

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Eliana Christina de Jesus Castro

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

Belo Horizonte

Novembro de 2015

Eliana Christina de Jesus Castro

Avaliação de soldas produzidas por arames tubulares fabricados em laboratório do tipo básico com adição de polímero como ingrediente do fluxo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Maria Celeste Monteiro de Souza Costa

Coorientador: Alexandre Queiroz Bracarense

Belo Horizonte

Novembro de 2015

Castro, Eliana Christina de Jesus.
C355a Avaliação de soldas produzidas por arames tubulares fabricados em laboratório do tipo básico com adição de polímero como ingredientes do fluxo / Eliana Christina de Jesus Castro. - 2015.
116 f. : il.; tabs. ; grafs ; fotos. –
Orientadora: Maria Celeste Monteiro de Souza Costa.
Co-orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2015.
Bibliografia.
1. Soldagem. 2. Processo de fabricação. 3. Polímeros. 4. Microestrutura - Metalografia. I. Costa, Maria Celeste Monteiro de Souza. II. Bracarense, Alexandre. III. Título.

CDD: 660.112



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
“AVALIAÇÃO DE SOLDAS PRODUZIDAS POR ARAME
TUBULARES FABRICADOS EM LABORATÓRIO DO TIPO
BÁSICO COM POLÍMEROS COMO
INGREDIENTES DO FLUXO.”

Autora: Eliana Christina de Jesus Castro

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof^ª. Dr^ª. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa (ORIENTADORA)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof^ª. Dr^ª. Elaine Carballo Siqueira Correa
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Claudio Turani Vaz
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Joel Romano Brandão
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Belo Horizonte, 04 de Novembro de 2015.

Aos meus pais pelo incentivo
À matilha pela companhia

AGRADECIMENTOS

À Professora Celeste pelas orientações, dedicação, paciência e compromisso para que esta dissertação fosse realizada.

Ao Professor Bracarense pela co-orientação, fundamental para esta pesquisa.

Ao Prof. Joel Romano pela disponibilidade na ajuda técnica.

À Professora Elaine pelo auxílio e palavras de incentivo.

Ao corpo docente do Curso de Mestrado em Engenharia de Materiais pelas excelentes aulas e oportunidade de aprendizado.

À CAPES pela bolsa.

Aos colegas, funcionários e professores do laboratório de soldagem da UFMG (LRSS).

Aos funcionários do PPGEM/CEFET-MG, principalmente à secretária Ivete, pelo suporte administrativo, ao Geraldinho e Giovane pelo auxílio mecânico.

E a todos que de uma forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

“Alegações extraordinárias requerem evidências extraordinárias.”
(Carl Sagan, Cosmos, 1980)

RESUMO

Estudos recentes mostraram que a solda produzida por eletrodos revestidos aglomerados com polímero apresenta baixos teores de hidrogênio difusível e consideráveis frações volumétricas de ferrita acicular. Foi verificado também que as propriedades mecânicas das soldas obtidas com eletrodos revestidos aglomerados com polímero, como limites de resistência, escoamento, alongamento e tenacidade ao impacto apresentam valores satisfatórios quando comparados aos mínimos especificados em norma para eletrodos classe E7018. Esses resultados sugerem que há perspectivas de uso do polímero como ingrediente, e não aglomerante, em fluxos de arames tubulares. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o metal de solda produzido empregando arames tubulares fabricados em laboratório com adição de diferentes composições de polímero aos fluxos básicos (classe E7018). A aplicação de polímeros em fluxos de arames tubulares fabricados em laboratórios também apresentou benefícios à solda em relação aos fluxos sem a adição de polímero. A partir da soldagem com os arames tubulares fabricados em laboratório, foi estudado o efeito do polímero comparando-se as microestruturas obtidas e os comportamentos mecânicos através dos resultados de microdureza. Os resultados preliminares obtidos com a análise microestrutural apresentaram aumento da incidência na formação da ferrita acicular nas composições de polímero analisadas em relação às composições de fluxo sem o polímero. Nas condições estudadas, não foram verificadas diferenças significativas quanto aos resultados de microdureza do metal de solda e a geometria do cordão quanto ao teor de polímero.

Palavras-chave: polímeros, fluxos, arames tubulares, ferrita acicular

ABSTRACT

Recent researches have shown that the welds produced by covered electrodes agglomerated with polymer presented low contents of diffusible hydrogen and considerable volume fraction of acicular ferrite. It has been verified that the weld mechanical properties such as strength, ductility, yield strength and fracture toughness presented reasonable values when compared to the minimum specified in the standards for E7018 class of electrodes. These results suggest that there are perspectives for polymer use as ingredient, not as agglomerate, in flux wire. In this work, the aim is to evaluate the weld metal produced using basic flux cored wires (class E7018). In this work, the addition of polymer in cored wires has also brought benefits to the weld. From the welding tests using the laboratory produced flux cored wires, the polymer effect was analyzed comparing the microstructures obtained and the mechanical behavior throughout the micro hardness test. The results obtained with the microstructural analysis have shown there is a tendency on acicular ferrite formation in different contents of polymer when compared to no added polymer flux. Under the testing conditions, it has not been verified any significantly difference in the micro hardness testing results of the metal weld and the weld shape when compared with the amount of polymer used.

Keywords: Tubular wires, flux, polymer, acicular ferrite

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema da soldagem com arame tubular proteção.....	23
Figura 2: Esquema de soldagem com arame tubular autoprotégido.....	24
Figura 3: Gráfico da alteração da corrente com a extensão do eletrodo após o bico de contato.....	28
Figura 4: Modos de transferência metálica no processo GMAW.....	30
Figura 5: Gráfico de condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência na soldagem GMAW com um gás de proteção à base de argônio.....	30
Figura 6: Esquema de processo de fabricação de arames tubulares.....	32
Figura 7: Etapas de fechamento do arame.....	33
Figura 8: Tipos de seção transversal de arames tubulares.....	34
Figura 9: Exemplificação do fenômeno de retorno elástico ou efeito mola em chapas durante o fechamento.....	36
Figura 10: Desenho esquemático do formato da fita de aço após cada etapa de fabricação.....	37
Figura 11: Características da Fieira de trefilação.....	39
Figura 12: Desenhos de carretéis de plástico e aço.....	40
Figura 13: Gráfico da fração volumétrica de ferrita acicular no metal de solda eletrodos básicos impermeáveis em relação aos convencionais.....	46
Figura 14: Esquema das regiões de uma solda por fusão.....	50
Figura 15: Diagrama das alterações que podem ocorrer na zona fundida na solda de um aço carbono.....	51
Figura 16: Esquema de algumas morfologias de constituintes conforme a classificação do IIW de micrografias padrão para comparação.....	55
Figura 17: Esquema do caminho de propagação de trinca por clivagem nos grãos de aço com ferrita de contorno de grão e ferrita acicular.....	56
Figura 18: Fluxograma experimental.....	60
Figura 19: Máquina utilizada para a fabricação do arame tubular utilizado neste trabalho.....	61
Figura 20: Forno utilizado para a secagem dos fluxos.....	63
Figura 21: Fluxo moído.....	63
Figura 22: Esquema para o cálculo de fechamento da fita.....	65
Figura 23: Guia construída e instalada antes do rolete de moldagem da fita...	68

Figura 24: Guia construída e instalada antes do rolete de fechamento do arame.....	66
Figura 25: Primeiro e segundo pares de roletes.....	67
Figura 26: Fieiras de trefilação.....	68
Figura 27: Chapa com chanfro em “V”.....	69
Figura 28: Esquema de soldagem.....	70
Figura 29: Esquema da metodologia das regiões analisadas do cordão de solda.....	71
Figura 30: Representação esquemática dos parâmetros geométricos considerados para a análise dos cordões de solda sobre chapa....	72
Figura 31: Regiões no metal de solda para medição da microdureza.....	73
Figura 32: Arame tubular produzido.....	74
Figura 33: Seção transversal dos arames produzidos com o fluxo E7018.....	76
Figura 34: Seção transversal dos arames produzidos com o fluxo E7018 antes e depois da trefilação.....	77
Figura 35: Oscilogramas da soldagem com o arame 15% com gás.....	79
Figura 36: Oscilogramas da soldagem com o arame 15% sem gás.....	80
Figura 37: Cordões de solda dos pré-testes de soldagem.....	81
Figura 38: Cordões de solda dos testes principais.....	82
Figura 39: Cordão de solda com escória produzido com arame 5% com proteção gasosa.....	83
Figura 40: Macrografias dos pré-testes.....	84
Figura 41: Macrografias dos testes principais.....	85
Figura 42: Microestrutura típica encontrada no metal de solda depositado com os arames tubulares.....	87
Figura 43: Microestrutura típica encontrada no metal de solda depositado.....	88
Figura 44: Microestrutura típica encontrada no metal de solda depositado.....	89
Figura 45: Microestrutura típica encontrada no metal de solda depositado.....	89
Figura 46: Microestrutura típica encontrada no metal de solda depositado.....	89
Figura 47: Microestrutura típica encontrada no metal de solda depositado.....	90
Figura 48: Microestrutura típica encontrada no metal de solda depositado.....	91
Figura 49: Microestrutura típica encontrada no metal de solda depositado.....	92
Figura 50: Gráfico do perfil de microdureza encontrada no centro do cordão...	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Constituintes no esquema de classificação de microestrutura de metal de solda de baixo carbono do IIW.....	53
Tabela 2:	Cálculo da concentração mássica do polímero em solução.....	63
Tabela 3:	Cálculo das quantidades de cada componente utilizado para fabricação dos fluxos.....	62
Tabela 4:	Parâmetros dos testes de soldagem.....	78
Tabela 5:	Medidas do formato dos cordões (pré-testes).....	86
Tabela 6:	Medidas do formato dos cordões (testes principais).....	86
Tabela 7:	Medidas de microdureza Vickers (pré-testes).....	93
Tabela 8:	Medidas de microdureza Vickers (testes principais).....	93

LISTA DE SÍMBOLOS

AF	= Ferrita acicular (acicular ferrite)
CC	= Corrente contínua
D	= Profundidade (Depth)
DBCP	= Distância bico de contato-peça
f	= Ângulo final de dobramento
FC	= Ferrita com carbonetos agregados (ferrite carbide)
FCAW	= Flux Cored Arc Welding
FCAW-G	= Flux Cored Arc Welding Gas
FCAW-S	= Flux Cored Arc Welding - Shielded
FC (P)	= Ferrite Carbide (Perlita)
FS	= Ferrita com segunda fase
FS (A)	= Ferrita com segunda fase alinhada
FS (NA)	= Ferrita com segunda fase não alinhada
FS (UB)	= Ferrita com segunda fase (Bainita superior)
GLP	= Gás liquefeito de petróleo
GMAW	= Gas Metal Arc Welding
GTAW	= Gas Tungsten Arc Welding
h	= Reforço (height)
l	= Ângulo inicial
MAG	= Metal Active Gas
MB	= Metal de base
MIG	= Metal Inert Gas

M(L)	= Martensita em ripas
M(T)	= Martensita maclada
N	= Profundidade do entalhe
NA	= Não aplicável
PAW	= Plasma Arc Welding
PF	= Ferrita primária
PF(G)	= Ferrita de contorno de grão
PF(I)	= Ferrita Poligonal Intragranular
Pmáx	= Penetração máxima
Ri	= Raio inicial
R _f	= Raio final
SAW	= Submerged Arc Welding
SMAW	= Shield Metal Arc Welding
Tc	= Temperatura crítica
Tf	= Temperatura de fusão
TIG	= Tungsten Inert Gas
Tp	= Temperatura de pico
w	= Largura (width)
ZF	= Zona fundida
ZTA	= Zona termicamente afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	JUSTIFICATIVA	16
3	OBJETIVOS	17
3.1	Objetivos Gerais	17
3.2	Objetivos Específicos	17
4.	PESQUISA CIENTÍFICA	18
4.1	Processos de Soldagem	18
4.1.1	Processo de Soldagem SMAW.....	18
4.1.2	Soldagem GMAW (MIG/MAG).....	19
4.1.3	Processo de Soldagem FCAW.....	20
4.2	Características do Processo de Soldagem FCAW	21
4.2.1	Vantagens do Processo FCAW.....	21
4.2.2	Variações de arames tubulares.....	22
a)	Arames com proteção gasosa (Processo FCAW-G).....	22
b)	Arames autoprotetidos (Processo FCAW-S).....	23
4.2.3	Limitações do Processo FCAW.....	25
4.2.4	Gases de Proteção.....	25
4.2.4	Variáveis do Processo FCAW.....	27
a)	Corrente de Soldagem.....	27
b)	Tensão de Soldagem.....	27
c)	Extensão do Eletrodo.....	28
d)	Velocidade de Soldagem.....	28
e)	Polaridade.....	29
4.2.5	Transferência Metálica nos processos de soldagem.....	29
4.2.6	- Transferência metálica no processo de soldagem FCAW.....	31
4.3	Processo de Fabricação de Arames Tubulares	32
4.3.1	Operações de dobramento da fita.....	33
4.3.2	Roletes de Conformação.....	36
4.3.3	Trefilação do Arame.....	37
4.4	Fluxos utilizados em consumíveis de soldagem	40

4.4.1	Classificação dos fluxos em consumíveis de soldagem.....	42
a)	Fluxos rútilicos.....	42
b)	Fluxos básicos.....	43
4.4.4	Fluxos em arames tubulares autoprotégidos.....	44
4.4.5	Comportamento do polímero em fluxos consumíveis de soldagem.....	45
4.5	Metalurgia da Soldagem.....	48
4.5.1	Fluxo de Calor Durante a Soldagem.....	48
4.5.2	Ciclo Térmico de Soldagem.....	50
4.5.3	Microconstituintes no Metal de Solda.....	52
4.5.3.1	A ferrita acicular e sua nucleação.....	56
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
5.1	Introdução.....	59
5.2	Fluxograma experimental.....	59
5.3	Fabricação dos arames tubulares.....	61
5.3.1	Máquina de trefilação do arame tubular.....	61
5.3.2	Materiais.....	62
5.3.3	Preparação dos fluxos.....	62
5.3.4	Ajustes do equipamento.....	64
a)	Ajuste dos roletes.....	64
b)	Desenvolvimento e construção de guias.....	65
5.3.4	Produção dos arames.....	66
5.4	Testes de soldagem.....	68
a)	Materiais.....	68
b)	Equipamentos.....	69
c)	Ajuste dos parâmetros.....	70
5.4.1	Análise metalográfica.....	70
a)	Materiais.....	70
b)	Equipamentos.....	71
c)	Procedimento experimental.....	71
5.4.2	Análise da geometria do cordão.....	72
5.4.3	Perfil de microdureza.....	72
a)	Materiais.....	72

b)	Equipamentos.....	72
c)	Procedimento experimental.....	73
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
6.1	Resultado da fabricação de arames tubulares.....	74
6.2	Resultado dos testes de soldagem.....	77
6.3	Resultado da análise macrográfica.....	83
6.5	Resultado da Análise microestrutural.....	87
6.4	Resultado da análise de microdureza.....	92
7	CONCLUSÕES.....	96
	REFERÊNCIAS.....	97
	ANEXO I.....	101
	ANEXO II.....	104

1 - INTRODUÇÃO

A crescente demanda da indústria mecânica por alta produtividade aliada ao baixo custo de produção incentiva o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de combinar melhores propriedades dos materiais e redução de custos.

No segmento da soldagem, a fabricação de consumíveis desenvolvida em laboratório permite avaliar e aperfeiçoar as características desejadas visando reduzir os custos a longo prazo. A partir dos resultados obtidos em laboratório, estuda-se a viabilidade da produção em escala industrial.

É possível fabricar em laboratório novas formulações de arames tubulares para soldagem FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) com características específicas. A fabricação de novos consumíveis em laboratório pode proporcionar características desejáveis na solda, incluindo propriedades mecânicas, que são de extrema relevância na soldagem mecanizada, automatizada ou semiautomatizada.

O núcleo de arames tubulares pode conter diferentes tipos de fluxos, os quais são empregados de acordo com as variáveis requeridas no processo de soldagem FCAW, como tipo de material a ser soldado e características metalúrgicas da solda. Este núcleo possui funções similares ao revestimento de eletrodos revestidos. É possível, com relativa facilidade, fabricar e ajustar a composição química dos fluxos internos de arames tubulares em uma máquina de fabricação de arames construída em laboratório, na qual uma fita metálica é alimentada continuamente, preenchida por um fluxo e deformada em forma de arame tubular.

Dessa forma, se torna importante avaliar soldas produzidas por diferentes composições de fluxos em arames tubulares, uma vez que a demanda pelo processo de soldagem por eletrodo revestido vem sendo substituída pela soldagem com arame tubular. Isso ocorre devido à sua maior produtividade da solda produzida, aliada a algumas características que são compartilhadas pelos dois processos, como a possibilidade de se adicionar ao fluxo elementos químicos que minimizem a instabilidade da transferência e, conseqüentemente, melhorando as propriedades mecânicas da solda e facilidade de operação.

Este trabalho pretende estudar o desempenho de arames tubulares desenvolvidos em laboratório, nos quais são variados os tipos e composições de fluxos à base de revestimento de eletrodos revestidos de classe E7018 e comparar os resultados de cordões soldados, quanto à geometria e às propriedades mecânicas, contendo diferentes quantidades de polímero e nas condições de soldagem com e sem proteção gasosa externa.

2 – JUSTIFICATIVA

A utilização do processo de soldagem com arames tubulares tem aumentado significativamente nos últimos anos no Brasil e no mundo. As altas taxas de deposição, a aplicação expressiva da soldagem automatizada nas indústrias e o desenvolvimento de novos consumíveis têm levado as empresas a investir mais neste processo. Segmentos como o naval, *offshore*, construção pesada, dutos e manutenção estão entre os que mais utilizam soldagem com arames tubulares. Na soldagem subaquática, por exemplo, o uso de soldagem com arames tubulares se mostra promissor.

A adequação a alguma aplicação específica pode ser obtida com arames tubulares, modificando-se a composição e o percentual do fluxo. Assim como na soldagem com eletrodos revestidos, a escolha entre os fluxos que compõem o arame está associada com as propriedades mecânicas e metalúrgicas requeridas para a deposição de solda.

A adição de polímero na formulação do revestimento de eletrodos revestidos obteve resultados promissores quanto às características microestruturais e existe a necessidade de se estudar o comportamento da solda obtida com a adição de teores de polímero na soldagem FCAW. Espera-se que, assim como na soldagem SMAW, possa se obter também desempenho e características microestruturais desejáveis.

3 - OBJETIVOS

3.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo geral a fabricação e a avaliação de arames tubulares em uma máquina de baixo custo construída em laboratório, usando diferentes tipos de fluxos e teores de polímero como ingrediente do fluxo. Serão demonstradas as etapas de fabricação do arame tubular e análise das propriedades metalúrgicas das soldas observadas com cada arame.

3.2 Objetivos específicos

- Manutenção e adaptação das peças da máquina de fabricação de arames tubulares disponível no laboratório.
- Preparação de fluxos a serem avaliados – E7018 com e sem adição de polímero, variando-se a porcentagem de polímero.
- Fabricação de arames usando os fluxos.
- Análise macrográfica do arame fabricado.
- Soldagem mecanizada de um cordão de solda utilizando os arames fabricados.
- Análise metalográfica das soldas.
- Verificação de propriedade mecânica por meio de ensaio de microdureza dos cordões de solda.

4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 - Processos de Soldagem

A soldagem pode ser definida por uma operação que visa obter a união de peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas (QUITES, 2002).

De acordo com Modenesi et al. (2012), a soldagem é um dos processos industriais mais importantes na fabricação de peças metálicas. Os processos de soldagem também são utilizados na recuperação de peças desgastadas para a aplicação de revestimentos com propriedades especiais sobre superfícies metálicas e para corte. O sucesso da soldagem está associado a diversos fatores e, em particular, com a sua relativa simplicidade operacional.

Diversos processos de soldagem podem ser utilizados na fabricação de peças metálicas a partir das características do metal de base e dos objetivos requeridos na solda, dentre os quais se podem destacar os processos de soldagem por fusão a arco elétrico: com arame maciço (GMAW - *Gas Metal Arc Welding*), com arame tubular (FCAW - *Flux Cored Arc Welding*), com eletrodo revestido (SMAW - *Shield Metal Arc Welding*), e com eletrodo de tungstênio (GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*), a plasma (PAW – *Plasma Arc Welding*) e a arco submerso (SAW – *Submerged arc welding*).

4.1.1 – Processo de Soldagem SMAW

O processo de soldagem com eletrodo revestido se dá pela abertura de um arco elétrico entre a peça a ser fundida e um eletrodo revestido formado por um núcleo metálico e uma camada de revestimento composto por minerais e outros materiais (celulose, ferro ligas, rutila etc). A alma metálica do eletrodo conduz a corrente elétrica e é adicionada ao metal de base durante a soldagem.

O processo SMAW tem como vantagens a possibilidade de soldar diversos tipos de materiais, devido ao grande número de formulações na fabricação dos eletrodos; além da capacidade de atingir posições de difícil acesso e possuir baixo custo do

equipamento e dos consumíveis. Tais características resultam em uma maior frequência de aplicações na indústria.

O tipo de revestimento dos eletrodos pode produzir uma proteção gasosa através de sua queima ou produzir substâncias que reagem com elementos da atmosfera, de forma a evitar contaminações de gases como o nitrogênio e oxigênio. Além disso, existem outras funções para o revestimento, como: proporcionar estabilidade do arco, controlar a formação do cordão de solda; adicionar elementos de liga ao metal de solda; formar escórias como agente de fluxo e direcionar o arco elétrico.

Os eletrodos revestidos usados na soldagem de aços carbono podem ser classificados de acordo com o seu revestimento, destacando-se: os eletrodos celulósicos, os quais possuem celulose como material principal, cuja decomposição gera gases de proteção do arco e a poça de fusão; eletrodos rútilicos, compostos por grandes quantidades de rutila (TiO_2), capazes de produzir muita escória e bom acabamento da solda; eletrodos básicos, os quais possuem grandes quantidades de carbonatos e fluoretos, beneficiando a solda, porém requerem cuidados quanto à umidade por serem altamente higroscópicos; eletrodos oxidantes, os quais são compostos principalmente por óxidos de ferro e produzem escória oxidante, facilmente destacáveis, sendo porém, pouco usados.

Uma limitação deste processo é a interrupção da soldagem para a troca manual do eletrodo pelo soldador, assim que o eletrodo é todo consumido. Além desse fator limitante, é necessário realizar uma limpeza da escória em cada passe. Esses fatores acarretam em uma diminuição da produtividade.

4.1.2 – Soldagem GMAW (MIG/MAG)

A soldagem GMAW ocorre através da abertura de um arco elétrico entre um consumível definido como um eletrodo metálico maciço alimentado de forma contínua e a peça a ser soldada. Este processo pode ser realizado de forma semiautomática, ou até mesmo automática, com características de processo que favorecem sua robotização.

Quando devidamente ajustado, o processo GMAW pode efetuar soldas em todas as posições, com ótima estabilidade do arco, produzindo pouca escória, já que não

há envolvimento nenhum de fluxo, permitindo assim que em alguns casos os passes sejam depositados um sobre o outro sem a necessidade de limpeza prévia (MACHADO, 1996).

Quando a soldagem é realizada utilizando um gás inerte, como os gases argônio e hélio, é denominado processo MIG (*Metal Inert Gas*). Caso o gás de proteção seja um gás ativo, como o dióxido de carbono, é denominado processo MAG (*Metal Active Gas*). O processo de soldagem MIG pode ser utilizado na soldagem de aços carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio e suas ligas, magnésio e suas ligas, cobre e suas ligas. Já o processo MAG é utilizado na soldagem de aços de baixo carbono e aços de baixa liga (ALMEIDA, 2004).

Devido à proteção gasosa externa, há necessidade de proteção contra ventos, onde correntes de ar são consideráveis. Dessa forma, este processo apresenta dificuldade de realização de soldas em campo, exigindo um conjunto de equipamentos mais robustos e de alto custo. É considerado um processo relativamente de maior investimento e custo operacional (MODENESI et al, 2012).

4.1.3 – Processo de Soldagem FCAW

O processo de soldagem FCAW é definido pela coalescência entre metais, a qual é obtida através de um arco elétrico entre o arame tubular consumível alimentado continuamente e a peça a ser soldada. A proteção do arco e da poça de fusão nesse processo é feita pelo fluxo interno do arame, podendo ser, ou não, complementada por um gás de proteção (BRACARENSE, 2009).

O fluxo interno do arame pode atuar como desoxidante, acrescentar elementos de liga ao metal de solda e estabilizar o arco elétrico. A escória formada, além de atuar metalurgicamente, protege a solda durante a solidificação.

Por ser um processo passível de automatização, sua utilização tem aumentado em razão de ser mais produtivo que a soldagem com eletrodos revestidos. No entanto, é um processo que, em comparação ao SMAW exige equipamentos mais complexos e em comparação ao GMAW, possui um maior custo dos consumíveis. Em razão da alta produtividade, o alto custo se torna viável, geralmente compensado por uma economia muito maior (FORTES, 2004).

4.2 – Características do Processo de Soldagem FCAW

4.2.1 - Vantagens do Processo FCAW

A soldagem com arame tubular é um processo similar ao GMAW, em que são mantidas as vantagens como alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição e alto rendimento, resultando em alta produtividade. Neste processo estão abrangidas também vantagens do processo manual por eletrodo revestido, as quais envolvem uma grande gama de aplicações devido ao ajuste da composição química do fluxo do consumível. Dessa forma, o processo FCAW reúne as características de um processo semiautomático e passível de robotização, com a versatilidade que os fluxos dos consumíveis proporcionam, tornando-o bastante interessante do ponto de vista econômico.

A notoriedade do processo FCAW, segundo Fortes (2004), Souza e Ferraresi (2013), tem crescido devido às possíveis vantagens que este processo oferece em relação aos outros processos, tais como: alta qualidade do metal de solda depositado, ausência de irregularidades do cordão de solda, características de arco regular e baixo nível de respingos. Garcia e Scotti (2011) também acrescentam que existe uma taxa de fusão e deposição do arame tubular maior que do arame maciço na mesma faixa de corrente, uma vez que o invólucro tubular metálico tem menor massa condutora e isso proporciona maior densidade relativa de corrente. Comparado com o eletrodo revestido, a taxa de deposição do arame tubular é cerca de duas vezes maior na posição vertical e seis vezes na posição horizontal/plana (MACHADO, 1996).

Do ponto de vista econômico, é possível afirmar que o arame tubular pode realizar um dado comprimento de solda em menor tempo em relação ao arame maciço (GARCIA e SCOTTI, 2011).

Quanto à aplicação industrial, o processo FCAW é observado com frequência nos segmentos nuclear e naval, na construção de plataformas para exploração de petróleo e na fabricação de estruturas e peças de aço carbono, aços de baixa liga e aços inoxidáveis (SILVA, 2010; MACHADO, 1996).

4.2.2 - Variações de arames tubulares

Existem duas formas básicas de soldar com arames tubulares. No modo denominado autoprottegido, somente a escória e os gases produzidos pela decomposição de alguns dos seus elementos protegem o metal de solda da contaminação da atmosfera (principalmente de gases O_2 e N_2). A outra variação de arame tubular é o método que utiliza um gás de proteção adicional externamente, geralmente CO_2 puro, ou misturas desse gás com argônio e, algumas vezes, também com oxigênio (MACHADO, 1996).

a) Arames com proteção gasosa (Processo FCAW-G)

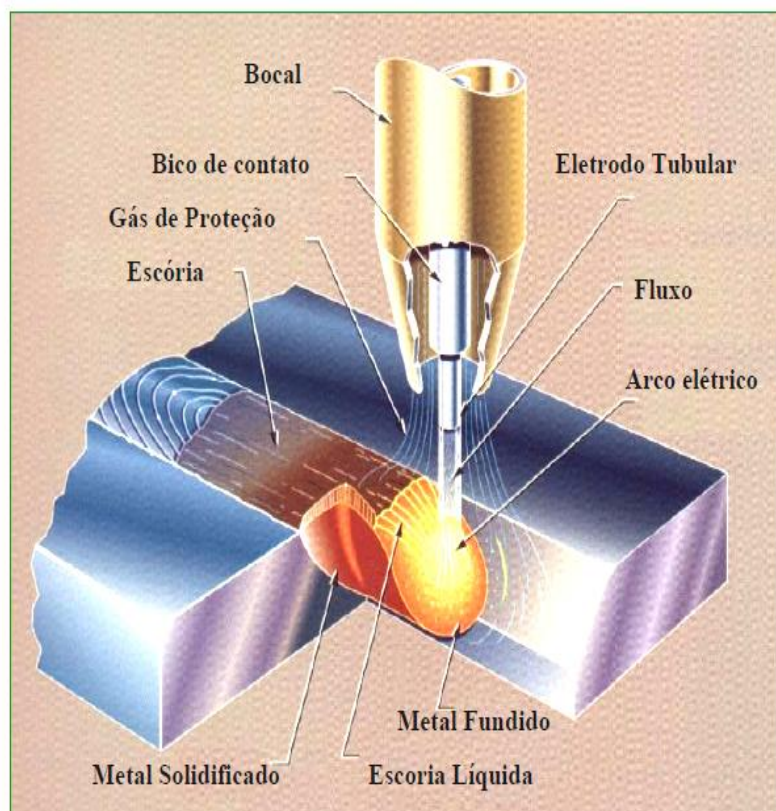
Os arames com proteção gasosa utilizam equipamentos semelhantes aos usados no processo GMAW. Os bocais e as tochas são adaptados para passagem de gás e estão conectados a cilindros que armazenam os gases. Geralmente empregam intensidade de corrente maior e a tocha pode ser resfriada a água ou com o próprio gás de proteção.

Este tipo de arame não é recomendado para uso em trabalho em campo, já que a presença do vento pode acarretar na perturbação da camada de gás e causar perda de proteção. O processo de proteção a gás é apropriado para produção de peças pequenas e soldagem de elevada penetração (BRACARENSE, 2011).

Machado (1996) comenta que em relação ao arame tubular autoprottegido, esta variação de arame tubular com proteção gasosa apresenta em geral soldas com menos descontinuidades, já que a proteção contra a contaminação atmosférica é mais eficiente.

A Figura 1 mostra um desenho de soldagem com proteção gasosa, mostrando o bocal adaptado para a passagem do gás de proteção.

Figura 1 - Esquema da soldagem com arame tubular com proteção gasosa.



Fonte: Nascimento, 2005.

b) Arames autoprotetidos (Processo FCAW-S)

O tipo de arame tubular que não requer nenhum gás de proteção externo é chamado de autoprotetido e isto é possível graças à composição dos fluxos no arame tubular. Os fluxos contêm vários ingredientes que, quando exposto às altas temperaturas de soldagem, protegem o metal de solda da contaminação.

