Medidas relativas à geometria do cordão de solda e da ZTA

Amostra	Medidas (mm)			
	Largura	Profundidade	Reforço	ZTA (valor médio)
5% de PTFE sem uso de gás de proteção	17,201	4,781	1,016	1,958
5% de PTFE e uso de gás de proteção	13,179	5,040	1,192	1,328
10% de PTFE sem uso de gás de proteção	16,698	4,642	0,732	2,143
10% de PTFE e uso de gás de proteção	12,998	5,191	0,936	1,697
15% de PTFE sem uso de gás de proteção	14,512	5,121	0,333	1,888
15% de PTFE e uso de gás de proteção	12,533	5,687	2,098	2,734

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Gráfico 5.7 – Valores de largura e profundidade para cada cordão de solda



Fonte: elaborado pela autora, 2016.

De acordo com os resultados obtidos verificou-se uma tendência da largura dos cordões de solda realizados sem o uso de gás de proteção externo ser maior. Neste estudo pode-se observar que este aumento foi da ordem de 25%. Verifica-se também que quanto menor o percentual de polímero (5%) maior foi a largura, ou seja, foi de 17.201 mm contra 14.512 mm.

Ao analisar os dados dos cordões de solda, percebe-se que a utilização do gás de proteção (CO_2) influenciou na profundidade do cordão de solda. Os valores de penetração encontrados nas soldas realizadas com o gás de proteção externa foram de aproximadamente 0,50 mm mais elevados do que quando não foi utilizado o gás de proteção externa. Este comportamento pode ser associado à literatura, pois em várias fontes pesquisadas (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009; OKUMURA, TANIGUCHI, 1982) à medida que se aumenta a quantidade de CO_2 na mistura gasosa melhor é a condutividade térmica, ou seja, mais calor vai para o metal de base favorecendo assim o aumento da profundidade do cordão de solda.

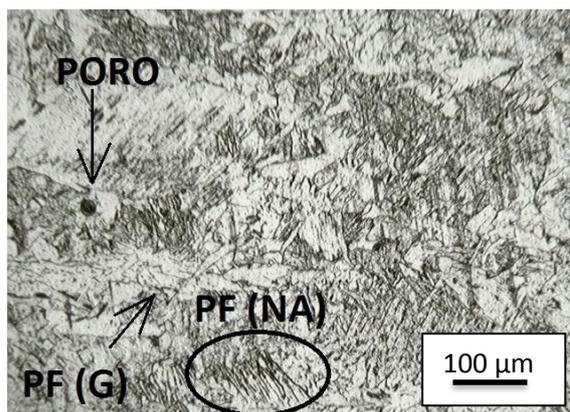
A partir dos resultados obtidos da profundidade com relação ao percentual de polímero verifica-se que há maior absorção de energia quando se utiliza maior porcentual de polímero aliado a proteção gasosa externa. Para 15% de PTFE com gás de proteção a profundidade atingiu 5,687 mm contra 5,040 mm para 5% de PTFE, ou seja, a profundidade é 12% maior.

Com relação aos resultados encontrados no reforço e na ZTA não se verificou alterações significativas que pudesse ser feita uma comparação.

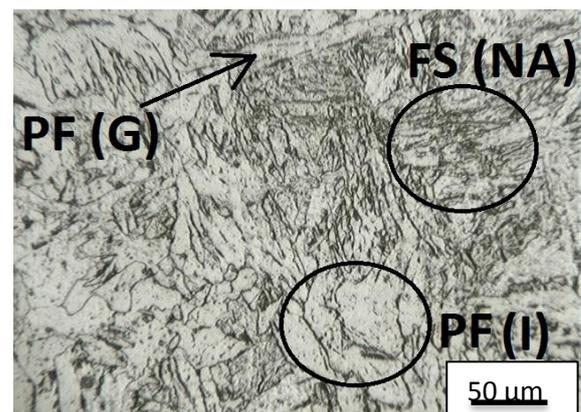
5.2 Análise Micrográfica dos cordões de solda

As microestruturas típicas encontradas no metal de solda estão apresentadas nas Figuras 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13.

Figura 5.8 – 5% PTFE e uso de gás de proteção

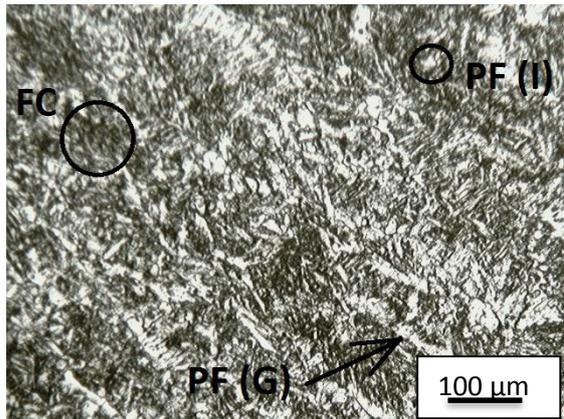


Fonte: elaborada pela autora, 2016.

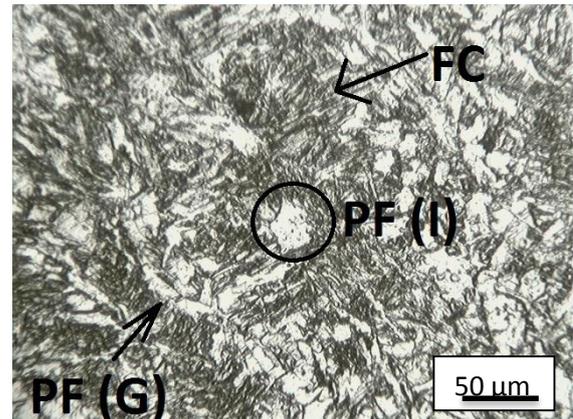


Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Figura 5.9 – 5% PTFE sem o uso de gás de proteção

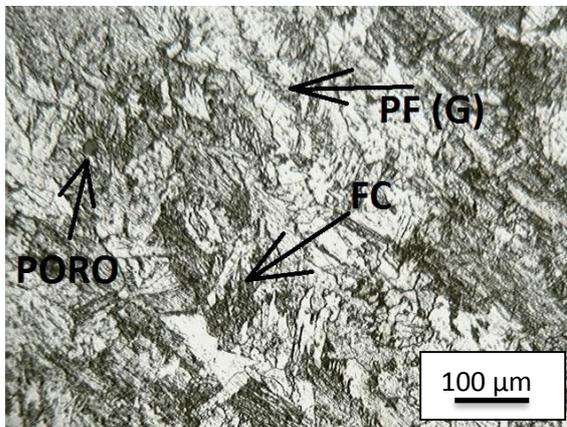


Fonte: elaborada pela autora, 2016.

