



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação de Mestrado

**“ANÁLISE DOS EFEITOS DOS SEMIÂNGULOS DE FIEIRA DE TREFILAÇÃO
UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE ARAMES SÓLIDOS NA ESTABILIDADE DO
PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW”**

Autor: Márcio Luiz de Moura

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

Co-orientadora: Prof^a. Elaine Carballo Siqueira Corrêa, Dra.

Belo Horizonte
Fevereiro/2014

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais

Márcio Luiz de Moura

**“ANÁLISE DOS EFEITOS DOS SEMIÂNGULOS DE FIEIRA DE TREFILAÇÃO
UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE ARAMES SÓLIDOS NA ESTABILIDADE DO
PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW”**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET - MG, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Transformação Mecânica

Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização

ORIENTADORA: Prof^a. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa, Dra.

CO-ORIENTADORA: Prof^a. Elaine Carballo Siqueira Corrêa, Dra.

Belo Horizonte
Fevereiro / 2014

Moura, Márcio Luiz.

M929a Análise dos efeitos dos semiângulos de fiação utilizados na fabricação de arames sólidos na estabilidade do processo de soldagem GMAW / Márcio Luiz Moura. - 2014.

104 f. : il. ; tabs. ; graf. –

Orientadora: Maria Celeste Monteiro de Souza Costa.

Co-orientadora: Elaine Carballo Siqueira Corrêa.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2014.

Bibliografia.

1. Soldagem. 2. Soldagem MIG. 3. Conformação mecânica. I. Costa, Maria Celeste Monteiro de Souza. II. Corrêa, Elaine Carballo Siqueira. II. Título.

CDD: 620.11

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores do curso de Mestrado em Engenharia de Materiais do CEFET-MG. Em especial às minhas orientadoras pelo carinho e dedicação.

RESUMO

A produção de arames sólidos no Brasil, utilizados no processo de soldagem GMAW, tem crescido a cada ano uma vez que este processo de soldagem tem a característica de aumentar a produtividade industrial. Porém, com o crescimento do consumo deste material, vem também a necessidade de produzir arames de melhor qualidade, pois os equipamentos para a soldagem GMAW estão em constante evolução, fornecendo para o mercado industrial equipamentos com controle eletrônico, com técnicas de controle da transferência de metal e da estabilidade operacional além da formação do cordão de solda. Contudo, o processo de soldagem GMAW é caracterizado por uma forte interdependência de seus parâmetros operacionais e uma grande sensibilidade às pequenas variações em suas condições operacionais. Estas características tendem a dificultar a reprodução das condições de soldagem e podem levar, em algumas situações, ao aparecimento de condições de instabilidade e de difícil controle do processo. Uma variável ainda pouco estudada é a influência do processo de fabricação do arame na estabilidade do processo de soldagem GMAW. Neste trabalho é apresentado um estudo que envolve a caracterização e a análise do desempenho do arame no processo de soldagem GMAW através do monitoramento do processo produtivo do mesmo.

Palavras-chave: Soldagem. GMAW. Feira.

ABSTRACT

The production of solid wires in Brazil used in GMAW welding process has grown each year since this welding process has the characteristic of increasing industrial productivity. However, with the growth in consumption of material, also comes the need to produce better quality wires once the equipment for GMAW welding are constantly evolving, providing equipment for the industrial market with electronic control, with technical control of the transfer metal, with technical control of operational stability and the formation of the weld bead. However, the GMAW welding process is characterized by a strong interdependence of its operating parameters and a great sensitivity to small changes in their operating conditions. These features tend to hinder the reproduction of welding conditions and can lead, in some situations, the emergence of conditions of instability and difficult to control the process. A variable is still little studied the influence of manufacturing process on the stability of the wire GMAW welding process. In this work a study involving the characterization and analysis of the performance of the wire in GMAW welding process by monitoring the production process of the same is presented.

Keywords: Welding. GMAW. Process. Spinneret.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3. 1 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW	17
FIGURA 3. 2 – PERFIS DE PENETRAÇÃO E DE TRANSFERÊNCIA TÍPICOS EM SOLDAGEM GMAW COM ALGUNS GASES DE PROTEÇÃO.....	21
FIGURA 3. 3 – VARIAÇÃO DA TENSÃO DO ARCO GTAW COM CORRENTE DE 100A E COMPRIMENTO DE ARCO DE 1,6MM PARA AS MISTURAS GASOSAS: AR-He, AR-H ₂ E He-H ₂	22
FIGURA 3. 4 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS GASES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	22
FIGURA 3. 5 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA QUEDA DE TENSÃO AO LONGO DE UM ARCO. (A) ZONA DE QUEDA CATÓDICA; (B) COLUNA DO ARCO E (C) ZONA DE QUEDA ANÓDICA. LA – COMPRIMENTO DO ARCO.	24
FIGURA 3. 6 - BALANÇO ESTÁTICO DAS FORÇAS ATUANTES NA GOTA	27
FIGURA 3. 7– MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE ACORDO COM A CLASSIFICAÇÃO DO IIW.....	31
FIGURA 3. 8 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PRINCÍPIO DA SHADOWGRAFIA APLICADO NA SOLDAGEM	32
FIGURA 3. 9 – SINAIS DE TENSÃO, CORRENTE E SOM SINCRONIZADO COM O SINAL DA CÂMERA.	33
FIGURA 3. 10 – SEQUENCIA DE QUADROS DA FILMAGEM DE ALTA VELOCIDADE EM SINCRONISMO COM OS OSCILOGRAMAS DE CORRENTE E TENSÃO DE SOLDAGEM, OBTIDOS COM O PROCESSO MIG-MAG COM TRANSFERÊNCIA DO TIPO GLOBULAR.....	33
FIGURA 3. 11 – 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)	34
FIGURA 3. 12 – OSCILOGRAMAS DE TENSÃO E CORRENTE DE UM PROCESSO COM TRANSFERÊNCIA GLOBULAR. ARAME ER 70S6 DE 1,2MM DE DIÂMETRO, GÁS CO ₂	36
FIGURA 3. 13 – TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO	37
FIGURA 3. 14 - RESULTADO TÍPICO DE TESTES USANDO TENSÃO CONSTANTE	42
FIGURA 3. 15 – VALORES DE TENSÃO PARA DIFERENTES CTWD (H) OBTIDOS NOS TESTES COM CORRENTE CONSTANTE (ARGÔNIO PURO E CORRENTE DE 260A).....	43
FIGURA 3. 16 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA REGIÃO DO ARCO NO PROCESSO MIG	44
FIGURA 3. 17 – AUMENTO ANORMAL NA TENSÃO DO ARCO APÓS A MUDANÇA DE POLARIDADE DO POSITIVO PARA O NEGATIVO NA SOLDAGEM MIG COM INVERSÃO DE POLARIDADE ..	46
FIGURA 3. 18 – A OXIDAÇÃO DO AÇO EM ALTA TEMPERATURA	47
FIGURA 3. 19 - TIPOS E ÓXIDOS NA CAREPA DOS AÇOS	47
FIGURA 3. 20 – LIMPEZA MECÂNICA INDUSTRIAL.....	49
FIGURA 3. 21 – DECAPAGEM QUÍMICA	50
FIGURA 3. 22 – CAMADA DE LUBRIFICAÇÃO ESPESSA	53
FIGURA 3. 23 – ESPESSURA DA LUBRIFICAÇÃO NA TREFILAÇÃO.....	53
FIGURA 3. 24 – NÚCLEO DE WC EM CARÇA DE AÇO CARBONO	54
FIGURA 3. 25 – TENSÕES SOBRE O NÚCLEO DE WC	55
FIGURA 3. 26 – REGIÕES DA FIEIRA	57
FIGURA 3. 27 – BLOCO ROTATIVO DE TREFILAÇÃO.....	59
FIGURA 3. 28 – ILUSTRAÇÃO DE CAST	61
FIGURA 3. 29 – ILUSTRAÇÃO DE HELIX.....	62
FIGURA 4. 1 – FLUXOGRAMA DO TRABALHO EXPERIMENTAL DESENVOLVIDO	63
FIGURA 4. 2 – FORMA DE MEDIR O DIÂMETRO REAL DO ARAME CONFORME NORMA AWS SFA-5.19.....	70

FIGURA 4. 3 - MEDIÇÃO DO CAST DE ACORDO COM A NORMA SFA-5.18	71
FIGURA 4. 4 - MEDIÇÃO DO HELIX DE ACORDO COM A NORMA SFA-5.18.....	72
FIGURA 4. 5 - DEMONSTRAÇÃO DA MEDIÇÃO DA TORÇÃO RESIDUAL ().....	73
FIGURA 4. 6 - MODELO DE IDENTIFICAÇÃO DOS BICOS DE CONTATO	76
FIGURA 5. 1 – SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA DE SEMIÂNGULO 4° SCS.....	78
FIGURA 5. 2 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 6° SCS	78
FIGURA 5. 3 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 9° SCS	79
FIGURA 5. 4 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 12° SCS	79
FIGURA 5. 5 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 14° SCS	79
FIGURA 5. 6 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 16° SCS	80
FIGURA 5. 7 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 4° SCL.....	80
FIGURA 5. 8 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 6° SCL.....	81
FIGURA 5. 9 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 9° SCL.....	81
FIGURA 5. 10 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 12° SCL.....	81
FIGURA 5. 11 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 14° SCL.....	82
FIGURA 5. 12 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 16° SCL.....	82
FIGURA 5. 13 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 4° CSP	83
FIGURA 5. 14 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 6° CSP	83
FIGURA 5. 15 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 9° CSP	83
FIGURA 5. 16 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 12° CSP	84
FIGURA 5. 17 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 14° CSP	84
FIGURA 5. 18 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 16° CSP	84
FIGURA 5. 19 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 4° CP.....	85
FIGURA 5. 20 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 6° CP.....	85
FIGURA 5. 21 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 9° CP.....	86
FIGURA 5. 22 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 12° CP.....	86
FIGURA 5. 23 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 14° CP.....	86
FIGURA 5. 24 - SUPERFÍCIE DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 16° CP.....	87
FIGURA 5. 25 - ADERÊNCIA DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 40°	90
FIGURA 5. 26 - ADERÊNCIA DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 6°	90
FIGURA 5. 27 - ADERÊNCIA DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 9°	90
FIGURA 5. 28 - ADERÊNCIA DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 12°	91
FIGURA 5. 29 - ADERÊNCIA DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 14°	91
FIGURA 5. 30 - ADERÊNCIA DO ARAME COM FIEIRA SEMIÂNGULO 16°	91
FIGURA 5. 31 – PRINCIPAIS EFEITOS NO TEMPO DE SOLDAGEM.....	94
FIGURA 5. 32 – SOLDAGEM (MIN) VS SEMIÂNGULO E RESIDUO (GM ²).....	95
FIGURA 5. 33 – SOLDAGEM (MIN) VS SEMIÂNGULO E RUGOSIDADE	95
FIGURA 5. 34 – RUGOSIDADE VS SEMIÂNGULO.....	96

LISTA DE TABELAS

TABELA 3. 1 – CONSTANTES FÍSICAS DOS GASES DE PROTEÇÃO	20
TABELA 3. 2 – FORMAS USUAIS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA DE ACORDO COM O IIW.	30
TABELA 3. 3 – FÓRMULA, DUREZA E COR CARACTERÍSTICA DOS ÓXIDO	48
TABELA 3. 4 – RESISTÊNCIA WC X TREFILADO (CETLIN, 2007).....	55
TABELA 3. 5 – VALOR DE DELTA EM FUNÇÃO DO SEMIÂNGULO DA FIEIRA.....	58
TABELA 4. 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO	64
TABELA 4. 2 – ESPECIFICAÇÃO DE FIEIRAS	64
TABELA 4. 3 - VALORES DE CAST EM FUNÇÃO DO TIPO DE EMBALAGEM E DA BITOLA DO ARAME,	71
TABELA 4. 4 - VALORES DO HELIX SEGUNDO AWS SFA-5.18.....	72
TABELA 4. 5 - QUANTIDADE DE ARAME A SER DESCARTADO EM FUNÇÃO DA MASSA INICIAL E BITOLA DO ARAME DA BOBINA	73
TABELA 4. 6 - VELOCIDADES DE ALIMENTAÇÃO E DE SOLDAGEM E CORRENTES NOMINAIS PADRONIZADAS EM FUNÇÃO DA BITOLA DE ARAME	75
TABELA 4. 7 - DIMENSÕES DOS BICOS DE CONTATO INDICADOS PARA CADA NÍVEL CORRENTE	76
TABELA 5. 1 – RUGOSIDADE MÉDIA.....	88
TABELA 5. 2 – CAMADA RESIDUAL.....	89
TABELA 5. 3 – RESULTADO DAS CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS E PADRÕES DE SOLDAGEM	93

LISTA DE ABREVIATURAS

- GMAW - Gas Metal Arc Welding
 - CP - Superfície com cobre com polimento
 - CSP - Superfície com cobre sem polimento
 - E - Campo elétrico na coluna do arco
- GTAW - Gas Tungsten Arc Welding
 - I_a - Comprimento do arco
 - SCL - Superfície sem cobre e limpa
 - SCS - Superfície sem cobre e suja
 - V - Diferença de potencial
 - V_a - Queda de potencial no ânodo
 - V_c - Queda de potencial no cátodo