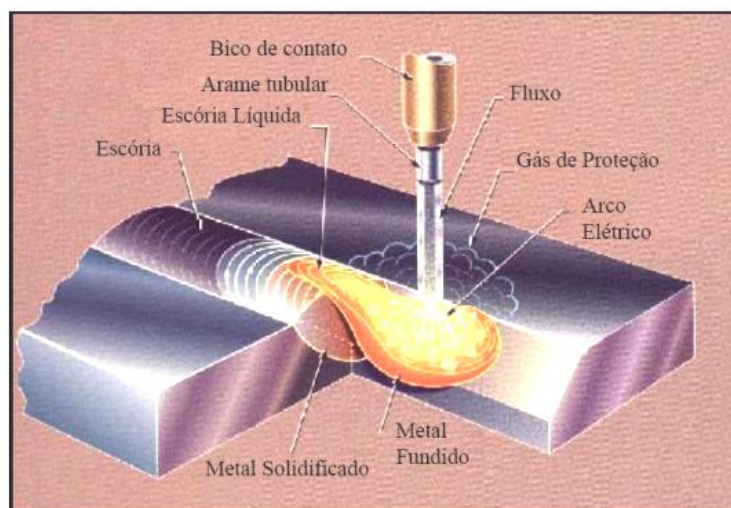
A soldagem com arame autoprotetido é interessante porque possui menor sensibilidade a correntes de ar, sendo um processo adequado à soldagem em campo. Em locais de difícil acesso, onde a utilização de gás de proteção não se apresenta viável, usa-se esse tipo de arame. Portanto, as condições do vento no local de soldagem não são uma preocupação. A possibilidade de soldagem em todas as posições é uma vantagem adicional deste método (MACHADO, 1996). Além disso, esta variação representa menores custos de soldagem em comparação ao método com proteção gasosa, devido à maior simplicidade dos

equipamentos, já que não requer cilindros de gás, e, conseqüentemente, o bocal e a tocha não necessitam de compartimento para passagem de gás.

As desvantagens são que esta variação de arame geralmente produz maior quantidade de fumos nocivos, o que requer o uso de máscaras respiratórias ou ventilação adequada. Adicionalmente, há algumas condições que podem produzir soldas com propriedades mecânicas inferiores, já que nem sempre a proteção contra contaminação atmosférica é eficaz (MACHADO, 1996). A escória é muitas vezes difícil de ser removida e a habilidade do operador pode ser um fator importante. Por esse motivo, o metal pode apresentar inclusões de escória caso não seja feita uma limpeza adequada. Devido à característica de geração de gases protetores, este método apresenta uma menor taxa de deposição, tornando-se com isso, um arame menos produtivo comparativamente à variação com proteção gasosa.

A Figura 2 apresenta esquematicamente a soldagem com arame autoprotetido.

Figura 2 - Esquema de soldagem com arame tubular autoprotetido



Fonte: NASCIMENTO, 2005.

Fortes (2004) explica que sendo um processo de soldagem contínuo, os arames tubulares autoprotetidos são capazes de atingir maiores taxas de deposição que

os eletrodos revestidos e são desenvolvidos para aplicações de soldagem em geral e aplicações específicas como reparos, soldagem fora de posição e soldagem de alta deposição. Bracarense (2011) comenta que alguns arames tubulares autoprotetidos são especificamente desenvolvidos para a soldagem de chapas finas a altas velocidades de soldagem.

4.2.3 - Limitações do Processo FCAW

Atualmente, a demanda por aumento de produtividade e redução de custos tem sido o principal motivo para a escolha do arame tubular. A continuidade do processo devido à ausência de troca do eletrodo e a automação também foram fatores importantes para que houvesse maior uso deste processo. Por outro lado, Bracarense (2009) cita as seguintes limitações da soldagem FCAW:

- Limita-se à soldagem de metais ferrosos e liga à base de níquel.
- Necessidade de remoção de escória para arame com fluxo não metálico
- O arame tubular é mais caro que o arame de eletrodo maciço, entretanto, à medida que aumentam os elementos de ligas esta relação diminui.
- O equipamento é mais caro se comparado ao utilizado para soldagem pelo processo GTAW e SMAW.
- Restrição da soldagem ao ar livre (somente para soldagem FCAW com gás de proteção)
- O alimentador de arame e a fonte de energia devem estar próximos ao local de trabalho
- São gerados mais fumos do que os processos GMAW e SAW

4.2.4 - Gases de Proteção

O objetivo principal do gás de proteção é manter o nitrogênio e o oxigênio presentes na atmosfera fora da poça de fusão durante a soldagem. Estes gases são prejudiciais ao processo de soldagem, uma vez que podem reagir com os constituintes na solda na presença da energia gerada pelo arco elétrico. O gás de proteção promove também a estabilidade do arco e a uniformidade da transferência metálica, controlando o modo de transferência em conjunto com outros parâmetros, como velocidade de soldagem e intensidades de corrente e tensão. Tanto a

abertura como a estabilidade do arco é influenciada pelo potencial de ionização dos gases de proteção usados no processo de soldagem. Além disso, os gases de proteção ainda possuem funções relacionadas à soldabilidade, penetração e pequena participação na composição química da poça de fusão, quando gases ativos são empregados na soldagem (MACHADO, 1996).

O gás de proteção é inerte, quando não reage quimicamente com a maioria dos metais; ativo, quando reage quimicamente com os outros elementos, ou uma mistura destes dois tipos. Segundo a sua natureza e composição, os gases de proteção terão uma influência maior nas características de estabilidade do arco e no tipo de transferência metálica, na velocidade de soldagem, na quantidade de respingos, na penetração e no formato do cordão de solda, e, ainda, no custo final da operação de soldagem, já que este representa cerca de 5% do custo total de soldagem (MYERS, 2010). O tipo de gás de proteção empregado também influencia na temperatura da poça de fusão, na sensibilidade à fissuração e porosidade, assim como na facilidade na execução da soldagem em diversas posições (TATAGIBA et al. 2012).

Dentre os gases de proteção mais usados na soldagem FCAW em arames que não são autoprotetidos, pode-se citar o dióxido de carbono (CO_2) e misturas deste com o argônio (Ar). Os gases hélio (He) e oxigênio (O_2) também estão presentes em misturas.

O dióxido de carbono é muito usado para proteção durante a soldagem com arames tubulares. Este gás possui baixo custo e proporciona cordões com alta penetração. O dióxido de carbono é relativamente inativo a temperatura ambiente, mas quando é aquecido a altas temperaturas pelo arco elétrico, dissocia-se formando o monóxido de carbono (CO) e o oxigênio. O oxigênio proveniente desta dissociação irá reagir com os elementos do metal fundido oxidando-os. Assim, materiais desoxidantes são adicionados ao fluxo do eletrodo para compensar os efeitos oxidantes do CO_2 (TATAGIBA et al. 2012).

O uso da mistura de gases de proteção na soldagem com arames tubulares pode combinar as vantagens separadas de dois ou mais gases. O aumento da quantidade de gás inerte na mistura aumenta a eficiência de transferência dos

desoxidantes que estão no fluxo do arame. Por outro lado, a penetração do cordão de solda será reduzida (BRACARENSE, 2000).

Dentre os gases inertes destaca-se o argônio. O argônio é capaz de proteger a poça de fusão em todas as temperaturas de soldagem. Sua presença em quantidade suficiente resulta na diminuição da oxidação comparativamente a proteção com 100% de CO₂.

É importante ressaltar que a proteção gasosa utilizada para soldagem com arame tubular depende do tipo de arame utilizado, das propriedades mecânicas exigidas, do tipo de junta, do tipo de tocha e bocal, dos gases disponíveis, dos custos previstos etc.

4.2.4 - Variáveis do Processo FCAW

a) Corrente de Soldagem

A corrente de soldagem é proporcional à velocidade de alimentação do arame para um determinado diâmetro e composição do arame tubular. Se as outras variáveis como velocidade de soldagem e tensão forem mantidas constantes, para um determinado diâmetro de arame, o aumento da corrente de soldagem irá provocar: aumento da taxa de deposição do arame, aumento da penetração e um cordão de solda convexo com aparência ruim para aumentos excessivos a corrente. Por outro lado, uma corrente insuficiente irá produzir respingos excessivos e porosidade no metal solda devido à absorção de hidrogênio (quando soldado com arame tubular autoprottegido) (BRACARENSE, 2000).

b) Tensão de Soldagem

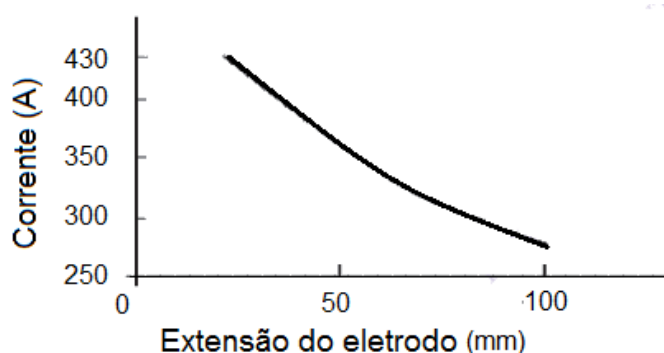
A tensão do arco e o seu comprimento estão diretamente relacionados. Esses parâmetros podem afetar a aparência, penetração e as propriedades mecânicas do cordão de solda. Longos comprimentos de arco podem causar contaminação da poça de fusão pela atmosfera, permitindo que o nitrogênio proveniente da atmosfera forme nitretos e diminua a tenacidade da solda, por exemplo. O aumento da tensão leva também a aumento de respingos e irregularidade no formato cordão, havendo a possibilidade de causar porosidade e mordeduras. Para tensões baixas (arco com comprimento curto), além do risco de extinção do arco, há uma

diminuição na tensão superficial da poça de fusão, já que a área de contato entre o arco e o metal base é menor, portanto a poça receberá menos calor irradiado do arco, originando cordão convexo de pouca penetração com superfície estreita (MACHADO,1996; JOAQUIM, 2001; BRACARENSE, 2000).

c) Extensão do Eletrodo

A extensão do eletrodo é uma variável de muita importância no processo FCAW. Essa extensão do arame é aquecida por efeito Joule, causando uma queda de tensão. Como consequência há uma alteração na taxa de deposição, penetração e estabilidade do arco. A Figura 3 mostra como pode variar a corrente em função da extensão do arame, mantida constante a velocidade de alimentação. Aumentando a extensão do eletrodo, a corrente de soldagem tende a diminuir e vice-versa. Como a corrente é ajustável, tornam-se possíveis aumentos da ordem de 100% da taxa de deposição, quando a extensão passa de 20 mm para 60 mm, por exemplo.

Figura 3 – Gráfico da alteração da corrente com a extensão do eletrodo após o bico de contato.



Fonte: MACHADO (1996) adaptada.

d) Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem é o deslocamento linear do arco ao longo da junta a ser soldada e influencia a energia de soldagem e a penetração do cordão. Uma velocidade de soldagem muito baixa gera elevada energia de soldagem, podendo

causar problemas metalúrgicos não desejáveis na microestrutura da junta soldada, além de elevar o custo da soldagem (MARQUES et al, 2007). A soldagem com arames tubulares com fluxo não metálico em baixas velocidades de soldagem dificulta o controle da escória que pode passar a frente da poça de fusão e gerar inclusões de escória (RODRIGUES, 2005).

Marques et al. (2007) relaciona velocidades de soldagem muito altas com o aparecimento de mordeduras, falta de fusão e/ou de penetração no cordão de solda.

e) *Polaridade*

A polaridade inversa com corrente contínua (CC+) é recomendada para arames tubulares rufílicos. Alguns arames tubulares funcionam bem com CC+ e em CC-, enquanto arames básicos operam melhor com CC-, resultando em uma ação mais efetiva do arco e em um acabamento do cordão de solda com quantidade reduzida de respingos. Em arames “*metal cored*”, uma mudança da polaridade do eletrodo de positiva para negativa resulta em pequenas variações nos valores médios de corrente e tensão de soldagem e tende a aumentar a estabilidade operacional ou diminuir a estabilidade operacional, mantendo-se a microestrutura do cordão de solda (STARLING et al, 2011).

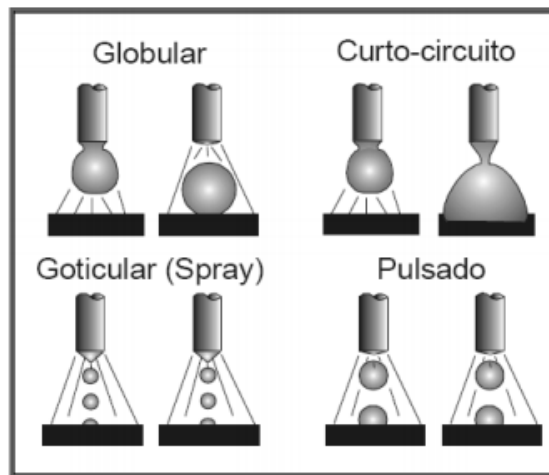
4.2.5 – Transferência Metálica nos processos de soldagem

De acordo com Modenesi (2000), a forma pela qual o metal fundido transfere-se do eletrodo para a poça de fusão influencia diversos aspectos operacionais da soldagem, em particular, o nível de respingos e fumos, a capacidade do processo ser utilizado fora da posição plana, o formato do cordão, ou seja, a estabilidade e o desempenho operacional do processo. O modo de transferência depende de diversos fatores como, por exemplo, os parâmetros elétricos do arco (tipo e valor da corrente, tensão e polaridade), o diâmetro e composição do metal de adição, tipo e composição do meio de proteção, comprimento energizado do eletrodo, pressão atmosférica, entre outros.

A transferência metálica pode ser dividida em quatro modos, os quais são levados em consideração o tamanho da gota e as características como é transferida.

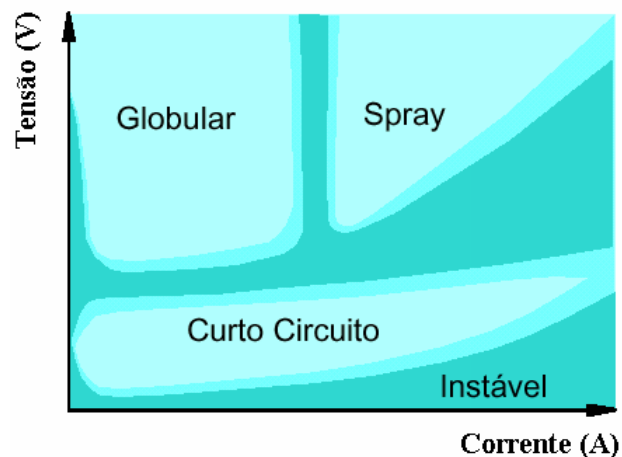
Assim, podem-se classificar os modos de transferência metálica como: curto-circuito, globular, pulsado e “spray” (aerossol), apresentados esquematicamente na Figura 4. A Figura 5 ilustra a relação entre o modo de transferência e a tensão e a corrente de soldagem no processo GMAW. (MODENESI, 2006; MARQUES, 2005).

Figura 4 – Modos de transferência metálica no processo GMAW.



Fonte: BARRA (2003)

Figura 5 – Gráfico de condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência na soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio (desenho esquemático)



Fonte: MODENESI (2004).

4.2.6 - Transferência metálica no processo de soldagem FCAW

No processo de soldagem FCAW, a forma como acontece a transferência metálica do metal fundido para a poça de fusão depende particularmente das características do fluxo interno do arame tubular (MODENESI 1998).

De acordo com Costa (2006), além das características do fluxo interno do arame tubular, a corrente de soldagem também é um fator importante, uma vez que, dependendo do seu valor, pode ocorrer a incidência direta do fluxo interno do arame (fluxo sem fundir) sobre a poça de fusão. Nesta situação é provável que não ocorram as condições necessárias para que os ingredientes contidos nos fluxos, em particular a água cristalizada, se dissociem satisfatoriamente. Segundo a autora, foi verificado ainda que esta incidência direta de fluxo interno do arame para a poça de fusão ocorre principalmente quando se solda com correntes elevadas.

De acordo com Norrish (1992), arames tubulares básicos operam normalmente com transferência globular não axial a correntes elevadas e curto circuito para menores valores de correntes. Em arames autoprotetidos, as transferências por curto circuito e globular repulsiva são típicas sendo que a tendência desta última pode ser reduzida através de uma formulação adequada do fluxo. Ainda de acordo com o autor, arames tubulares rútilicos operam normalmente a altas correntes com uma transferência em spray projetada não axial. Parte do fluxo forma uma camada de escória na superfície da gota, uma pequena quantidade se decompõe formando gases de proteção e a parte restante do fluxo é transferida à poça de fusão onde o mesmo se funde e produz uma camada de escória protetora. De acordo com Bracarense et al. (2002), que estudaram a transferência de metal na soldagem de um arame tubular rútilico com 75% Ar-25% CO₂, o fluxo forma uma coluna que toca a poça de fusão e que se quebra imediatamente antes da transferência da gota de metal fundido. Esta coluna de fluxo sustenta a gota, retardando a sua transferência para a poça e, assim, permitindo o seu crescimento.

Norrish (1992) explica que arames com o núcleo de pó metálico e que contêm pouca adição de fluxo não metálico (*“metal cored”*) se comportam de forma similar a arames maciços. Neste caso, a transferência por curto circuito é obtida para

baixas correntes e a transferência por spray projetado para altas correntes. A presença, contudo, de adições de fluxos capazes de estabilizar o arco possibilita a operação com transferência não repulsiva com eletrodo negativo.

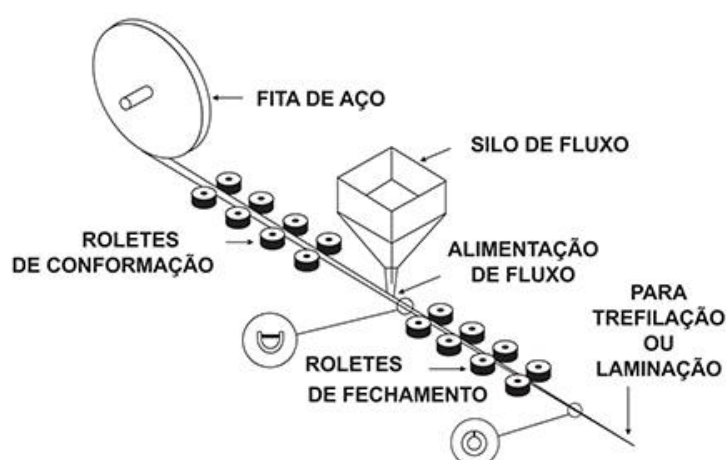
4.3 - Processo de Fabricação de Arames Tubulares

A manufatura deste consumível é uma operação extremamente técnica e precisa, requerendo uma máquina especialmente projetada para produzir arames tubulares contendo fluxos em seu núcleo, os quais representam cerca de 25% de seu peso (CARY e HELZER, 2005).

O processo de fabricação de arames tubulares é caracterizado por um processo de conformação mecânica, no qual uma fita metálica de material dúctil e seção reta passa através de pares de roletes de conformação até obter uma seção circular. Esta fita é alimentada continuamente por meio de um motor que aciona o tambor de enrolamento responsável pela tração do arame.

Um desenho esquemático da fabricação de arame tubular pode ser visualizado na Figura 6.

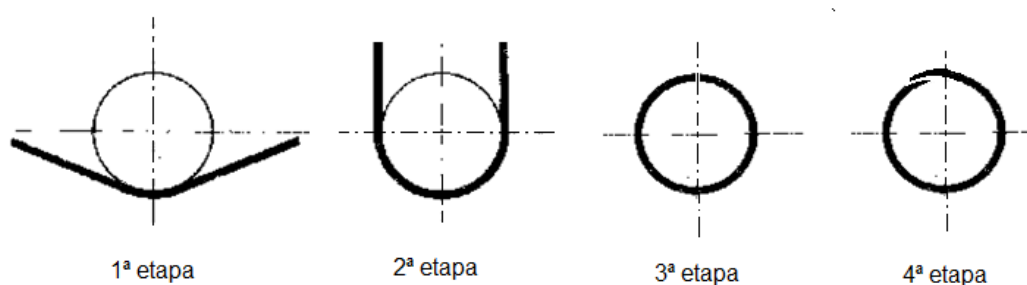
Figura 6 – Esquema de processo de fabricação de arames tubulares



4.3.1 - Operações de conformação da fita

A fita metálica é deformada plasticamente pelos roletes de conformação em quatro etapas, entre as quais adquire um formato de canaleta (em “V” seguido de “U”) para receber a adição do fluxo de soldagem com composições específicas através de um silo de alimentação. Após esta etapa, a fita passa pelos roletes de fechamento, que são responsáveis por fechar o arame, unindo-se as extremidades no topo. Na última etapa, os roletes de selagem tem a função de sobrepor uma das extremidades da fita para que não haja vazamento de fluxo. As quatro etapas de conformação da fita estão mostradas na Figura 7.

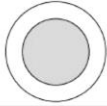
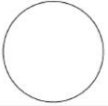
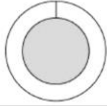
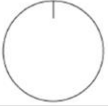

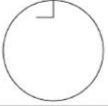

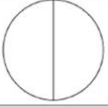



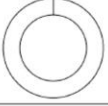
Figura 7 - Etapas de fechamento do arame -1ª etapa: dobramento em “V”; 2ª etapa: dobramento em “U”; 3ª etapa: fechamento de topo; 4ª etapa: sobreposta.



Fonte: elaborada pela autora.

Segundo classificação do Instituto Internacional de Soldagem (IIW, 1986), os arames tubulares podem possuir diferentes seções transversais (Figura 8).

Figura 8 – Tipos de seção transversal de arames tubulares

Tipo N°.	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.

Na conformação produzida pelos roletes, as propriedades de plasticidade do material da fita e os raios de dobramento obtidos em cada etapa são os fatores mais importantes.

A plasticidade é a capacidade que o material deve ter de se deformar quando submetido a um esforço e de manter essa forma quando o esforço acaba, sem que haja alterações da estrutura, como estirções, trincas etc. Quando o esforço é de tração, a capacidade do material de se deformar sem fraturar se refere à ductilidade. Dessa forma, para processos de forjamento e trefilação de arames, devem ser selecionados materiais dúcteis. Estes materiais são selecionados a partir de valores de seus comportamentos elásticos como os de limite de escoamento.

A operação de conformação exige que se considere a recuperação elástica do material (efeito mola), para que se tenham as dimensões exatas na peça dobrada. O efeito do retorno elástico é um dos principais fatores que determinam a forma final da peça dobrada e, se não for corretamente controlado, afeta adversamente a

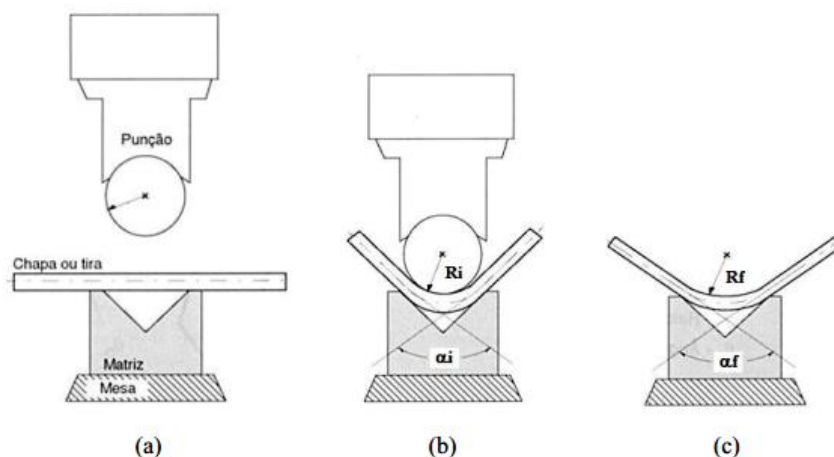
precisão e, conseqüentemente, a sua qualidade. A recuperação elástica da peça será tanto maior quanto maior for o limite de escoamento, menor o módulo de elasticidade e maior a deformação plástica (DIETER, 1981).

O controle do retorno elástico ou a correção da fita metálica a ser conformada é uma tarefa difícil e complexa que normalmente é resolvida por métodos de tentativa e erro. Estes métodos são demorados e implicam em custos elevados.

O raio mínimo de dobramento de chapas é definido pelo valor abaixo do qual o metal pode trincar na superfície externa, devido aos esforços de tração observados no forjamento da fita. Ele é geralmente expresso em múltiplos da espessura da fita. Deve-se sempre evitar cantos vivos para evitar o aparecimento de trincas e, para isso, usam-se raios de curvatura que correspondem a 1 a 2 vezes a espessura da chapa, tratando-se de materiais dúcteis, e 3 a 4 vezes, para materiais duros (ALVARENGA, 2005). O raio mínimo de dobramento é, assim, um limite de conformação, que varia para os diversos metais e sempre aumenta com a prévia deformação a frio do metal. Portanto, os roletes de conformação da fita devem possuir dimensões adequadas para que o dobramento não resulte em trincas.

Na Figura 9 pode ser observada, como exemplo, uma representação esquemática da recuperação elástica em um ensaio de dobramento de chapas com matriz em "V". Nota-se que após a retirada dos esforços, o raio final R_f e o ângulo final f de dobramento são respectivamente maior e menor do que os originais: raio inicial R_i e ângulo inicial i (DIETER, 1981). Essa variação dimensional observada após o processo está relacionada à energia elástica armazenada no material durante a operação de dobramento, sendo associada aos estados de tensão e de deformação desenvolvidos nesta operação de estampagem. Por essa razão, recomenda-se construir as matrizes com os ângulos mais acentuados e realizar a operação várias vezes em uma ou mais matrizes.

Figura 9 - Exemplificação do fenômeno de recuperação elástica ou efeito mola em chapas durante o dobramento



Fonte: GARCIA et al. (2000).

Nota: (a) sem dobramento, (b) durante o dobramento e (c) após o dobramento.

4.3.2 - Roletes de Conformação

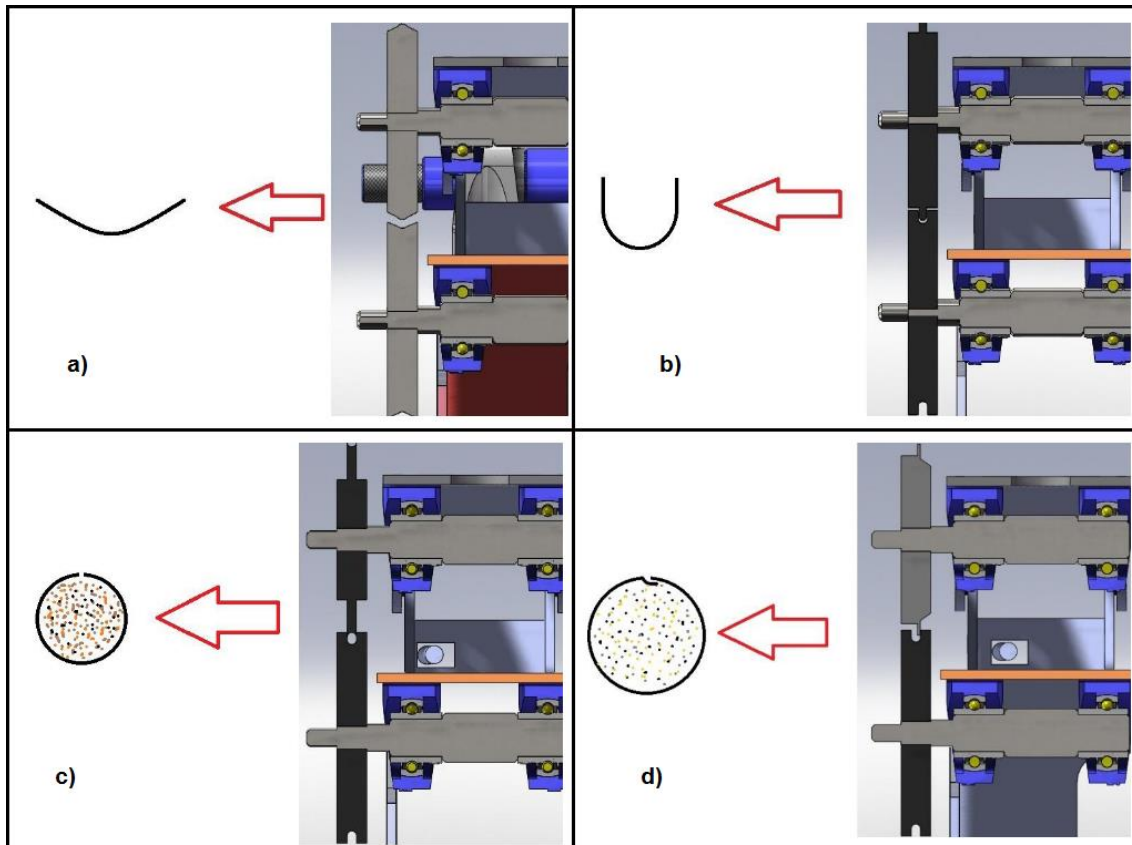
Os pares de roletes de conformação da máquina de fabricação de arames tubulares são os responsáveis pela conformação da fita no formato adequado para um fechamento perfeito do arame, respeitando-se os raios de curvatura e o retorno elástico em cada etapa. Estes roletes são montados em eixos, os quais podem rodar livremente conforme a fita passa por eles.

A precisão dos cálculos das dimensões dos roletes é importante para que o formato da fita obtido a partir de cada par de roletes corresponda à dimensão requerida na etapa seguinte para um fechamento apropriado do arame, evitando-se que o arame se incline e não se feche perfeitamente. Muitas vezes, esses cálculos são feitos baseados em tentativa e erro, levando-se em conta a espessura da fita e o diâmetro final. Dessa forma, a complexidade destes ajustes pode durar mais tempo para fabricação.

Os roletes devem ser fabricados a partir de materiais com dureza necessária para que eles mantenham sua geometria íntegra, mesmo sob severos esforços.

A Figura 10 mostra um esquema das etapas dos quatro pares de roletes de conformação necessários para a fabricação do arame tubular.

Figura 10 - Desenho esquemático do formato da fita de aço após cada etapa de fabricação



Fonte: OLIVEIRA, 2010 (adaptada).

Nota: a) 1ª etapa – seção da fita em “V”; b) 2ª etapa – seção da fita em “U”; c) 3ª etapa – fita fechada em topo com fluxo no interior; d) 4ª etapa – fechamento sobreposto da fita.

4.3.3 - Trefilação do Arame

Após o fechamento do arame contendo o fluxo, ele passa por um processo mecânico de trefilação ou laminação para alcançar o diâmetro final desejado do arame.

Segundo Cetlin e Helman (2005), o processo de trefilação consiste em forçar a passagem de uma barra ou tubo através de uma fieira (matriz cônica) mediante a aplicação de uma força de tração à saída desta fieira.