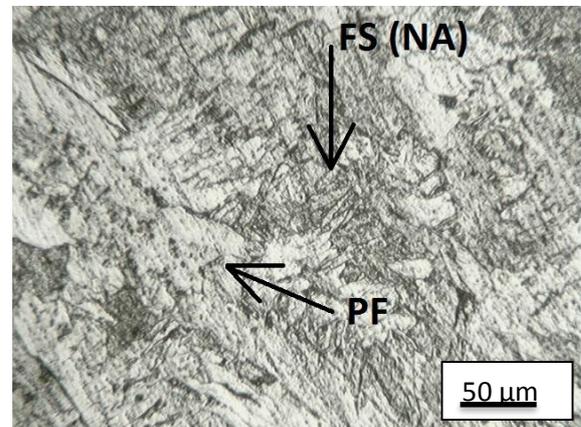


Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Figura 5.10 – 10% PTFE e uso de gás de proteção

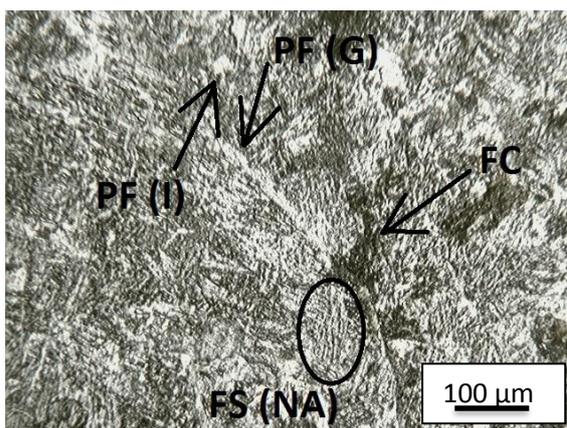


Fonte: elaborada pela autora, 2016.

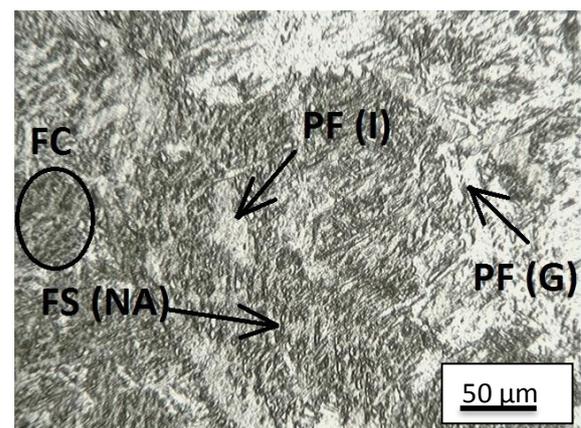


Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Figura 5.11 – 10% PTFE sem o uso de gás de proteção

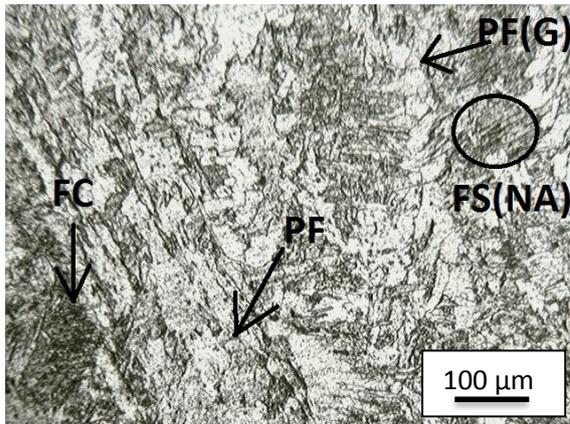


Fonte: elaborada pela autora, 2016.

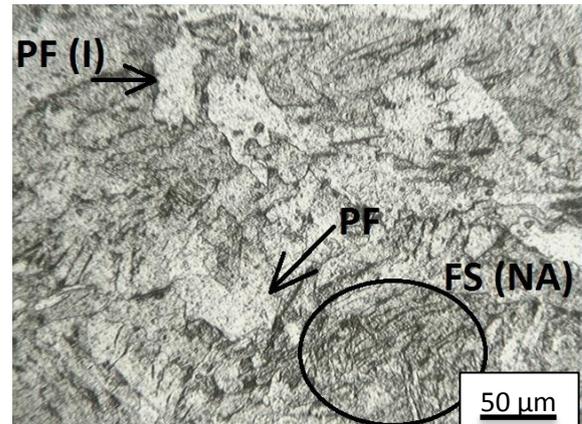


Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Figura 5.12 – 15% PTFE e uso de gás de proteção

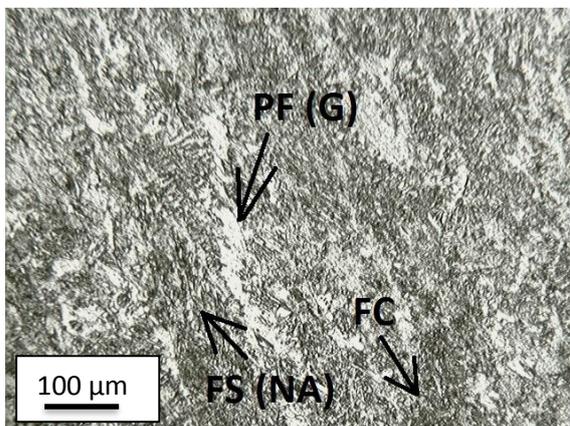


Fonte: elaborada pela autora, 2016.

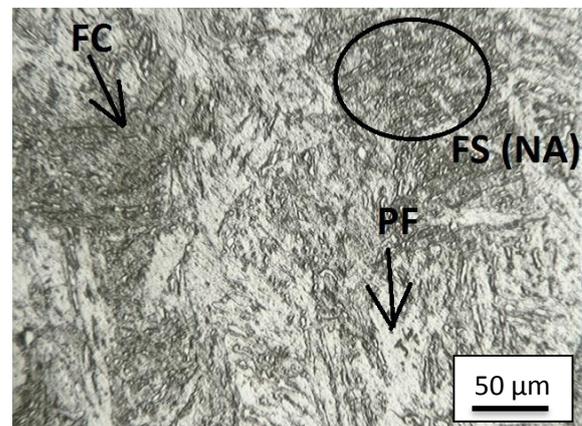


Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Figura 5.13 – 15% PTFE sem o uso de gás de proteção



Fonte: elaborada pela autora, 2016.



Fonte: elaborada pela autora, 2016.

De acordo com as microestruturas analisadas vários constituintes foram encontrados, dentre as quais estão a ferrita primária, ferrita primária intragranular, ferrita primária de contorno de grão, ferrita secundária não alinhada e carboneto disperso. A ferrita acicular não esteve presente em nenhuma das microestruturas.