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
OBJETIVOS	15
2.1. Objetivo Geral	15
2.2. Objetivos Específicos	15
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1. Processo de soldagem	16
3.1.1. Processo de Soldagem MIG/MAG ou GMAW	16
3.1.2. Gases de Proteção.....	18
3.1.2.1. Características dos Gases de Proteção	19
3.1.3. Arco Elétrico	23
3.1.4. - Transferência Metálica	26
3.1.4.1 - Teoria do equilíbrio das forças estáticas	27
3.1.4.2. Classificação dos modos de transferência metálica	29
3.1.4.3. Métodos de identificação dos modos de transferência metálica	30
3.1.4.4 - Tipos de transferência de metal no processo GMAW	32
3.1.5. Estabilidade	38
3.1.5.1 - Estabilidade operacional do processo	38
3.1.5.2. Estabilidade operacional no processo GMAW	39
3.1.6. Instabilidade no processo GMAW	40
3.2. Processo de Fabricação de Eletrodos.....	46
3.2.1. Tratamento de superfície do fio máquina	46
3.2.1.1. Limpeza Mecânica.....	48
3.2.1.2. Decapagem Química.....	50
3.2.2. Trefilação.....	51
3.2.2.1 Tipos de lubrificação.....	52
3.2.2.2 Fieiras.....	54
3.2.2.3 Máquinas de Trefilar.....	58
3.2.3. Retrefilação Úmida.....	59
3.2.4. Cobreamento.....	59
3.2.5. Acondicionamento	60
3.2.5.1 Cast.....	60

3.2.5.2 Helix	61
4. METODOLOGIA.....	63
4.1 Materiais.....	63
4.1.1 Eletrodo.....	63
4.1.2 Fieiras para fabricação do arame.....	64
4.2 Bancada para a execução dos testes de soldagem	65
4.3 Análises da Superfície do Material Trefilado	66
4.3.1 MEV.....	66
4.3.2 Teste de rugosidade.....	66
4.3.3 Teste de resíduo	67
4.3.4 Teste de aderência.....	68
4.3.5 Testes de soldagem	68
4.3.5.1 Metal de base para os testes de soldagem	69
4.3.5.2 Caracterização dos arames.....	70
4.3.5.3 Pré-ajuste de pressão do arame da bobina.....	73
4.3.5.4 Deposição do Cordão.....	74
5. RESULTADOS E DISCUSÕES.....	78
5.1 Caracterização microestrutural da superfície do arame	78
5.2 Resultados do teste de Rugosidade.....	87
5.3 Resultados do teste de resíduo.....	88
5.4 Resultados do teste de Aderência.....	90
5.5 Resultados do teste de Soldagem.....	92
5.6 Discussões Gerais	94
6. CONCLUSÕES	97
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

INTRODUÇÃO

O mercado de fabricação de arames sólidos para a soldagem passa frequentemente por reclamações quanto à trepidação do arame, à colagem do arame no bico de contato e à instabilidade do arco elétrico, outras. O fato é que estas reclamações são pertinentes porque os problemas dentro acontecem e raramente o seu diagnóstico é passado de forma satisfatória ou definitiva para os clientes. Logo, diante dessas reclamações constantes é preciso evoluir em conhecimento científico para se propor melhorias contínuas de efeito e eliminar a causa dos problemas.

O processo produtivo de arames para a soldagem GMAW possui uma série de etapas de fabricação e em sua maioria corresponde às normas que orientam as especificações para colocar este tipo de produto no mercado. Algumas substâncias presentes na superfície do arame, provenientes do processo de fabricação podem, de fato, interferir no desempenho da soldagem feita com o processo GMAW. Como em qualquer outro processo de soldagem, o processo GMAW possui suas particularidades. De acordo com Costa (2006), o processo de regulagem das variáveis de soldagem do processo GMAW é mais sensível e mais complexo (em comparação com a soldagem com eletrodos revestidos) à variação de seus parâmetros operacionais logo, devem ser ter alguns cuidados para que o cordão de solda não apresente falta de fusão, falta de penetração, porosidade, mordeduras e outros defeitos comuns em solda.

Durante o processo produtivo dos arames sólidos para a soldagem GMAW existem alguns fatores que podem realmente colaborar para diminuir a capacidade de soldabilidade do mesmo. Neste sentido é importante que seja tomadas algumas decisões como: decapagem química ou mecânica do fio máquina, utilizar trefilação seca ou combinar com a trefilação úmida, cobrear o arame em linha com a trefilação, utilizar instalação de cobreamento independente e até mesmo melhorar a especificação de ferramentas para a conformação dos arames.

Este trabalho buscou caracterizar e avaliar o desempenho do arame no processo de soldagem GMAW através do monitoramento do processo produtivo do mesmo. O monitoramento foi feito através das análises de todas as etapas de fabricação do

arame, de como é a sua exposição e em quais substâncias químicas eles são submetidos, quais ferramentas e equipamentos utilizados para conformação mecânica e até mesmo o tempo de fabricação.

Através do uso de técnicas de soldagem bem definidas e uma avaliação minuciosa de todos os pontos importantes que influenciam no processo de soldagem GMAW, o estudo proposto permitiu visualizar e caracterizar as principais variáveis do processo de fabricação do arame que podem influenciar no desempenho do processo de soldagem GMAW.

OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo geral analisar e caracterizar o efeito dos semiângulos de feiras de trefilação utilizada na fabricação do arame sólido consumível no processo de soldagem GMAW.

2.2. Objetivos Específicos

- Analisar o acabamento superficial do arame.
- Analisar a taxa de resíduo presente na superfície do arame.
- Analisar a variação da rugosidade do arame em função da superfície de contato das feiras.
- Analisar a aderência da camada de cobre na superfície do arame.
- Analisar a estabilidade do processo de soldagem GMAW com cada tipo de trefilação.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Processo de soldagem

Segundo Marques, et al. (2009), a soldagem é um importante processo na união de metais utilizado industrialmente. Suas aplicações variam desde aplicações em indústrias microeletrônica até em produção de navios e outras aplicações de grande porte. Comumente o processo de soldagem é utilizado na confecção de grades, portões e até mesmo no artesanato e na fabricação de joias.

Dentre todas estas aplicações, cada processo de soldagem recebe uma parametrização específica levando em consideração o metal de base, o tipo de junta a ser executada e a aplicação da peça produzida. Esta diversidade de aplicações estimula a busca de controles sobre o processo de soldagem com o objetivo de buscar máximo desempenho em todas as funções exercidas.

Em sua grande maioria, os processos de soldagem causam nas peças a serem unidas, variações de temperaturas e deformações plásticas que alteram a estrutura dos materiais nas juntas a serem soldadas. A soldagem pode ser considerada um tratamento termomecânico agressivo que afeta as características metalúrgicas do material e que devem ser cuidadosamente considerados.

Estas alterações dependem das reações ocorridas durante a solidificação e da velocidade de resfriamento do cordão de solda e de sua microestrutura resultante.

3.1.1. Processo de Soldagem MIG/MAG ou GMAW

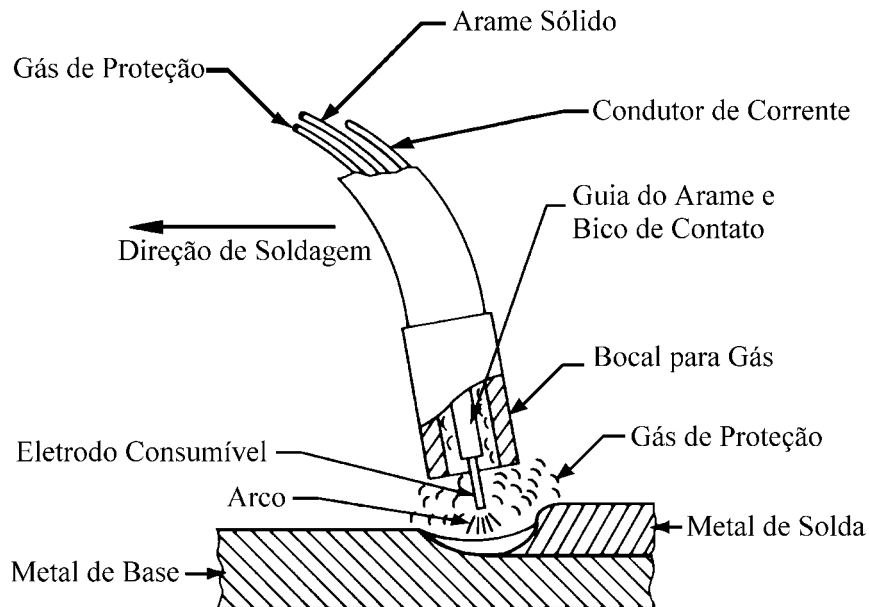
O processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) é um processo de soldagem a arco com proteção gasosa, conhecido também como processo de soldagem MIG–MAG.

Este processo produz a união de peças metálicas através do aquecimento com o arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. O gás utilizado tem como objetivo fazer a proteção do arco e da região da

solda contra contaminação pela atmosfera, estes podem ser inertes ou ativos (MARQUES et al., 2009).

A sigla MIG (*Metal Inert Gas*) no Brasil refere-se ao processo de soldagem quando a proteção usada é inerte ou rica em gases inertes ou MAG (*Metal Active Gas*) quando o gás utilizado é ativo ou contem misturas ricas em gases ativos (AWS, 1991). A figura 3.1 apresenta de forma esquemática este processo.

Figura 3. 1 – Desenho esquemático do processo de soldagem GMAW



Fonte: AWS (1991)

De acordo com a AWS, 1991, o processo de soldagem GMAW é um processo normalmente semiautomático em que alimentação do arame eletrodo é realizada mecanicamente através de alimentador motorizado e o soldador é o responsável pela iniciação e interrupção da soldagem, além de deslocar a tocha ao longo da junta.

A manutenção do arco é garantida pela contínua alimentação do eletrodo, e o comprimento do arco é inicialmente mantido constante pelo próprio sistema, independente dos movimentos do soldador.

Este processo pode ser aplicado em soldagens com uma ampla faixa de espessura tanto em metais ferrosos, quanto em metais não ferrosos. O diâmetro dos eletrodos utilizados pode variar de 0,8mm a 2,4mm. O processo MAG é utilizado apenas na soldagem de materiais ferrosos usando como gás de proteção CO₂ ou misturas ricas neste gás, enquanto a soldagem MIG pode ser utilizada tanto para materiais ferrosos e não ferrosos, como alumínio, cobre, magnésio, níquel e suas ligas (MARQUES et al., 2009).

Pode-se afirmar que as principais vantagens da soldagem MIG/MAG quando comparada à soldagem com eletrodos revestidos são: alta taxa de deposição e o alto fator de ocupação do soldador, grande versatilidade quanto ao tipo de material e espessuras aplicáveis, não existência de fluxo de soldagem e conseqüentemente ausência de remoção de escoria e limpeza.

Descrições mais completas do processo GMAW, abrangendo desde as técnicas operatórias às suas inovações recentes, podem ser encontradas em grande número de trabalhos, por exemplo, nas referências: BROSILOW, 1978; AMIN, 1983; DUTRA, 1989; AWS, 1991; MACHADO, 1996; SULIVAN, 1998; CARY, 1998 e MARQUES, et al.2009.

3.1.2. Gases de Proteção

De acordo com TUSEK e SUBAN,(2000), o principio do uso dos gases é de proteger a poça de fusão e evitar a contaminação pelo ar atmosférico. Este gás é uma variável importante no processo de soldagem a arco e também possui outras funções. Características de ionização e formação do arco, o modo de transferência metálica do metal de adição, a estabilidade do arco, as propriedades do metal depositado, o volume de fumos e respingo, a geometria e o aspecto superficial do cordão de solda, a penetração e a velocidade, são diretamente influenciados por estes gases ou misturas.

Os gases utilizados possuem diferentes composições químicas, ou seja, em função do metal de base, do tipo de transferência metálica escolhido, do diâmetro do aço, do tipo de eletrodo e até mesmo da posição de soldagem. Existe uma grande

variedade de tipos de gases disponíveis no mercado para a soldagem de aços. Estes gases podem ser utilizados puros, como é o caso do argônio e do dióxido de carbono. As misturas também são utilizadas, e podem melhorar a estabilidade do arco, reduzir formação de respingos, diminuir a tensão superficial e melhorar o processo de transferência metálica.

Segundo (HILTON, 1988), a característica da coluna do arco é significativamente afetada de acordo com a condutividade térmica do gás. A resistividade do arco normalmente aumenta de acordo com a condutividade térmica, com isso pode exigir para correntes e comprimentos de arco equivalentes um aumento de tensão do arco que pode vir a prejudicar a abertura do arco. Outro ponto importante é a rigidez da coluna do arco que também indica a estabilidade do arco. Esta rigidez representa exatamente a força necessária para desviar o arco da sua posição desejada.

Misturas à base de hélio, normalmente produzem arcos menos rígidos o que pode comprometer a estabilidade do arco principalmente em baixas correntes. Já em correntes elétricas altas um arco menos rígido pode ajudar na prevenção de mordeduras e irregularidades sobre o cordão. Lembrando que misturas com o gás hélio são pouco utilizadas na soldagem de aços carbono, devido ao custo expressivo deste gás.

3.1.2.1. Características dos Gases de Proteção

Cada gás utilizado na soldagem possui propriedades químicas e físicas diferentes e são nessas diferenças que se encontram as melhores características operacionais atribuídas através de mistura de proteção ao processo de soldagem. A seguir serão apresentadas algumas características básicas dos principais gases de proteção utilizados na soldagem.

- Argônio

O argônio não forma composto com outros elementos e também não dissolve de forma simples na poça de fusão, o argônio é um gás inerte. Em função destas características garantem ao argônio algumas preferências do ponto de vista

metalúrgico, onde proporciona alta qualidade da solda com baixas inclusões de escória além de boas propriedades mecânicas. O argônio possui um potencial de ionização baixo (tabela 3.1) de forma que a abertura do arco fica mais fácil e a operação de soldagem é estável em baixas correntes elétricas.

Com relação a transferência metálica, a soldagem GMAW com proteção de misturas com argônio favorece a transferência por spray em correntes mais baixas. Em transferência spray, este gás favorece a formação de um cordão com penetração mais estreita no centro do mesmo. Na soldagem dos aços, em particular do aço carbono, este gás normalmente não é empregado puro, devido principalmente ao seu custo mais elevado além de apresentar menor estabilidade do arco e menor molhabilidade da poça de fusão em relação a outras misturas, além de uma maior tendência à formação de mordeduras (figura 3.2).