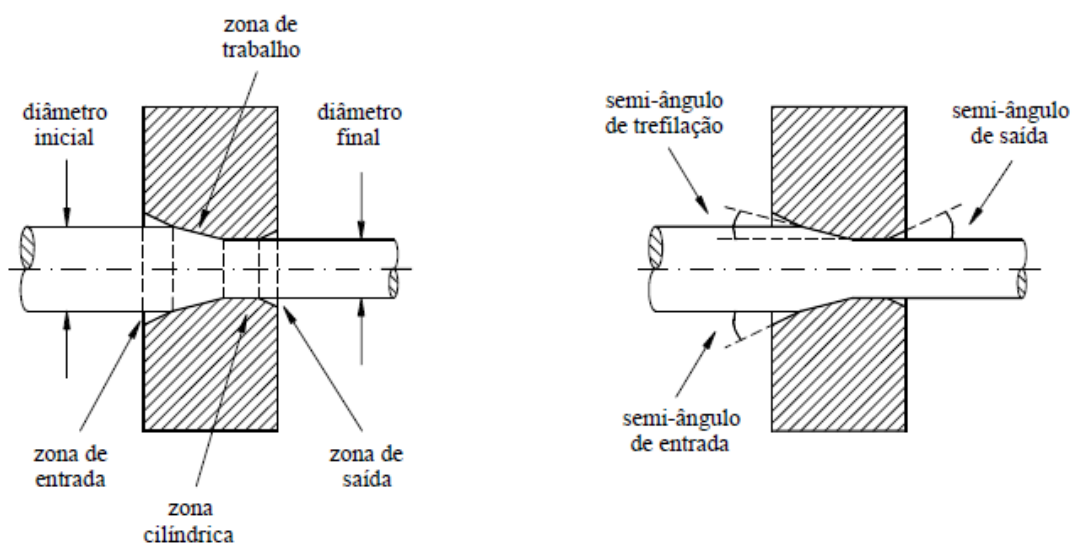
A fieira é a matriz ou ferramenta da trefilação. Ela pode ser confeccionada em diversos perfis e geometrias, dependendo de sua aplicação e do produto final requerido. Essas matrizes são usualmente construídas de carboneto de tungstênio e metal duro devido à sua grande durabilidade (WANG, 2002). Elas são caracterizadas por seu diâmetro de entrada, diâmetro de saída e o ângulo do cone (ângulo de trefilação), tendo como resultado a redução da área da seção transversal e o aumento do comprimento do arame.

A extremidade do arame deve ser apontada e inserida através da fieira e, em seguida, presa por garras ou bobinando-a em um tambor acionado por um motor de tração.

O processo de trefilação pode ser realizado em um ou vários passes sucessivos, dependendo do diâmetro final desejado e respeitando-se a sequência de fieiras de diâmetros menores a cada passe.

A fieira é composta por uma zona de entrada e produzida com um ângulo maior que o de trefilação para facilitar a lubrificação. A superfície externa do arame é lubrificada com um sólido seco de baixa resistência ao cisalhamento, como a grafita, para facilitar a conformação mecânica. A Figura 11 mostra o esquema de uma fieira.

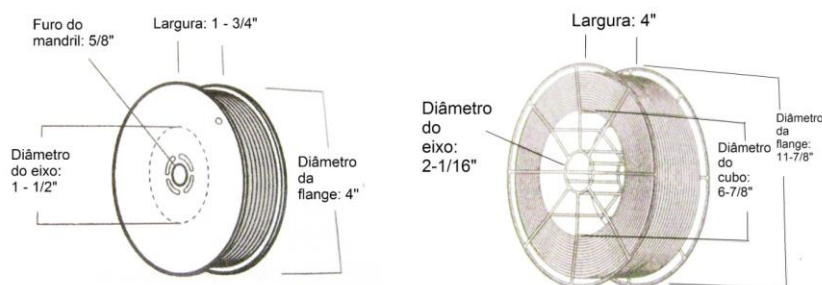
Figura 11 – Características da Fieira de Trefilação



Fonte: CORRÊA, 2004 (adaptada).

Após submeter os tubos com cerca de 5 mm de diâmetro aos passes de trefilação, de arames tubulares podem alcançar valores de até 1,2 mm de diâmetro. Atualmente já se fabricam arames com até 0,9 mm de diâmetro. Os arames são então bobinados em bobinas (carretéis plásticos ou metálicos) com pesos que variam de 10 a 30 kg, conforme mostra a Figura 12. Na sequência o arame é embalado a vácuo, evitando-se contato com a umidade e visando a manter suas características originais de baixo nível de hidrogênio - fator crítico para os processos de soldagem - resistência à corrosão e proteção do produto durante o transporte e o armazenamento.

Figura 12 – Desenhos de carretéis de plástico e aço



Fonte: CARY e HELZER (2005) adaptada.

4.4 - Fluxos utilizados em consumíveis de soldagem

O fluxo utilizado nos consumíveis de alguns processos de soldagem é constituído de metais, minerais e aglomerantes em forma de pó ou granulado. Estes fluxos estão presentes no núcleo do arame tubular, no revestimento do eletrodo ou sobreposto externamente ao arco elétrico quando se solda com o processo de soldagem a arco submerso.

Durante a soldagem com arame tubular, os elementos do fluxo são decompostos a fim de proporcionar proteção do arco elétrico e da poça de fusão, contra a contaminação do ar da atmosfera, podendo ou não gerar gases e fumos. Bracarense (2000) explica que o fluxo também tem como função refinar metalurgicamente a microestrutura da solda, adicionando elementos de liga com os objetivos de melhorar as propriedades mecânicas do metal depositado, estabilizar o arco elétrico e reduzir a taxa de resfriamento, evitando-se, assim, a formação de microconstituintes indesejáveis, como a martensita, que, conforme será visto posteriormente, pode ser prejudicial à solda.

O material da fita metálica do arame tubular não precisa reproduzir exatamente a composição requerida para o metal de solda, já que os elementos de liga podem ser adicionados ao fluxo conforme a conveniência.

Os arames tubulares se dividem quanto ao fluxo em dois tipos: os arames tubulares "*metal cored*" e os "*flux cored*". O fluxo do arame "*metal cored*" é

composto principalmente de pó de ferro, ferro-ligas e desoxidantes. Estes fluxos tem a função de reduzir praticamente toda a formação de escória sobre os cordões de solda, deixando apenas pequenas ilhas de sílica sobre a sua superfície. Uma vantagem da utilização deste fluxo é que ele proporciona soldagem com altas taxas de deposição e rendimento (STARLING, 2011). Os arames tubulares com enchimento de pó metálico com proteção gasosa são usados também na soldagem de aços inoxidáveis e para revestimentos contra desgaste. Em relação ao processo GMAW, Araújo (2004) mostrou que os arames “*metal cored*” possuem maior produtividade e menor ocorrência de “finger”, além de ser mais adequado à aplicação em soldagem robotizada.

O fluxo do arame tubular “*flux cored*” é composto geralmente por minerais e outros ingredientes, tais como os utilizados no revestimento dos eletrodos revestidos e podem ser subdivididos em dois grupos principais: rútilicos e básicos. Os fluxos básicos produzem soldas com microestruturas desejáveis, além de baixos teores de hidrogênio difusível, diminuindo-se assim o risco por fissuração e de fragilização induzidos por este elemento. O grupo dos rútilicos proporciona uma soldagem de fácil manipulação, produzindo escória abundante e cordões com média e baixa penetração. Possui relativamente baixa resistência à fissuração a quente (BRACARENSE, 2000).

Os principais constituintes existentes no fluxo do arame tubular e revestimento de eletrodos com as suas respectivas funções são:

- **Óxidos de potássio, sódio, cálcio, manganês e silício:** Estes óxidos são formadores de escória que protegem a poça de fusão dos gases da atmosfera. Eles auxiliam na obtenção de um arco mais estável, por isso ajudam na redução da formação de respingos.
- **Calcário:** Este mineral é formador de gases que têm a função de proteger a poça de fusão da atmosfera durante a soldagem. Em função dessa facilidade de gerar gases, está sempre presente nos fluxos dos arames tubulares autoprotetidos, possibilitando assim, a retirada da proteção gasosa externa. Ele é utilizado principalmente quando é necessário soldar aços de alta liga.

- **Manganês, vanádio, molibdênio e cromo:** Estes elementos podem interferir nas propriedades mecânicas do metal de solda, aumentando a resistência quanto à fluência, corrosão, dureza, tenacidade, ductilidade e a sua tenacidade (EVANS, 1988; CARY e HELZER, 2008; MODENESI, 2011; FORTES, 2004).
- **Sódio e potássio:** Estes elementos são facilmente ionizáveis, logo estabilizam o arco elétrico de forma a tornar a operação mais fácil além de ser formadores de escória.
- **Celulose:** Composto orgânico que, quando queimado, forma uma barreira impedindo a contaminação do metal fundido dos gases da atmosfera. A fusão do fluxo com este composto orgânico ocorre a temperaturas abaixo da temperatura de fusão do metal de solda. Logo, os fluxos contendo estes compostos orgânicos apresentam um grau elevado de higroscopicidade, que pode ser causa do acréscimo de hidrogênio difusível no metal de solda e desta forma tornando as soldas mais susceptíveis a trincas induzidas por hidrogênio (COSTA,1999; KOU, 2002).

Existe no mercado uma gama muita rica e diversificada de arames tubulares com diferentes composições de fluxos, para atender funções específicas.

4.4.1 - Classificação dos fluxos em consumíveis de soldagem

Na soldagem de forma geral, os tipos de fluxo são os de composição metálica, os de composição rutilica e os de composição básica.

a) Fluxos rutilicos

Os fluxos de arame tubular rutilicos têm como elemento principal rutilo (em torno de 50% de dióxido de titânio TiO_2), o que faz com que a proteção do cordão de solda seja por meio da escória. Essa por sua vez é densa e se destaca facilmente do cordão de solda.

Os consumíveis de soldagem que contém rutilo apresentam facilidade na abertura e manutenção do arco e podem ser utilizados na soldagem fora de posição e são pouco sensíveis à umidade. O metal de solda pode apresentar um nível de hidrogênio alto, ou seja, de até 30ml/100g Estes consumíveis são próprios para a execução de cordões curtos, em chapas finas de aços de baixo teor de carbono (CENNI, 1985). Já a soldagem de materiais com um teor de carbono mais elevado pode originar trincas com facilidade (FORTES, 2004).

O fluxo do tipo rutilico é o mais utilizado no processo FCAW devido à facilidade de formação da gota. Além disso, possibilita a soldagem fora de posição devido à formação de escória com uma composição que inicia a solidificação em temperaturas altas, permitindo um bom suporte para a sustentação da poça de fusão (DIAS, 2003, NASCIMENTO, 2005).

Starling et al. (2009) indica a utilização do arame tubular rutilico na soldagem com proteção gasosa com proporção 75% de argônio e 25% de dióxido de carbono, caso as propriedades mecânicas adequadas da zona fundida (altas resistência mecânica e tenacidade), associadas a uma boa estabilidade operacional, a uma boa aparência superficial do cordão e a pequenos níveis de respingos sejam os requisitos principais.

Alguns exemplos de eletrodos rutilicos comerciais são o E71-T1C e o EX1T-1.

b) Fluxos básicos

Para French e Bosworth (1995), os arames com fluxo do tipo básico são utilizados quando elevadas propriedades mecânicas do metal de solda com baixo níveis de hidrogênio são requeridos. Uma grande desvantagem destes arames é o seu baixo desempenho operacional. Comparados com o arame de fluxo rutilico, eles têm um arco mais instável, apresentando altos níveis de respingos. Mesmo em pequenos diâmetros, os arames de fluxo básico não são satisfatórios para a soldagem fora de posição, já que em baixas correntes de soldagem, necessárias para a soldagem fora de posição, a transferência metálica ocorre em grandes gotas, as quais dependem da força da gravidade para uma satisfatória formação. Além disso, no estado líquido a escória básica não garante um suporte adequado de sustentação.

Em fluxos básicos, usam-se o calcário ou outras formas de carbonato de cálcio a fim de liberar o dióxido de carbono no arco. O fluoreto de cálcio também é usado para fornecer proteção eficaz contra os gases da atmosfera, inibindo a captação de hidrogênio.

De um modo geral, o revestimento/fluxo de maior basicidade tende a reduzir os teores de oxigênio, enxofre e fósforo no metal depositado, melhorando assim as propriedades mecânicas, em especial a resistência à fratura frágil (MODENESI et al, 2009).

Segundo investigou Starling (2009), os arames tubulares básicos apresentam as menores eficiências de deposição, penetração e diluição da solda, quando comparados com os arames rutilícos e “*metal cored*”.

Desta forma, fica evidente que enquanto o arame de fluxo rutilíco oferece melhor desempenho operacional para a soldagem em todas as posições, os arames de fluxo básico e de fluxo “*metal cored*” oferecem vantagens em termos de propriedades mecânicas da solda, níveis de hidrogênio difusível, taxa de deposição e eficiência. As principais desvantagens do arame com fluxo básico e “*metal cored*” são a faixa de corrente na qual operam satisfatoriamente e sua inadequação para o uso em soldagem fora de posição.

Um exemplo típico de arames tubulares básicos são os ASME SFA-5.20: E71T-5 e E71T-5M.

4.4.4 - Fluxos em arames tubulares autoprotégidos

Os arames tubulares desenvolvidos para aplicação sem gás de proteção são chamados de arames tubulares autoprotégidos (“*self shielded wires*”) e o processo normalmente é denominado de “FCAW-S” (*Self Shielded Flux Cored Arc Welded*). Estes arames contêm constituintes para proteger o metal de solda da contaminação atmosférica, de modo similar aos eletrodos revestidos. Eles possuem metais e minerais voláteis e materiais que se decompõem para produzir gases protetores, assim como desoxidantes e formadores de nitretos destinados a capturar o oxigênio e o nitrogênio (provenientes do gás atmosférico) que conseguem penetrar na atmosfera protetora.

Dentre as características dos arames autoprotégidos, destacam-se:

- uso no campo para a soldagem de aços carbono em todas as posições, uma vez que o vento presente em campos abertos pode perturbar a atmosfera gasosa durante a soldagem com arames com proteção gasosa;
- taxas de deposição maiores que a soldagem manual com eletrodos revestidos;
- não necessitam de equipamentos de solda especiais;

O custo mais elevado dos arames tubulares autoprotégidos em relação aos outros tipos de arames e eletrodos compensa a diferença de preço pela sua produtividade, que é sua principal vantagem. Além disso, apresenta baixo índice de respingos, falta de penetração lateral e uma menor probabilidade de ocorrência de porosidade (FORTES, 2004a).

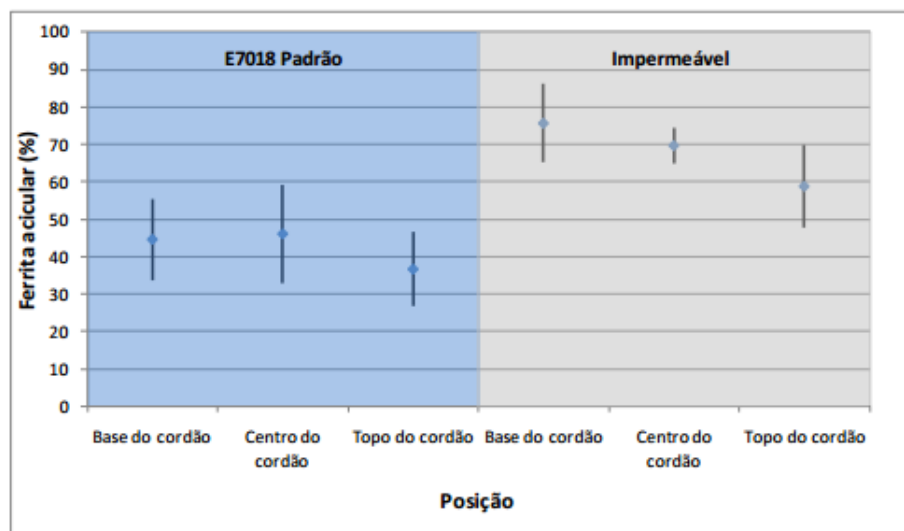
A qualidade da solda e as melhorias de produtividade oferecidas por arames tubulares autoprotégidos são muitas vezes negligenciadas a respeito de sua adequação para uma variedade de aplicações. Uma compreensão mais clara do alcance e capacidades desses arames, no entanto, revela que eles podem oferecer a melhor combinação de eficiência e de menor desgaste do soldador para muitas aplicações industriais (HASHIMOTO, 2007).

A disponibilidade de gás em cilindros para soldagem pode ser inviável em certas situações. Por essa razão, o arame autoprotégido tem sido desenvolvido juntamente com o arame tubular com proteção gasosa.

4.4.5 - Comportamento do polímero em fluxos consumíveis de soldagem

Estudos anteriores (VAZ ET AL, 2011) verificaram que o metal de solda obtido com eletrodos revestidos básicos contendo polímeros como aglomerante apresentou baixos teores de hidrogênio difusível e a microestrutura apresentou considerável fração volumétrica de ferrita acicular, a qual é conhecida por resultar em boa tenacidade à solda, como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Gráfico da fração volumétrica de ferrita acicular no metal de solda de eletrodos básicos impermeáveis em relação aos convencionais.



Fonte: VAZ et al. (2011).

Foi investigado por Santiago et al. (2012) que as diferenças de composição de polímero (3, 7 e 13%) não mostraram resultados significativos quanto à composição química, microestrutura e dureza do metal de solda. Dentre os teores do polímero pesquisados, a redução não propiciou aumento no teor de hidrogênio difusível. Dessa forma, ainda são necessários mais estudos que esclareçam a influência dos polímeros durante o processo de soldagem.

Vaz et al. (2011) analisaram as propriedades mecânicas das soldas obtidas com eletrodos revestidos aglomerados com polímero, como limites de resistência, escoamento, alongamento e tenacidade ao impacto e encontrou valores satisfatórios quando comparados aos mínimos especificados para os eletrodos classe E7018. Foi encontrado também um valor mais elevado para a energia absorvida no teste de impacto quando comparado com os resultados obtidos por eletrodos da classe E7018.

A investigação realizada por Vaz (2014) para avaliar como ocorre a formação de ferrita acicular no metal de solda a partir da adição de polímero como aglomerante nos eletrodos revestidos básicos, mostra que:

“A análise dos elementos químicos residuais apontou o nitrogênio como sendo o principal responsável pelas discrepâncias observadas na microestrutura. O estudo das características operacionais de eletrodos classe E7018 tradicionais e aglomerados com polímero mostrou que a menor absorção de nitrogênio pelo metal de solda se deve a dois fatores principais. Medidas do teor de nitrogênio dissolvido das gotas coletadas durante a soldagem do eletrodo aglomerado com polímero demonstrou uma atmosfera protetora mais efetiva. O teor de carbono presente no metal de solda obtido pela soldagem do eletrodo com polímero apontou para uma atmosfera rica nesse elemento. Tal característica é coerente com a hipótese de uma melhor proteção gasosa. O tamanho médio das gotas coletadas, teor de nitrogênio dissolvido em função do tamanho e os oscilogramas de tensão indicaram alterações no modo de transferência metálica.” VAZ e BRACARENSE (2014).

A substituição dos silicatos pelos polímeros conforme demonstrado nos estudos pode oferecer várias vantagens à solda. Na fabricação dos eletrodos impermeáveis, o polímero em solução foi adicionado para atuar como aglomerante. As vantagens dos eletrodos impermeáveis contendo aglomerado de polímero em relação aos eletrodos convencionais que contêm aglomerante silicato são:

- Maior fração volumétrica de ferrita acicular, a qual confere maior tenacidade no metal de solda;
- Menor teor de hidrogênio difusível no metal de solda;
- Não necessitam ser ressecados antes do uso, dispensando o uso de estufas.
- Redução do tempo de secagem e preparação dos eletrodos, eliminando a necessidade do processo de secagem em forno durante a fabricação, economizando insumos (GLP, energia elétrica) e tempo.
- Revestimento flexível e alta resistência ao impacto, garantindo as condições durante o transporte.

Espera-se que a aplicação de polímeros em fluxos de arames tubulares também possa trazer benefícios à solda. Trabalhos anteriores (LADEIRA, 2013; BORBA, 2013) mostraram que a fabricação de arames tubulares contendo fluxos com

polímero em laboratório é viável e obteve resultados satisfatórios na soldagem dentro e fora d'água. No entanto, ainda são necessários mais estudos sobre o teor das composições e os diversos tipos de fluxos para se comparar a microestrutura obtida com diferentes fluxos.

4.5 - Metalurgia da Soldagem

A metalurgia da soldagem pode ser definida pelo estudo das alterações estruturais e das propriedades relevantes que ocorrem nos materiais metálicos como resultado da união durante o processo de soldagem.

A aplicação de uma elevada densidade de energia em um pequeno volume de material, como ocorre na operação de soldagem, é responsável por essas alterações. O desconhecimento ou a simples desconsideração das implicações dessas alterações pode acarretar em complicações inesperadas e, em alguns casos, podem resultar em problemas muito graves. Existem duas formas de se enfrentar esta questão. A primeira é desenvolver materiais que sejam menos sensíveis à soldagem, isto é, melhorar a "soldabilidade" dos materiais. A segunda maneira é controlar a operação de soldagem de modo a minimizar ou remover a degradação de propriedades da peça (MODENESI et al. 2012).

4.5.1 - Fluxo de Calor Durante a Soldagem

Uma das formas de se controlar a operação de soldagem de forma a melhorar ou manter as propriedades da solda é através do controle do fluxo de calor durante a soldagem. O calor é aplicado na maioria dos processos de soldagem, como: o obtido pelo arco elétrico entre um eletrodo e a peça de trabalho; o obtido por chama que ocorre pela queima de um gás combustível com oxigênio numa tocha ou o obtido pela resistência de contato, que é a passagem de uma corrente elétrica através das partes a serem unidas.

A transferência de calor da fonte para o metal e deste ao longo da peça durante a soldagem é responsável por causar a fusão e a solidificação do cordão de solda, além de afetar as transformações de fase e, portanto, a microestrutura e as propriedades mecânicas resultantes do metal de solda. Este fluxo de calor também

é responsável por causar alterações dimensionais, tensões residuais e distorções, observadas na peça após a soldagem (KOU, 2003).

Para se medir a intensidade de uma fonte de calor, usa-se como parâmetro a energia de soldagem, que é definida pela intensidade da fonte de calor por unidade de comprimento do cordão. É também chamada de aporte térmico. A fórmula da energia de soldagem em processos ao arco elétrico é dada pela equação 1 (CARY e HELZER, 2005), a qual é usada para comparar os procedimentos de soldagem ou para limitar a entrada de calor. É possível analisar, dadas as características geométricas da junta, o nível de pré-aquecimento necessário para controle de possíveis transformações microestruturais, características metalúrgicas e propriedades mecânicas da junta soldada, além de variar a velocidade de resfriamento de uma solda.

$$H = \frac{\eta \times E \times I}{v} \quad (1)$$

Onde:

H - energia de soldagem em J/mm,

η - rendimento,

E - tensão do arco dada em Volts,

I - corrente de soldagem dada em Ampères,

v - velocidade linear de soldagem em mm/s.

A equação da energia desenvolvida pelo arco elétrico leva em conta o rendimento da soldagem, o qual depende do processo empregado, sendo seu valor de $\eta = 0,8$ para o processo FCAW (QUITES, 2002). A dissipação de energia térmica se dá através de transferência de calor por condução, convecção e radiação pela peça e eletrodo.

Para o estudo e quantificação do calor aportado na peça de trabalho, utilizam-se tanto métodos teóricos (analíticos e numéricos), quanto experimentais (calorimetria).

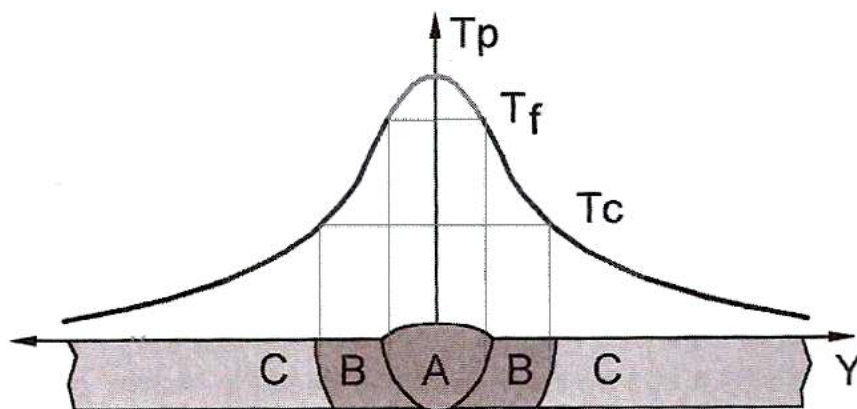
4.5.2 - Ciclo Térmico de Soldagem

A variação de temperatura durante a soldagem em um ponto da peça é descrita pelo seu “Ciclo Térmico de Soldagem”. A fim de se controlar as alterações metalúrgicas na soldagem, as condições térmicas no metal depositado e próximo a ele devem ser estabelecidas. Desse modo, devem ser considerados:

- A distribuição da temperatura máxima (ou temperatura de pico T_p) na zona afetada pelo calor
- O tempo em uma dada temperatura
- As taxas de resfriamento no metal depositado e na zona afetada pelo calor.

A repartição térmica de uma junta soldada é representada pelas temperaturas máximas atingidas ao longo da seção transversal da junta, como mostra a figura 14.

Figura 14 - Esquema das regiões de uma solda por fusão



A – zona fundida (ZF) representada pela T_p (Temperatura de pico), B – zona termicamente afetada (ZTA) representada pela T_f (Temperatura de fusão), C – metal de base (MB) representada pela T_c (Temperatura crítica).

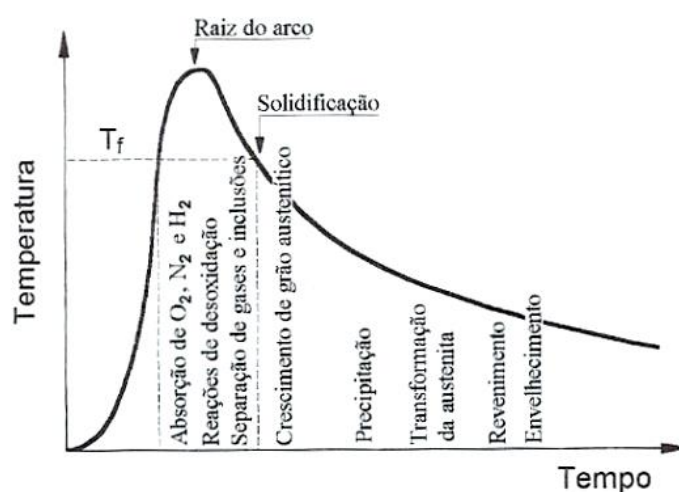
Fonte: BRACARENSE, 2009.

A curva de repartição térmica é definida para uma junta soldada por fusão em três regiões básicas:

- Metal base: Região mais afastada da solda. Não é afetada pelo processo de soldagem. As suas temperaturas de pico são inferiores à temperatura crítica do material.
- Zona termicamente afetada (ZTA): Região não fundida do metal base que teve sua microestrutura alterada pelo ciclo térmico de soldagem. As temperaturas de pico desta região foram superiores à temperatura crítica do material em questão e inferiores à sua temperatura de fusão.
- Zona fundida: Região onde o metal fundiu-se e solidificou-se durante a operação de soldagem. As temperaturas de pico desta região foram superiores a temperatura liquidus do metal base.

O ciclo térmico da soldagem influencia significativamente as reações e alterações estruturais ocorridas em determinadas regiões do material, (BRACARENSE, 2009). A Figura 15 representa as alterações e reações esperadas na soldagem a arco de um aço de baixo carbono, para um ponto situado na zona fundida.

Figura 15 – Diagrama das alterações que podem ocorrer na zona fundida na solda de um aço de baixo carbono



Fonte: BRACARENSE (2009).

Um dos aspectos mais importantes a serem considerados no ciclo térmico é a taxa de resfriamento da solda. Após um ponto na solda ou próximo a ela ter atingido a temperatura máxima, a taxa na qual ele resfria poderá ter efeito significativo na estrutura metalúrgica, propriedades mecânicas e até mesmo na ausência de defeitos da solda. A taxa de resfriamento pode ser controlada e é governada pelas condições de transferência de calor, perdas de calor e condutividade térmica do metal de base. Entretanto, alguns fatores merecem maior atenção, já que podem ser usados para regular a taxa de resfriamento. O mais relevante é a temperatura inicial do metal de base. Quanto maior a temperatura inicial do metal de base, menor a taxa de resfriamento (CARY e HELZER, 2005).

4.5.3 - Microconstituintes no Metal de Solda

Colpaert (2008) explica que a combinação de composição química e a estrutura (em suas várias escalas) definem as propriedades e, conseqüentemente, o desempenho dos metais. Os diferentes tratamentos termomecânicos (variação de temperatura e operações mecânicas) resultam em estruturas cujas transformações de fase nas diferentes etapas de processamento, definem suas características.

As transformações de fases são conduzidas pelo balanço entre força motriz disponível para criar interfaces e vencer forças e mobilidade atômica (COLPAERT, 2008). As transformações de fase no estado sólido, inclusive nos aços, ocorrem de forma a resultar em menor energia livre termodinâmica. A energia livre é função das concentrações dos componentes nas fases e a transformação tende a envolver difusão de átomos. Dessa forma, há situações onde não há condições para que ela ocorra, já que o fator cinético também deve ser considerado.

As microestruturas presentes no metal de solda dependem da composição química do metal de base e do metal de solda, do ciclo térmico de soldagem, do tamanho de grão austenítico e do teor de distribuição das inclusões não metálicas; estes fatores também são influenciados pela energia de soldagem, pela espessura e geometria da junta e pela temperatura de pré-aquecimento e entre passes.