Vários fatores influenciam a formação da ferrita acicular. É necessário que ocorra um ciclo térmico adequado para o seu desenvolvimento. Há uma grande influência da composição química do cordão de solda, a variação de alguns elementos como carbono, silício e manganês pode alterar a formação da ferrita acicular. O tamanho e composição das inclusões não metálicas também se correlacionam com a nucleação da ferrita acicular, assim como o tamanho do grão austenítico, a presença de ferrita alotrófica e a deformação plástica.

A variação desses fatores pode prejudicar a formação da ferrita acicular, sendo assim, uma hipótese para que esse constituinte não tenha se desenvolvido nos cordões de solda realizados é de que o processo não estava de acordo com as condições necessárias para esse desenvolvimento.

5.3 Análise das Propriedades mecânicas

5.3.1 Testes de microdureza

O teste de microdureza foi realizado em cada cordão de solda, o número de medidas realizadas variou entre 24 e 27, dependendo do tamanho do cordão solda de cada peça. Os valores encontrados para cada composição do fluxo do arame tubular estão distribuídos nas tabelas de 5.2 a 5.7 e apresentados nos gráficos 5.14 a 5.19.

Tabela 5.2 – Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 5% PTFE e uso de gás de proteção

5% de PTFE com uso de gás de proteção	
Número de medição	Valor de dureza Vickers (HV)
1	135
2	154
3	147
4	122
5	136
6	136
7	122
8	134
9	132
10	129
11	162
12	148
13	151
14	146
15	154
16	158
17	148
18	145
19	149
20	140
21	145
22	140
23	147
24	141
25	148

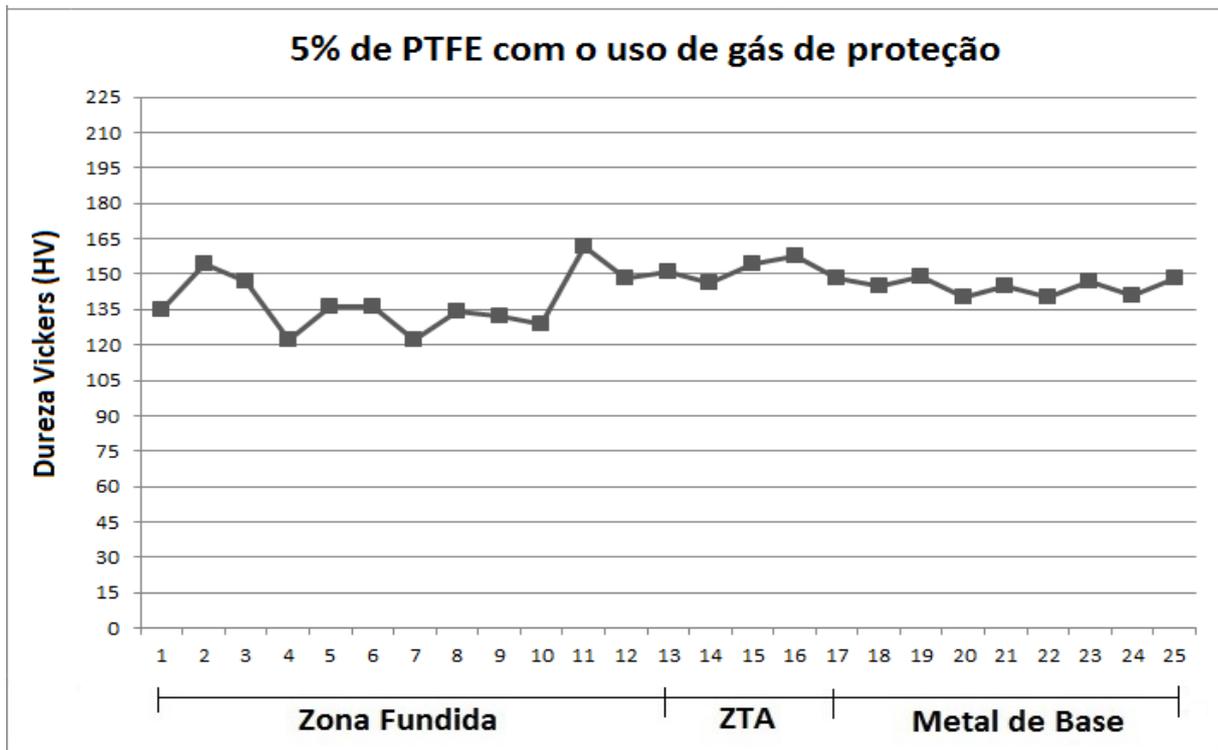
Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Tabela 5.3 - Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 5% PTFE sem o uso de gás de proteção

5% de PTFE sem uso de gás de proteção	
Número de medição	Valor de dureza Vickers (HV)
1	159
2	193
3	195
4	195
5	212
6	209
7	206
8	192
9	197
10	218
11	177
12	155
13	150
14	138
15	136
16	139
17	149
18	132
19	135
20	132
21	142
22	141
23	134
24	133
25	136
26	127
27	122

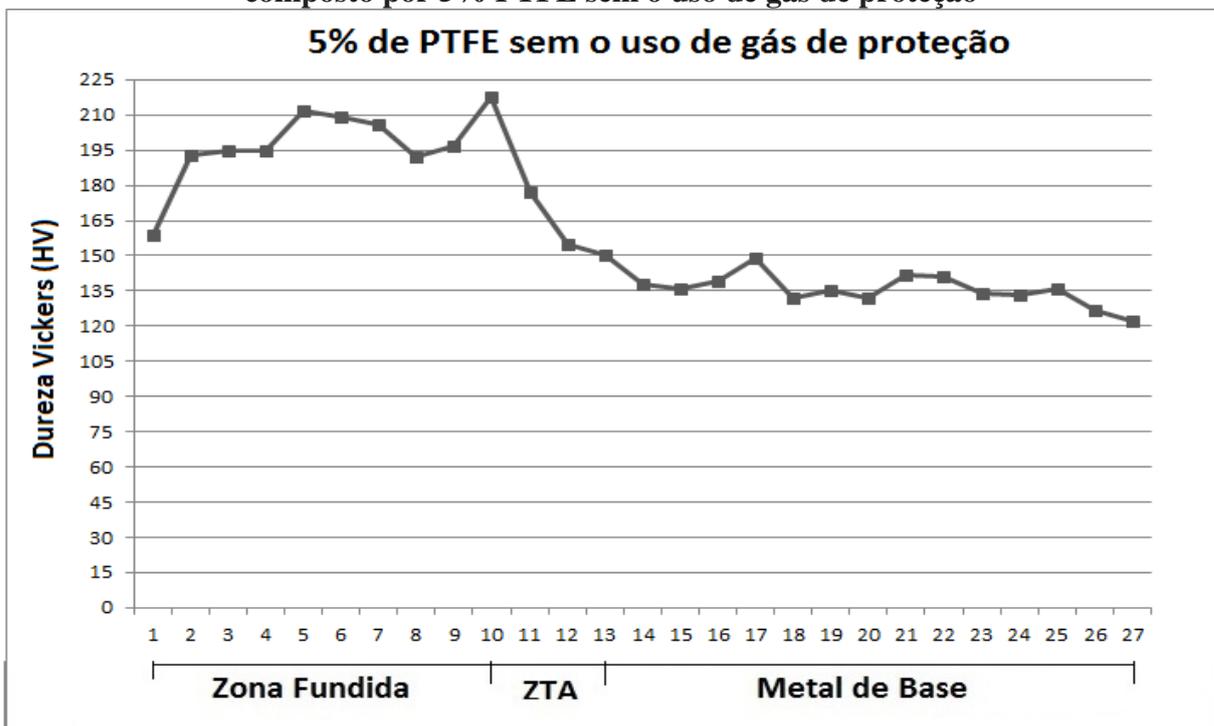
Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Gráfico 5.14 – Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 5% PTFE e uso de gás de proteção