Tabela 3. 1 – Constantes físicas dos gases de proteção

Elemento	1º Potencial de ionização (eV^a)	Densidade (kg/m³)
Argônio	15,75	1,784
Hélio	24,58	0,178
Hidrogênio	13,59	0,083
Nitrogênio	14,54	1,161
Oxigênio	13,61	1,326
Dióxido de carbono	–	1,977

Nota: ^a1eV = 1,6 x10⁻¹⁶ J

Fonte: Lancaster (1986)

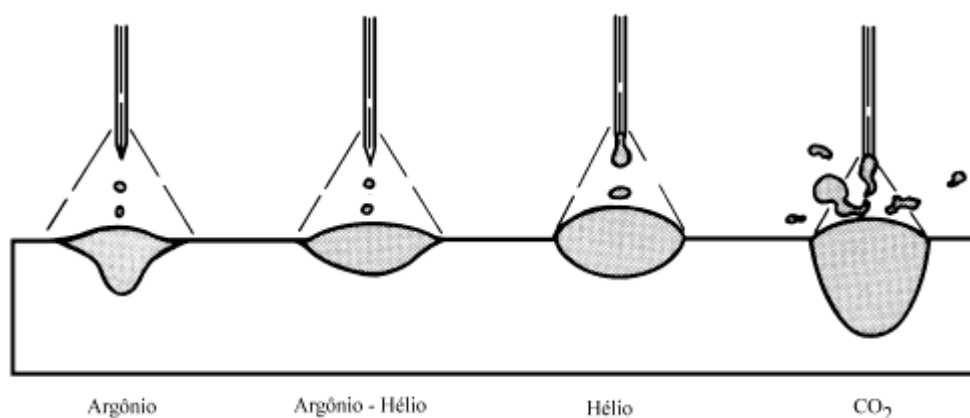
Um problema relacionado ao uso do argônio, que diz respeito à segurança do trabalho, refere-se ao seu elevado potencial para a geração de ozônio (WIKTOROWICZ e CROUCH,1994).

- Hélio

O hélio assim como o argônio é inerte, também permitindo a obtenção de soldas de boa qualidade do ponto de vista metalúrgico. É um gás mais leve do que o ar, o que tende a prejudicar a eficiência da proteção gasosa e exigir, em relação ao argônio,

uma vazão maior (2 a 3 vezes) para obter-se uma proteção equivalente. Para manter um comprimento de arco com um valor de corrente elétrica, o hélio exige tensões mais altas que o argônio (figura 3.3), resultando na geração de uma maior quantidade de energia no arco, o que está associado, segundo a maioria dos autores, com o seu maior potencial de ionização (HELMBRECHT e OYLER, 1957). Esta característica, aliada à maior condutividade térmica do hélio (figura 3.4), implica em uma maior capacidade de fusão do metal de base (HILTON, 1982).

Figura 3. 2 – Perfis de penetração e de transferência típicos em soldagem GMAW com alguns gases de proteção.



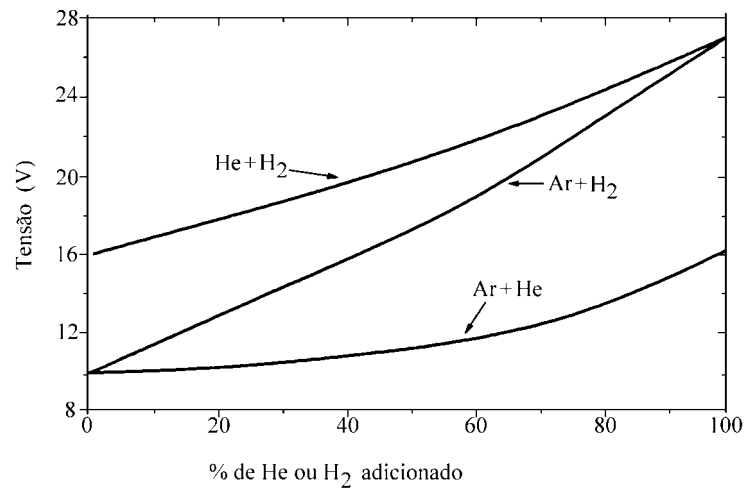
Fonte: AWS (1991)

No geral, soldas obtidas com o uso de misturas a base de hélio apresentam um perfil mais arredondado, com maior penetração secundária do que quando o argônio é usado. A figura 3.2 também apresenta estas características.

O hélio relacionado com o argônio permite o uso de maiores velocidades de soldagem (BROSILOW, 1978; WIKTOROWICZ e CROUCH, 1994), uma maior produtividade, gerando um fator econômico importante, sobretudo para materiais de alta condutividade térmica.

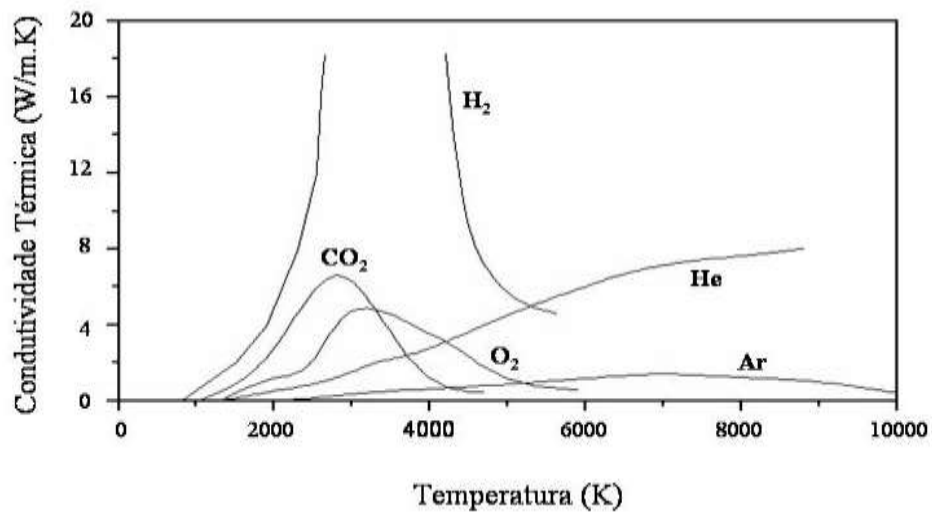
De modo similar, para penetração e velocidade de soldagem igual, o uso do hélio permite que uma menor corrente de soldagem seja usada, diminuindo as chances de formação de mordeduras (HELMBRECHT e OYLER, 1957; KUJANPAA, 1984).

Figura 3.3 – Variação da tensão do arco GTAW com corrente de 100A e comprimento de arco de 1,6mm para as misturas gasosas: Ar-He, Ar-H₂ e He-H₂



Fonte: Helmbrecht e Oyler (1957)

Figura 3.4 – Condutividade térmica dos gases em função da temperatura



Fonte : Tusek e Suban (2000)

- Dióxido de Carbono

É um gás oxidante, o que favorece no processo GMAW a estabilização da raiz do arco. Este efeito é notado apenas para baixas proporções de CO₂ em mistura com argônio e eventualmente em misturas com argônio e hélio, de modo que adições maiores que 5% de CO₂ tendem a diminuir a estabilidade do processo e aumentar a quantidade de respingos produzidos (HILTON e NORRISH, 1988).

O fator que favorece a utilização do dióxido de carbono, além do seu baixo custo, é a sua alta condutividade térmica (figura 3.4), promovendo uma maior transferência de calor para o metal base, que favorece a formação de cordões mais largas e de maior penetração (figura 3.2).

É citada como desvantagens do uso deste gás, a quantidade elevada de respingos gerados, maior oxidação de elementos de liga (Mn e Si), maior oxidação do cordão de solda, exigindo maior limpeza, além da tendência de não produzir a transferência por “spray” (AWS, 1991).

Para minimizar os efeitos negativos do CO₂ o ideal é misturá-lo com uma quantidade adequada de argônio (BROSILOW, 1978).

- Oxigênio

O oxigênio é um constituinte importante das misturas de gás empregadas na soldagem de aços. Apresenta efeitos similares ao CO₂ em termos da estabilização da raiz do arco, oxidação de elementos de liga e molhabilidade do metal líquido (HILTON e NORRISH, 1988).

Para Stenbacka (1992), é geralmente colocado que o efeito do oxigênio é dez vezes maior que o do CO₂ no que se refere à perda por oxidação é 2 a 3 vezes superior em relação à estabilização do arco. Por isso, esse gás não é usado como gás base em soldagem, e sim, em pequenas proporções, em geral inferior a 5% e exclusivamente no processo GMAW.

3.1.3. Arco Elétrico

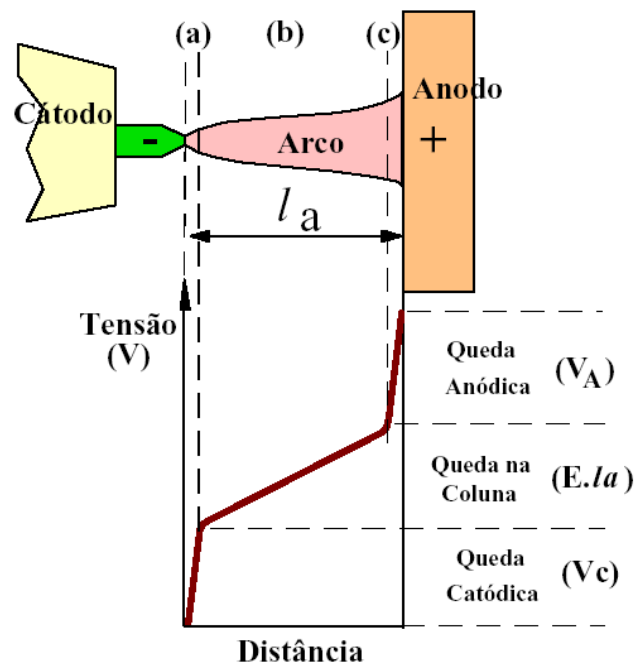
Um grande número de processos de soldagem usa o arco elétrico como fonte de calor para a fusão, os conhecimentos obtidos até o presente permitem um entendimento apenas parcial dos fenômenos envolvidos devido a sua grande complexidade (WASZINK, 1982; MARQUES, et al. 2005).

De acordo com Guile (1970), o arco elétrico é “uma descarga de corrente elétrica

entre eletrodos em um gás ou vapor (gerado a partir dos eletrodos) que tem uma queda de tensão junto ao cátodo da ordem do potencial de excitação do vapor do eletrodo (isto é, da ordem de 10V) e na qual a corrente pode ter praticamente qualquer valor superior a um mínimo que é de cerca de 100mA”.

Eletricamente, o arco de soldagem pode ser caracterizado pela diferença de potencial entre suas extremidades e pela corrente elétrica que circula por este. A queda de potencial ao longo do arco elétrico não é uniforme, ela se dá de forma abrupta nas regiões próximas aos eletrodos (ânodo e cátodo) e em intensidade menor na coluna do arco. Esta variação permite supor a existência de, pelo menos, três regiões distintas em um arco, figura 3.5.

Figura 3.5 - Representação esquemática da queda de tensão ao longo de um arco. (a) zona de queda catódica; (b) coluna do arco e (c) zona de queda anódica. l_a – comprimento do arco.



Fonte: Modenesi (2004)

Lesnewich (1958) afirma que a região de queda catódica, apesar de ter pequeno volume, é de extrema importância para a manutenção do arco elétrico, pois é a partir dela que emergem os elétrons que vão fluir pelo arco e que são responsáveis em grande parte pela condução da corrente elétrica de soldagem. O pequeno volume desta região e os elevados gradientes térmicos aí existentes tornam muito difíceis o

seu estudo. Essa região é caracterizada por um estado muito afastado do equilíbrio, sendo uma transição entre a coluna do arco e o eletrodo, não ocorrendo condições para o equilíbrio tanto térmico (mesma energia cinética média de seus diversos constituintes) como elétrico (balanço de cargas elétricas), ao contrário do que parece ocorrer na coluna do plasma a 1 atm.

Para haver emissão de elétrons nessa região, diversos mecanismos podem estar atuando, com destaque para a emissão termiônica, que ocorre em cátodos de material refratário, e para os mecanismos de emissão a frio, possivelmente associados à presença de filmes de óxidos na superfície do cátodo, em materiais de pontos de fusão e ebulição mais baixos.

A coluna do plasma é a região que se encontra entre as quedas catódicas e anódica. Essa região possui gradientes térmicos e elétricos bem mais baixos do que as regiões catódicas e anódica, com valores da ordem de 10^3 a 10^4 °C/mm e 1V/mm, respectivamente. A coluna do plasma é constituída de partículas neutras (átomos e moléculas), de íons e de elétrons livres, sendo os últimos os principais responsáveis pela passagem de corrente elétrica entre os eletrodos. Para que se dê a ionização do gás, este deve ser aquecido a altas temperaturas. A agitação do gás causada pela elevação da temperatura promove choques entre os seus constituintes, ocasionando a sua ionização parcial e a consequente formação do plasma. Uma vez que a coluna do plasma requer que se mantenha uma temperatura suficientemente elevada para sustentar o seu grau de ionização, quanto maior for o potencial de ionização dos constituintes da coluna, maior será a energia necessária para manter o nível de ionização requerido e, portanto, maior deverá ser a temperatura desse arco. A diferença de potencial nessa região varia de forma linear com o comprimento do arco. Assim, para um dado valor de corrente de soldagem, a diferença de potencial entre o eletrodo e a peça pode ser estimada, em uma primeira aproximação, pela equação 3.1.

$$V = (V_a + V_c) + E \cdot I_a \quad \text{eq 3.1}$$

Onde:

V = Diferença de potencial

V_a = Queda de potencial no ânodo

V_c = Queda de potencial no cátodo

E = Campo elétrico na coluna do arco

l_a = Comprimento do arco

A região anódica não tem a mesma importância que a região catódica, por consequência é uma região menos estudada. No ânodo os elétrons podem penetrar no eletrodo livremente, pois facilmente vencem a barreira de potencial existente. Já os íons positivos, como regra geral, devem vencer uma grande barreira de potencial para emergir desde o eletrodo para o plasma. Como resultado, há acúmulo de elétrons na região adjacente ao ânodo, ou seja, se forma uma região com carga espacial envolvente negativa, com aproximadamente 10^{-1} mm.