O *International Institute of Welding* (IIW, 1988) desenvolveu uma classificação para a identificação dos constituintes microestruturais em metais de solda ferríticos. A descrição é apresentada para observações realizadas por microscopia ótica e os constituintes podem ser classificados da conforme a Tabela 1:

Tabela 1 – Constituintes no esquema de classificação de microestrutura de metal de solda de baixo carbono do IIW

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

Fonte: IIW, 1988 adaptada

Os principais constituintes presentes nos aços são:

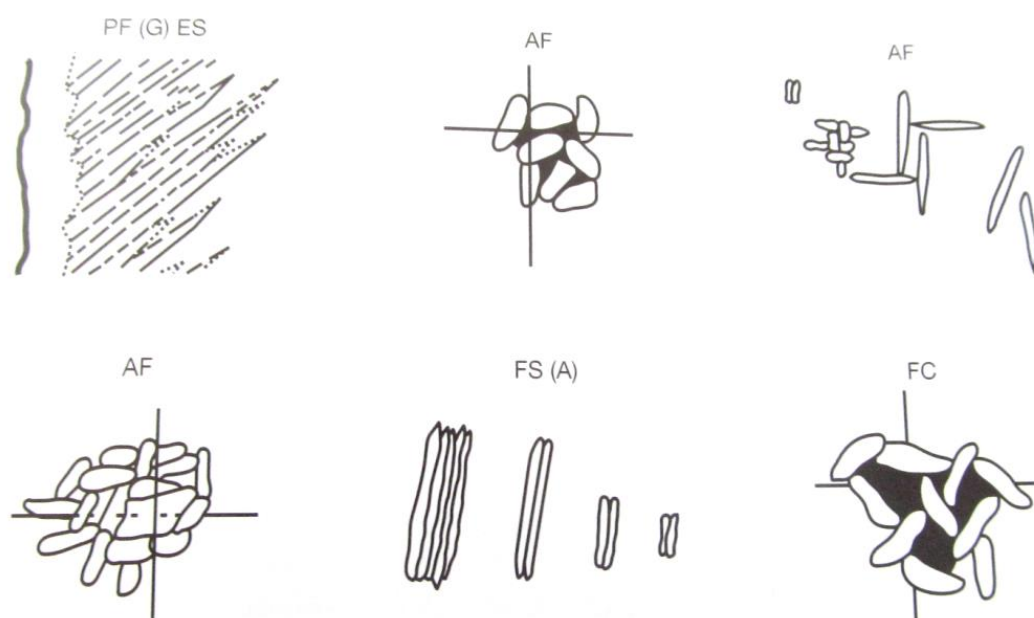
- Ferrita de contorno de grão (PF(G)): cristais de ferrita que nucleiam longitudinalmente nos contornos de grãos austeníticos em elevadas temperaturas de transformação. Possui forma de veios de grãos poligonais ou equiaxiais relativamente grandes. Entre os seus grãos podem ser encontrados constituintes ricos em carbono, impurezas e perlita. Por essa razão, uma grande quantidade desse constituinte é indesejável em soldas as quais devem apresentar elevada resistência à fratura por clivagem.
- Ferrita Poligonal Intragranular (PF(I)): Grãos de ferrita usualmente poligonais, localizados dentro dos grãos austeníticos prévios e cerca de três vezes maiores que os grãos ou lâminas adjacentes de ferrita. Podem crescer a partir de inclusões. Ocorre após a transformação austenítica da PF(G). Ocorre em soldas com baixa taxa de resfriamento e baixo teor de elementos de liga.
- Ferrita com segunda fase (FS): são placas laterais de ferrita que precipitam e crescem a partir de um contorno de grão de austenita prévia e/ou da ferrita alotriomórfica nos contornos de grãos ou de inclusões. Formam-se grãos relativamente grosseiros que apresentam pequena diferença de orientação cristalina entre si. Apresenta constituintes ricos em carbonos e frágeis em seus contornos de grãos, fazendo com que seja considerada pouco desejável em soldas que devam apresentar elevada tenacidade.
- Ferrita com segunda fase alinhada (FS (A)): É formada por grãos grosseiros e paralelos de ferrita em forma de ripas. Quando a relação comprimento/largura é maior que 4:1, são classificados como FS (A).
- Ferrita com segunda fase não alinhada (FS (NA)): Ferrita envolvendo completamente ou (i) “microfases” aproximadamente equiaxiais ou distribuídas aleatoriamente ou (ii) lâminas isoladas de AF.
- Ferrita acicular (AF): pequenos grãos de ferrita não alinhados encontrados dentro dos grãos de austenita. É gerada pelo cisalhamento da matriz austenítica e pela difusão de carbono para a austenita remanescente. Ocorre no interior do grão austenítico original sob taxas de resfriamento mais elevadas. Este microconstituinte apresenta granulação fina e entrelaçada, composta por finas ripas de ferrita com cementita entre estas

ripas. Ocorre nucleação próximos ou a partir de inclusões ou precipitados. Inclusões de compostos de titânio, principalmente TiO, parecem ser as mais efetivas para promover a nucleação da ferrita acicular (MODENESI, 2012). A ferrita acicular é a microestrutura responsável pelo aumento da tenacidade em metais de solda de aço carbono de baixa liga, sendo, portanto, desejável em soldas.

- Ferrita com carbonetos agregados (FC): Estruturas finas de ferrita e carboneto, incluindo ferrita com carbonetos “interfásicos” e perlita. Se o agregado é claramente identificado como perlita, ele deve ser designado como FC(P). Se o agregado for menor que as lâminas adjacentes dentro do grão austenítico prévio, ele deve ser desprezado.

A Figura 16 ilustra algumas dos principais constituintes encontradas na soldagem em aços de baixo carbono.

Figura 16 - Esquema de algumas morfologias de constituintes conforme a classificação do IIW de micrografias padrão para comparação



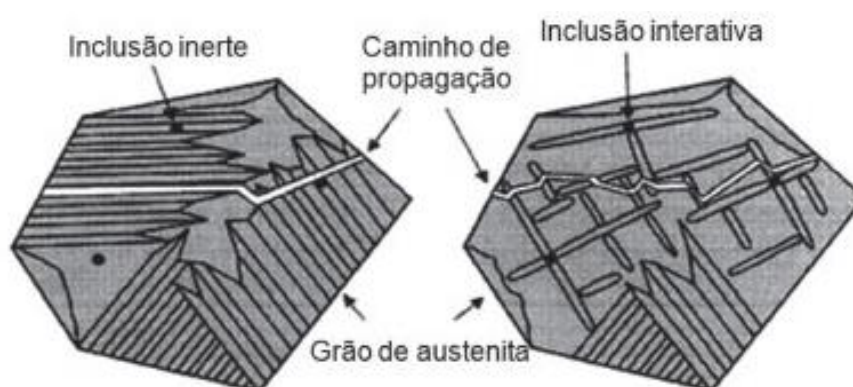
Fonte: COLPAERT (2008) adaptada.

4.5.3.1 - A ferrita acicular e sua nucleação

Considerando que o microconstituente ferrita acicular (AF) geralmente é desejável para melhorar as propriedades mecânicas do metal de solda por apresentar boa relação entre resistência e tenacidade, torna-se importante conhecer como ocorre o processo de formação e os fatores que afetam a nucleação deste microconstituente no metal de solda.

A Figura 17 mostra de forma esquemática o caminho para propagação de fratura por clivagem. Este caminho ocorre em função da orientação espacial das placas de ferrita de contorno de grão e intragranular. De acordo com a figura, a ferrita de contorno de grão (tal como ferrita Widmanstätten ou bainita superior) proporciona um caminho preferencial de propagação de trincas no grão. No caso da ferrita acicular, como esta tem uma orientação cristalográfica aleatória, o caminho de propagação de trincas por clivagem é retardado, com constante mudança de direção, sendo este um dos mecanismos pelo qual a tenacidade é melhorada nas soldas.

Figura 17 – Esquema do caminho de propagação de trinca por clivagem nos grãos de aço com ferrita de contorno de grão e ferrita acicular



Fonte: PARIS (2012).

A nucleação da ferrita acicular depende principalmente da presença de inclusões não metálicas no metal de solda. Há evidências de que a AF é formada em inclusões não metálicas no depósito de solda (BHADESHIA e CHRISTIAN, 1990; BABU E BHADESHIA, 1991).

Para melhor compreender estas evidências, foi realizada uma análise das transformações ocorridas no resfriamento durante a soldagem. Foi demonstrado que uma redução de superfície de contorno de grão austenítico por unidade de volume, favorecia a formação de ferrita acicular em detrimento da bainita, devido à redução dos locais propícios para a sua nucleação. Um efeito similar é obtido através do aumento do número de inclusões presentes no aço.

Paris et al. (2012) pesquisaram os fatores que afetam a formação de ferrita acicular e seriam de acordo com: a composição química do aço, taxa de resfriamento na faixa de temperatura 800-500°C, tamanho do grão de austenita e as inclusões na solda. Os mecanismos de formação da ferrita acicular nas inclusões, sugeridos na literatura seriam:

- Redução da energia interfacial e nucleação simples heterogênea na superfície das inclusões;
- Nucleação epitaxial nas inclusões, a qual tem boa coerência com a ferrita;
- Nucleação devido às tensões internas nas inclusões a qual é associada com diferentes coeficientes de expansão térmica nas inclusões e na matriz metálica;
- Nucleação devido à depleção dos elementos do soluto na matriz próximo das inclusões;

Vaz, 2014 investigou a literatura e explicou que a formação de ferrita acicular pode ser provocada pela adição controlada de elementos químicos microligantes nos aços, por exemplo: Ti, Al, Nb, V, O, N, Ce, B e S. Lau (1988), avaliou o efeito da variação no teor de nitrogênio (de 33 a 192 ppm) na formação da ferrita acicular em metal de solda depositado pelo processo SAW (*Submerged Arc Welding*) contendo titânio e boro e verificou que o aumento no teor de nitrogênio (acima de 70 ppm) proporciona redução na fração volumétrica de ferrita acicular. Ele atribui as mudanças na microestrutura à sequência de reação entre titânio e boro com

nitrogênio e oxigênio. Estas, por sua vez, dependem da disponibilidade de cada um dos elementos citados.

Gallego e Ventrella (2014), concluíram que a formação de ferrita acicular é favorecida por inclusões não metálicas na presença de titânio quando as partículas apresentam morfologia irregular e de maior tamanho. Um aumento da energia de soldagem beneficia a formação dessas partículas.

5 – MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 – Introdução

Este trabalho envolveu um desenvolvimento experimental para fabricação de arames tubulares utilizados na soldagem com o processo FCAW com diferentes composições de fluxos internos. Para a fabricação dos arames foi utilizada uma máquina de fabricação de arames desenvolvida pelo Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação da UFMG.

Para a realização do trabalho experimental foi necessário ajustar a máquina e preparar os fluxos que seriam utilizados na fabricação de arames. A base desses fluxos foi composta pelo revestimento de eletrodos revestidos comerciais do tipo básico com percentuais de polímero.

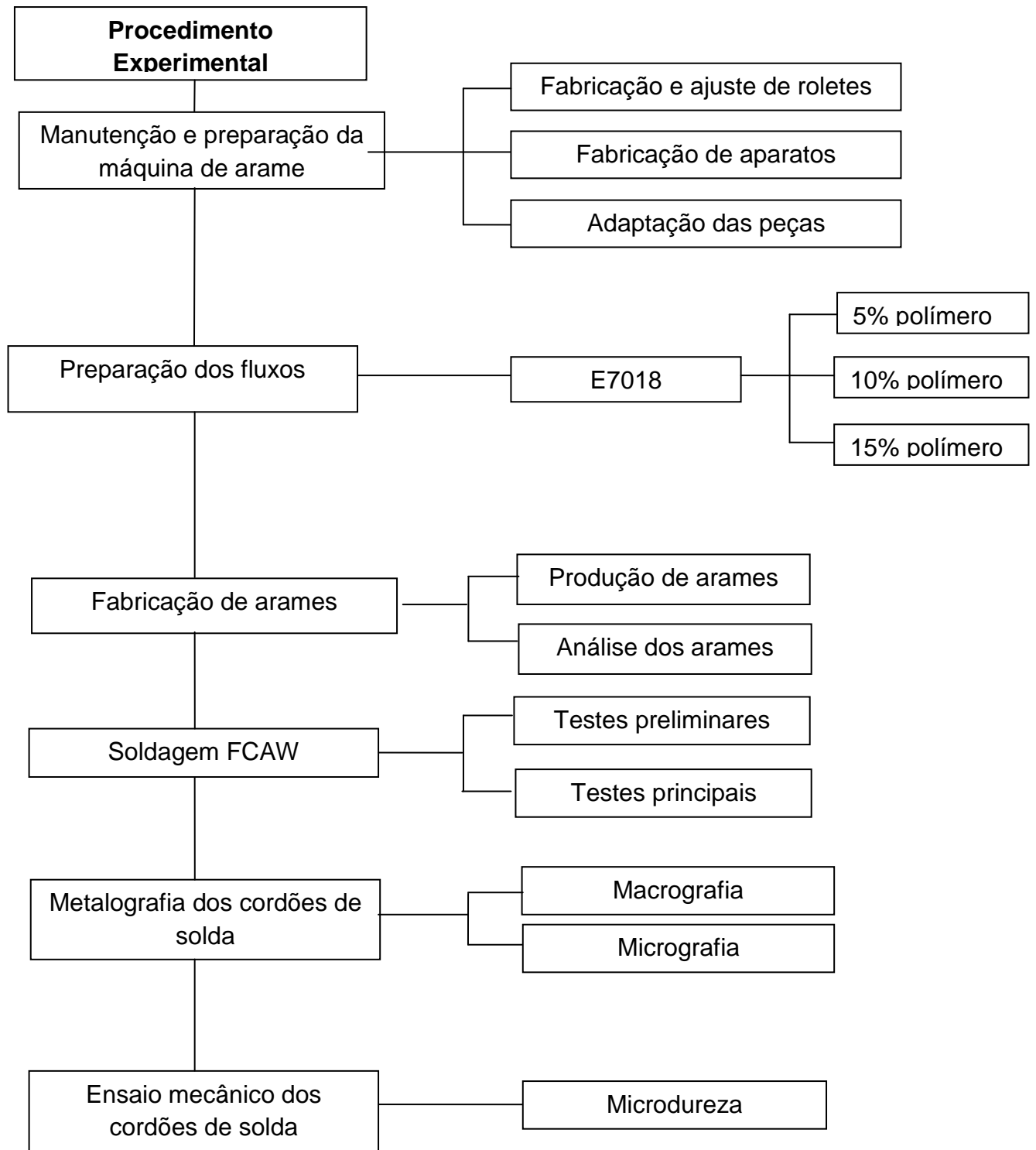
Os arames fabricados foram utilizados em testes de soldagem com deposição de cordões em chapas de aço carbono comum, utilizando o processo de soldagem FCAW nas condições com e sem gás de proteção externa.

Para estudar a influência do gás e da composição do fluxo sobre o formato do cordão, foram feitas análises das suas dimensões lineares e das áreas de metal depositado e do metal fundido. A avaliação da influência do teor de polímero e do uso de gás de proteção externa foi feita por meio de análises da microestrutura e de ensaio de microdureza

5.2 – Fluxograma experimental

O desenvolvimento experimental deste trabalho foi dividido em cinco etapas. Na Figura 20 está esquematizado a sequência metodológica para se atingir o objetivo do trabalho, correlacionando-se cada etapa com a sequência de realização das atividades experimentais deste trabalho.

Figura 18 – Fluxograma experimental



Fonte: elaborada pela autora

5.3 – Fabricação dos arames tubulares

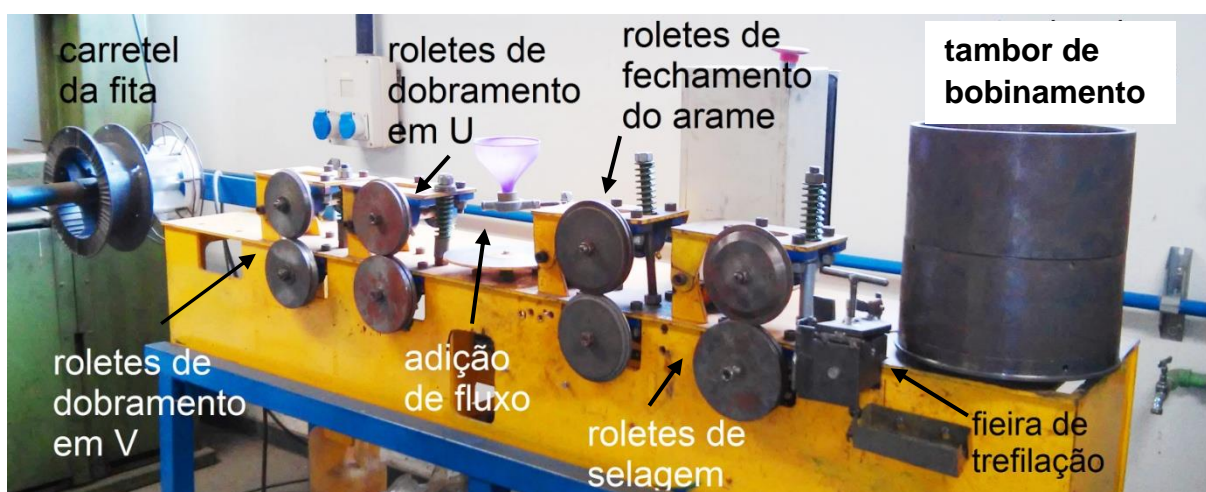
5.3.1 – Máquina de fabricação do arame tubular

A Figura 19 mostra a máquina de fabricação de arame tubular desenvolvida no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação da UFMG. Ela consiste de uma base retangular, por onde passa a fita do arame até se fechar completamente.

Na base da máquina há um motor elétrico acoplado a um redutor, o qual é responsável pela tração e alimentação da fita. Na parte superior da máquina, estão posicionadas quatro torres com seus respectivos pares de roletes, cada um projetado de forma a fechar o arame tubular em cada etapa de conformação mecânica.

Entre os pares de roletes está o sistema de abastecimento do fluxo. A adição do fluxo foi feita através de um funil em direção a um disco que transfere o fluxo para calha do arame dobrado em “U”. Em uma das extremidades, está um eixo para o carretel de alimentação da fita e na outra extremidade, está o tambor de bobinamento e tração do arame, o qual está ligado diretamente ao eixo do redutor.

Figura 19 – Máquina utilizada para a fabricação do arame tubular utilizado neste trabalho



Fonte: foto tirada pela autora

5.3.2 - Materiais

Os arames tubulares foram fabricados a partir de uma fita de aço SAE 1006 com 10 mm de largura e 0,5 mm de espessura. Este aço foi escolhido porque ele possui um elevado coeficiente de deformação plástica e uma ductilidade que minimiza o desgaste dos roletes da máquina.

Os fluxos utilizados foram revestimentos de eletrodos comerciais sendo básicos da classe E7018.

5.3.3 - Preparação dos fluxos

Para a formulação das misturas foi adicionado aos revestimentos comerciais o polímero em solução. Na preparação dos fluxos, foi necessário calcular as proporções de cada material. Com o auxílio de uma balança, as quantidades de cada pó misturado foram medidas e separadas em um recipiente. Em seguida misturou-se 100 g de pó misturado para proporções de 5, 10 ou 15 g de polímero, já descontando a diluição em que o polímero se encontrava, de acordo com o percentual que estava estabelecido para cada fluxo, conforme as Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Cálculo da concentração mássica do polímero em solução:

Massa do recipiente vazio	58,995 g
Massa do recipiente contendo o polímero em solução	125,857 g
Massa do recipiente contendo o polímero totalmente seco	100,128 g
Concentração da solução de polímero	61,5%

Fonte: elaborada pela autora

Tabela 3 – Cálculo das quantidades de cada componente utilizado para fabricação dos fluxos:

	Massa de pó E7018	Massa de polímero seco	Massa de solução
Produção de fluxo 5%	200 g	10 g	16,255 g
Produção de fluxo 10%	200 g	20 g	32,510 g
Produção de fluxo 15%	200 g	30 g	48,765 g

Fonte: elaborada pela autora

Após a preparação da mistura, a secagem dos fluxos foi em uma estufa (Figura 20), a uma temperatura de 100°C , por um período de 120 horas.

Após a etapa de secagem, os fluxos foram levados a um moinho de rolos para que fossem moídos e peneirados até se tornarem pós finos, de granulometria similar ao fluxo original (Figura 21).

Figura 20 - Forno utilizado para a secagem dos fluxos



Fonte: Foto tirada pela autora

Figura 21 – Fluxo moído



Fonte: Foto tirada pela autora

5.3.4 – Ajustes do equipamento

Antes de iniciar a produção dos arames tubulares, foi necessário fazer alguns ajustes na máquina como:

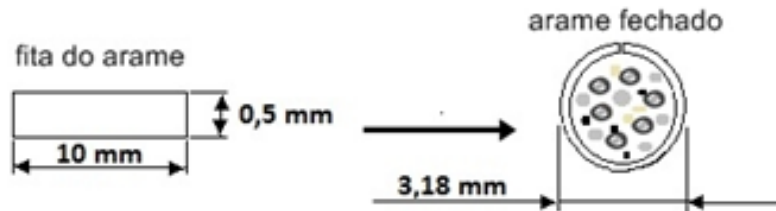
a) Ajuste dos roletes

Para cada etapa de deformação da fita metálica, é definida uma forma a qual ela irá adquirir em cada par de roletes. Esses formatos requerem dimensões e alinhamentos exatos dos roletes para que eles deformem a fita em uma sequência correta até o fechamento do arame.

Optou-se por fabricar dois pares de roletes em aço SAE 1045 que pertencem à terceira etapa de fechamento do arame. As dimensões dos roletes foram projetadas de acordo com as dimensões da fita metálica a ser utilizada. As superfícies dos roletes foram nitretadas para que não sofressem alterações dimensionais em função do desgaste causado pelo deslizamento da fita. Este procedimento foi adotado para que pudesse garantir o devido fechamento da fita ao receber o fluxo e para o correto funcionamento da máquina.

Tal etapa é considerada crítica, já que uma dimensão inadequada é incapaz de fechar o arame corretamente. Para os cálculos dos sulcos dos roletes levou-se em conta o diâmetro final do arame produzido (3,18 mm) a partir da largura da fita (10 mm), conforme mostra a Figura 22.

Figura 22 – Esquema utilizado para o cálculo do sulco do rolete de fechamento da fita



Cálculo do diâmetro do sulco do rolete

$$2 \times 3,14 \times r = 10 \text{ mm}$$

$$r = 1,59 \text{ mm}$$

$$\mathbf{d = 3,18 \text{ mm}}$$

Fonte: elaborada pela autora

b) Desenvolvimento e construção de guias

Para impedir que a fita metálica girasse ao passar pelos pares de roletes, optou-se por construir uma guia e instalá-la antes da entrada dos roletes de fechamento. A Figura 23 e 24 mostram as guias construídas e instaladas na máquina.

Figura 23 – Guia construída e instalada antes do rolete de dobramento da fita



Fonte: Foto tirada pela autora

Figura 24 – Guia construída e instalada antes do rolete de fechamento do arame



Fonte: Foto tirada pela autora

5.3.4 – Produção dos arames

A fabricação do arame pode ser dividida em 8 etapas:

1. Bobinamento da fita metálica no carretel;
2. Deformação da fita ao passar pelo primeiro rolete para que ela possa ser conformada na forma de “V”;
3. Deformação da fita ao passar pelo segundo rolete para a mesma possa ser conformada na forma de “U”;
4. Abastecimento do perfil “U” com o fluxo;
5. Fechamento do perfil “U” abastecido;
6. Selagem do arame fechado;
7. Trefilação do arame no diâmetro estabelecido em fieiras escalonadas com 9% de redução de diâmetro (3,7; 3,5; 3,2; 2,9; 2,6 e 2,3 mm de diâmetro), sendo lubrificadas por grafite;
8. Bobinamento do arame no tambor.

Inicialmente a fita é bobinada no carretel de modo alinhado. Ao acionar o motor da máquina a fita começa a se desenrolar com uma velocidade de 10 m/h e passa pelo primeiro par de roletes. A velocidade de trefilação do arame foi estabelecida em 10 m/h para evitar tração excessiva, ranhuras e possível rompimento. Neste par de roletes a fita é conformada em um perfil V, em seguida passa pelo segundo par de roletes, e o perfil em V é conformado até adquirir a forma de uma canaleta tipo “U” (Figura 25). Após o segundo par de roletes, a fita na forma de canaleta “U” é abastecida com o fluxo. É importante observar que a taxa de abastecimento da canaleta “U” é de aproximadamente 7 g de fluxo por metro de canaleta. Quando a canaleta “U” passa pelo terceiro par de roletes, este é fechado de topo. Ao passar pelo quarto par de roletes, o arame é selado para evitar o vazamento de fluxo. Após selagem, o arame passa pelas fieiras de trefilação até atingir o diâmetro de 2,2 mm. O lubrificante utilizado foi o grafite em pó. As fieiras utilizadas são mostradas na Figura 26.

Figura 25 - Primeiro e segundo pares de roletes



Fonte: Foto tirada pela autora

Foi definido neste trabalho que cada cordão de solda realizado iria utilizar 15 metros de arame trefilado.

Figura 26 – Fieiras de trefilação



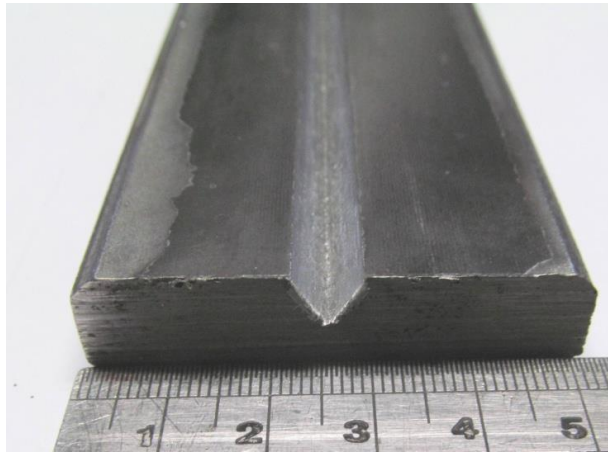
Fonte: Foto tirada pela autora

5.4 Testes de soldagem

a) Materiais

Para a deposição dos cordões de solda, foi utilizada uma chapa de aço SAE 1020 com 12 mm de espessura e 50 mm de largura cortada em cinco partes de dimensões de 200 mm de comprimento para os arames de bases E7018 com 0, 5, 10 e 15% de polímero fabricados nesse trabalho, conforme a Figura 27. Foi produzido um chanfro em “V”. Foram utilizadas 4 chapas para cada tipo de arame, sendo 2 para soldagem com gás de proteção externa e 2 sem gás.

Figura 27 – Chapa com chanfro em “V”



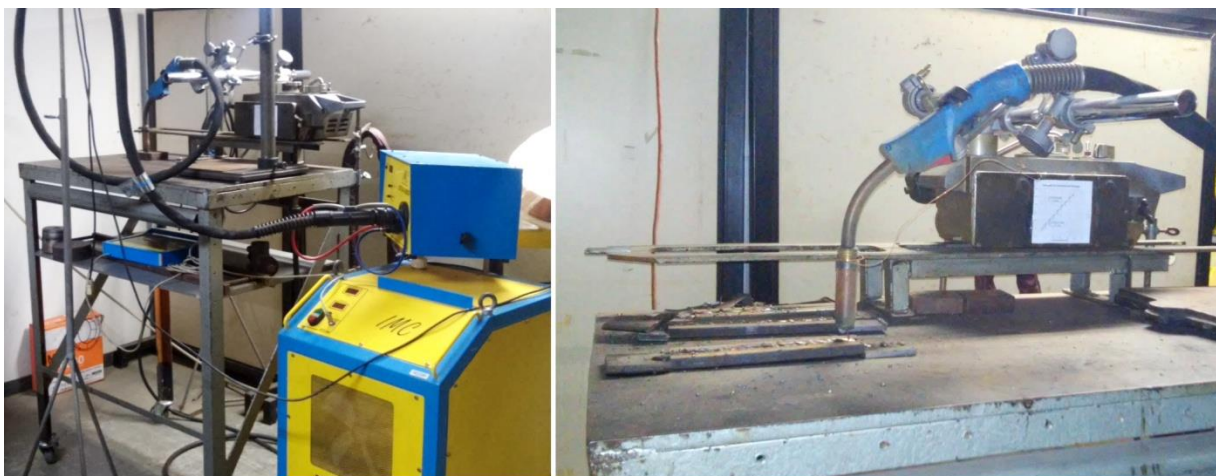
Fonte: Foto tirada pela autora

b) Equipamentos

Os cordões de solda foram realizados por um dispositivo de soldagem disponível no LRSS. Esse dispositivo tem as seguintes características:

- Permite o ajuste da posição da tocha de soldagem ao longo do eixo vertical.
- Possui movimento mecanizado na direção de soldagem por meio de um carro tartaruga que se desloca por um trilho colocado em um suporte.
- Permite a regulagem da velocidade de soldagem.

A fonte de soldagem utilizada foi a máquina de solda MTE DIGITEC 600 (Figura 28), 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 circuito aberto pode variar de 18V a 45V.

Figura 28 – Esquema de soldagem

Fonte: Foto tirada pela autora

Foi utilizado também um sistema de aquisição de dados para coletar a tensão e a corrente durante a soldagem. O monitoramento foi realizado com uma taxa de 1000 leituras por segundo.

c) Ajuste dos parâmetros

Antes dos testes principais, foram realizados testes preliminares de soldagem para serem estabelecidos parâmetros como tensão, velocidade de soldagem, vazão de gás e DBCP.

5.4.1 Análise metalográfica

a) Materiais

As seções transversais dos cordões de solda foram embutidas a quente com baquelite no primeiro lote de amostras e a frio com acrílico no segundo lote de amostras. Para o lixamento, foram utilizadas lixas d'água com granulometrias P120, P220, P320, P400, P600 e P1200. O polimento foi feito com alumina e pasta de diamante de 9 μm , 3 μm e 1 μm . O ataque para revelação da microestrutura das amostras foi feito com imersão de reagente nital 5% (solução alcoólica com 5% em volume de ácido nítrico) por 15 segundos.

b) Equipamentos

O embutimento a quente das amostras metalográficas foi feito com uma embutidora fabricada pela AROTEC modelo PRE 40 MI. No segundo lote de amostras, o embutimento a frio foi feito utilizando-se resina acrílica.

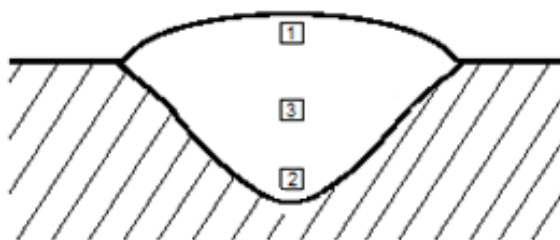
As macrografias foram feitas com uma máquina fotográfica e as micrografias foram feitas com o microscópio Kontrol com até 400 vezes de aumento. Foi utilizada uma câmera digital Sony para o registro das imagens.

c) Procedimento experimental

Os cordões de solda foram seccionados para a obtenção de uma amostra por cordão, com espessura de 10 mm. A superfície de cada amostra escolhida para ser analisada é a superfície contrária à direção de soldagem, como é mostrado esquematicamente na Figura 31.

As fotos tiradas das microestruturas pertencem às regiões do cordão de solda indicadas pela Figura 29: topo (1), centro (2) e raiz ou linha de fusão (3).

Figura 29 – Esquema da metodologia das regiões analisadas do cordão de solda.