Fonte: elaborado pela autora, 2016.

Gráfico 5.15 - Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 5% PTFE sem o uso de gás de proteção



Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Tabela 5.4 - Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 10% PTFE e uso de gás de proteção

10% de PTFE com uso de gás de proteção	
Número de medição	Valor de dureza Vickers (HV)
1	131
2	131
3	127
4	124
5	137
6	149
7	155
8	155
9	137
10	141
11	143
12	147
13	157
14	145
15	137
16	144
17	140
18	151
19	162
20	142
21	145
22	140
23	142
24	139
25	140
26	145

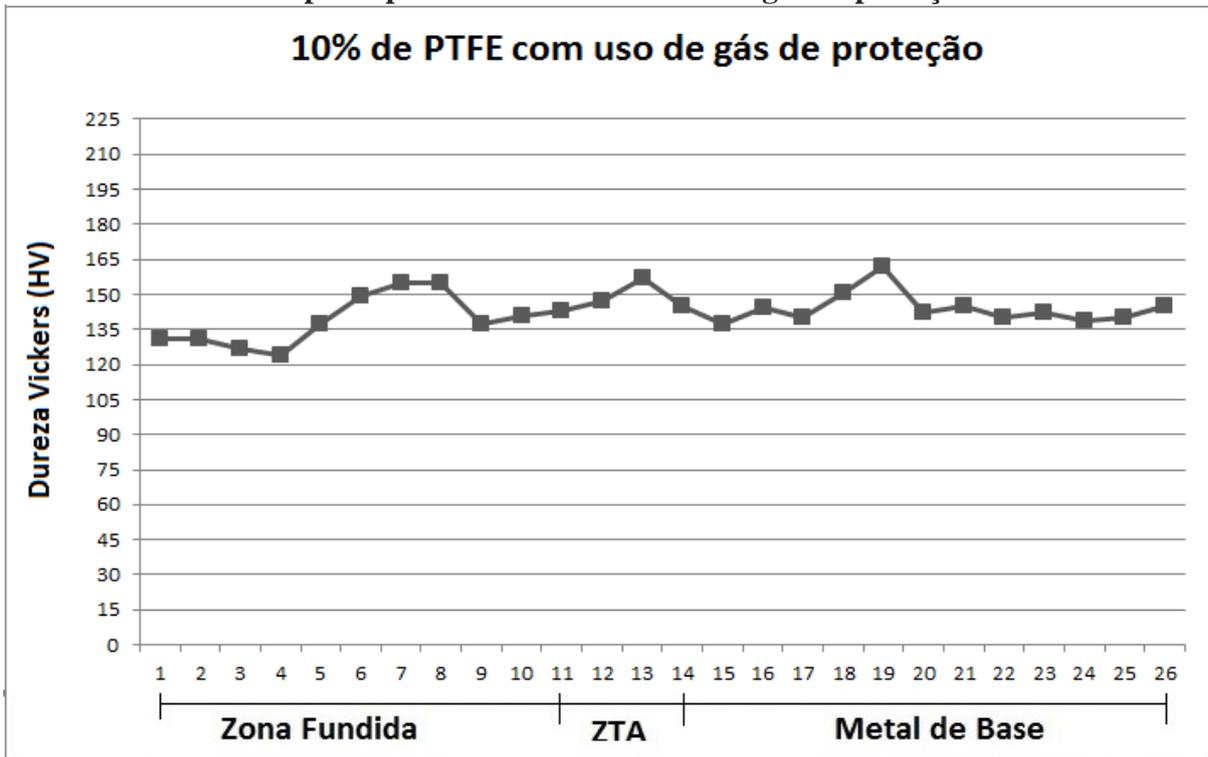
Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Tabela 5.5 - Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 10% de PTFE sem o uso de gás de proteção

10% de PTFE sem uso de gás de proteção	
Número de medição	Valor de dureza Vickers (HV)
1	167
2	181
3	189
4	191
5	196
6	203
7	187
8	200
9	186
10	189
11	172
12	149
13	144
14	145
15	150
16	155
17	152
18	150
19	144
20	142
21	139
22	137
23	134
24	138
25	133

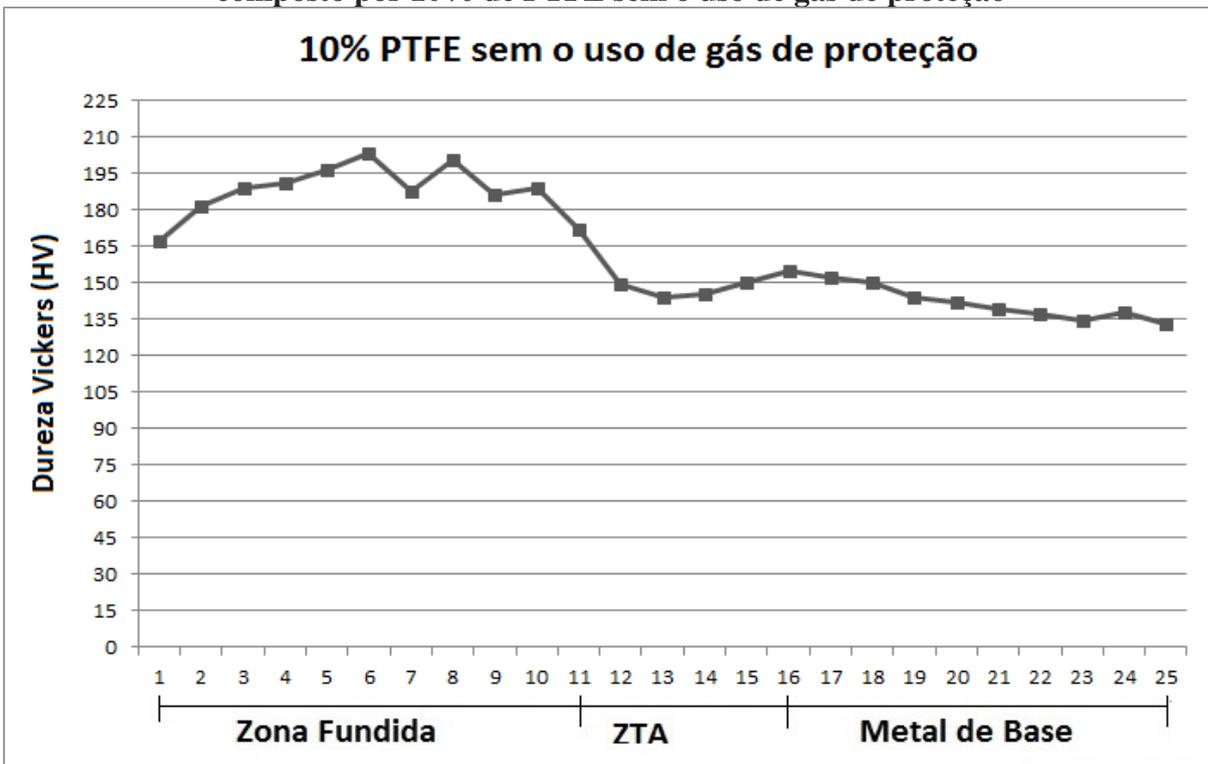
Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Gráfico 5.16 - Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 10% de PTFE e uso de gás de proteção