3.1.4. - Transferência Metálica

Entende-se por transferência metálica a maneira ou modo pelo qual o metal líquido se transfere da ponta do eletrodo para a poça de fusão.

Há basicamente três modos de transferência metálica que são amplamente aceitos e mais facilmente detectados. São eles: curto-circuito, globular e aerossol (também conhecido como *spray*, ou goticular). Há outros modos que podem ser considerados como uma subdivisão dos mencionados acima que são, por exemplo, o aerossol rotacional, aerossol axial, aerossol com alongamento ou modos obtidos por formas especiais de operação do equipamento cujo principal modo é o chamado arco pulsado.

O modo de transferência influi diretamente nos aspectos operacionais, em particular na eficiência de deposição, no nível de respingos e fumos, na capacidade do processo ser utilizado fora da posição plana, no formato dos cordões enfim, na estabilidade e no desempenho operacional (NORRISH e RICHARDSON, 1988; KIM e EAGAR, 1993, HEALDET *al.*1994).

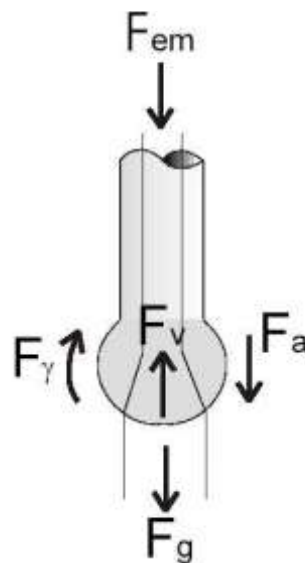
O conhecimento das características e o bom entendimento dos modos de transferência são imprescindíveis para o melhor controle e adequação do uso da

soldagem GMAW.

3.1.4.1 - Teoria do equilíbrio das forças estáticas

A teoria do equilíbrio das forças estáticas leva em consideração a resultante das forças estáticas atuantes sobre o destacamento da gota metálica, isto é, o destacamento da gota ocorre quando as forças que o favorecem excedem as forças de retenção (figura 3.6). O fenômeno de destacamento da gota deverá ser considerado como dependente do tempo. Kim e Eagar (1993) encontraram variações menores que 10% entre os resultados teóricos e os experimentais, o que reforça o uso desta teoria.

Figura 3. 6 - Balanço estático das forças atuantes na gota



Fonte: Barra (2003)

A condição necessária para o destacamento da gota metálica da ponta do eletrodo até a poça de fusão, considerando a posição plana, pode ser dada pela equação 3.2.

$$F_{em} + F_g + F_a > F_\gamma + F_v \quad \text{eq. 3.2}$$

Onde:

F_{em} = Força eletromagnética

F_g = Força devido à aceleração da gravidade

F_a = Força de arraste de gases

F_γ = Força devido à tensão superficial

F_v = Força de reação devido ao jato de vapor de metal

A influência da força atuante na no destacamento da gota de soldagem dependerá da sua posição (equação 3.3).

$$F_g = m_g \times g \quad \text{eq. 3.3}$$

Onde:

m_g = massa da gota

g = aceleração da gravidade

A força eletromagnética (F_{em}) pode ser expressa pela equação 3.4.:

$$F_{em} = \vec{j} \times \vec{B} \quad \text{eq.3.4}$$

Onde:

J = densidade de corrente

B = Campo magnético

Integrando a equação 3.4 na superfície condutora da gota e assumindo uma densidade de corrente uniforme, Amson (1962) obteve a equação 3.5 para a força eletromagnética.

$$F_{em} = \frac{\mu_o \times I^2}{4\pi} \times f \quad \text{eq.3.5}$$

Onde:

F_{em} = Força eletromagnética

μ_o = Permeabilidade magnética do material

I = Corrente elétrica

f = Função da geometria do sistema

A força de arreste está ligada diretamente com a intensidade do fluxo de plasma no

interior do arco. De acordo com a equação 3.6, o valor de F_a apresenta dependência com a composição do gás, com o tamanho da gota (considerada esférica) e com a velocidade do fluxo no interior do arco (NORRISH *et al.* 1988; KIM *et al.* 1993).

$$F_a = \frac{\pi \times \rho \times v_g^2 \times r_g^2 \times c_a}{2} \quad \text{eq. 3.6}$$

Onde:

ρ = Densidade do gás

v_g = Velocidade do gás

r_g = raio da gota imersa no gás

c_a = coeficiente de arraste (depende do nº de Reynolds e, em menor escala, da corrente)

Força devido à tensão superficial (F_γ) é uma das mais importantes para manter a gota em contato com o arame, qualquer que seja a posição de soldagem. De acordo com Kim e Eagar (1993), uma expressão simples para a força associada com a tensão superficial é dada pela equação 3.7.

$$F_\gamma = 2 \times \pi \times \gamma_s \times r_a \quad \text{eq.3.7}$$

Onde:

γ_s = Tensão superficial

r_a = Raio do arame

Para altos valores de corrente e, particularmente, na presença de elementos de elevada pressão de vapor no consumível, a vaporização destes elementos pelo arco pode gerar um jato que exerce uma força de reação sobre a gota de metal de adição (F_v). Adicionalmente, quando a raiz do arco fica restrita a uma pequena área sob a gota de metal de adição, esta também pode gerar forças de reação na gota.

3.1.4.2. Classificação dos modos de transferência metálica

As diversas formas de transferência de metal podem ser observadas nos diversos

processos de soldagem. Conforme a nomenclatura do “*International Institute of Welding*” (IIW) (Lancaster, 1986), a transferência metálica pode ser classificada em três grupos principais: “*Free-flighttransfer*” ou transferência por voo livre, “*Bridgingtransfer*” ou transferência por contato e “*Slag-protectedtransfer*” ou transferência protegida por escória, conforme esquematizado na tabela 3.2 e ilustrado na figura 3.7.

Tabela 3. 2 – Formas usuais de transferência metálica de acordo com o IIW.

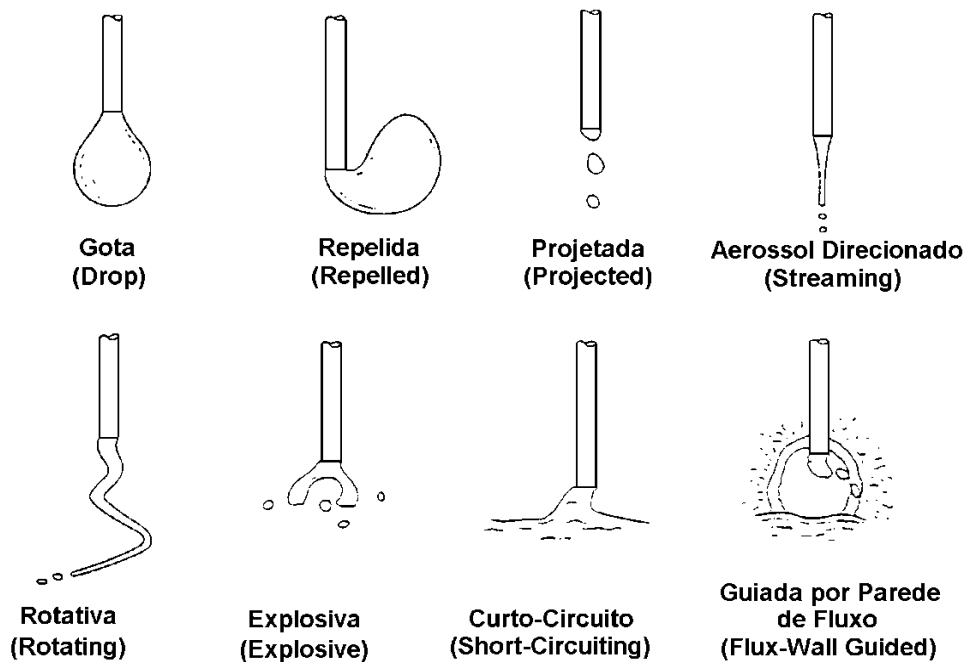
TIPO DE TRANSFERÊNCIA	PROCESSO DE SOLDAGEM
1 – TRANSFERÊNCIA POR VOO LIVRE	
1.1 – Globular	
1.1.1 – Gota (Drop)	GMAW – Baixa corrente
1.1.2 – Repelida (Repelled)	GMAW com proteção de CO ₂
1.2 – Spray	
1.2.1 – Projetada (Projected)	GMAW – Corrente intermediária
1.2.2 – Spray em Fluxo (Streaming)	GMAW – Corrente média
1.2.3 – Rotacional (Rotating)	GMAW – Corrente elevada
1.3 – Explosiva	SMAW
2 – TRANSFERÊNCIA POR PONTE	
2.1 – Curto-Circuito (Short-Circuiting)	GMAW – Arco “curto”
2.2 - Sem Interrupção (Without Interruption)	GTAW com alimentação contínua
3 – TRANSFERÊNCIA PROTEGIDA POR	
3.1 - Fluxo Guiado (Flux-Wall Guided)	SAW
3.2 – Outros modos	SMAW, FCAW, ESW, etc.

Fonte: Lancaster (1986.)

3.1.4.3. Métodos de identificação dos modos de transferência metálica

Existem diversas classificações do modo de como a gota metálica se destaca da ponta do arame até a poça de fusão. O acompanhamento destes modos de transferência pode ser feito através da análise de oscilogramas de corrente e tensão do processo, da filmagem de alta velocidade da região do arco ou mediante combinação destas duas técnicas, além de diversas outras (LANCASTER, 1987; BÁLSAMO, 2000 (b); VILARINHO, 2000).

Figura 3. 7– Modos de transferência de acordo com a classificação do IIW



Fonte: Lancaster (1986)

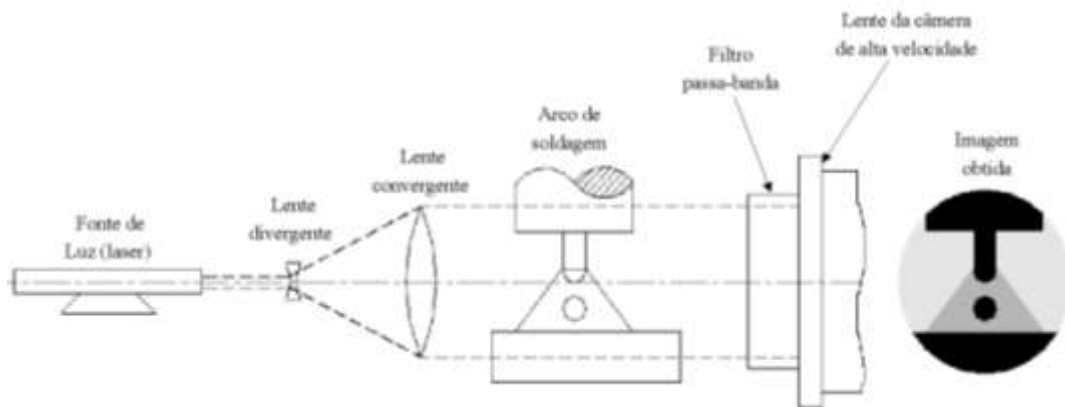
Conforme Allemand (1985), Bálsamo (2000a e b) e Vilarinho (2000), para estudar a transferência metálica através da visualização das gotas transferidas se faz necessária uma instrumentação (figura 3.8) que permite visualizar quantidades mínimas de metal (gotas) viajando a uma velocidade muito alta, o que pode ser alcançado com uma filmagem ou fotografia de alta velocidade com a técnica “*Shadowgrafia*”.

A utilização de filme fotográfico torna esta metodologia muito limitada devido à necessidade de revelação do filme, o que gera certa demora entre o experimento e a análise dos resultados.

Além disso, fornece informações somente de um instante do processo, não possibilitando a observação de sua evolução, fazendo com que muitos eventos transientes não sejam identificados.

Logo, com a utilização de uma câmera de alta velocidade (1000 quadros/s ou mais), há possibilidade de se medir com precisão, tanto a taxa de transferência metálica, quanto o tamanho das gotas transferidas.

Figura 3. 8 – Representação esquemática do princípio da Shadowgrafia aplicado na soldagem



Fonte: Vilarinho (2000)

Alguns autores sincronizam as imagens obtidas por filmagem de alta velocidade com os oscilogramas de corrente elétrica e tensão do processo, utilizando o sinal do obturador da câmera (figura 3.9).

Assim, visualizando quadro a quadro da filmagem obtida com os sinais de tensão e corrente de soldagem, pode-se determinar o momento exato da transferência metálica.

A figura 3.10 mostra uma sequência de quadros da filmagem de alta velocidade em sincronismo com os oscilogramas de corrente elétrica e tensão de soldagem, obtidos com o processo MIG - MAG com transferência do tipo globular.

Esta técnica possui algumas limitações como: resolução de imagem da câmera e sistema de aquisição de sinais com alta taxa de aquisição.