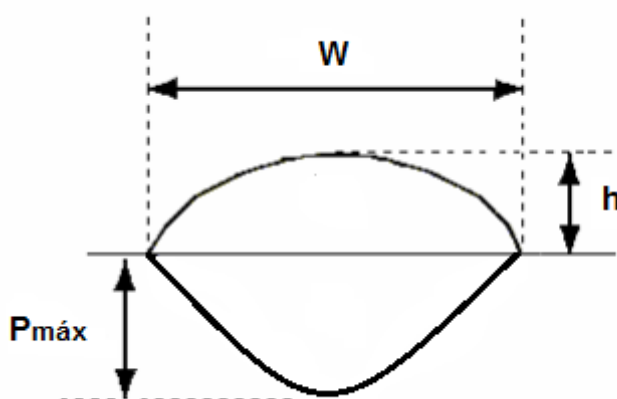


Fonte: elaborada pela autora

5.4.2 Análise da geometria do cordão

As dimensões dos cordões de solda foram medidas para análise da largura e penetração e comparação quanto aos fluxos e uso ou não do gás externo de proteção, conforme representado na Figura 30.

Figura 30 – Representação esquemática dos parâmetros geométricos considerados para a análise dos cordões de solda sobre chapa (W = Largura (mm), h = Reforço (mm), $P_{máx.}$ = Penetração máxima (mm)).



Fonte: elaborado pela autora

5.4.3 Perfil de microdureza

a) Materiais

Foram selecionadas duas seções de cada chapa com os cordões de solda para serem embutidas, lixadas, atacadas e analisadas no microdurômetro, sendo também utilizadas para a análise metalográfica.

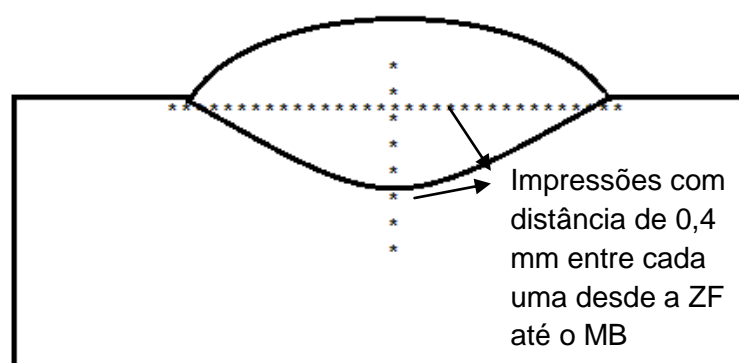
b) Equipamentos

As medições de microdureza Vickers foram realizadas utilizando o microdurômetro Shimadzu HMV-2T.

c) Procedimento experimental

A zona fundida da solda foi analisada quanto à microdureza nas direções horizontal e vertical conforme representação na Figura 31, com carga de 100 gf em pontos equidistantes de 0,4 mm em cada direção e tempo de indentação de 15 segundos. O total de pontos variou de 40 a 50 considerando as duas direções. O objetivo do teste 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 31 – Regiões no metal de solda para medição da microdureza



Fonte: elaborada pela autora

6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em um primeiro momento, para os pré-testes de soldagem, foram fabricados aproximadamente 45 metros de arames de formulação E7018 contendo diferentes teores de polímero (0, 5, 10 e 15%). Posteriormente foram fabricados mais 45 metros de cada arame com formulação básica (E7018), contendo 5, 10 e 15% de polímero.

Os resultados obtidos são apresentados levando-se em conta as duas etapas de fabricação e os testes dos arames com formulação E7018.

6.1 - Resultado da fabricação de arames tubulares

A Figura 32 apresenta o arame produzido no tambor de bobinamento. A máquina pôde funcionar dentro da expectativa e os resultados finais de produção foram satisfatórios, visto que os arames foram fechados de acordo com o esperado.

Figura 32 – Arame tubular produzido



Fonte: foto tirada pela autora

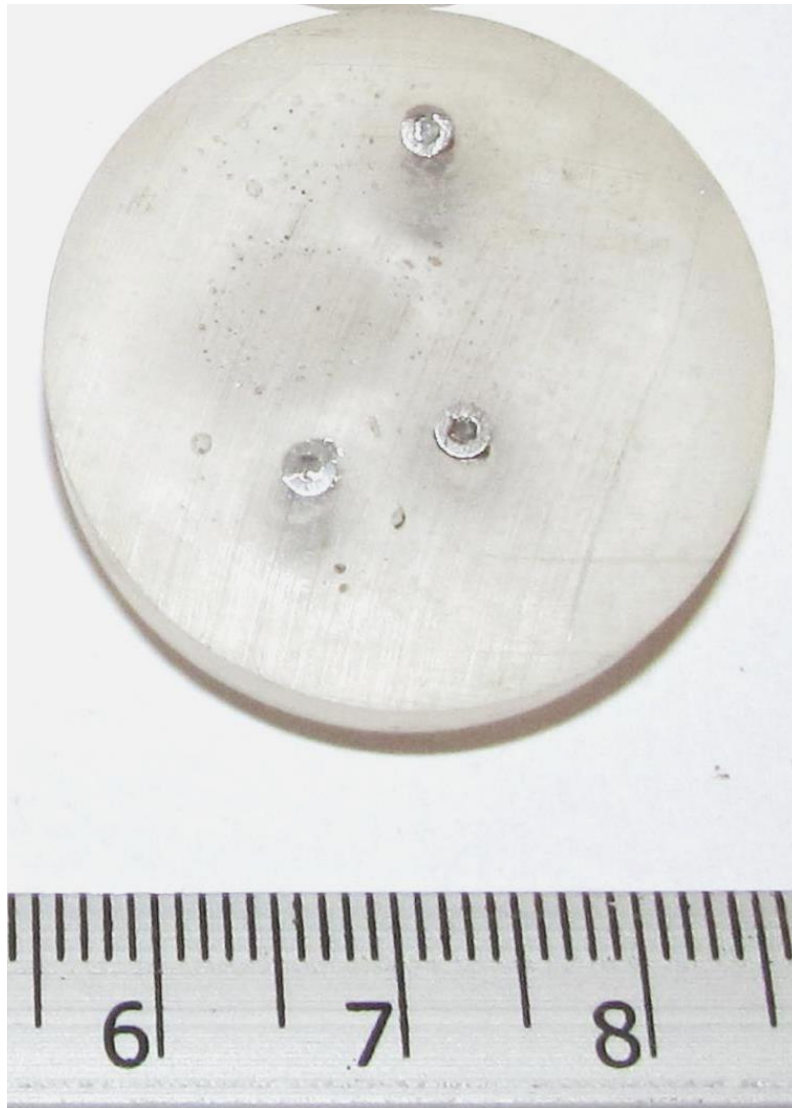
Todos os arames foram analisados visualmente quanto ao acabamento em algumas seções, o qual se mostrou liso e livre de ranhuras. Esses defeitos de acabamento poderiam afetar negativamente a estabilidade do processo durante a execução da solda.

Durante a inspeção visual do arame, foi observado também que o fluxo interno se manteve uniforme nas seções analisadas ao longo do comprimento, garantindo assim que as propriedades mecânicas do cordão de solda não fossem alteradas. Em determinadas seções do arame, foram pesados fragmentos de mesmo comprimento e comparados.

Durante a fabricação do arame, a taxa de enchimento com o fluxo foi de aproximadamente 0,4 g/cm de arame. A massa do arame finalizado foi de aproximadamente 2,2 g para cada 10 cm de arame contendo 5%, 2,1 g para os arames contendo 10% e 1,9 g para os arames contendo 15% de polímero. A proporção média medida da massa de arame sem fluxo sobre a massa de arame com fluxo interno foi de cerca de 13%. Essa medida foi feita medindo-se a massa de fragmentos de mesmo comprimento do arame contendo o fluxo e outra sem o fluxo interno.

A Figura 33 mostra a seção transversal dos arames produzidos com a formulação do E7018 contendo polímero.

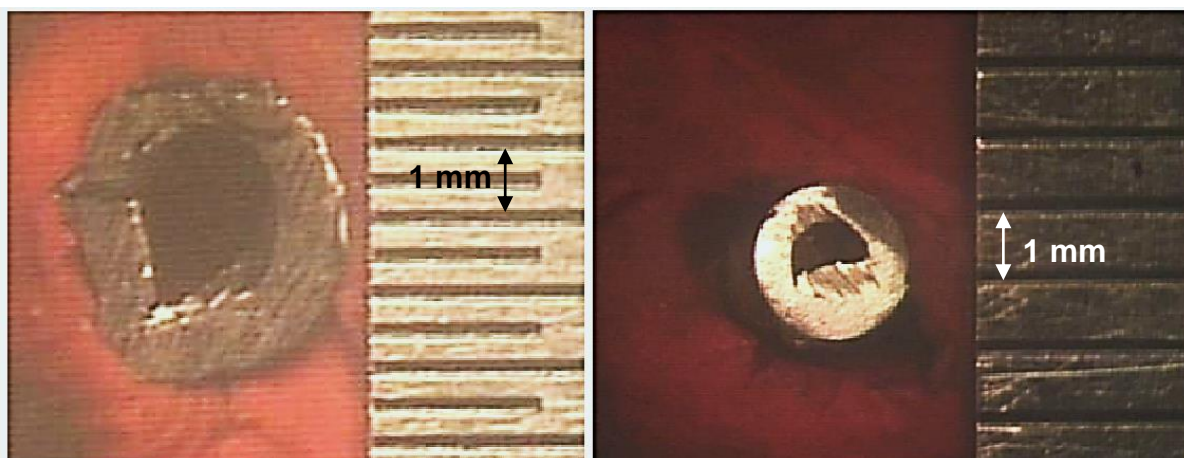
Figura 33 – Seção transversal dos arames produzidos com o fluxo E7018 embutidos



Fonte: foto tirada pela autora

Na Figura 34 são mostradas as seções do arame antes de ser trefilado, com 4,0 mm de diâmetro e após a trefilação, com diâmetro de 2,2 mm.

Figura 34 – Seção transversal dos arames produzidos com o fluxo E7018 antes e depois da trefilação.



Fonte: elaborada pela autora

Mediu-se com a ajuda de um microdurômetro o diâmetro externo os arames, que foi de 2,21 mm e a medida do diâmetro interno, 1,15 mm, possuindo 0,55 mm de espessura da parede, com incerteza de 0,005 mm. A área interna do arame contendo o fluxo representa, portanto, 27,6% da área representada pelo diâmetro externo.

6.2 - Resultado dos testes de soldagem

Para cada um dos arames tubulares produzidos foram realizados dois cordões de solda, sendo um cordão com proteção gasosa e outro autoprottegido, ou seja, sem a proteção de gás externo.

Os testes principais foram realizados utilizando-se os parâmetros pré-estabelecidos e estão mostrados na Tabela 4, variando-se apenas o arame, no qual os fluxos de base E7018, contendo 5, 10 e 15% de polímero foram analisados.

Tabela 4 – Parâmetros dos testes de soldagem

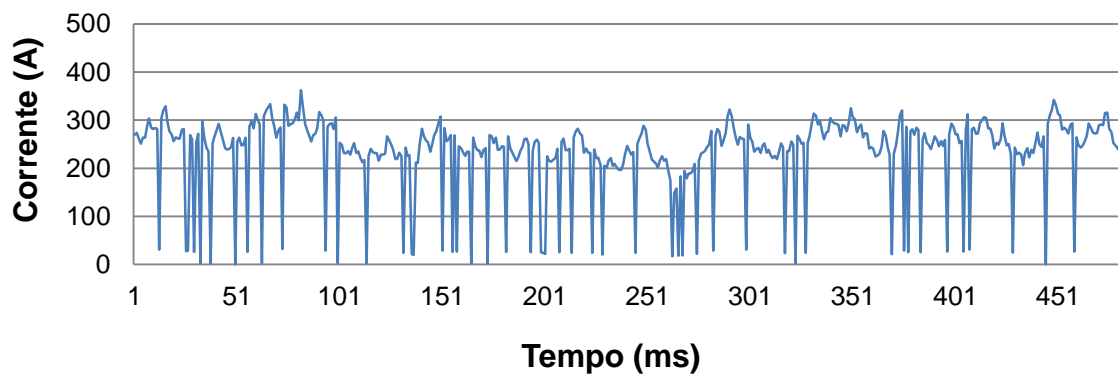
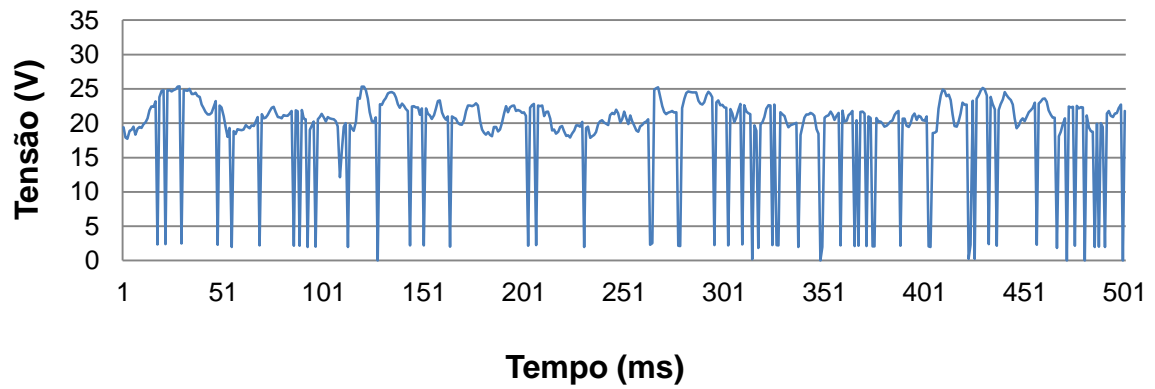
PARÂMETROS DE SOLDAGEM	
Metal de base	Aço SAE 1020
Tensão de regulagem (V)	29
Gás de proteção	CO ₂ / NA
Vazão do gás (L/min)	16 / NA
Velocidade de alimentação do arame (m/min)	2,6
Velocidade de soldagem (mm/min)	360
Diâmetro do bocal (mm)	24
DBCP (mm)	23
Diâmetro do arame (mm)	2,2
Corrente CC+ (A)	230 - 280

Fonte: tabela elaborada pela autora

A energia de soldagem calculada foi de aproximadamente 1,3 KJ/mm. De acordo com a norma AWS A5.20, este valor deveria estar compreendido entre 1,4 e 2,6 KJ/mm para diâmetros de arame acima de 2 mm. A utilização de baixos valores de energia de soldagem pode provocar falhas de penetração na junta soldada assim como elevadas velocidades de resfriamento, o que, em certas ocasiões pode ser prejudicial à junta soldada. No entanto, o arame fabricado tem caráter experimental e não será utilizado comercialmente.

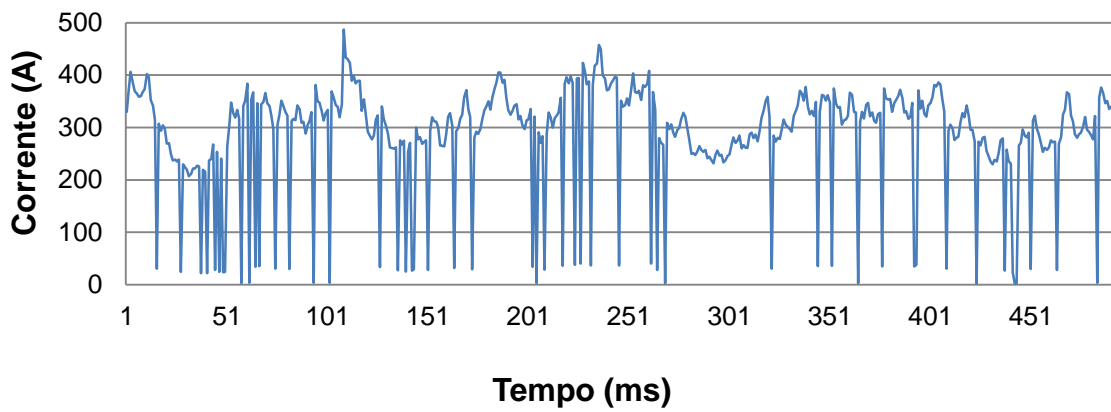
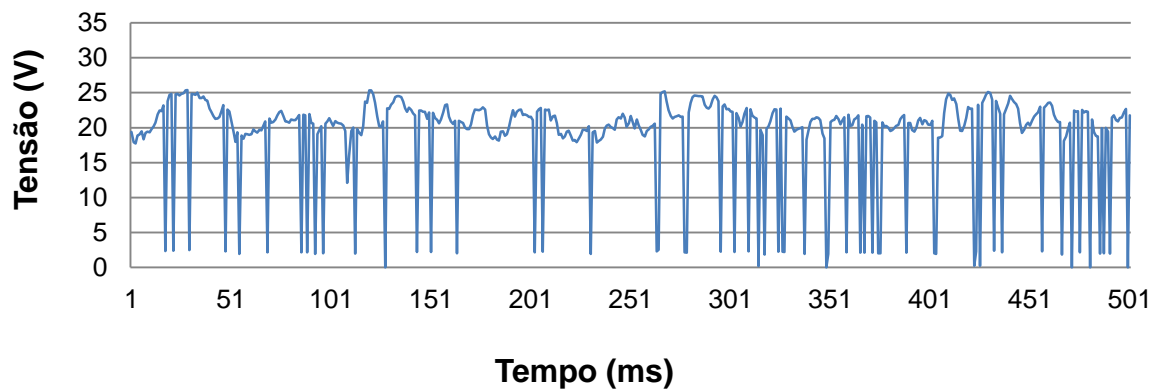
As Figuras 35 e 36 mostram oscilogramas obtidos durante a soldagem do arame com 15% de polímero com e sem a utilização de gás. Não foram obtidos os oscilogramas na soldagem com os outros arames.

Figura 35. Oscilogramas da soldagem com o arame 15% com gás.



Fonte: elaborado pela autora

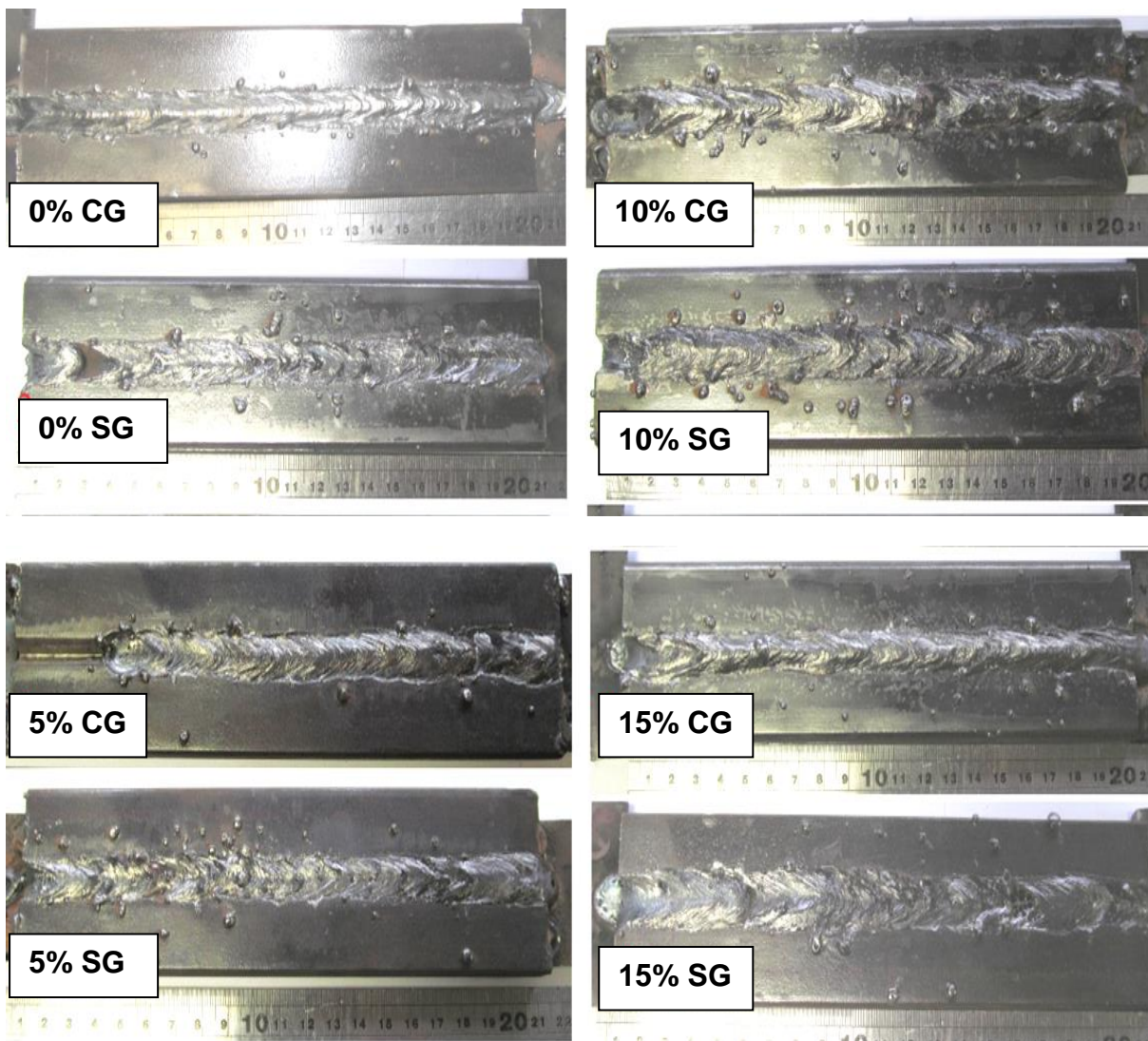
Figura 36. Oscilogramas da soldagem com o arame 15% sem gás.



Fonte: elaborado pela autora

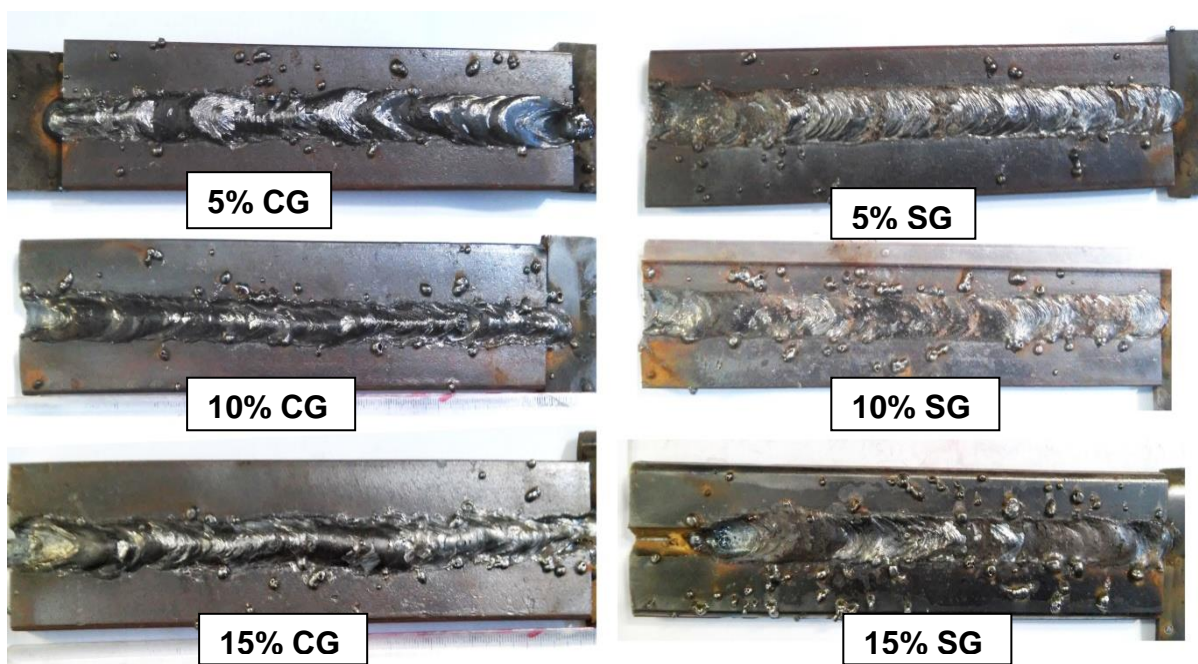
As Figuras 37 e 38 apresentam as fotos das chapas soldadas com o arame após remoção de escória.

Figura 37. Cordões de solda dos pré-testes de soldagem



Fonte: foto elaborada pela autora.

Figura 38. Cordões de solda dos testes principais



Fonte: foto elaborada pela autora.

É possível observar por inspeção visual que os cordões de soldas nas condições de soldagem sem proteção externa de gás possuem maiores larguras e menores reforços do que os soldados com proteção gasosa. O acabamento superficial dos cordões de solda também se mostrou relativamente mais uniforme nas condições nas quais se utilizou o gás de proteção, havendo menos respingos e menos variações geométricas ao longo do cordão.

Foi observada ainda a presença de pouca escória destacável em todas as condições de soldagem, conforme mostra a Figura 39.

Figura 39 – Cordão de solda com escória produzido com arame 5% com proteção gasosa.



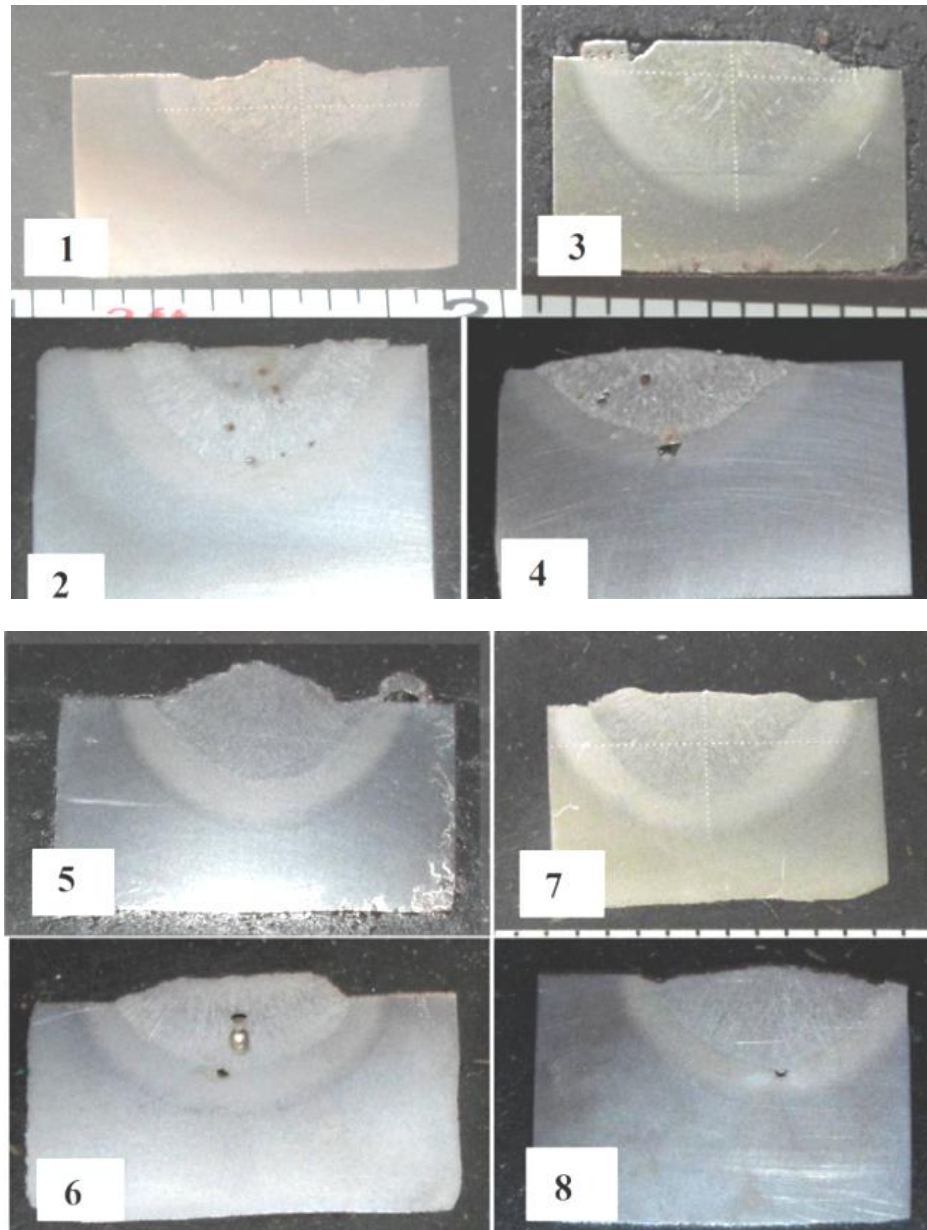
Fonte: foto tirada pela autora

Durante a soldagem, observou-se que a presença de respingos e fumos foi maior na condição de soldagem sem proteção gasosa externa. No entanto, não se notou um aumento ou diminuição dos respingos com a variação do teor de polímero dos arames. A transferência metálica observada foi semelhante à globular em todas as soldagens.

6.3 - Resultado da análise macrográfica

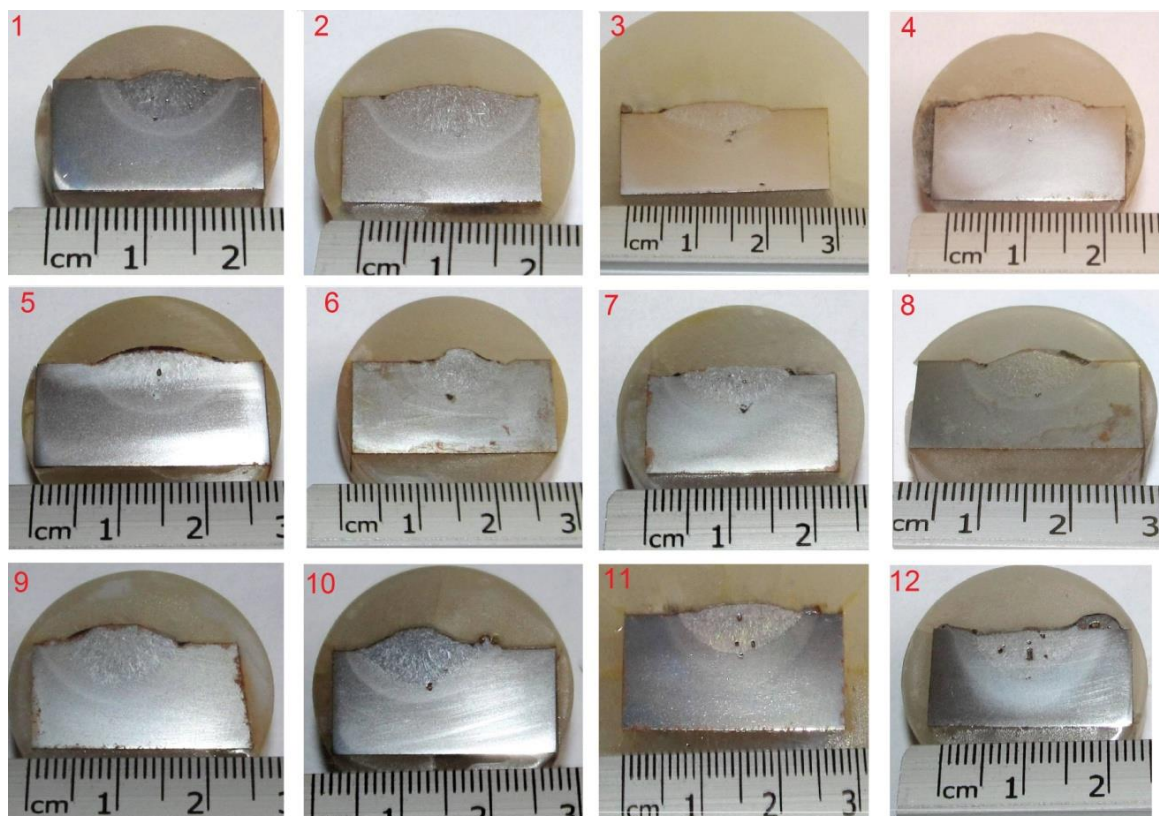
Após a soldagem das chapas, foram cortadas amostras das extremidades (início e final da chapa soldada) para verificar a uniformidade no comportamento da solda. Após a preparação metalográfica dos cordões de solda conforme estabelecido na metodologia, pode-se observar as macrografias apresentadas nas Figuras 40 e 41.