Fonte: elaborado pela autora, 2016.

Gráfico 5.17 - Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 10% de PTFE sem o uso de gás de proteção



Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Tabela 5.6 - Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 15% de PTFE e uso de gás de proteção

15% de PTFE com uso de gás de proteção	
Número de medição	Valor de dureza Vickers (HV)
1	154
2	149
3	162
4	145
5	135
6	134
7	145
8	140
9	133
10	127
11	153
12	147
13	143
14	144
15	163
16	149
17	143
18	141
19	139
20	143
21	136
22	138
23	140
24	134
25	125

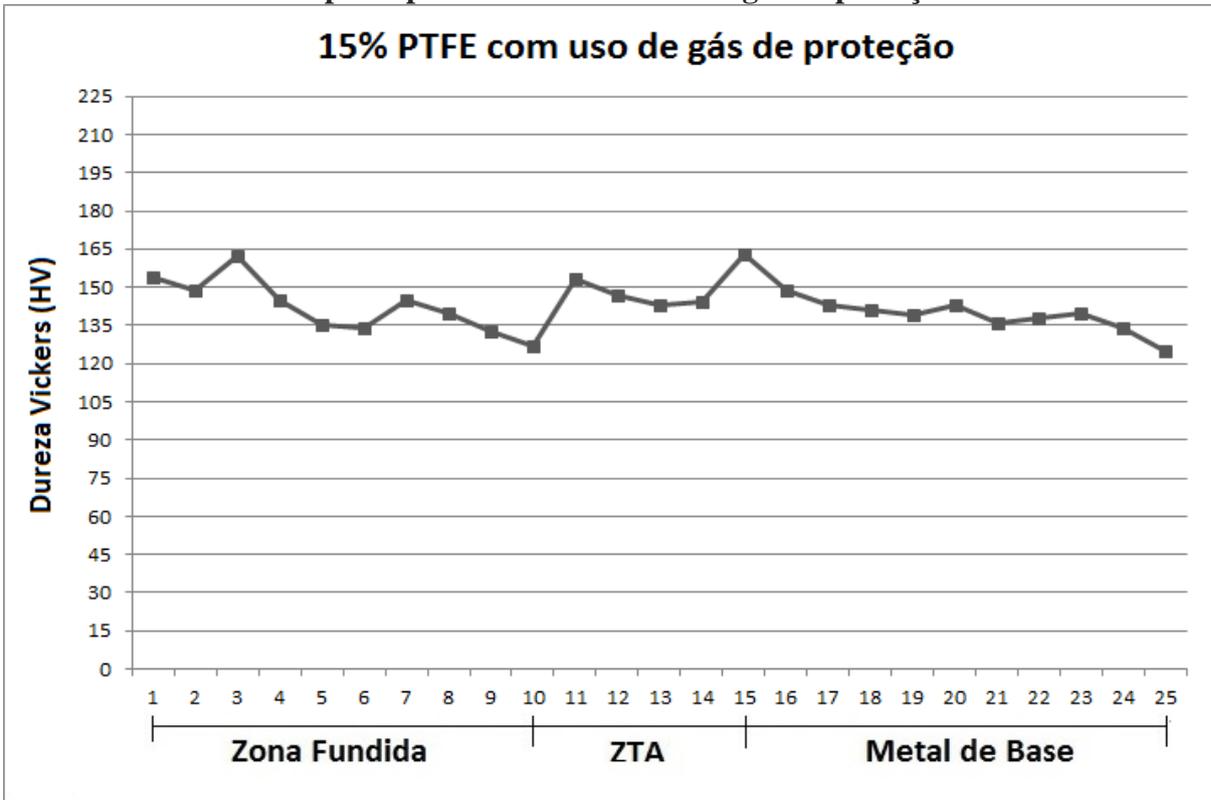
Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Tabela 5.7 - Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 15% de PTFE sem o uso de gás de proteção

15% de PTFE sem uso de gás de proteção	
Número de medição	Valor de dureza Vickers (HV)
1	170
2	171
3	183
4	183
5	185
6	138
7	178
8	200
9	188
10	177
11	180
12	163
13	156
14	156
15	157
16	159
17	166
18	160
19	150
20	156
21	155
22	154
23	145
24	146