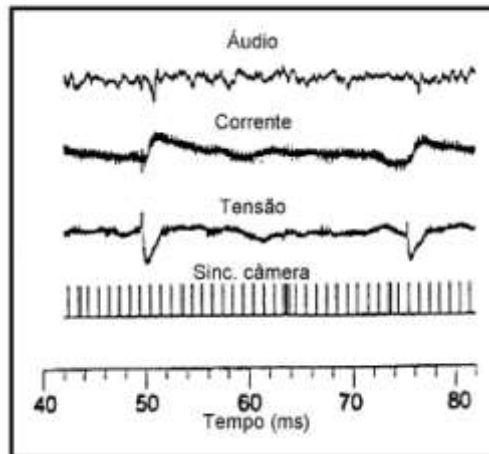
Uma descrição mais detalhada desta técnica pode ser obtida nas referências: JOHNSON *et al.* 1991; SUBRAMANIAM, 1998; BÁLSAMO, 2000(a); VILARINHO, 2000.

3.1.4.4 - Tipos de transferência de metal no processo GMAW

Para o processo GMAW convencional, com eletrodo positivo e gás de proteção a

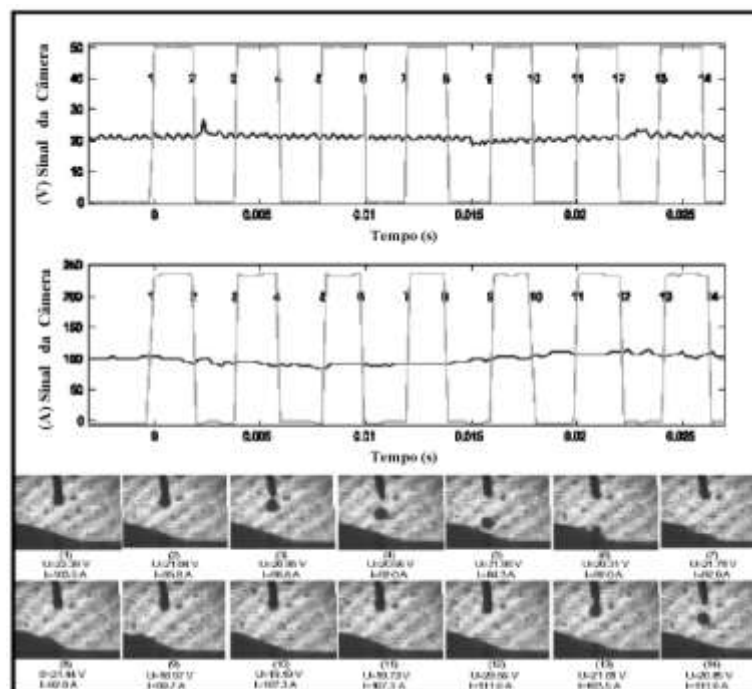
base de argônio, distinguem-se três modos de transferência básicos, isto é: (a) transferência globular, (b) transferência por curto-circuito e (c) transferência por “spray” ou aerossol. A figura 3.11 mostra, esquematicamente, os campos operacionais desses três modos principais de transferência em função da corrente e da tensão de soldagem.

Figura 3. 9 – Sinais de tensão, corrente e som sincronizado com o sinal da câmera.



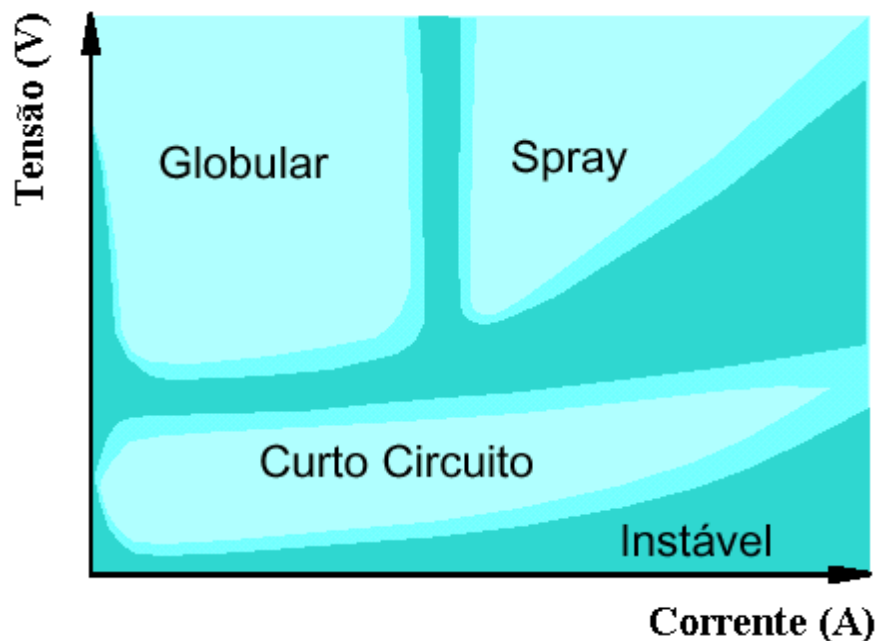
Fonte: Johnson et al. (1991)

Figura 3. 10 – Sequencia de quadros da filmagem de alta velocidade em sincronismo com os oscilogramas de corrente e tensão de soldagem, obtidos com o processo MIG-MAG com transferência do tipo globular.



Fonte: Vilarinho (2000)

Figura 3. 11 – 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)

Na região indicada como instável, que ocorre para valores de tensão bem baixos, tipicamente inferiores a 15 Volts, um grande volume de respingos é gerado e pouco calor é transferido ao metal de base, não permitindo a fusão adequada deste e do arame.

Nota-se, ainda, que a transição entre alguns destes modos de transferência ocorre dentro de certa faixa, que pode ser relativamente grande, de tensão e corrente, ou seja, de uma forma mais ou menos gradual (Silva, 1995).

- Transferência Globular

Ocorre, em geral, para baixas densidades de corrente, mas para valores intermediários de tensão de soldagem. Ocorre para qualquer tipo de gás de proteção. Para misturas ricas em CO₂ e hélio, esta forma de transferência ocorre em uma faixa mais ampla de corrente elétrica.

A transferência globular é caracterizada pela formação de grandes gotas de metal fundido que se transferem para poça de fusão a uma baixa frequência (10⁰ a 10¹

gotas/s).

O diâmetro médio das gotas de metal líquido varia com a corrente elétrica e tende a diminuir com o aumento da mesma. Normalmente, o diâmetro das gotas é maior que o diâmetro do eletrodo. Como o destacamento das gotas é feito pela ação da gravidade, esse tipo de transferência não é utilizado para soldagem fora de posição.

Na transferência globular, o metal líquido forma-se na ponta do arame pela sua fusão e mantém-se preso a este por ação da tensão superficial. Com o aumento do volume da gota, o seu peso aumenta e acaba por ocasionar a sua separação do arame e a gota do metal líquido se transfere para a poça de fusão por ação da gravidade.

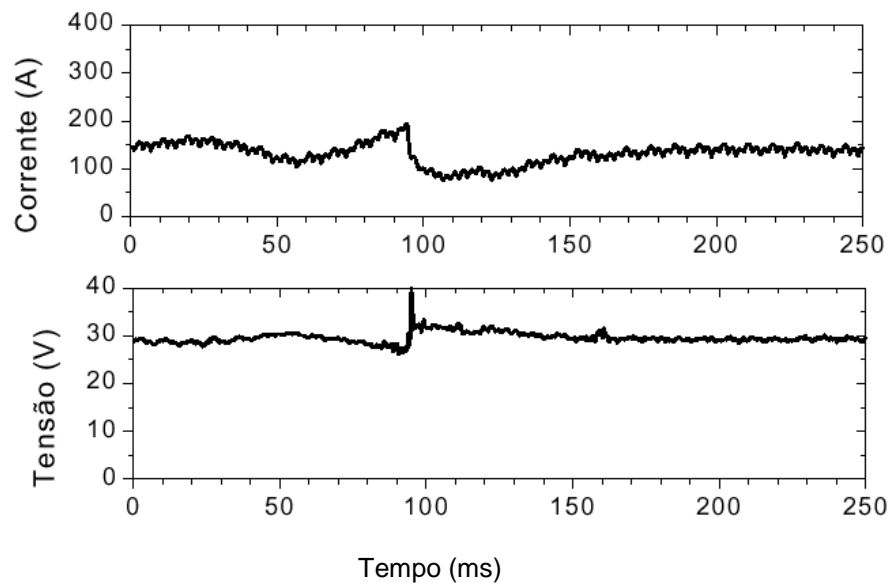
Oscilogramas típicos de corrente e tensão de soldagem para a transferência globular no processo GMAW são mostrados na figura 3.12 (Modenesi, 2004).

Quando se utiliza argônio puro ou misturas a base deste gás, a transferência globular ocorre para valores elevados de tensão e densidade de corrente relativamente baixa, isto é, abaixo daqueles de transição globular–spray (figura 3.11). Entretanto, quando se utiliza dióxido de carbono e hélio este tipo de transferência ocorre em toda a faixa de corrente.

Para outros gases, sobretudo misturas a base de hélio ou dióxido de carbono, este tipo de transferência é também predominantemente para níveis relativamente elevados de corrente.

No caso de dióxido de carbono, a transferência globular pode ser repulsiva com grande geração de respingos. Para misturas a base de argônio, a transferência globular ocorre de forma relativamente estável.

Figura 3. 12 – Oscilogramas de tensão e corrente de um processo com transferência globular. Arame ER 70S6 de 1,2mm de diâmetro, Gás CO₂



Fonte: Modenesi (2004)

a) **Transferência por curto-circuito**

Esse tipo de transferência ocorre para baixos valores de corrente e tensão de soldagem e para quaisquer gases de proteção. É normalmente utilizado com eletrodos com diâmetros menores para soldagem fora de posição ou na soldagem de chapas finas.

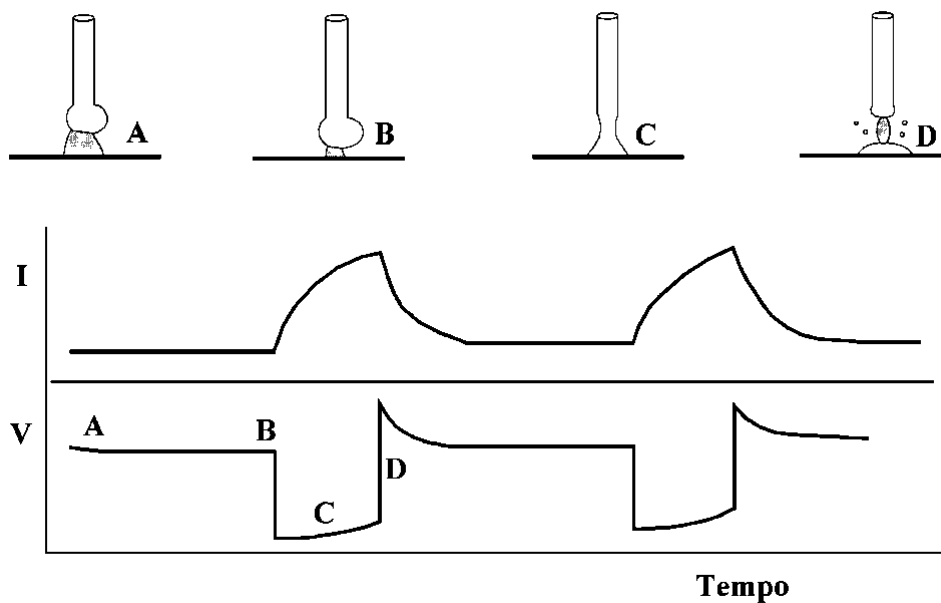
Na transferência por curto-circuito, o comprimento do arco é reduzido de forma que a gota formada na ponta do arame toque na poça de fusão da solda antes que seja destacada pela ação da gravidade como no modo globular. Com isto, ocorre um curto-circuito elétrico e o arco é extinto. Com o curto-circuito, a corrente elétrica tende a se elevar rapidamente, aumentando a fusão do eletrodo por efeito Joule e, ao mesmo tempo, o metal fundido tende a se transferir para a poça de fusão por ação da tensão superficial e de forças de origem magnética. Com isto, o curto-circuito é rompido, o arco é restabelecido e este processo é repetido ciclicamente. Em condições normais de operação deste tipo de transferência, aproximadamente 20 a 200 curtos podem ocorrer em um segundo (Smith, 1962; AWS, 1991).

Neste modo de transferência, o processo alterna entre condições do arco, no qual

há formação da gota na ponta do arame e fusão do metal de base (formação da poça de fusão), e condições de curto-circuito, quando a gota é efetivamente transferida do arame para a poça, figura 3.13.

Em um curto-circuito, a intensidade de energia cedida à peça é relativamente baixa e, portanto, a soldagem com este tipo de transferência tende a produzir pouca fusão do metal de base. Em materiais de espessura maior ou elevada condutividade térmica, isto pode favorecer a ocorrência de falta de fusão, contudo, na soldagem de peças de espessuras menor, esta característica pode, por outro lado, ser vantajosa (Silva, 1995).

Figura 3.13 – Transferência por Curto-Circuito



Fonte: Modenesi (2004)

b) *Transferência spray ou aerossol ou goticular*

Esse tipo de transferência ocorre para elevadas densidades de corrente e quando se usa argônio ou misturas de proteção ricas em argônio. Com estas misturas, à medida que se aumenta a corrente de soldagem, diminui o tamanho médio das gotas de metal líquido que é transferido para a peça. A partir de certo valor de

corrente, o modo de transferência passa de globular para aerossol. A esse nível de corrente dá-se o nome de corrente de transição globular/aerossol.

Nesse modo de transferência, as gotas metálicas sofrem a ação de elevadas forças de origem eletromagnéticas que são responsáveis pela diminuição de seu tamanho e sua aceleração. A redução do tamanho das gotas é acompanhada pelo aumento do número de gotas que se desprendem do eletrodo. A taxa de transferência das gotas pode variar de um pouco menos de 100 a centenas de gotas por segundo quando a velocidade de alimentação do eletrodo aumenta de aproximadamente 42 a 340 mm/s (2,4 a 20,4m/min) (WELDING HANDBOOK, 1991).