Figura 40. Macrografias dos pré-testes - 1) 0% com gás (início do cordão); 2) 0% sem gás; 3) 5% com gás (início do cordão); 4) 5% sem gás; 5) 10% com gás (início do cordão); 6) 10% sem gás; 7) 15% com gás (início do cordão); 8) 15% sem gás



Fonte: foto tirada pela autora

Figura 41. Macrografias dos testes principais - 1) 5% com gás 1(início do cordão); 2) 5% com gás 2; 3) 5% sem gás 1 (início do cordão); 4) 5% sem gás 2; 5) 10% com gás 1 (início do cordão); 6) 10% com gás 2; 7) 10% sem gás 1 (início do cordão); 8) 10% sem gás 2; 9) 15% com gás 1 (início do cordão); 10) 15% com gás 2; 11) 15% sem gás 1 (início do cordão); 12) 15% sem gás 2.



Fonte: elaborada pela autora

A existência de descontinuidades foi identificada por meio de inspeção visual e observou-se a presença de uma grande quantidade de poros, inclusões de escória e falta de penetração em quase todas as amostras. Essas descontinuidades podem estar associadas aos parâmetros de soldagem estabelecidos e à composição do fluxo interno. Nas condições de soldagem com proteção gasosa externa, foram verificadas uma menor quantidade de descontinuidades.

Todas as amostras foram avaliadas visualmente quanto à geometria do cordão por meio das medidas da largura (w), penetração ($p_{\text{máx}}$) e reforço (h) e estão quantificadas nas Tabelas 5 (referente aos pré-testes) e 6. Os gráficos comparativos dessas medidas estão apresentados no Anexo II.

Tabela 5. Medidas do formato dos cordões (pré-testes)

GEOMETRIA DO CORDÃO				
Arame	Amostra *	w [mm]	$\rho_{\text{máx}}$ [mm]	h [mm]
0% polímero com gás	1	13,1	5,7	0,9
0% polímero com gás	2	6,5	4,4	1,3
0% polímero sem gás	1	12,0	5,4	0,7
0% polímero sem gás	2	12,8	3,7	1,7
5% polímero com gás	1	11,5	5,1	2,6
5% polímero com gás	2	11,2	6,0	2,0
5% polímero sem gás	1	10,0	3,5	1,2
5% polímero sem gás	2	12,4	4,1	1,2
10% polímero com gás	1	11,1	5,4	2,4
10% polímero com gás	2	12,3	3,8	2,5
10% polímero sem gás	1	11,0	4,5	1,4
10% polímero sem gás	2	14,7	4,0	1,8
15% polímero com gás	1	9,6	5,7	2,5
15% polímero com gás	2	12,3	6,2	0,8
15% polímero sem gás	1	10,5	4,8	1,2
15% polímero sem gás	2	10,7	4,2	1,3

Fonte: elaborada pela autora (*1: início do cordão, 2: final do cordão)

Tabela 6. Medidas do formato dos cordões (testes principais)

GEOMETRIA DO CORDÃO				
Arame	Amostra	w [mm]	$\rho_{\text{máx}}$ [mm]	h [mm]
5% polímero com gás	1	12,0	6,0	1,0
5% polímero com gás	2	14,0	7,0	2,0
5% polímero sem gás	1	12,0	5,0	1,5
5% polímero sem gás	2	17,0	7,0	2,0
10% polímero com gás	1	11,0	5,0	2,0
10% polímero com gás	2	16,0	4,0	2,0
10% polímero sem gás	1	14,0	4,0	1,0
10% polímero sem gás	2	15,0	5,0	2,0
15% polímero com gás	1	14,0	6,0	2,0
15% polímero com gás	2	14,0	5,0	3,0
15% polímero sem gás	1	17,0	5,0	1,0
15% polímero sem gás	2	13,0	5,0	1,0

Fonte: elaborada pela autora (*1: início do cordão, 2: final do cordão)

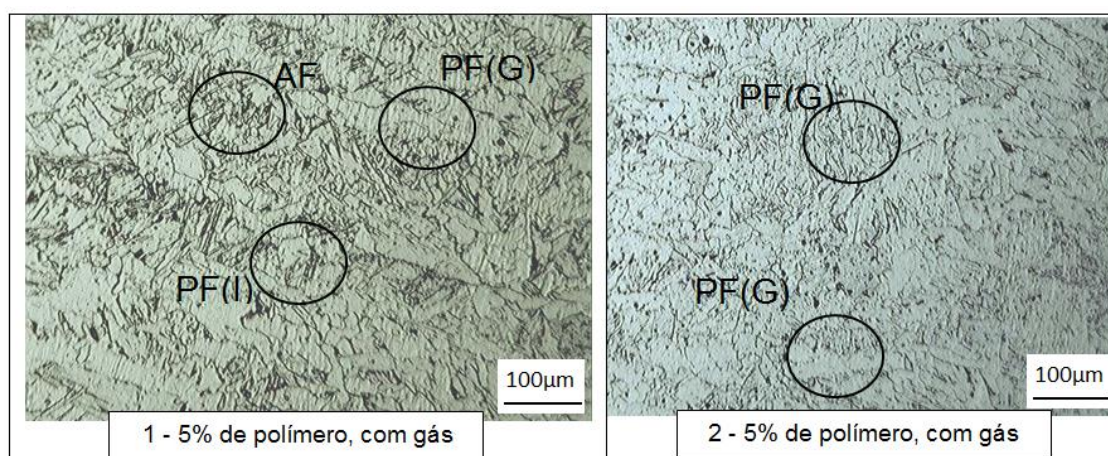
Nas soldas realizadas sem o uso de gás de proteção, pode-se observar uma tendência do aumento da largura, à medida que as soldas eram realizadas com arames contendo fluxos com maiores teores de polímero. Porém, no caso das soldas realizadas com proteção de CO₂ como gás de proteção, essa tendência não foi confirmada.

Além disso, conforme as imagens obtidas na macrografia dos cordões é possível observar a ocorrência de poros, sobretudo nas soldas utilizando 10% e 15% de polímero nos fluxos, o que pode ser um indício de diferentes porcentagens relacionadas às condições de gás de proteção usado, tendo em vista que os parâmetros de soldagem utilizados foram semelhantes para todas as soldas realizadas.

6.5 – Resultado da análise microestrutural

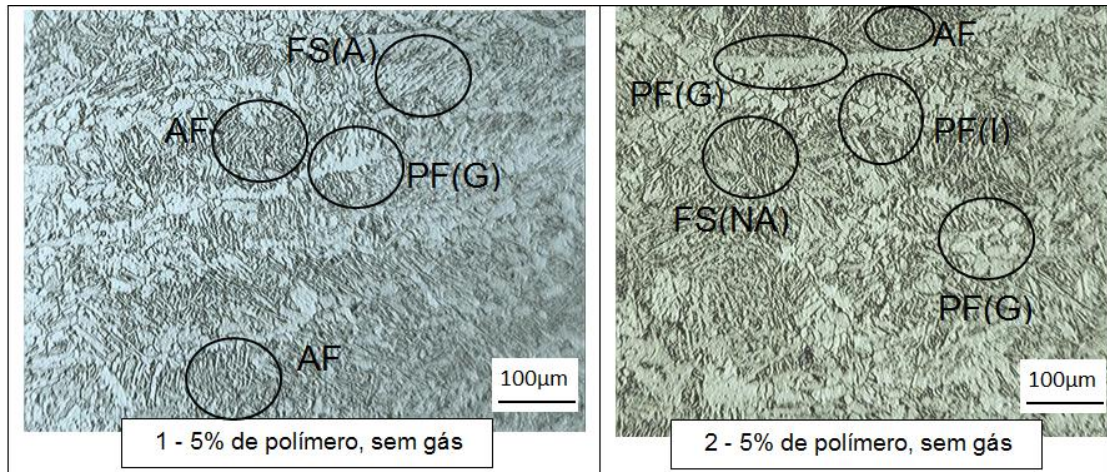
As microestruturas típicas encontradas no centro do metal de solda depositado com os arames tubulares avaliados estão apresentadas nas Figuras 42 a 47. As microestruturas das outras regiões são mostradas no Anexo I.

Figura 42. Microestrutura típica encontrada no metal de solda depositado com os arames tubulares (1: Início do cordão, 2: final do cordão), aumento de 100x.



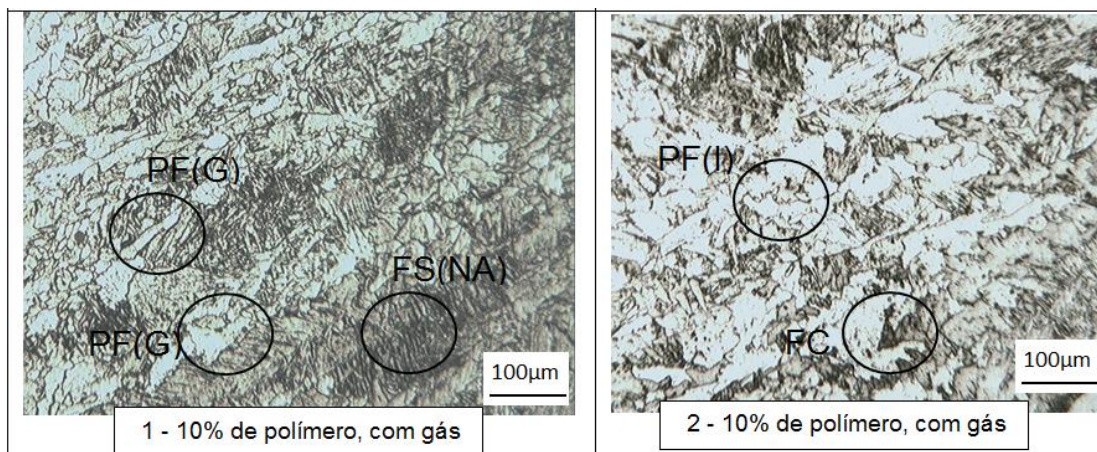
Fonte: elaborada pela autora

Figura 43. Microestrutura típica encontrada no metal de solda depositado com os arames tubulares (1: Início do cordão, 2: final do cordão), aumento de 100x.



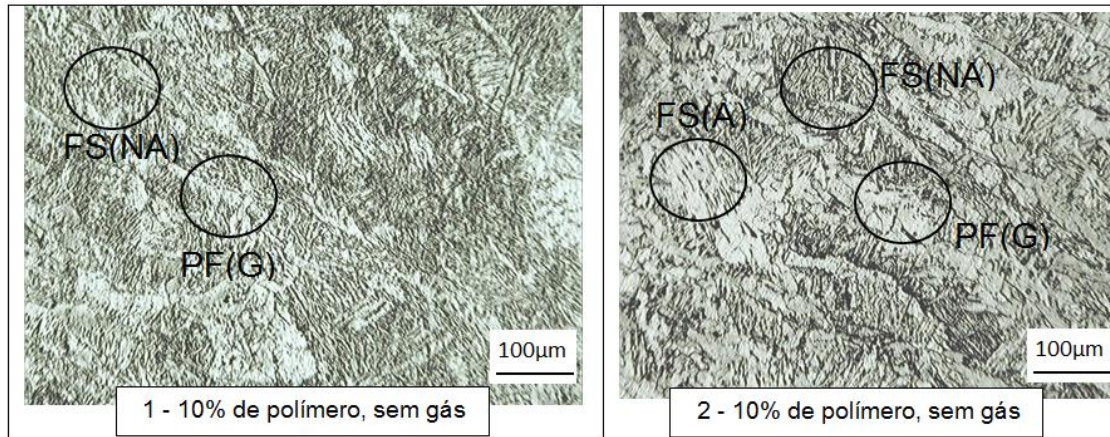
Fonte: elaborada pela autora

Figura 44. Microestrutura típica encontrada no metal de solda depositado com os arames tubulares (1: Início do cordão, 2: final do cordão), aumento de 100x.



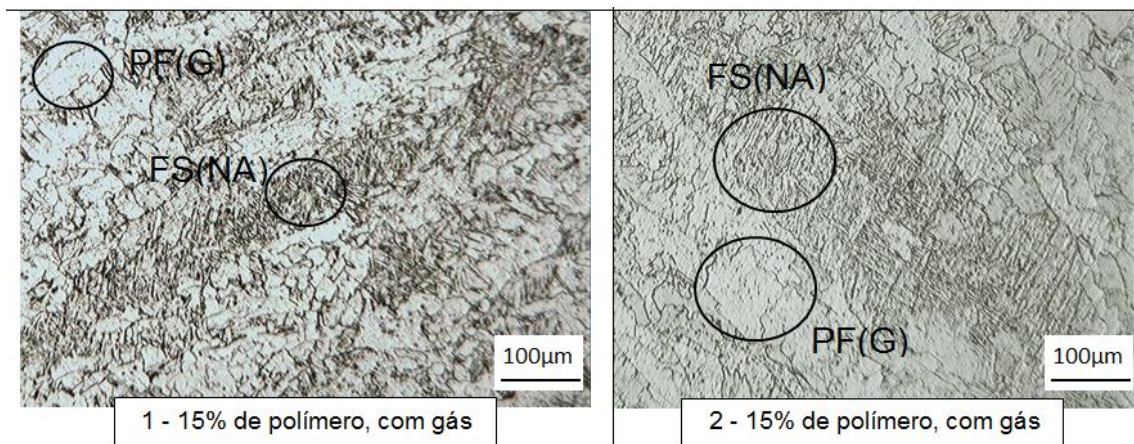
Fonte: elaborada pela autora

Figura 45. Microestrutura típica encontrada no metal de solda depositado com os arames tubulares (1: Início do cordão, 2: final do cordão), aumento de 100x.



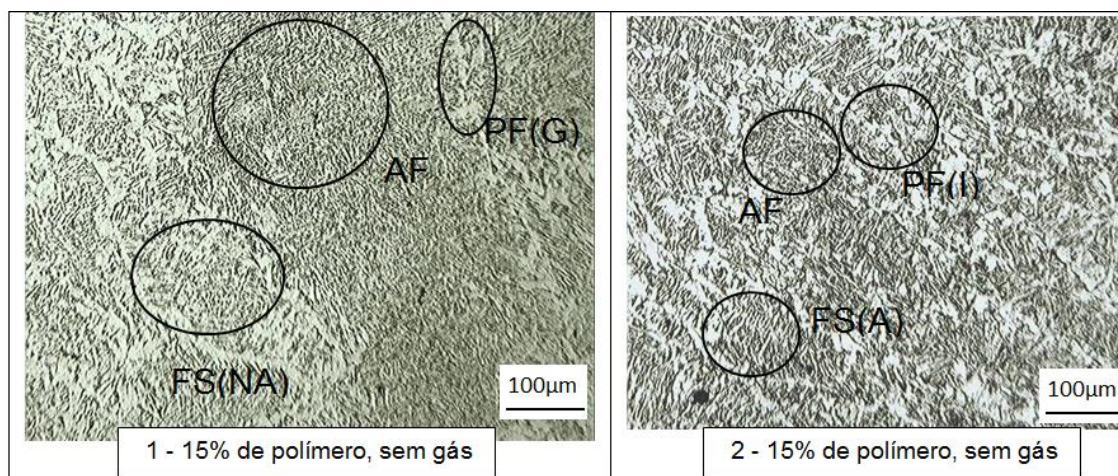
Fonte: elaborada pela autora

Figura 46. Microestrutura típica encontrada no metal de solda depositado com os arames tubulares (1: Início do cordão, 2: final do cordão), aumento de 100x.



Fonte: elaborada pela autora

Figura 47. Microestrutura típica encontrada no metal de solda depositado com os arames tubulares (1: Início do cordão, 2: final do cordão), aumento de 100x.



Fonte: elaborada pela autora

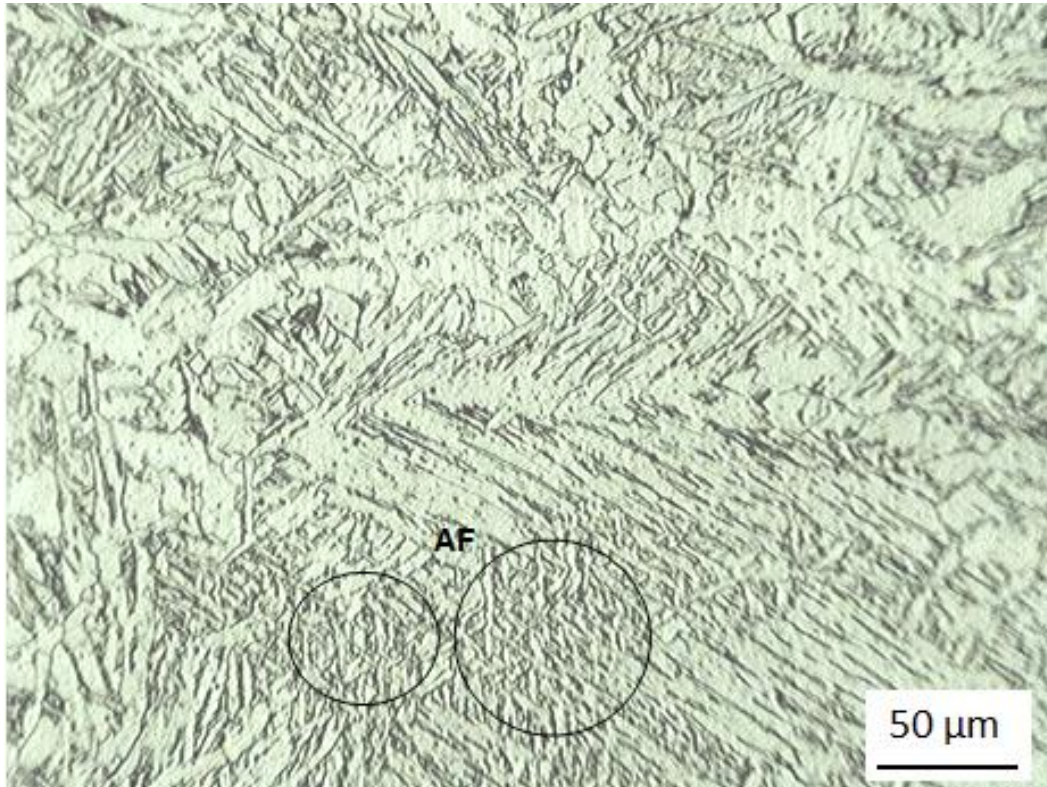
Verifica-se que os constituintes e morfologias variaram em cada porcentagem de polímero analisada e na condição de proteção gasosa externa e ou autoprotégido.

Em amostras soldadas sem proteção gasosa, notou-se uma maior presença de microconstituintes que se assemelham à forma da ferrita acicular quando comparada com soldas protegidas com CO₂.

As microestruturas prevalentes foram a ferrita de segunda fase alinhada e não alinhada, a ferrita poligonal de contorno de grão e intragranular e a ferrita acicular. Apesar de não terem sido feitas medidas das frações volumétricas dos constituintes, observou-se que não houve uma predominância de ferrita acicular nas microestruturas de soldas realizadas com arames tubulares com composições de 5 e 10%. No entanto, a composição de 15% de polímero na condição de soldagem sem gás externo obteve maior prevalência de ferrita acicular quando comparada com as outras micrografias.

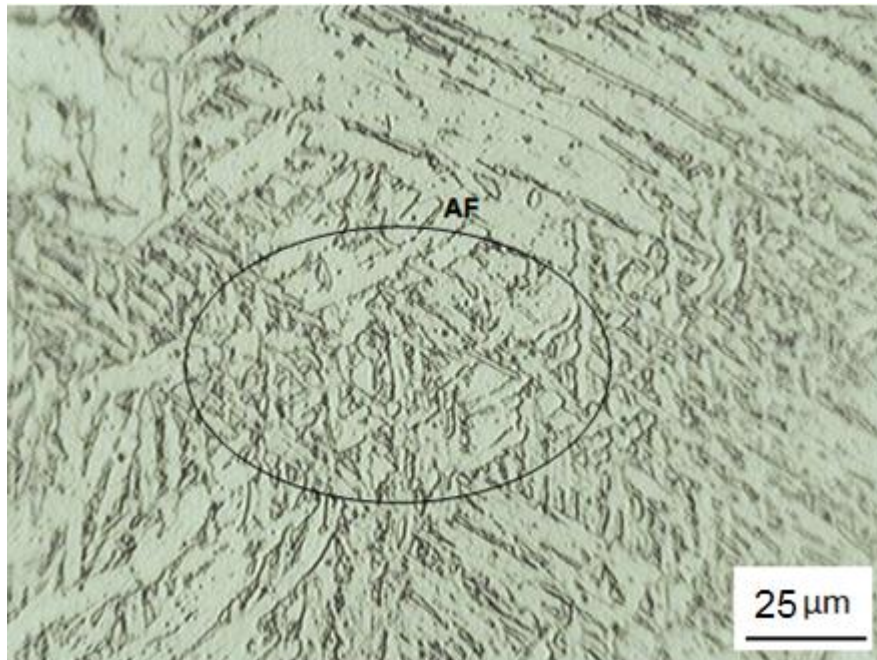
As Figuras 48 e 49 apresentam a micrografia com um aumento de 200 e 400x das amostras nas regiões onde se imaginou que haveria uma maior prevalência de ferrita acicular.

Figura 48. Microestrutura típica encontrada no metal de solda depositado com o arame tubular com 15% de polímero sem gás externo, aumento de 200x.



Fonte: Foto tirada pela autora

Figura 49. Microestrutura típica encontrada no metal de solda depositado com o arame tubular com 15% de polímero sem gás externo, aumento de 400x.



Fonte: Foto tirada pela autora

6.4 - Resultado da análise de microdureza

As Tabelas 7 e 8 apresentam a média dos valores medidos de microdureza Vickers. Todas as medidas foram realizadas no metal de solda depositado pelos arames, obtidas nas direções vertical e horizontal para cada uma das amostras retiradas das extremidades das soldas.

Tabela 7. Medidas de microdureza Vickers (pré-testes)

MICRODUREZA VICKERS		
Arames	Amostras	Média de Dureza (HV)
0% polímero com gás	1	142
0% polímero com gás	2	153
0% polímero sem gás	1	202
0% polímero sem gás	2	207
5% polímero com gás	1	178
5% polímero com gás	2	164
5% polímero sem gás	1	208
5% polímero sem gás	2	217
10% polímero com gás	1	168
10% polímero com gás	2	150
10% polímero sem gás	1	200
10% polímero sem gás	2	190
15% polímero com gás	1	172
15% polímero com gás	2	174
15% polímero sem gás	1	170
15% polímero sem gás	2	177

Fonte: tabela elaborada pela autora (*1: início do cordão, 2: final do cordão)

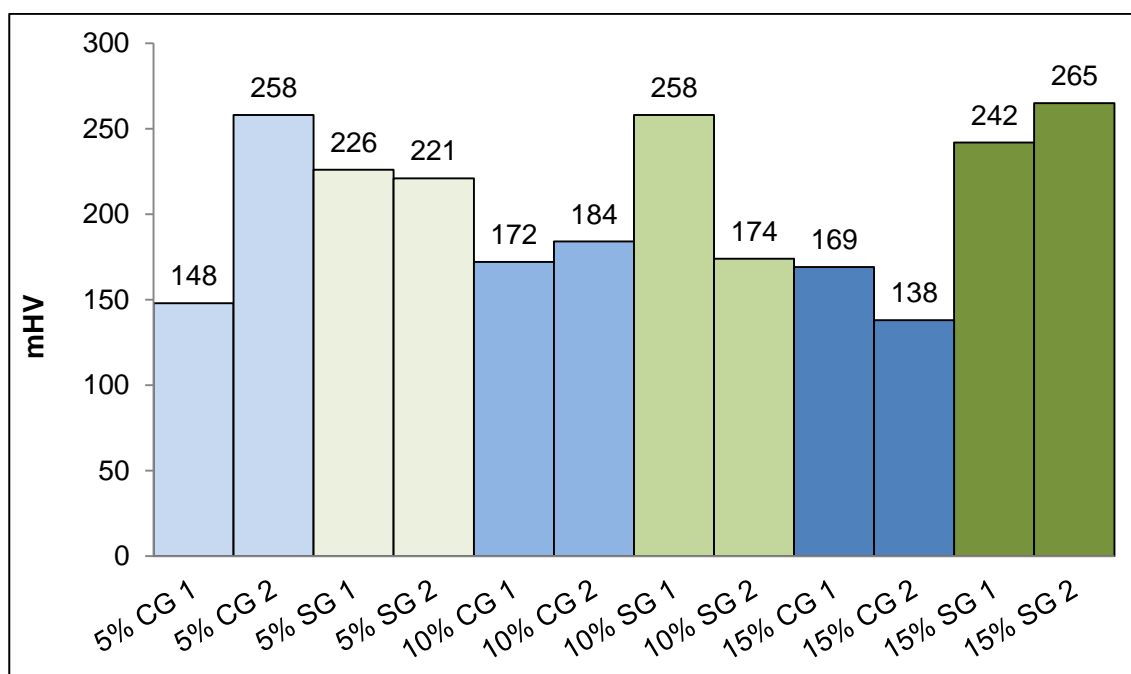
Tabela 8. Medidas de microdureza Vickers

MICRODUREZA VICKERS		
Arames	Amostras	Média de Dureza (HV)
5% polímero com gás	1	148
5% polímero com gás	2	258
5% polímero sem gás	1	226
5% polímero sem gás	2	221
10% polímero com gás	1	172
10% polímero com gás	2	184
10% polímero sem gás	1	258
10% polímero sem gás	2	174
15% polímero com gás	1	169
15% polímero com gás	2	138
15% polímero sem gás	1	242
15% polímero sem gás	2	265

Fonte: tabela elaborada pela autora (*1: início do cordão, 2: final do cordão)

Notou-se uma grande dispersão de valores de microdureza obtidos entre as amostras. Por meio da tabela 4, é possível observar que a maior parte dos valores está compreendida entre 150 e 250 HV. Adicionalmente, as amostras soldadas sem a ajuda de gás de proteção externo obtiveram maiores durezas, assim como as amostras retiradas das extremidades representadas pelo início da soldagem. As médias dos valores de microdureza estão representadas no Figura 51.

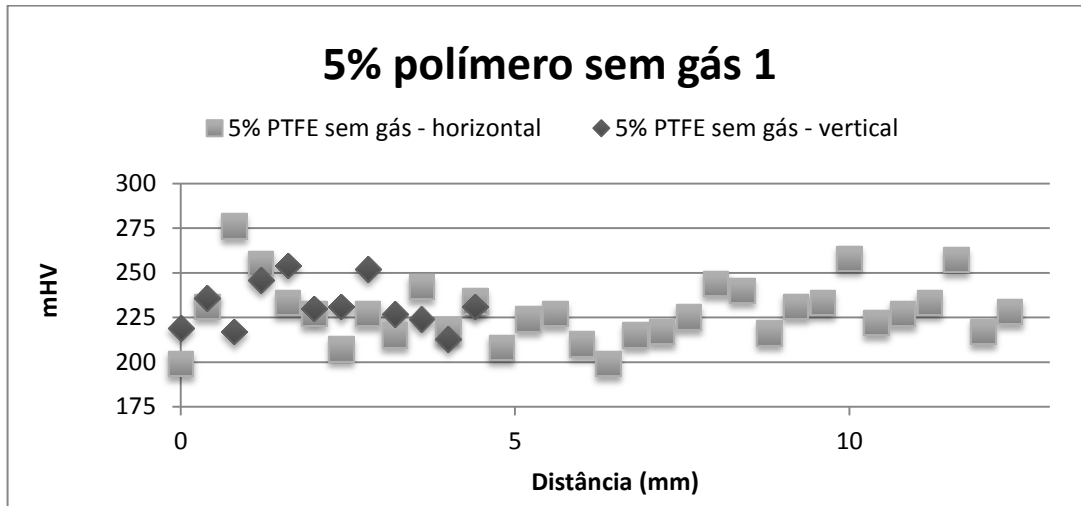
Figura 50. Gráfico das médias dos valores encontrados de microdureza no centro do cordão de solda depositado com o arame tubular E7018.



Fonte: tabela elaborada pela autora (*1: início do cordão, 2: final do cordão)

A Figura 52 mostra um gráfico com as medidas da amostra com 5% de polímero soldada sem gás externo de proteção, retirada da extremidade 1 (início do cordão). Os gráficos com as medidas das outras amostras estão apresentados no anexo II.

Figura 51. Gráfico do perfil de microdureza encontrada no centro do cordão de solda depositado com o arame tubular E7018 com 5% de polímero sem gás externo. Ampliação: 100x.



Fonte: tabela elaborada pela autora (*1: início do cordão)

Essas medidas de microdureza mostram que alguns dos valores são compatíveis com os valores típicos encontrados na literatura para a ferrita acicular, os quais podem variar entre 210 e 285 HV (BHADESHIA, 1991).