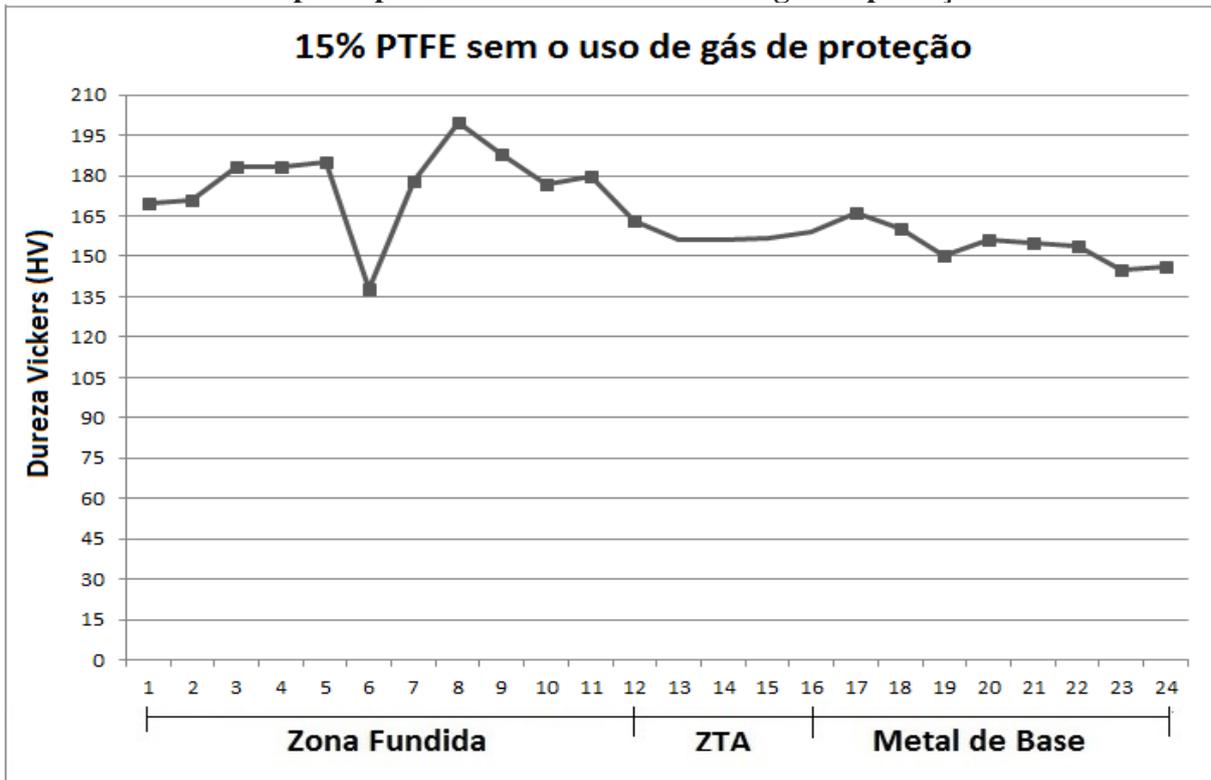
Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Gráfico 5.18 - Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 15% PTFE e uso de gás de proteção



Fonte: elaborado pela autora, 2016.

Gráfico 5.19 - Valores de microdureza do cordão de solda produzido com fluxo composto por 15% PTFE sem o uso de gás de proteção



Fonte: elaborado pela autora, 2016.

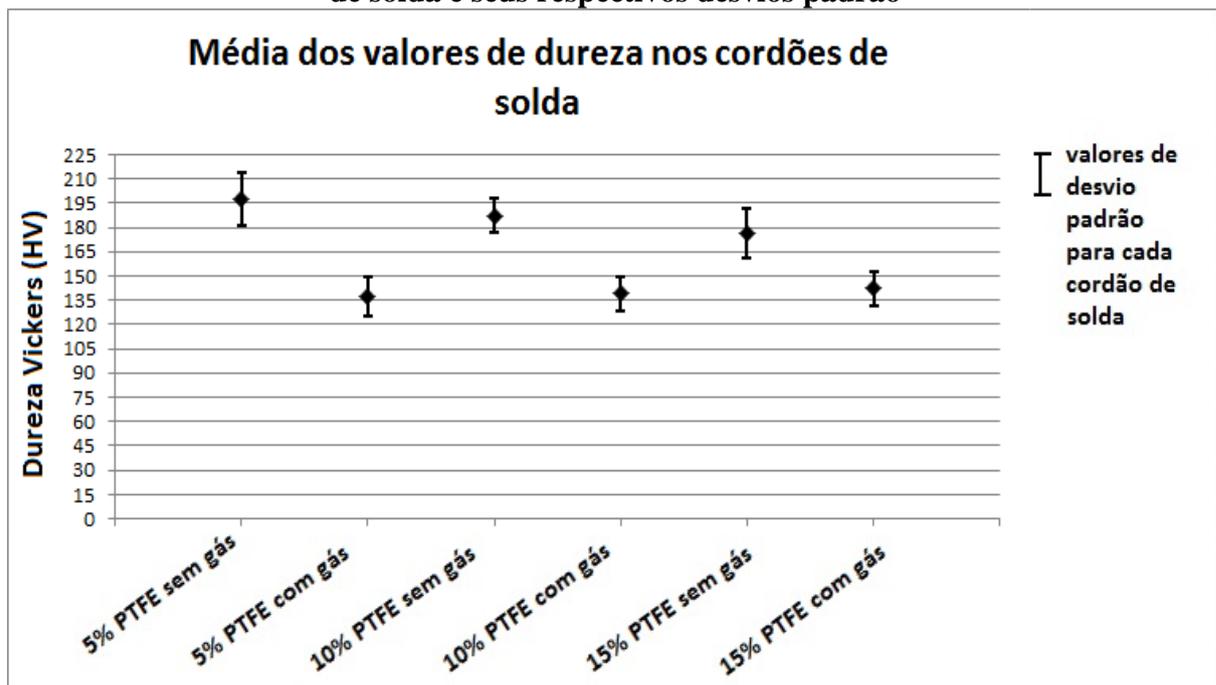
Para auxiliar a compreensão dos valores, um gráfico com os valores médios da microdureza encontrada na zona fundida de cada cordão de solda foi construído. O desvio padrão também foi calculado. Os valores encontrados estão dispostos na Tabela 5.8 e no Gráfico 5.19.

Tabela 5.8 – Médias e desvios padrão das zonas fundidas de cada cordão de solda analisado

	Média	Desvio Padrão
5% PTFE sem gás	197	16,26
5% PTFE com gás	137	12,52
10% PTFE sem gás	187	10,91
10% PTFE com gás	139	10,66
15% PTFE sem gás	176	15,35
15% PTFE com gás	142	10,71

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Gráfico 5.20 – Média dos valores de dureza encontrados na zona fundida de cada cordão de solda e seus respectivos desvios padrão



Fonte: elaborado pela autora, 2016.

7.3.1.1 Análise das tabelas e gráficos

Ao analisar os valores médios de dureza da tabela 5.8 pode-se verificar que as soldas executadas sem gás de proteção apresentaram um aumento de dureza da ordem de 34% e que, quanto menor o percentual de polímero (5%) maior a dureza, ou seja, variou de 197 HV contra 176 HV nas soldas realizadas com 15% de polímero. Neste trabalho o aumento foi de

12%. Já as soldas realizadas com gás de proteção externo não tiveram variações nos valores de dureza, a mesma ficou em torno de 130 HV.