Uma característica do modo de transferência spray é a penetração em forma de dedo. Esta penetração tende a ser relativamente profunda e localizada no centro do cordão, mas ela é afetada por forças magnéticas que podem causar o seu desvio para um dos lados do cordão.

Na soldagem GMAW, a transferência spray ocorre basicamente com gases de proteção à base de argônio com eletrodo positivo. Este tipo de transferência pode ser utilizado em qualquer tipo de metal e ligas devido às características inertes da proteção de argônio. Entretanto, a aplicação do processo para peças finas pode ser difícil devido às altas correntes necessárias para produzir um arco spray. A resultante das forças e a quantidade excessiva de calor podem perfurar chapas relativamente finas em vez de soldá-las. Ainda, a alta taxa de deposição pode produzir uma poça de fusão muito larga para ser suportada pela tensão superficial na posição vertical e sobre cabeça.

3.1.5. Estabilidade

3.1.5.1 - Estabilidade operacional do processo

A estabilidade de um processo de soldagem a arco com eletrodo consumível, tema bastante complexo e muito estudado, depende das condições do arco e de transferência de metal, além de vários outros fatores como as condições de alimentação do arame e as características da fonte de energia. Antes, avaliada

apenas com base em características elementares do processo, tais como ruídos e respingos, hoje, a estabilidade, é avaliada fazendo-se o uso de vários meios e técnicas. Devido às suas características, a transferência por curto circuito é a mais utilizada na soldagem GMAW e também muito estudada. Para se avaliar a estabilidade nesse modo de transferência, vários estudos foram feitos.

Em processos de soldagem com transferência metálica, a estabilidade do próprio arco e da transferência de metal através deste é de vital importância na estabilidade geral do processo, pois estes dois fenômenos são interligados de modo que a instabilidade no comportamento de um deles provoca, em geral, a instabilidade no outro e de todo o processo.

MODENESI e AVELAR (1997), BAIXO (1990), BAIXO e DUTRA (1991) utilizaram o período de transferência de metal (T) para avaliar a estabilidade. Este período apresentaria um valor mínimo para determinados valores de tensão onde, o processo seria mais estável. MODENESI e AVELAR (1997) mostraram que esta condição corresponderia a de menor volume de respingos gerados com esta forma de transferência.

Segundo HERMANS e OUDEN (1999) as principais causas de instabilidade na transferência por curto circuito são: curtos circuitos instantâneos, falha na reinginição do arco e variações na velocidade de alimentação. Os mesmos utilizaram outro critério para avaliar a estabilidade. A estabilidade seria maior quando a frequência de curto circuito estivesse sincronizada com a oscilação do metal líquido na poça de fusão.

3.1.5.2. Estabilidade operacional no processo GMAW

Na soldagem GMAW, o comportamento da raiz do arco tem um efeito significativo na estabilidade do processo. Na soldagem dos aços, em geral, quando pequenas adições de gases oxidantes são feitas em uma proteção gasosa inicialmente inerte, observa-se uma redução da mobilidade da raiz do arco, o que melhora a estabilidade do processo (HILTON e NORRISH, 1988). Este efeito é associado com a recomposição da camada de óxido próxima da raiz do arco que é continuamente

destruída pela emissão de elétrons para o arco (PATTEE et al. 1968b). Mas não só o comportamento da raiz do arco afeta a estabilidade, a transferência de metal de adição pode exercer uma influência importante no comportamento do arco.

Dentre os modos de transferências metálicas presente no processo GMAW, nota-se que, de uma forma geral, em termos operacionais (sobretudo em relação aos níveis de respingos e fumos), para misturas de proteção a base de argônio, que a transferência spray é bastante estável e a transferência globular e por curto-circuito tende a ser mais instável, tendendo a gerar o maior nível de respingos. Sob este aspecto, portanto, a transferência spray seria a preferencialmente usada.

As diferenças de estabilidade, associadas com os diferentes modos de transferência, podem ser visualizadas nos oscilogramas de tensão e corrente elétrica típicas de cada modo. Na transferência globular ou spray, os sinais de tensão e corrente são relativamente constantes com uma pequena dispersão em torno dos valores médios. No modo de transferência globular, em função do maior tamanho das gotas, esta dispersão é geralmente maior que em spray. Já no modo curto-circuito, as ocorrências dos curtos causam variações drásticas nos sinais de tensão de soldagem. Estas diferenças de comportamento entre cada modo podem fornecer uma base para controle em tempo real do modo de transferência. Estudos com este método indireto de análise permitem avaliar a estabilidade operacional do processo e, conseqüentemente, auxiliar na determinação de condições ótimas de soldagem.

3.1.6. Instabilidade no processo GMAW

Na literatura existem alguns estudos relacionados com a ocorrência de instabilidade no processo GMAW, enfocando a mudança na transferência metálica durante a soldagem. Lucas e Amin (1975) verificaram a ocorrência de alterações no modo de transferência associadas ao nível de desoxidação do arame. Em arames com maiores teores de oxigênio, os gases gerados causavam a explosão das gotas de metal durante a transferência, o que não ocorria para arames com menores teores de oxigênio. Agusa et al.(1981) estudaram o efeito da adição de cério no arame, visando melhorar a estabilidade do arco na soldagem de aço carbono com proteção

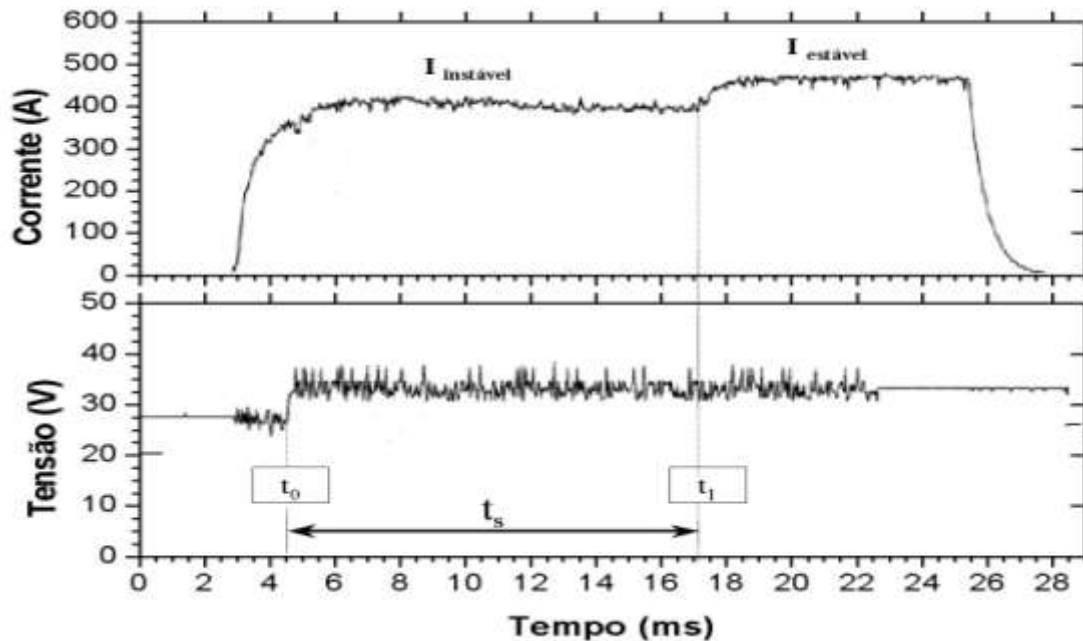
por argônio puro. Os autores verificaram a ocorrência de transferência globular repulsiva junto com spray nas condições em que se esperava somente a ocorrência de transferência spray. Rodwell (1985) estudou, para aços carbono e inoxidáveis, a ocorrência de perturbações do arco, incluindo mudanças repentinas em seu comprimento, na corrente de soldagem e variações da geometria do cordão de solda no processo GMAW operando com transferência spray, que foram associadas com a contaminação da superfície do arame e do bico de contato. Em 1994, Modenesi e Nixon revelaram um novo fenômeno de instabilidade na soldagem GMAW de aços de baixo carbono, anteriormente não descrito de forma explícita na literatura. Este fenômeno de instabilidade ocorreria em condições que conduziriam usualmente a uma transferência de metal por spray e dependeria de vários fatores, tais como o comprimento do arco, composição do gás de proteção, características da fonte de soldagem, além da duração da soldagem. Perturbações na forma do arco e na transferência metálica foram também associadas a este processo de instabilidade.

Modenesi e Nixon (1994) relataram que, quando a soldagem era realizada com fontes de tensão constante, em condições que favoreceriam o aparecimento da instabilidade relatada, o processo tendia a se iniciar operando de forma instável, com transferência globular repulsiva e elevada formação de respingos, mas mudava para uma operação estável algum tempo após o início da soldagem. Fortes flutuações no comprimento do arco e nos níveis de corrente eram observadas durante a transição da operação instável para a estável, resultando em mudanças facilmente perceptíveis em oscilogramas de tensão e corrente do processo (figura 3.14).

Para Modenesi e Nixon (1994), os testes com fonte de corrente constante, variações no comprimento do arco devidas à instabilidade não foram observadas para uma mesma condição operacional, mas alterações no modo de transferência e na aparência do arco ocorreram quando uma mudança neste comprimento era feita, através da variação do CTWD, havendo uma clara tendência para as condições de maior instabilidade ocorrer para condições operacionais que favorecessem um menor comprimento do arco. A figura 3.15 mostra a existência de valores diferentes de tensão de operação do arco que foram associados com a operação instável (maior tensão) e estável (menor tensão). Esses autores relacionaram o

aparecimento da instabilidade diretamente com o potencial de oxidação do gás de proteção, verificando-se um claro aumento da instabilidade do processo quando o teor de oxigênio no gás de proteção era menor.

Figura 3. 14 - Resultado típico de testes usando tensão constante

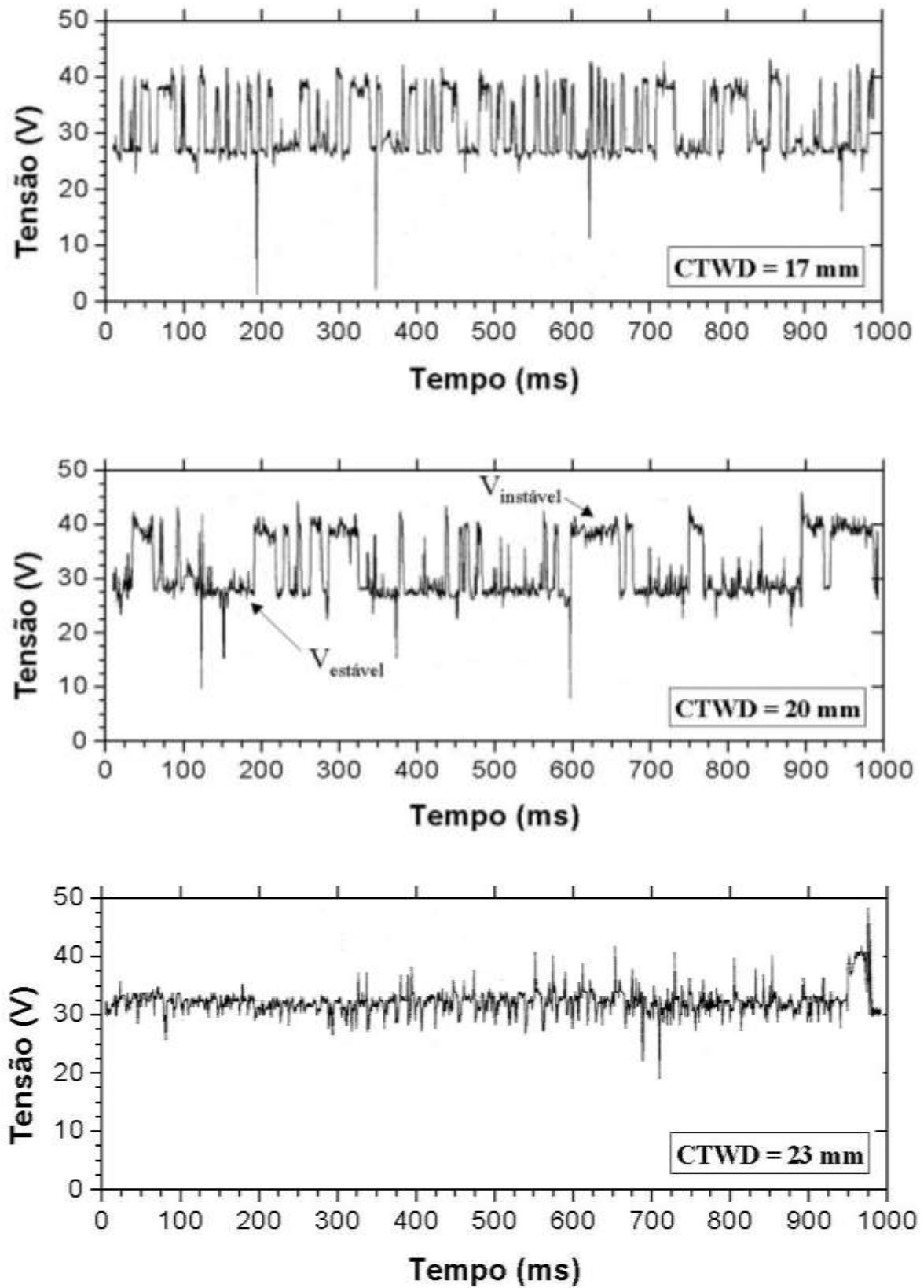


- t₀: instante de início do teste;
 - t₁: transição de modo de operação.
- Fonte: Modenesi e Nixon (1994)

Modenesi e Nixon (1994) propuseram um modelo para explicar estes fenômenos (figura 3.16) que considera a competição entre mecanismos alternativos para a emissão de elétrons na região catódica do arco. Na ausência de uma quantidade suficiente de oxigênio, a recomposição da camada de óxido no metal de base seria dificultada e a destruição desta afastaria da poça de fusão dificultando a manutenção deste processo de soldagem.