7 - CONCLUSÕES

Os experimentos realizados para avaliar a influência do teor de polímero contido no fluxo dos arames tubulares de formulação básica produzidos em laboratório permite concluir que:

- A microestrutura do metal de solda observada possuiu diferentes microconstituintes predominantes para teores de 0, 5, 10 e 15% de polímero.
- A microestrutura do metal de solda produzida a partir das condições de soldagem com proteção gasosa externa em comparação à soldagem sem proteção gasosa externa variou significativamente quanto à fração de ferrita acicular.
- A adição de polímero nas condições avaliadas não proporcionou variações nas dimensões dos cordões de solda, tampouco foram observadas diferenças na geometria do cordão entre os diferentes teores de polímero utilizado. No entanto, foram encontradas maiores valores de penetração e reforço, e menores valores de largura para as condições onde se usou proteção gasosa externa.
- Os valores de microdureza encontrados não variaram significativamente com o aumento do teor de polímero. Entretanto, os valores medidos de microdureza aumentaram quando a soldagem foi executada sem a adição de proteção de gás externa.
- As maiores quantidades observadas de ferrita acicular foram encontradas nas amostras obtidas do metal de solda produzido com os arames tubulares contendo 15% de polímero na condição sem proteção gasosa externa.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, H. A. L. **Otimização e comparação de modelos matemáticos para as características geométricas de soldas GMAW e FCAW.** Monografia (Graduação) – Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação tecnológica do Pará, Pará, 2004.
- ALVES, L. F. R. **Estudo comparativo da soldagem do aço inoxidável austenítico AISI-316L utilizando os processos de soldagem TIG, FCAW e MIG/MAG.** Monografia (Graduação) – Engenharia Mecânica, Centro Universitário de Itajubá, Itajubá, 2008.
- ARAUJO, W. R. **Comparação entre soldagem robotizada com eletrodo sólido e metal cored – A ocorrência do finger.** Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- ASTM International. **E23 - 07 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.** 2007.
- ANSI/AWS **A5.20/A5.20M Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding,** Miami, 2005.
- BABU, S.S., BHADESHIA, H.K.D.H. **Mechanism of the Transition from Bainite to Acicular Ferrite.** Materials Transation, JIM, v.32, n.8, p. 679-688, 1991.
- BABU, S.S., BHADESHIA, H.K.D.H. **Transition from Bainite to Acicular Ferrite in Reheated Fe-Cr-C Weld Deposits.** Materials Science and Techonology. v.6, p.1005-1019, 1990.
- BHADESHIA, H.K.D.H, **Titanium and its alloys,** Materials Science & Metallurgy, Part II, Course C9, Alloys, p 11, 200. Disponível em: <<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2000/C9/lecture7.pdf>> Acesso em: 22 out. 2014.
- BARRA, S. R., **Influência do Processo MIG/MAG Térmico sobre a Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida.** Tese (Doutorado) – Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- BRACARENSE, A. Q.; SOUZA, L.; COSTA, M. C. M. S.; FARIA, P. E.; LIU, S. **Welding current effect on diffusible hydrogen content in flux cored arc weld metal.** **J. Braz. Soc. Mech. Sci.** v.24, n.4, Rio de Janeiro Nov. 2002
- BRACARENSE, A. Q. **Processo de Soldagem com Arame Tubular – FCAW.** 2010. Disponível em <ftp://ftp.demec.ufmg.br/lrss/ProcessosSoldagem_Pos/TEXTOS/11TextoFCAW.pdf> Acesso em: 29 jul. 2014.
- CARY, Howard.; HELZER, Scott.; **Modern Welding Technology,** 6.ed. New Jersey: Pearson Education, 2005. 715p.
- CETLIN, Paulo Roberto; HELMAN, Horacio. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais.** 2.ed. ed. Artliber. 2005. 264p.

COLPAERT, HUBERTUS. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4.ed. Ed. Blucher. 2008. 652 p.

CORRÊA, E. C. S. **Aspectos do Encruamento de Metais Previamente Deformados à Frio**. Tese (Doutorado) - Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG. 2004.

COSTA, M. C. M. S. **Fenômenos de instabilidade do arco na soldagem GMAW com gases de baixo potencial de oxidação** Tese (Doutorado) - Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG. 2006.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653p.

EVANS, G. M. Effect of Molybdenum on Microstructure and Properties of C-Mn All-Weld Metal Deposits. **Joining & Materials**, 1(5), p. 239-246, Nov. 1988.

FICHEL, I., DALLA, A., ROS, D. A.; FELIZARDO, I., VAZ, C. T., GONZÁLEZ, L. P.; PÉREZ, M. R.; PUCHOL, R. Q.; PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q. Desenvolvimento de Eletrodos Revestidos Impermeáveis. In: CONSOLDA – ABS, 35., 2009, Piracicaba, **Anais...** Piracicaba: ABS, 2009.

FORTES, C.; DOMINGUES, J. R. **Apostila de Eletrodos Revestidos**. ESAB, 2005. Disponível em http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf Acesso em: 14 ago. 2014.

FORTES, C.; DOMINGUES, J. R. **Soldagem de Tubulações**. ESAB, 2004. Disponível em <http://www.hpbarnekow.com.br/biblioteca/ApostilaSoldagemTubulacoes.pdf> Acesso em: 14 ago. 2014.

GALLEGO, J.; VENTRELLA, V. A. Inclusões na formação da ferrita acicular: Caracterização por Microscopia Eletrônica de Transmissão. In: ABM, 2014, São Paulo. CONGRESSO ANUAL ABM, 69, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABM 2014. p. 1-10.

GARCIA, R. P; SCOTTI, A. Uma metodologia para Análises Comparativas da Capacidade Produtiva entre Arames Maciços (MIG/MAG) e Tubulares (Eletrodo Tubular). **Soldag. insp.** São Paulo, v.16, n.2, p.146-155, Abr/Jun 2011.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 247p.

HASHIMOTO, T.; MORIMOTO, T. Reduction of Spatter Generation on Gas Shielded Arc Welding from the Viewpoint of Welding Material. **Welding International**, v.21, i.5, p. 331-336, Out. 2007.

KAÇAR, R.; KOKEMLI, K. Effect of controlled atmosphere on MIG/MAG arc weldment properties. **Material & Design**. Surrey, v.26, n.6, p.508-516, 2005.

KOU, SINDO. **Welding Metallurgy**. 2.ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 461p.

LANCASTER, J. F. **Metallurgy of welding**. 6.ed. Woodhead Publishing, 1999. 464 p.

LANCASTER, J.F. **The Physics of Welding**. 2.ed. Pergamon Press & International Institute of Welding, 1986. 340p.

LAU, T. W.; SADOWSKI, M. M.; NORTH, T. H.; WEATHERLY, G. C.; Effect of nitrogen on properties of submerged arc weld metal. **Materials Science and Technology**, v.4, 1988, p. 52-61.

LINCOLN ELECTRIC. **GMAW Welding Guide**. 2006 Disponível em <
<http://weldinganswers.com/tag/welding/>> Acesso em 10 de setembro de 2014.

LIU. S.; SIEWERT, T.A. Metal transfer in gás metal arc welding: droplet rate. **Welding Journal Research Supplement**, p.53, 1989.

MACHADO, I. G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. 1996. 477p.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**. Ed. UFMG, Belo Horizonte, 2005. 362 p.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B.; **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte, janeiro de 2012 (Apostila).

MODENESI, P. J. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalurgia da UFMG, 1998. 141p.(Apostila).

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalurgia da UFMG, 2011. 26p.(Apostila).

MOREIRA, A. F., GALLEGOS, J., TOKIMATSU, R., YAMAKAKI, W. A caracterização de revestimentos soldados com arame tubular. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17, 2006, Foz do Iguaçu, **Anais...** p. 5330-5340.

MYERS, T. **Choosing a Shielding Gas for FCAW**. *Welding Journal*. 2010. Disponível em <http://files.aws.org/wj/2010/03/wj201003/wj0310-30.pdf> Acesso em 14 de agosto de 2014.

NORRISH, J. **Advanced welding processes**. Bristol: IOP, 1992. 375 p.

OLIVEIRA, B. V. **Desenvolvimento, construção e montagem de equipamento para fabricação do arame tubular para soldagem**. Monografia (Graduação) - Engenharia Mecânica, UFMG. Belo Horizonte, 2010.

PARIS, A. F.; MULAZZANI, F.; PARIS, J.F. Estudo microestrutural de aço carbono soldado com o processo arco submerso e adições de Fe-Ti. **Soldag. insp.** São Paulo. v.17, n.1, p.58-64, Jan./Mar. 2012.

QUITES, A. M. **Introdução à Soldagem a Arco Voltaico**. Soldasof, Florianópolis, 2002. 352p.

RODRIGUES, L. O.; **Análise e Otimização de Parâmetros na Soldagem com Arame Tubular**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

SANTIAGO, G. H.; VAZ, C. T.; BRACARENSE, A. Q.; Avaliação da influência do teor de polímero sobre as propriedades do metal de solda produzido com eletrodos impermeáveis. In: CONSOLDA – ABS 38, 2012. Ouro Preto, **Anais...** Ouro Preto: ABS, 2012.

SOUZA, C. I.; FERRARESI, V. A. Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal. **Soldag. insp.** v.18 n.3 São Paulo Jul/Set. 2013

STRANGWOOD, M.; BHADESHIA, H. K. D. H.; The mechanism of acicular ferrite formation in steel weld deposits. **Advances in Welding Technology and science**, 1987, p. 209-213.

STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J.; BORBA, T. M. D. Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular “Metal Cored”. **Soldag. insp.** São Paulo, v.16, n. 3, p.285-300, Jul/Set 2011.

STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J.; BORBA, T. M. D. Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular Rutilico. **Soldag. insp.** São Paulo, v.14, n.4, p.298-312, Out/Dez 2009.

TATAGIBA, L. C. S.; GONÇALVES, R. B.; PARANHOS, R. Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem MIG/MAG. **Soldag. insp.** v.17, n.3, São Paulo Jul/Set. 2012.

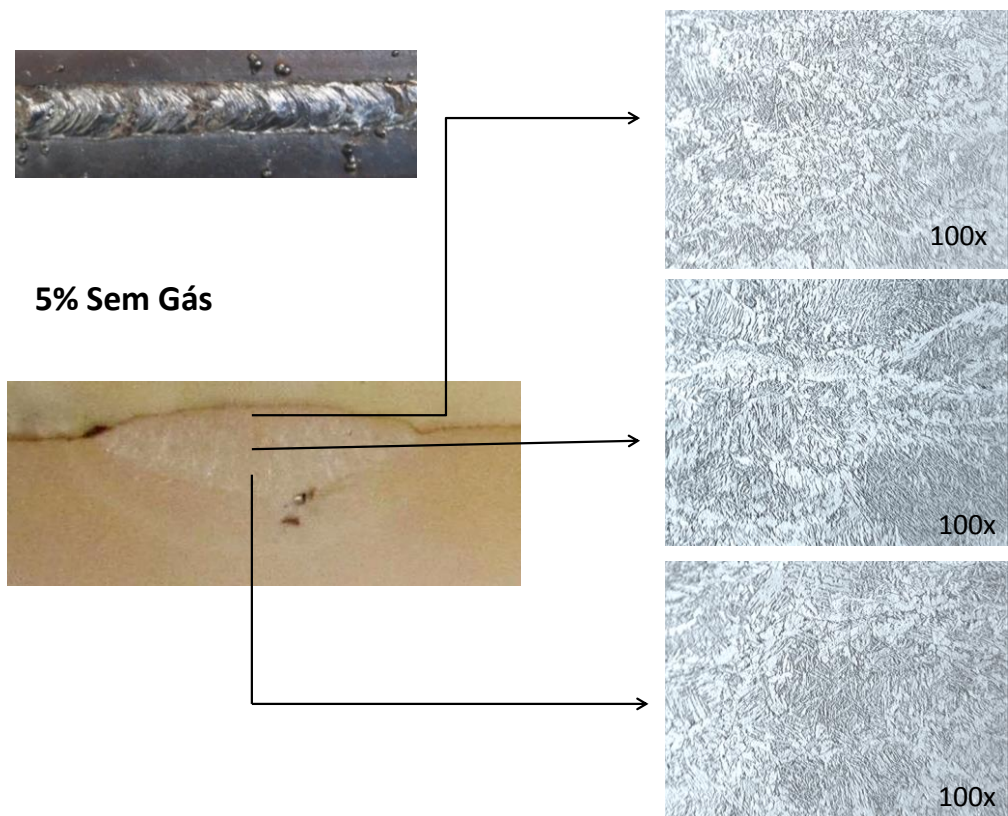
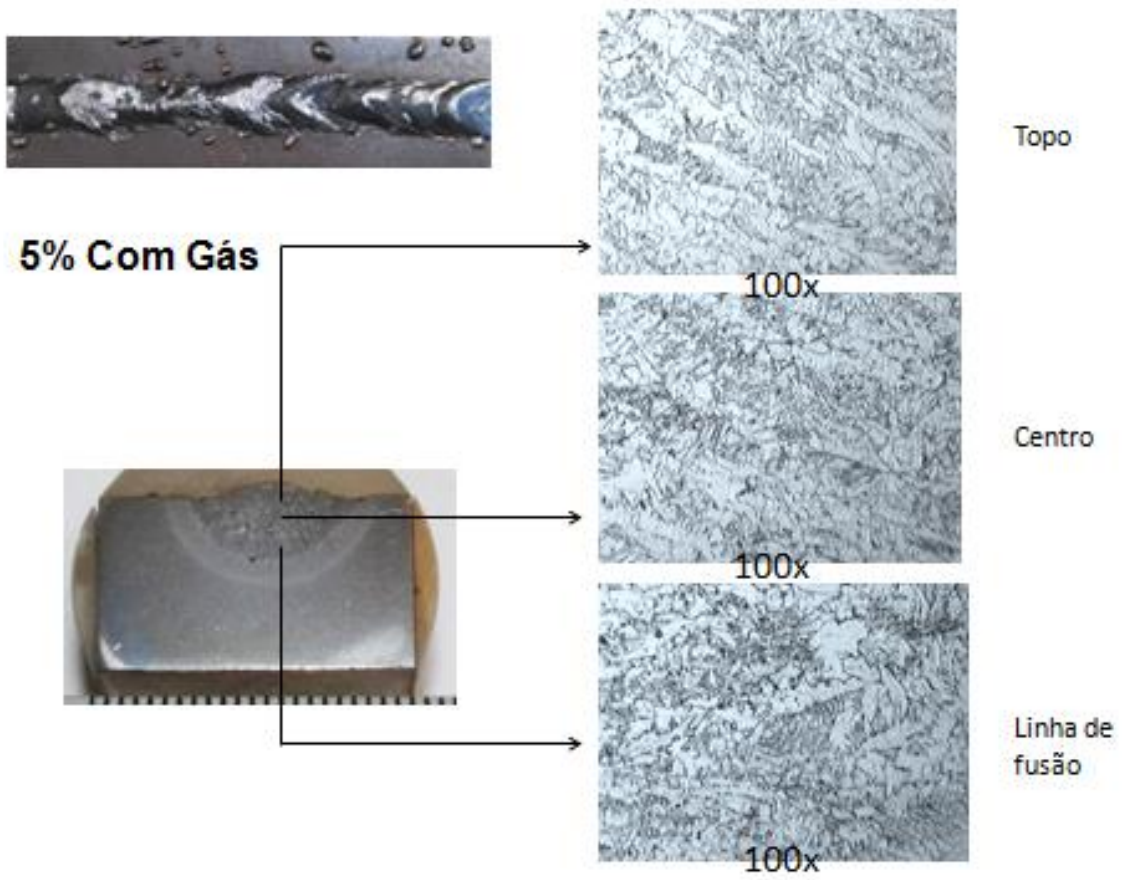
VAZ, C. T. **Influência do polímero utilizado como aglomerante em eletrodos revestidos básicos sobre a formação de ferrita acicular no metal de solda**. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica, UFMG. 2014.

VAZ, C. T.; BRACARENSE, A. Q.; FELIZARDO, I.; PESSOA, E. C.P. Desenvolvimento de Eletrodos Revestidos do Tipo Baixo Hidrogênio Impermeáveis. In: CONSOLDA – ABS, 36, 2010, Recife, **Anais...** Recife: ABS, 2010.

VAZ, C. T.; BRACARENSE, A. Q. Influência do uso de PTFE como aglomerante em eletrodos revestidos básicos sobre a formação de ferrita acicular no metal de solda. **Soldag. Insp.** São Paulo, v.19, n.2, p.177-189, Abr/Jun 2014.

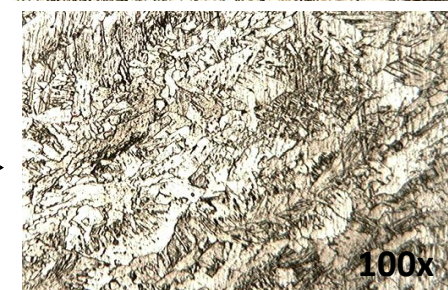
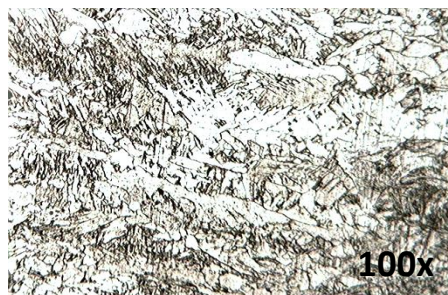
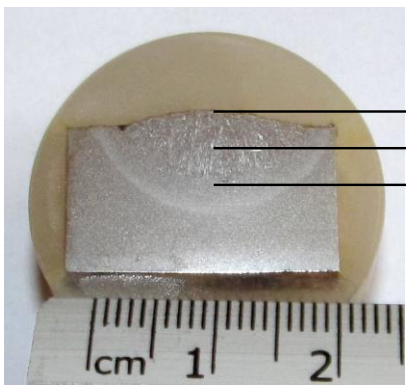
WANG, Z.; GONG, B. **Residual stress in the forming of materials**. In: G.E. TOTTEN; M.A.H. HOWES; T. INOUE, Handbook of residual stress and deformation of steel. Materials Park, ASM International, p.141-149. 2002.

ANEXO I

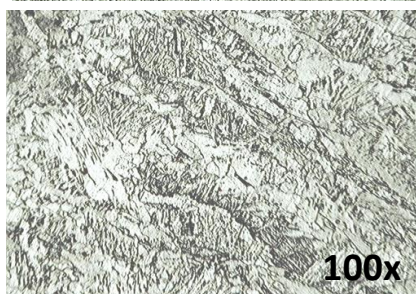
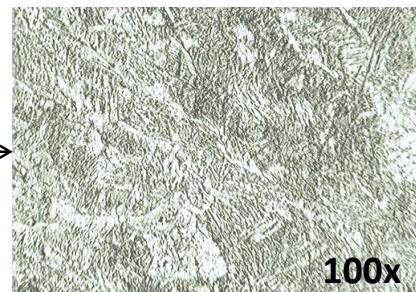
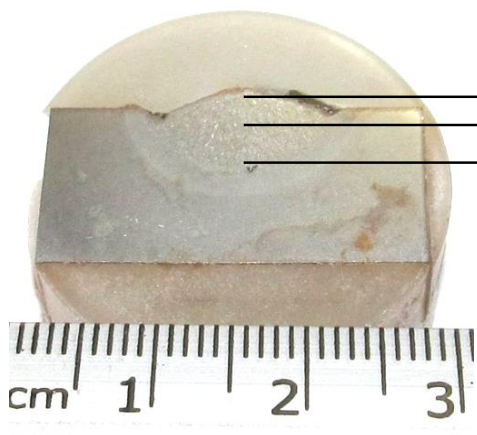




10% Com Gás

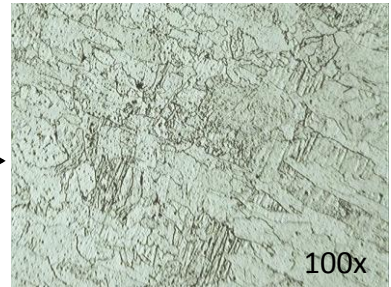
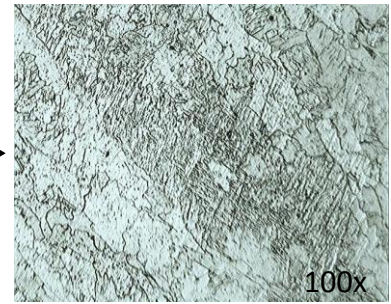
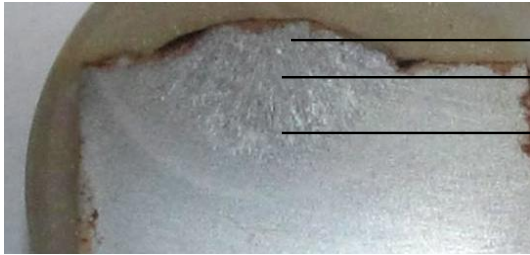
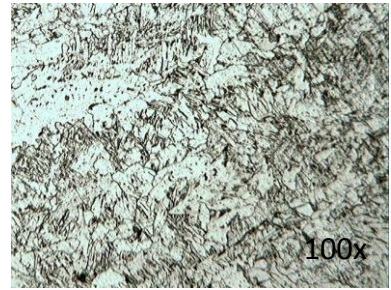


10% Sem Gás

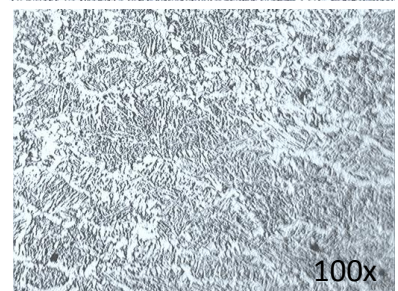
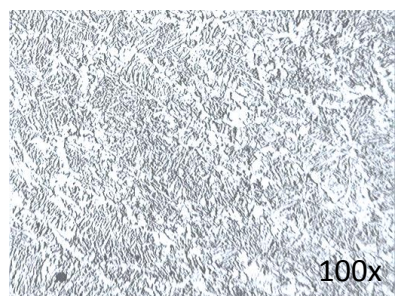
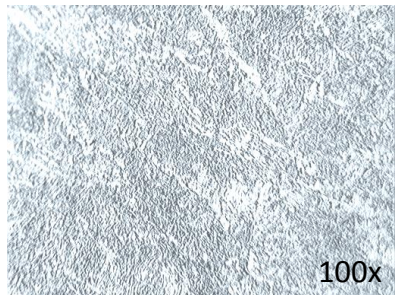




15% Com Gás

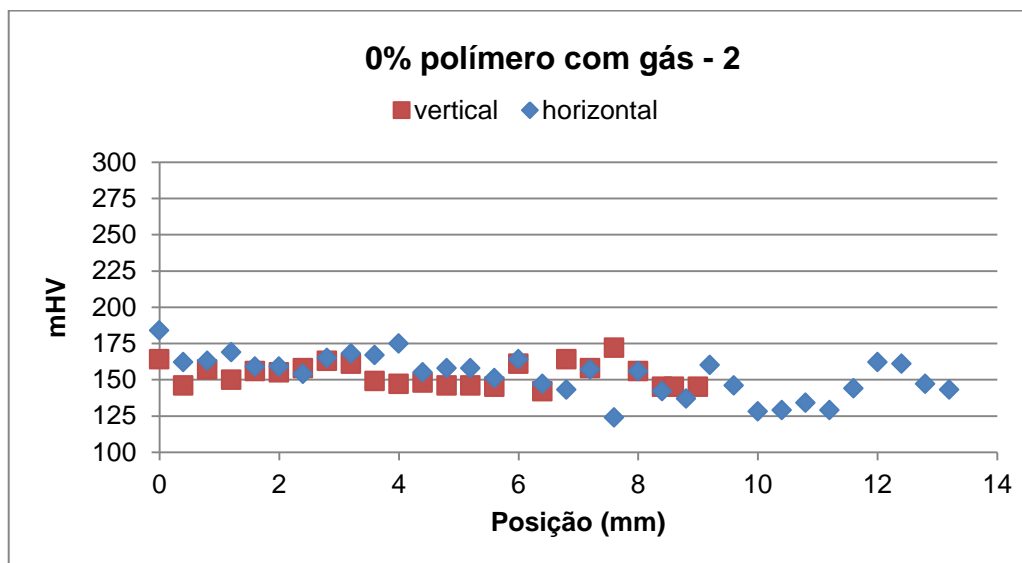
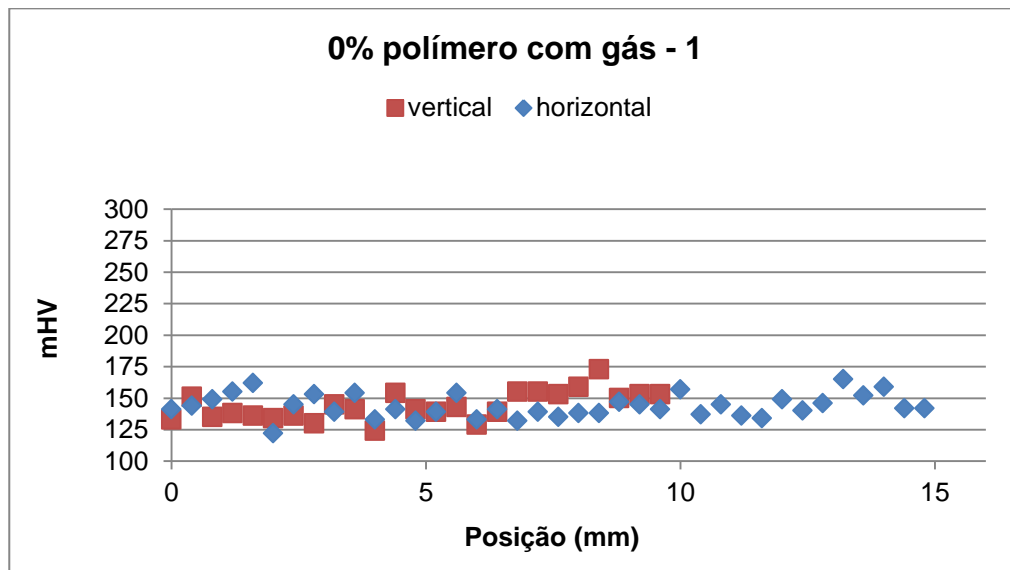


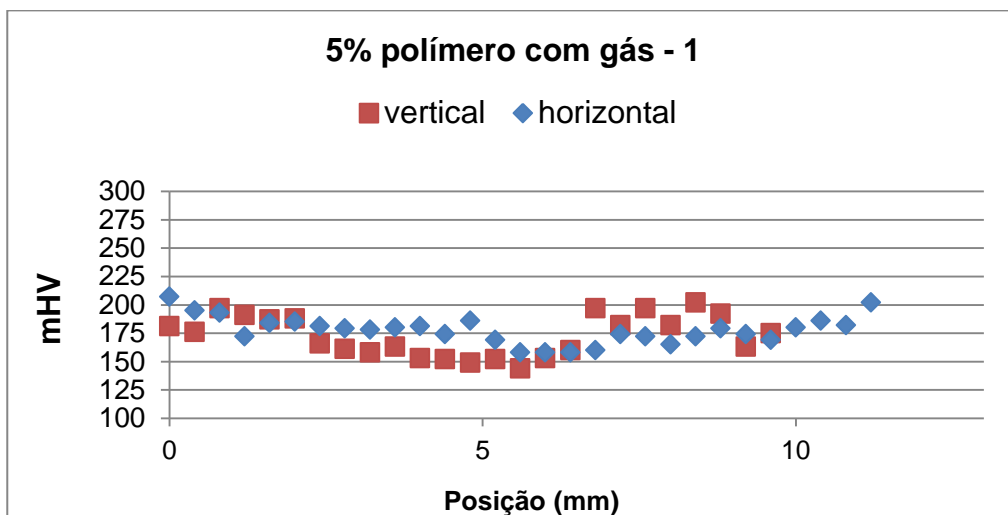
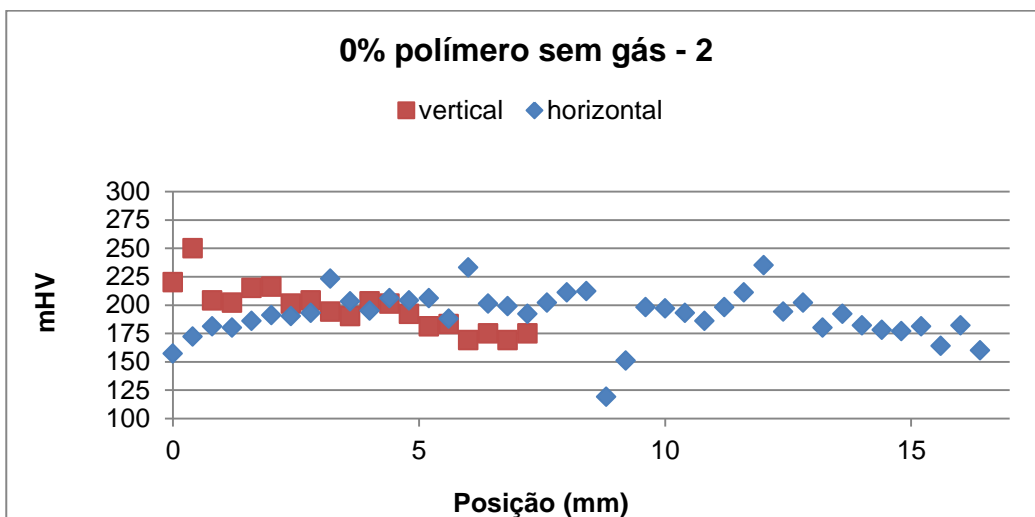
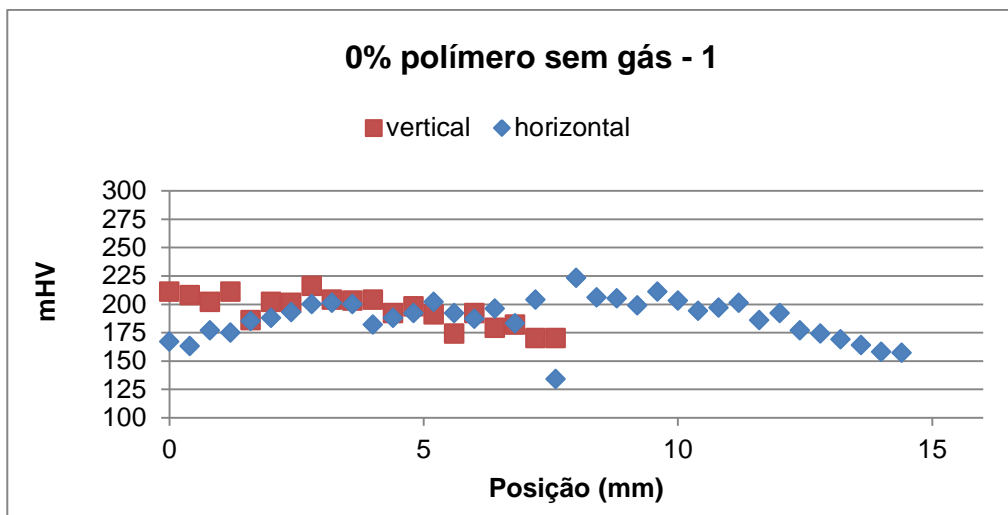
15% Sem Gás