Quando observados os gráficos sem o uso de gás de proteção, percebe-se uma queda no valor de dureza vickers encontrado entre a zona fundida e a zona termicamente afetada. Isso não foi observado quando se utilizou gás de proteção, pois os valores se encontram todos na mesma faixa. Acredita-se que o gás de proteção, CO₂, quando utilizado, há uma dissociação do mesmo gerando CO e O, esse átomo de oxigênio pode se reagir com os elementos endurecedores do cordão de solda, como Si e Mn, reduzindo a dureza da região. Desse modo, quando se utilizou gás de proteção a dureza foi próxima nas três regiões analisadas (zona fundida, zona termicamente afetada e metal de base). Já quando não foi utilizado o gás de proteção, uma menor quantidade de elementos endurecedores do cordão de solda reagiu, ocasionando na permanência desses elementos na zona fundida o que pode justificar esse valor de dureza superior na região em comparação com a ZTA e o metal de base.

Os valores de dureza encontrados nos cordões de solda são valores compatíveis com as microestruturas encontradas. Acredita-se que este baixo valor pode estar associado com o polímero adicionado no fluxo interno do arame.

5.3.2 Ensaio de Impacto

O ensaio de impacto foi realizado em todos os corpos de prova. Os valores da energia absorvida para cada uma das condições de soldagem estão presentes nas Tabelas 5.9 a 5.14.

Tabela 5.9 – Valores de energia absorvida no ensaio de impacto com os corpos de prova da soldagem com 5% PTFE sem uso de gás de proteção

5% de PTFE sem uso de gás de proteção	Energia absorvida (Joules)
CORPO DE PROVA 1	79
CORPO DE PROVA 2	79
CORPO DE PROVA 3	138
MÉDIA	99

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Tabela 5.10 – Valores de energia absorvida no ensaio de impacto com os corpos de prova da soldagem com 5% PTFE e uso de gás de proteção

5% de PTFE e uso de gás de proteção	Energia absorvida (Joules)
CORPO DE PROVA 1	104
CORPO DE PROVA 2	111
CORPO DE PROVA 3	59
MÉDIA	91

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Tabela 5.11 – Valores de energia absorvida no ensaio de impacto com os corpos de prova da soldagem com 10% de PTFE sem uso de gás de proteção

10% de PTFE sem uso de gás de proteção	Energia absorvida (Joules)
CORPO DE PROVA 1	52
CORPO DE PROVA 2	44
CORPO DE PROVA 3	23
MÉDIA	39

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Tabela 5.12 – Valores de energia absorvida no ensaio de impacto com os corpos de prova da soldagem com 10% de PTFE e uso de gás de proteção

10% de PTFE e uso de gás de proteção	Energia absorvida (Joules)
CORPO DE PROVA 1	105
CORPO DE PROVA 2	91
CORPO DE PROVA 3	68
MÉDIA	88

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Tabela 5.13 – Valores de energia absorvida no ensaio de impacto com os corpos de prova da soldagem com 15% de PTFE sem uso de gás de proteção

15% de PTFE sem uso de gás de proteção	Energia absorvida (Joules)
CORPO DE PROVA 1	46
CORPO DE PROVA 2	120
CORPO DE PROVA 3	89
MÉDIA	85

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Tabela 5.14 – Valores de energia absorvida no ensaio de impacto com os corpos de prova da soldagem com 15% de PTFE e uso de gás de proteção

15% de PTFE e uso de gás de proteção	Energia absorvida (Joules)
CORPO DE PROVA 1	47
CORPO DE PROVA 2	24
CORPO DE PROVA 3	25
MÉDIA	32

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

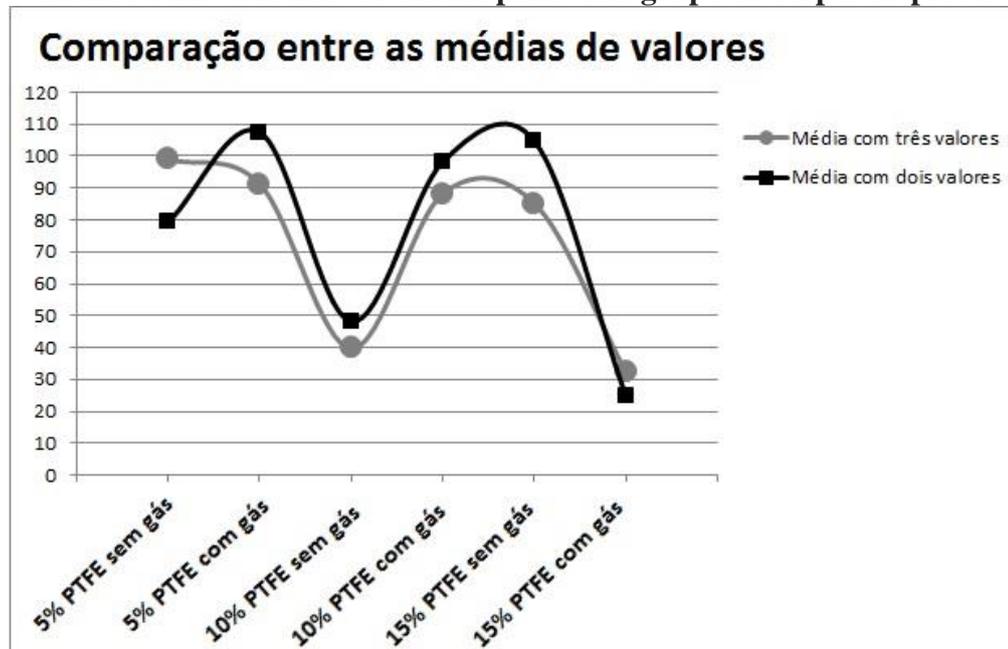
Ao observar os valores obtidos, percebe-se que houve um valor discrepante nas medidas. Na Tabela 5.15 e no Gráfico 5.21 estão apresentados os valores médios encontrados. É importante ressaltar que os valores discrepantes encontrados foram retirados para o cálculo das médias.

Tabela 5.15 – Novas médias calculadas para cada grupo de corpos de prova

Composição do corpo de prova	Valor médio absorvido (Joules)
5% de PTFE sem uso de gás de proteção	79
5% de PTFE e uso de gás de proteção	107
10% de PTFE sem uso de gás de proteção	48
10% de PTFE e uso de gás de proteção	98
15% de PTFE sem uso de gás de proteção	104
15% de PTFE e uso de gás de proteção	24

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Gráfico 5.21 – Médias calculadas para cada grupo de corpos de prova



Fonte: elaborado pela autora, 2016.

Mesmo fazendo o tratamento dos dados percebe-se que os valores encontrados não possuem nenhum padrão. Os valores médios das soldas feitas sem o gás de proteção e com gás de proteção estão no mesmo patamar, ou seja, 77 Joules.

Os valores médios mais elevados de energia absorvida são, respectivamente, nas soldas realizadas com 5% de polímero com o uso de gás de proteção e a amostra de solda com 15% de polímero sem o uso de gás de proteção. Com estes resultados não há como fazer uma correlação em função das discrepâncias dos mesmos.