Nesta condição, um mecanismo alternativo de emissão de elétrons, baseado na formação de vapores metálicos, tornaria operativo. Este mecanismo concentraria a raiz do arco em um ponto da poça de fusão, mudando a forma do arco e criando um jato de plasma com sentido oposto ao usual e, desta forma, dificultando a transferência de metal.

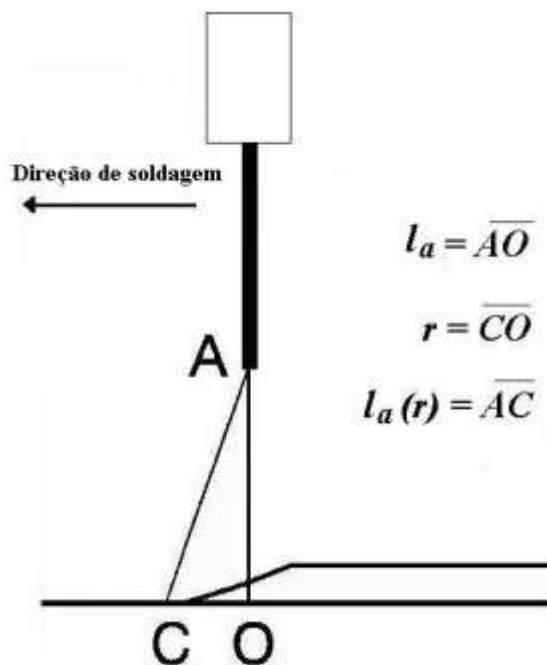
Figura 3. 15 – Valores de tensão para diferentes CTWD (h) obtidos nos testes com corrente constante (Argônio puro e Corrente de 260A)



Fonte: Modenesi e Nixon (1994)

Na figura 3.16, o ponto **C** indica a localização usual da mancha catódica, sendo à distância r o seu deslocamento em relação ao eixo do eletrodo/arco. Quando o gás de proteção é suficientemente rico em oxigênio a mancha catódica se localiza na borda da poça de fusão e, neste caso, r assumirá o seu valor mínimo (r_0). Porém, se o teor de gases oxidantes não for suficientemente alto, a região catódica terá de se expandir para alcançar as áreas da peça ricas em óxidos e, assim, r será maior que o valor mínimo. Uma estimativa de r seria obtida através da área de óxido consumida por unidade de tempo para sustentar a corrente de soldagem.

Figura 3. 16 – Representação esquemática da região do arco no processo MIG



Fonte: Modenesi e Nixon (1994)

Nos aspectos discutidos acima, tanto $I_a(r)$ e $\phi [\tan^{-1}(r/l_a)]$ deverão aumentar se r aumentar. Isso acontecerá se, por exemplo, diminuir o potencial de oxidação do gás de proteção. O modelo também mostra que ϕ aumentará se o comprimento do arco (l_a) diminuir. Logo, para operações com arco curto, ϕ poderá se tornar tão grande que seria impossível o arco preservar seu contato com a região catódica, tornando o processo inviável. Nesta condição, o arco poderia extinguir ou se manter a partir de um mecanismo de emissão de elétrons originários da poça de fusão.

A figura 3.17 mostra o oscilograma e alguns quadros da filmagem obtidos durante a soldagem de uma liga de Al-Mg, com arame de 1,2mm de diâmetro, corrente de 100A e tensão média de 18V. O quadro A desta figura mostra o estado imediatamente antes da mudança da polaridade, indicando que a gota acabou de se destacar da ponta do arame, onde o metal fundido remanescente possui uma forma de ponte aguda.

O quadro B mostra o estado imediatamente após a mudança da polaridade. Vê-se que a coluna de plasma é extremamente brilhante. Pode ser visto nos quadros C, D e E que a coluna do plasma gerada na ponta do eletrodo muda frequentemente de forma enquanto varia o valor anormal da tensão do arco. Os quadros D e E mostram que o metal fundido remanescente na ponta do eletrodo move-se instavelmente como se forças estivessem sendo exercidas sobre ele.

No quadro F, a ponta do eletrodo fica com uma forma esférica e pontos catódicos (pontos brilhantes) sobem para a superfície do eletrodo, onde óxidos existem. Neste momento o arco fica menos brilhante e a tensão do mesmo volta ao nível normal.

O mecanismo de geração da tensão anormal após a mudança de polaridade descrita por Tong. et al.(2005) é apenas uma suposição das observações relatadas acima, porém estes autores concluíram que mudanças na tensão do arco nem sempre estão necessariamente ligadas a uma flutuação no comprimento do arco.

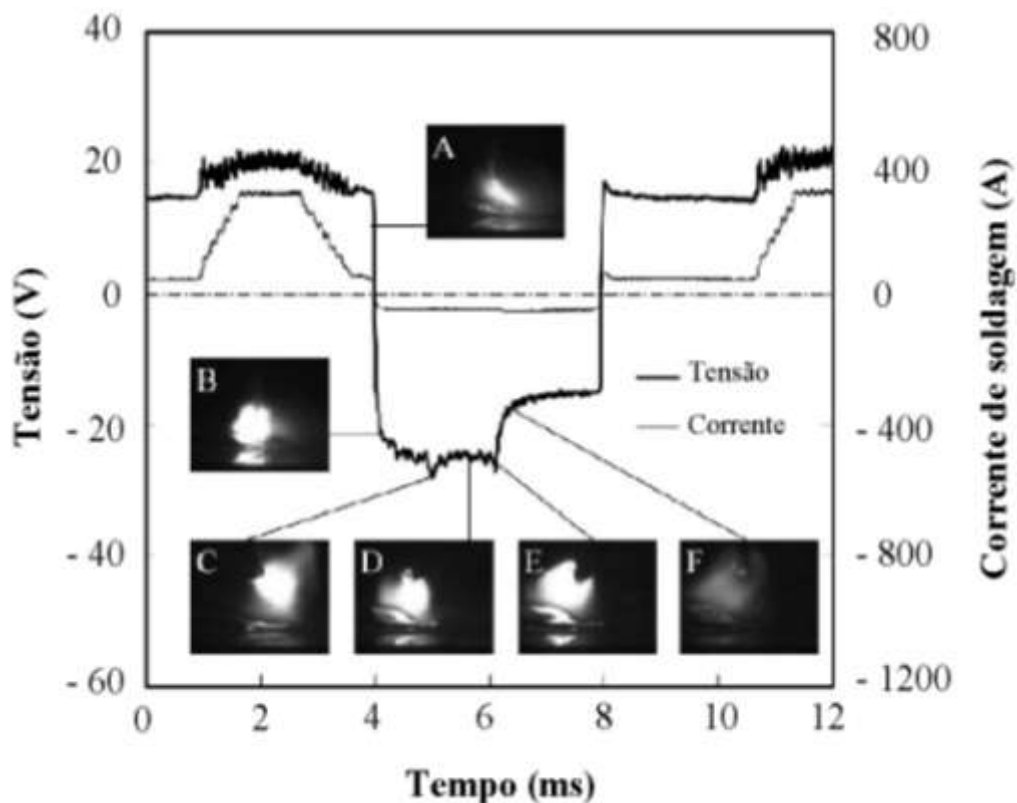
Relatada por Modenesi e Nixon (1994) a instabilidade e o aparecimento de uma tensão anormal após a mudança de polaridade relatada por Tong *et al.*(2005), podem ter uma importante influência nas condições operacionais na soldagem de aços ligados para os quais um baixo teor de componentes oxidantes no gás de proteção é necessário.

Este fenômeno pode ter ainda um papel importante na soldagem de ligas não ferrosas, para as quais se trabalha com misturas inertes.

Logo, um melhor conhecimento destes fenômenos permitirá a adoção, em equipamentos modernos de soldagem, de medidas corretivas para o seu controle.

Além disso, o possível efeito destes fenômenos no formato do cordão poderá ser utilizado, em situações controladas, para uma melhoria da produtividade do processo de soldagem GMAW.

Figura 3. 17 – Aumento anormal na tensão do arco após a mudança de polaridade do positivo para o negativo na soldagem MIG com inversão de polaridade



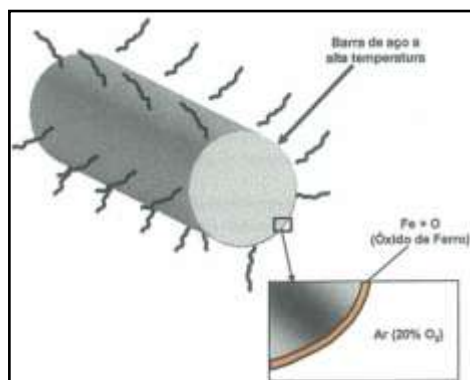
Fonte: Tong et al. (2005)

3.2. Processo de Fabricação de Eletrodos

3.2.1. Tratamento de superfície do fio máquina

De acordo com Zwevegem (1992), no processo de produção do fio máquina surgem em sua superfície camadas de óxidos de ferro provenientes do processo de resfriamento associados à composição química do material laminado (figura 3.18).

Figura 3. 18 – A oxidação do aço em alta temperatura

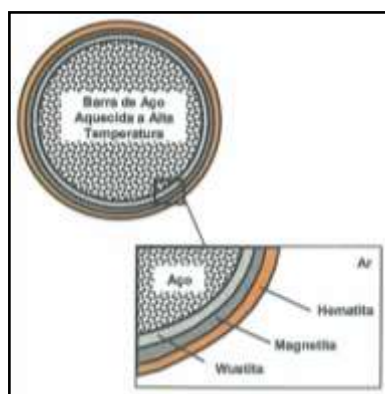


Fonte: Cetlin (2007)

Para Cetlin (2007), fios de aços aquecidos reagem com oxigênio na atmosfera formando uma camada de óxido de ferro em sua superfície conforme figura 3.18. Estes fios de aços fabricados por laminação a quente apresentam uma camada superficial de óxido também conhecida por “carepa”. A espessura da carepa sobre um fio de aço aquecido aumenta com o tempo e a temperatura do fio.

Conforme figura 3.19 observa se o posicionamento da formação das camadas de óxidos sobre a superfície do arame. FeO é um óxido com maior porcentagem de ferro se apresenta em uma camada mais espessa é menos dura e reage bem com ácidos. A magnetita, Fe_3O_4 este óxido possui uma camada mais dura, porém porosa e frágil e não reage bem com ácidos. Fe_2O_3 camada com baixa porcentagem de ferro e também difícil reação com ácidos (ZWEVEGEM, 1992). A tabela 3.3 apresenta as fórmulas, a dureza e as cores características dos óxidos.

Figura 3. 19 - Tipos e óxidos na carepa dos Aços



Fonte: Cetlin (2007)

Tabela 3.3 – Fórmula, dureza e cor característica dos óxido

Tipo de Óxido	Dureza Vickers (HV – MPs)	Cor	Características
Hematita (Fe ₂ O ₃)	10300 HV	Avermelhado	Compacto e Aderente
Magnetita (Fe ₃ O ₄)	4300 a 5000 HV	Preto	Poroso
Wusitita (FeO)	2700 a 3500 HV	Cinza	Poroso

Fonte: Cetlin (2007)

Para Zwevegem (1992), surgem impurezas devidas durante o transporte e o manuseio destes materiais. Acumula-se sobre a superfície toda espécie de impurezas no arame e também manchas de ferrugem que podem resultar em uma descamação parcial ou total da camada de óxido porosa.

Para processos subsequentes faz-se necessário a retirada destes óxidos e impurezas da superfície do fio máquina.

A camada de oxido dura penetra na superfície do arame e resulta em uma má qualidade nos processos seguintes que gera um grande desgaste nas fieiras e ruptura do arame (ZWEVEGEM, 1992).

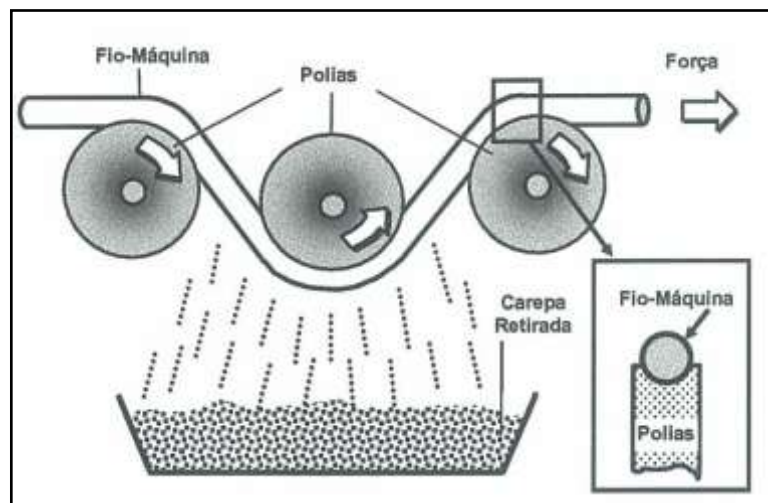
O processo de retirada destes óxidos e impurezas pode ser químico ou mecânico. Sendo que o processo químico também conhecido por decapagem química e limpeza mecânica.

3.2.1.1. Limpeza Mecânica

O processo consiste na quebra da camada de óxido frágil através da passagem do fio máquina por uma série de roldanas que proporcionam dobramentos sobre polias com diâmetros específicos visando o maior número de quebra possíveis destas camadas, conforme ilustrado no esquema da figura 3.20. Posteriormente utiliza-se a combinação de escovas metálicas e ar comprimido para e retirar resíduos de óxidos

finos (ZWEVEGEM, 1992).

Figura 3. 20 – Limpeza Mecânica industrial



Fonte: Zwevegem (1992)

Conforme Cetlin (2007), o material é tracionado pelo primeiro bloco da máquina de trefilar que através deste esforço movimentado o material sobre o canal das polias que se encontram e planos ortogonais entre si. Para ter sucesso neste processo é necessário que o alongamento percentual da fibra mais externa tenha pelo menos 8%, de forma similar ao caso da tração.