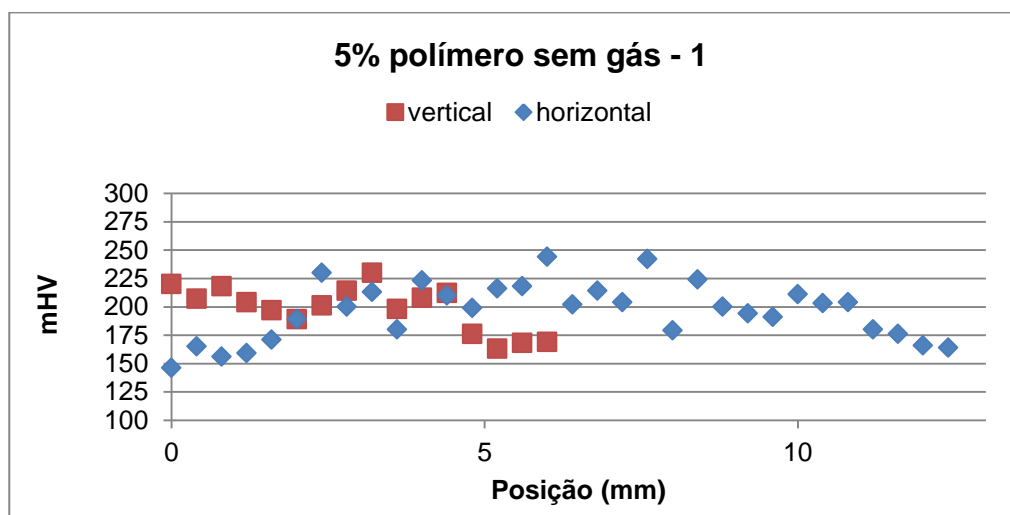
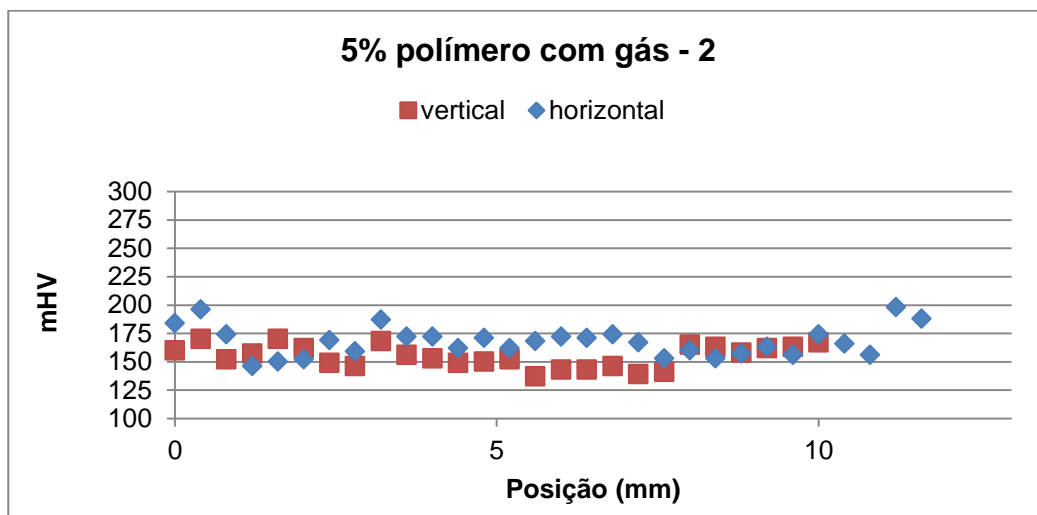
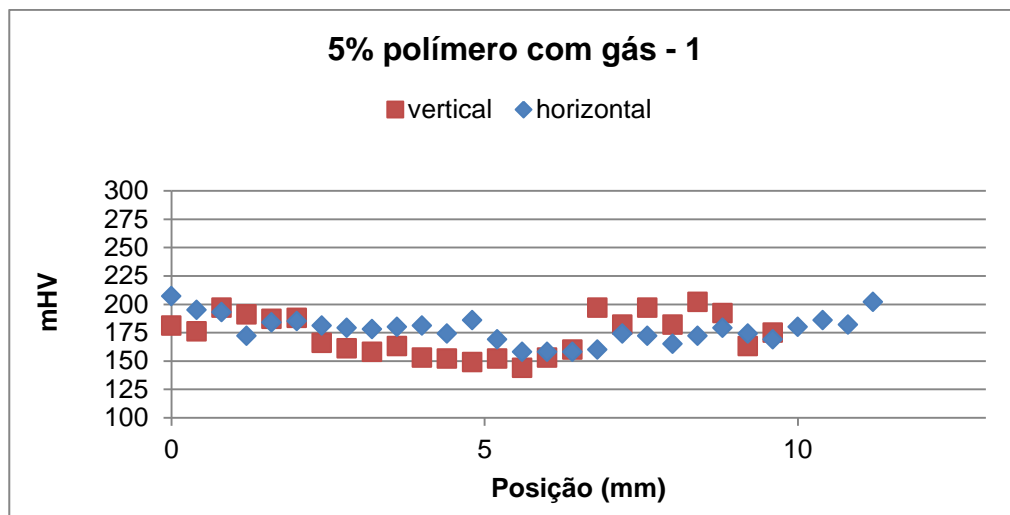


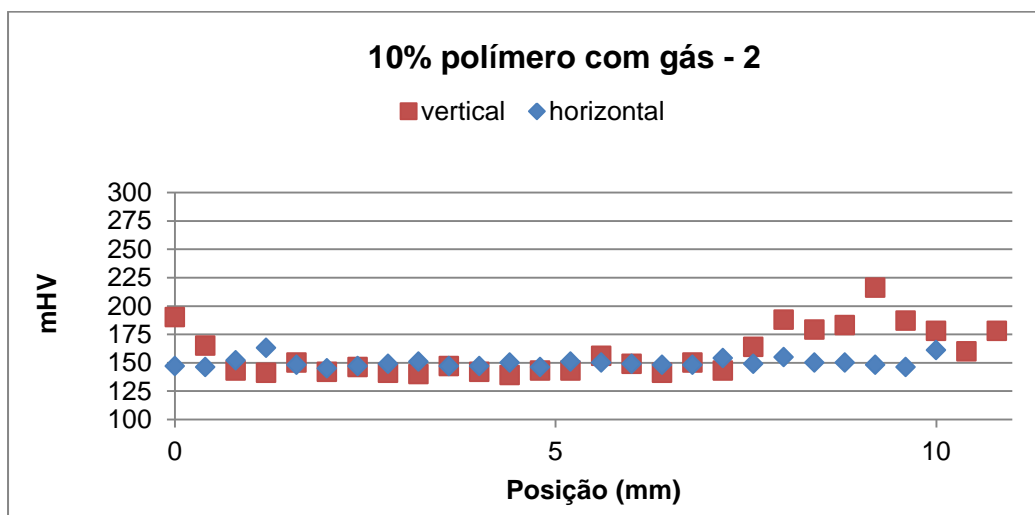
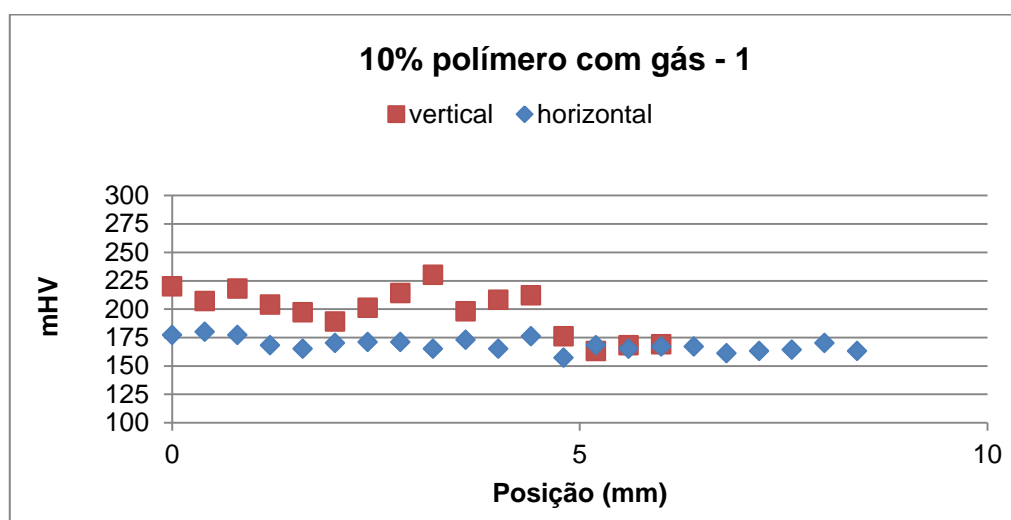
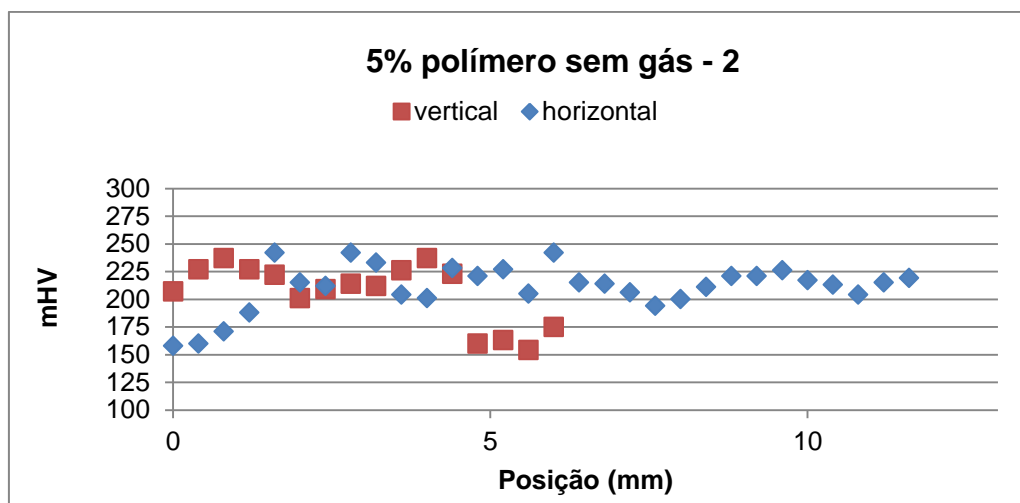
ANEXO II

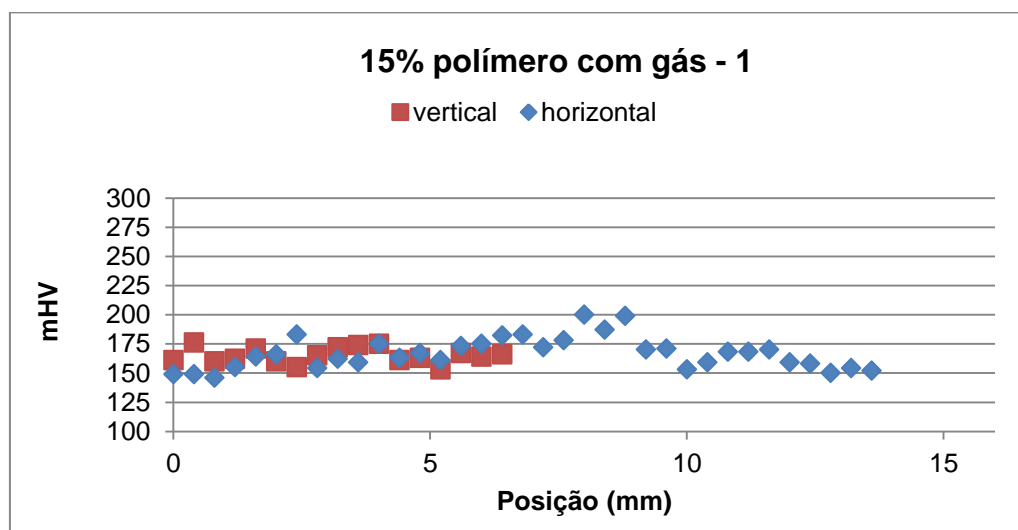
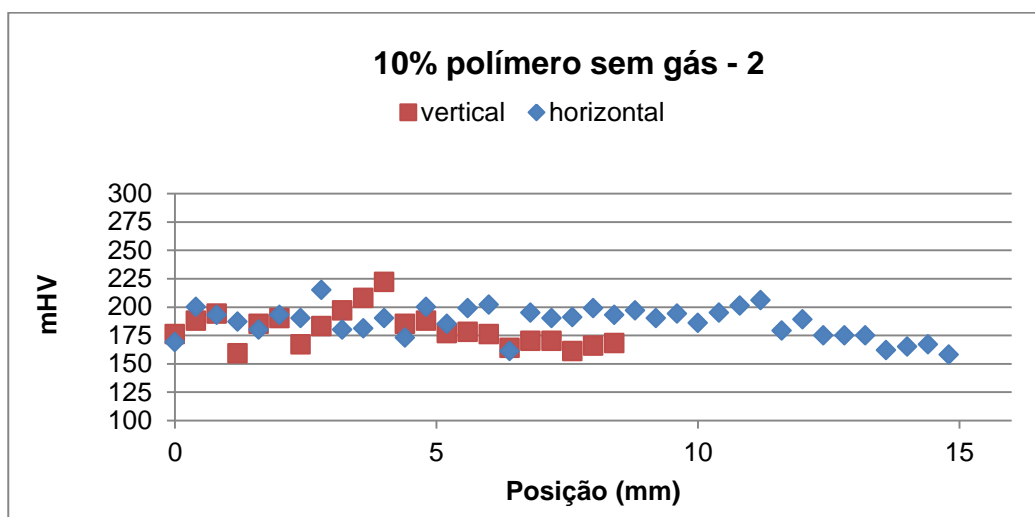
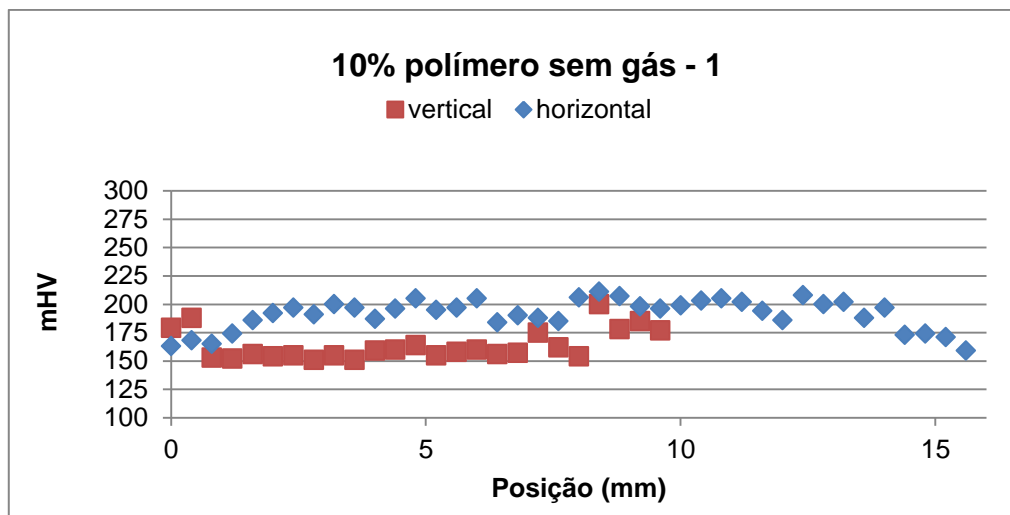
Microdureza das amostras dos pré-testes

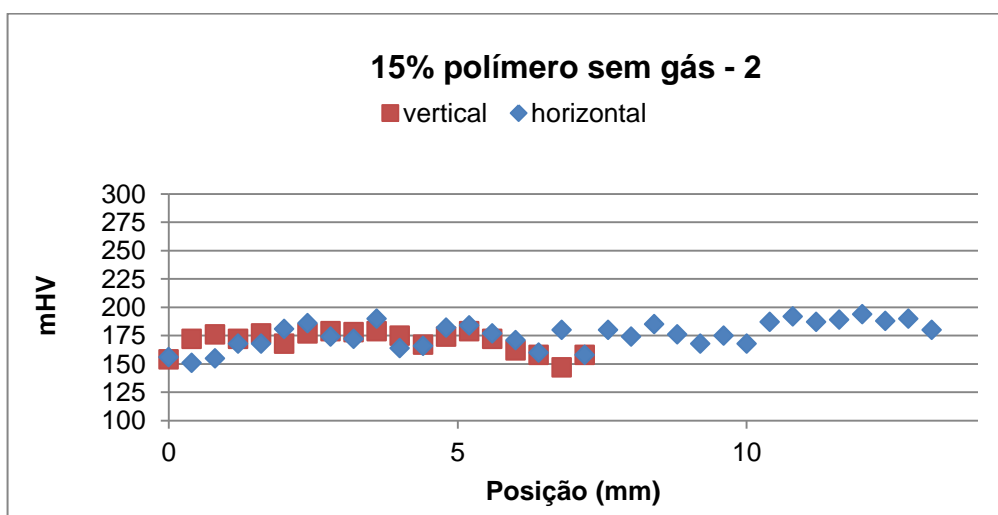
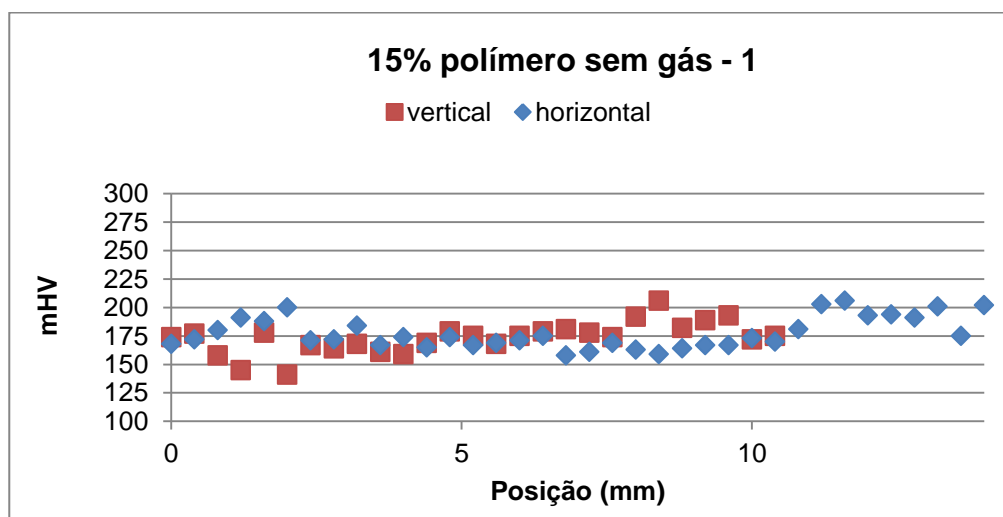
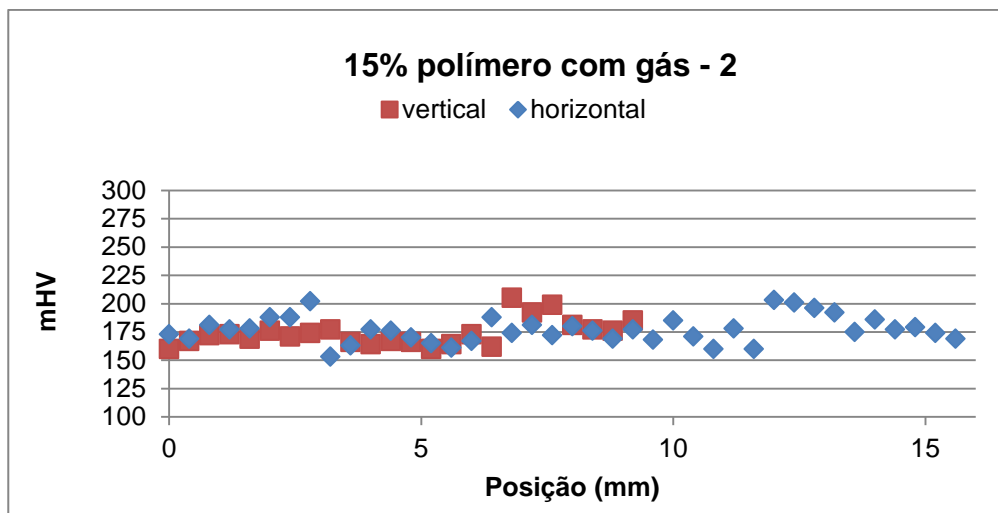


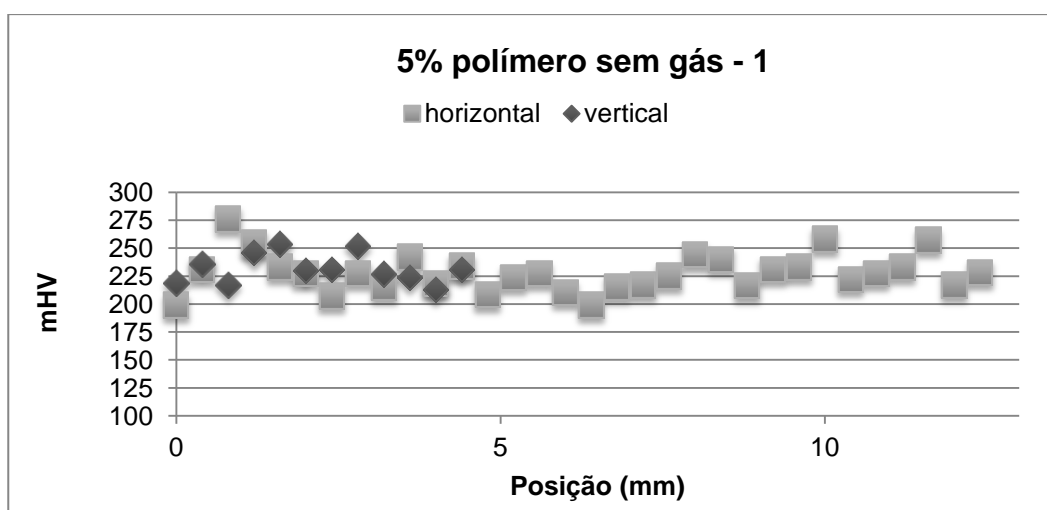
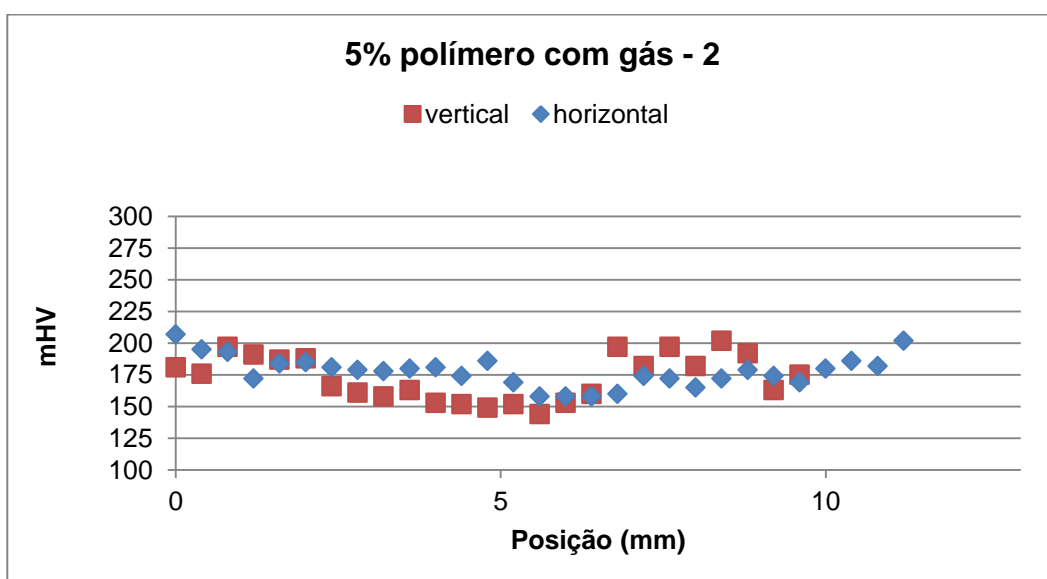
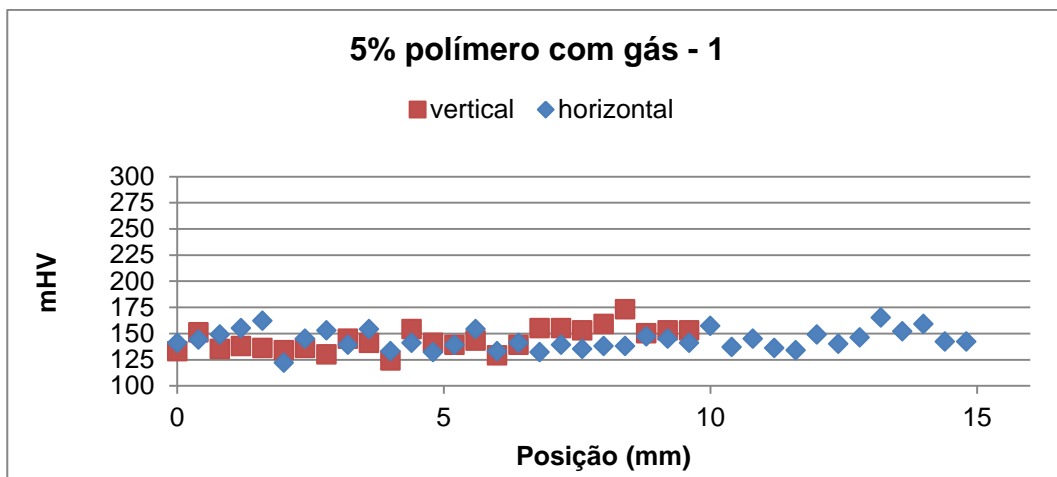


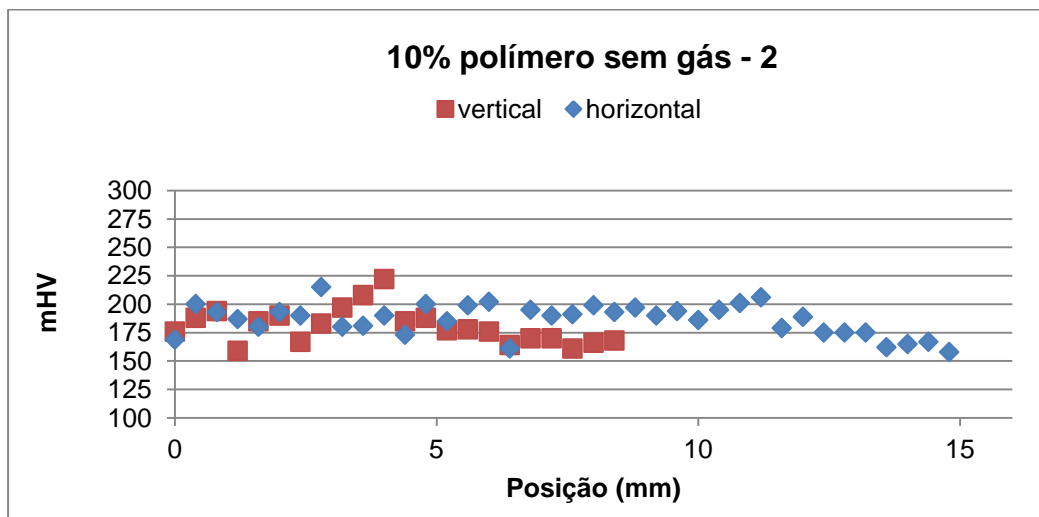
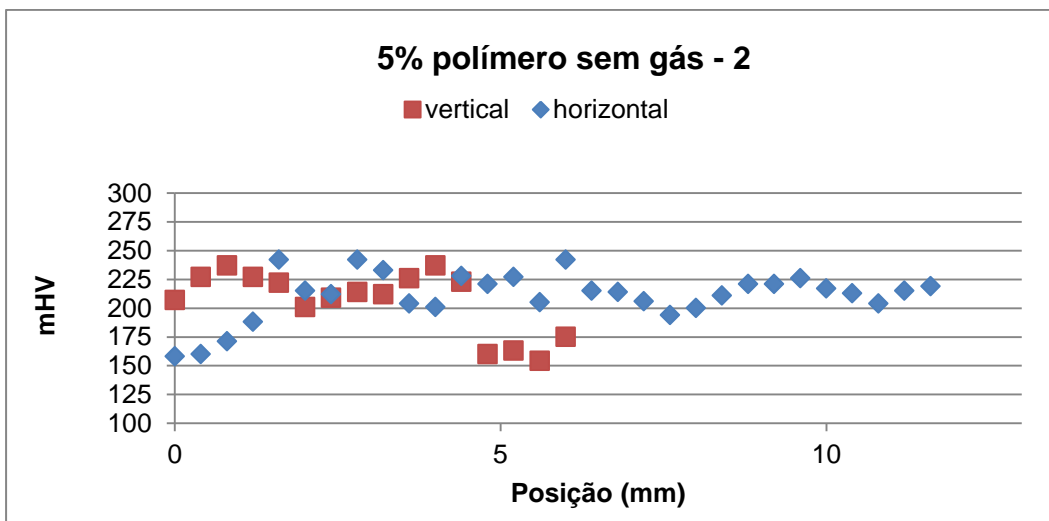




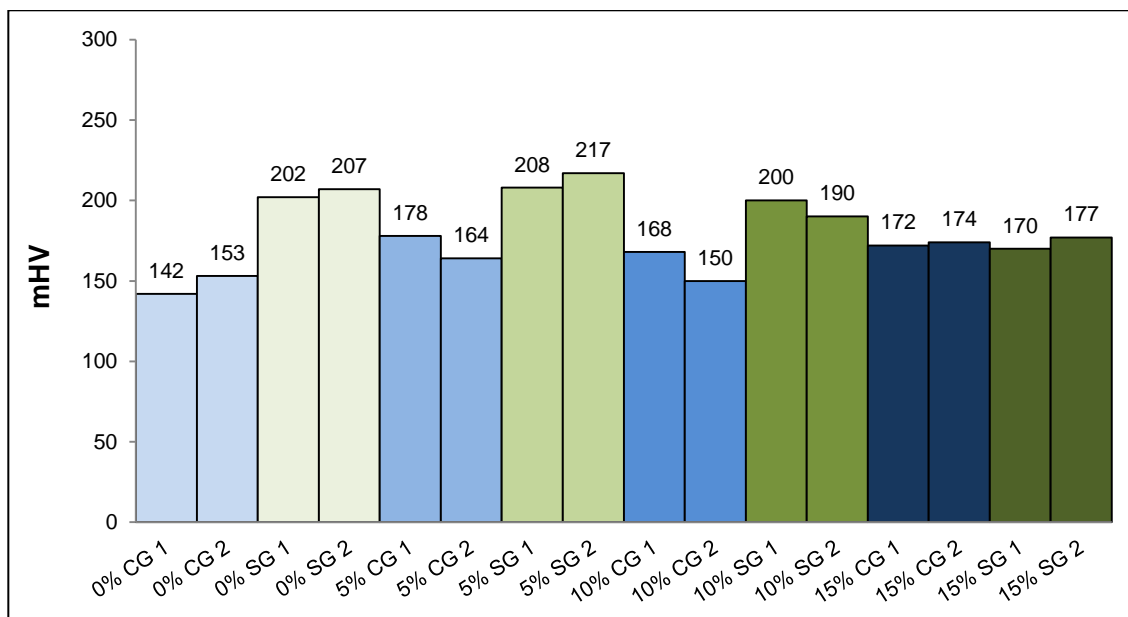








Média dos valores de microdureza dos pré-testes



Microdureza das amostras dos testes principais