Acredita-se que esta discrepância está relacionada com o próprio comportamento da solda, pois em um cordão de solda existem três regiões muito distintas, zona fundida, zona termicamente afetada e o metal de base. Como o entalhe foi posicionado no cordão de solda e como a ZTA também é uma região de fragilidade, estas regiões podem ter competido na hora do rompimento.

Outra hipótese para a inconclusão do teste de impacto está no entalhe, não apenas a localização dele quanto ao cordão de solda, mas quanto ao processo de fabricação desses entalhes. Como o processo de fabricação do entalhe foi feito por fresamento, isso pode ter causado alguma irregularidade no entalhe e essas irregularidades podem levar a uma grande alteração no momento de absorção da energia. Não somente o processo de fabricação pode levar a irregularidades como, também, o raio do entalhe fabricado. Uma diferença no raio pode gerar varias distorções nos valores de energia absorvida de um material.

Além dos problemas possíveis no entalhe, pode haver a possibilidade de a posição do corpo de prova na máquina. Como esse posicionamento é realizado manualmente e um milímetro de diferença no local de posicionamento pode gerar diferenças de valores de energia absorvida através do ensaio de impacto, provavelmente esse desvio no posicionamento pode ter contribuído para a grande discrepância nos valores encontrados.

Além de todas essas possibilidades, há ainda a grande presença de poros encontrada na microestrutura do material, essa porosidade pode ter sido pontos de tensão no material influenciando no valor de energia absorvida. Como a porosidade presente é diferente em cada corpo de prova, não há como ter certeza da uniformidade dos resultados.

Diante dos resultados obtidos não há como tirar nenhuma conclusão do ensaio de impacto sobre, exclusivamente, o cordão de solda do material. Sendo assim, o teste realizado foi considerado inconclusivo.

6 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho foi permitido concluir que:

Em todas as condições de soldagem os cordões de solda apresentaram uma grande quantidade de poros e inclusões de escória. Tais discontinuidades podem estar associadas aos parâmetros de soldagem utilizados, à composição química do fluxo e a não uniformidade do preenchimento do arame com fluxo durante a sua fabricação.

Em todas as microestruturas analisadas não foi possível encontrar a ferrita acicular.

De acordo com os resultados obtidos verificou-se que a largura dos cordões de solda executados sem o uso de gás de proteção externa e com 5% de polímero tendeu a ser maior. Neste trabalho foi da ordem de 25% maior.

Verificou-se que profundidade do cordão de solda aumenta quando se utiliza maior percentual de polímero aliado a proteção gasosa externa. Verificou-se que para 15% de polímero com gás de proteção a profundidade atingiu 5,687 mm contra 5,040 mm para 5% de PTFE, ou seja, a profundidade foi 12% maior.

Com relação aos resultados encontrados no reforço e na ZTA não se verificou alterações significativas que pudesse ser feita uma comparação.

De acordo com os resultados as soldas executadas sem gás de proteção apresentaram um aumento na dureza na ordem de 34% e que, quanto menor o percentual de polímero (5%) maior a dureza. Neste trabalho o aumento da dureza foi de 12%.

Os ensaios de impacto realizados são foram conclusivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.1-91**: Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding. Miami: Aws, 1998. 57 p.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS B4.0**: Standart Methods for Mechanical Testing of Welds. Miami: Aws, 2007. 136 p.

BOND, Danielle; MICHELS, Marília Arent; LAFRATTA, Fernando Humel. **INFLUÊNCIA DO FLUXO UTILIZADO NO PROCESSO ARCO SUBMERSO NA GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA**. Florianópolis: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2015. Disponível em: <http://www.udesc.br/arquivos/id_submenu/2252/81.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2016.

BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR - FCAW**. Belo Horizonte: Ufmg, 2000. 15 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Macânica**: Estrutura e Propriedades das Ligas. 2. ed. São Paulo: Mcgraw.hill, 1986. 1 v.

COSTA, Cel. Fernando Febeliano da. **Ensaio Tecnológicos**: 3º Ciclo de Técnico em Mecânica. São Paulo: Centro Estadual de Educação Tecnológica Paulo Souza, 2000. 95 p.

FORTES, Cleber. **Metalurgia da Soldagem**. ESAB, 2004. 94 p.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012. 365 p.

GEARY, Don; MILLER, Rex. **Soldagem**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. Tradução de: Carlos Lange Bassini e Irionson Antônio Bassini.

LOPES, Jorge Teófilo de Barros. **Estrutura e Propriedades dos Materiais**: Ensaio Mecânicos dos Materiais. Belém: Universidade Federal do Pará, 2014. 274 p.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem & Técnicas Conexas**: Processos. Porto Alegre: Ufrgs, 1996. 477 p.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Ufmg, 2009. 363 p.

MODENESI, Paulo José. **Introdução à Física do Arco Elétrico: Soldagem I**. Belo Horizonte: Ufmg, 2012. 44 p.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Vilani. **Introdução aos Processos de soldagem: Soldagem I**. Belo Horizonte: Ufmg, 2000. 51 p.

OKUMURA, Toshie; TANIGUCHI, Célio. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro: Ltc, 1982. 461 p.

PERDIGÃO, Sérgio de Carvalho. **Instrução para a classificação dos constituintes microestruturais do metal de solda dos aços ferríticos, utilizando a microscopia ótica**. 16. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 1987. 18 p.

RODRIGUES, Emanuel Rezende. **Influência de Parâmetros do Processo FCAW-G nas características da solda do aço ASTM A-36**. 2010. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SAMPAIO, Raimundo. **Apostila de Inspeção Visual: Inspeção de Equipamentos**. Camaçari: Curso de Inspeção de Equipamentos, 2010. 27 p.

SILVA, André Luis da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. 2. ed. Sumaré: Eletrometal S.a. Metais Especiais, 1988. 512 p.

SOUZA, Antônio C.. **Consumíveis de Soldagem**. Guarulhos: Lincon Eletric do Brasil, 2011. 44 p.

SOUZA, Cláudio Ivanei de. **Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal**. 2011. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1982. 286 p.

STRASSER, Victor E. de. **A soldagem moderna dos metais ferrosos pelo arco elétrico**. Rio de Janeiro: Sedegra, 1963. 294 p.

VAZ, Cláudio Turani. **Influência do polímero utilizado como aglomerante em eletrodos revestidos básicos sobre a formação de ferrita acicular no metal de solda**. 2014. 146 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992. 493 p.

WAINER, Emílio. **Soldagem**. 19. ed. São Paulo: Abm, 1983. 720 p.

ZOLIN, Ivan. **Ensaio Mecânicos e Análise de Falhas**. 3. ed. Santa Maria: Colégio Técnico Industrial - Ufsm, 2011. 102 p. Disponível em: <file:///C:/Users/Asus UX32LA/Downloads/TCC/Ensaio/161012_ens_mec_an_fal.pdf>. Acesso em: 05 maio 2016.