O decapador mecânico provoca o alongamento do material, além de decapar o material por flexão. O alongamento do decapador mecânico cresce com o número de suas polias, com a queda do diâmetro dessas polias e com a redução do teor de carbono do aço (CETLIN, 2007).

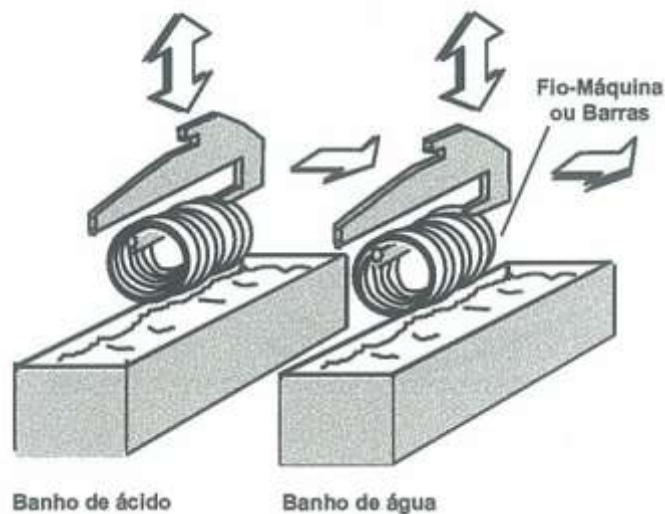
Este processo oferece vantagens como: otimização do tempo, menor custo e o fato de ser menos prejudicial ao ambiente. A decapagem pode ser feita antes de o arame entrar na máquina de trefilar, com um passo específico separado de trabalho o que se evita manuseio desnecessários com o fio máquina. As desvantagens deste processo está associada a dificuldades de reduções altas, onde os resíduos de óxidos causam rupturas durante o processo de trefilação e um desgaste maior de feiras. Para uma boa decapagem a camada de oxido tem que ser frágil (ZWEVEGEM, 1992).

3.2.1.2. Decapagem Química

Para Zvevegem (1992) é um processo onde o arame é imerso durante um tempo específico em um banho de ácido, de modo que o ácido reage com o ferro limpando a superfície do arame como mostra a figura 3.21. Para arames de baixo teor de carbono usa-se o H_2SO_4 ou HCL e para arames de alto teor de carbono utiliza-se o HCL.

De acordo com Cetlin (2007) a carepa não é dissolvida pelo ácido, que penetra nas fissuras da carepa, e reage com o ferro. Forma-se o gás hidrogênio, que quebra e expulsa a carepa.

Figura 3. 21 – Decapagem Química



Fonte: Cetlin (2007)

O tempo de decapagem deve ser observado, porque deve ser o suficiente para garantir a limpeza perfeita do arame uma vez que o uso de tempo demasiado pode corroer a superfície do mesmo. A velocidade da limpeza depende da concentração do ácido, da temperatura, do percentual de ferro presente no ácido e da movimentação do banho. Depois da decapagem é necessário lavar e neutralizar os ácidos residuais presentes na superfície do arame (ZWEVEGEM, 1992).

Após a decapagem química, é necessário proteger a superfície do material, para

que ela não oxide novamente. Além disso, é necessário neutralizar eventuais restos de ácidos. Contudo é preciso também que o fio-máquina tenha uma superfície que ajude na lubrificação durante a trefilação e que ajude a carrear sabão para a ferramenta de conformação mecânica que são as fieiras. Estas proteções podem ser feitas com recobrimento de cal assim como com bórax:

O recobrimento com cal é obtido mergulhando o fio-máquina decapado em um banho de cal a cerca de 90°C a 95°C. Reage-se a CaO com a água, formando assim o hidróxido de cálcio – Ca(OH)₂. A aderência do Ca(OH)₂ à superfície do material depende do tamanho de suas partículas.

As partículas de Ca(OH)₂ crescem rapidamente a temperatura acima de 100°C. Muitos banhos de cal são aquecidos com vapor, e é comum que a tubulação de vapor, na entrada do banho, fique a temperatura bem acima de 100°C. Se isso acontecer, a qualidade do banho de cal piora rapidamente e a cal não consegue aderir bem ao aço (CETLIN, 2007).

Na decapagem com HCL, deve haver cuidadosa lavagem do ácido após a decapagem, pois restos de ácido podem reagir com a cal, formando cloreto de Cálcio (CaCl₂) que absorve água e provoca pontos de ferrugem no material. Depois de passar pela cal, o material deve se seco com temperaturas entre 200°C e 300°C.

No caso do bórax, utilizam-se banhos com concentrações de 2,5 a 6 gramas para cada litro de água, aquecidos até 90°C. O banho de bórax deixa uma camada de bórax penta hidratado (com 5 moléculas de água) na superfície do material. Este tipo de bórax adere bem à superfície do aço e alonga junto com o aço na trefilação, fornecendo uma boa lubrificação entre o material e a fieira. Se o bórax se seca abaixo de 60°C, ele absorve mais água, ficando com 10 moléculas de água (bórax decahidratado). Este tipo de bórax é branco e parece um pó, e não oferece uma boa aderência e lubrificação na trefilação.

3.2.2. Trefilação

O processo de trefilação consiste na redução do diâmetro do fio em sucessivos

passos de redução. Para que a trefilação seja possível, inicialmente é necessário retirar a carepa que se encontra na superfície do fio-máquina conforme dito no item anterior.

Além da retirada da carepa é necessário lubrificar a região entre o material e a fieira para que seja possível a trefilação (ZWEVEGEM, 1992).

3.2.2.1 Tipos de lubrificação

De acordo com (CETLIN, 2007) há dois tipos básicos de lubrificação: lubrificação limite ou lubrificação com filme espesso.

A lubrificação limite envolve uma fina camada, classificada monomolecular, separando as duas superfícies em contato. A espessura fica na ordem de 10nm (10^{-9} m). Lubrificantes deste tipo aderem às superfícies em movimento. Este tipo de lubrificação utiliza-se ácidos graxos (ácido esteárico, palmítico, oléico) que mantêm suas características lubrificantes a temperaturas de até 150°C. Compostos de Cloro ou enxofre também são usados, este reage com o ferro na superfície dos arames, formando cloretos e sulfetos de ferro sendo que os cloretos suportam temperaturas de 350°C e os sulfetos de até 600°C.

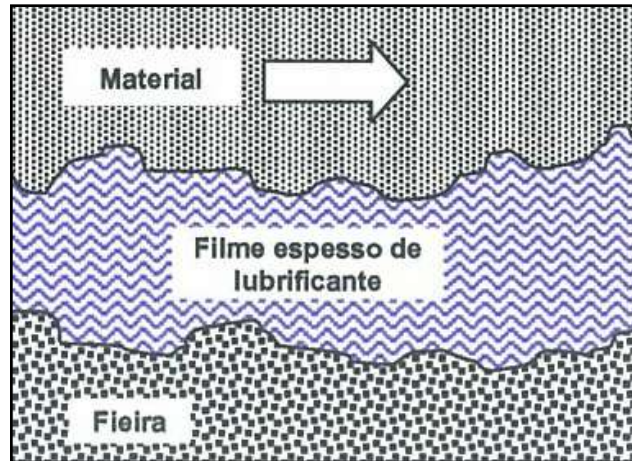
Quando se tem condições severas de lubrificação limite, pode-se recobrir o material com uma camada de fosfato de zinco, que é um excelente lubrificante. A camada de fosfato é muito mais espessa que 10nm, mas pode-se considerar como sendo um caso de lubrificação limite.

A lubrificação com filme espesso existe uma separação completa da superfície em movimento através de um filme lubrificante como pode ser observado na figura 3.22. A espessura do filme é varias vezes maiores que as asperezas das superfícies em contato, conforme a figura abaixo:

A lubrificação com filme espesso é muito boa e reduz os coeficientes de atrito, porém só é possível conseguir a lubrificação com filme espesso se o lubrificante estiver sob alta pressão. As superfícies do material e da fieira não são lisas, mas

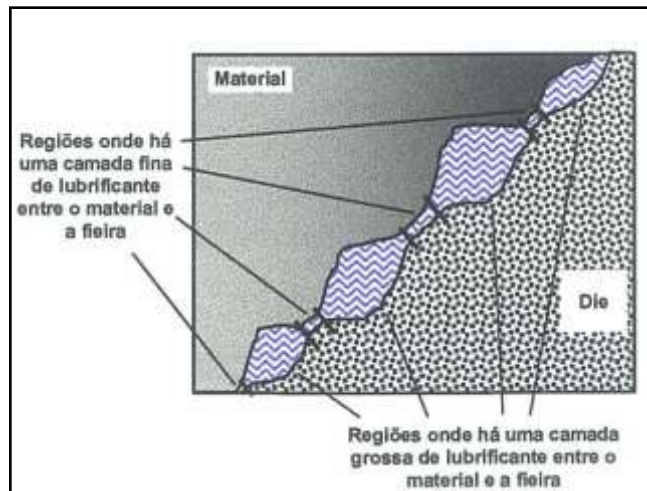
irregulares e cheias de vales e resaltos, com isso a camada de lubrificante pode não ter a mesma espessura em todos os pontos conforme a figura 3.23.

Figura 3. 22 – Camada de lubrificação espessa



Fonte: Cetlin (2007)

Figura 3. 23 – Espessura da lubrificação na trefilação



Fonte: Cetlin (2007)

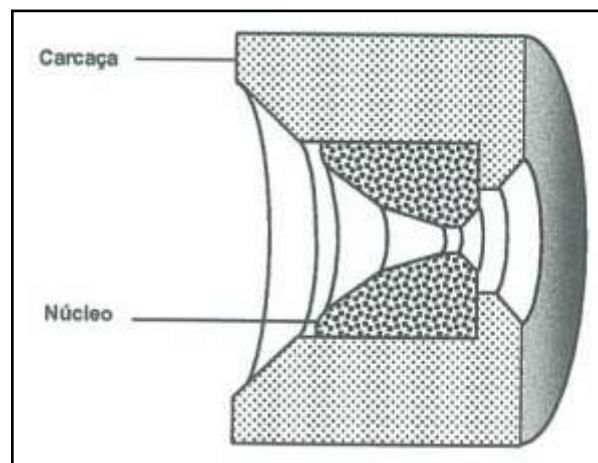
Conforme Frigerio (2011) a espessura do filme lubrificante depende de uma série de fatores como: tipo de lubrificante utilizado, aderência do lubrificante ao material antes da trefilação, rugosidade superficial do material, limite de resistência do aço sendo trefilado, geometria da fieira de trabalho e das fieiras de pressão, temperatura do material e da fieira e velocidade de trefilação.

3.2.2.2 Fieiras

No processo de trefilação as fieiras são o que se chama de ferramentas de conformação mecânica. E com o uso das fieiras que se consegue obter os diâmetros desejados e atender ao processo de redução do fio-máquina.

Inicialmente, as fieiras eram simples furos cônicos em chapas de aço ou ferro fundido. No entanto, desgastavam-se rapidamente, especialmente quando se trefilava material de maior resistência mecânica. A partir de 1920, passou-se a utilizar o WC (carboneto de tungstênio) nas fieiras. Esse material era muito duro e resistente ao desgaste, e permitia a trefilação por períodos de tempo razoáveis sem que a fieira sofresse desgaste excessivo. Como o WC é de custo elevado, ele é utilizado como um pequeno núcleo montado em uma carcaça (CETLIN, 2007), como mostra a figura 3.24.

Figura 3. 24 – Núcleo de WC em carcaça de aço Carbono

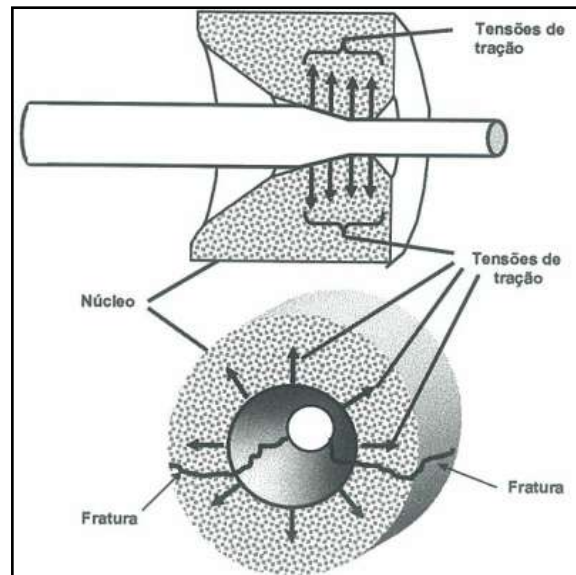


Fonte: Zwevegem (1992)

O WC é muito resistente à compressão e ao desgaste. Pode-se observar na figura 3.25, durante o processo de trefilação, que o núcleo fica submetido a tensões de tração. WC quebra-se facilmente sob tensão de tração. As tensões aplicadas vão de 200 MPa até mais de 2000 MPa, dependendo do material sendo trefilado (baixo ou alto teor de carbono). Para evitar a quebra do núcleo de WC durante a trefilação, ela é montada dentro de um núcleo de aço carbono. Às vezes usa-se ainda interferência térmica (aquecimento da carcaça antes da prensagem do núcleo). Com isso a

carcaça aplica esforços de compressão sobre o núcleo, e evita sua fratura durante a trefilação (ZWEVEGEM, 1992).

Figura 3. 25 – Tensões sobre o núcleo de WC



Fonte: Zwevegem (1992)

As carcaças das feiras são fabricadas com aços comuns, com carbono até 0,45%. Os núcleos podem ser de WC ou diamante. O núcleo de WC é uma mistura de pequenos grãos de carboneto de tungstênio, numa matriz de cobalto (Co). O núcleo de WC tem de 5 a 10% de cobalto, e o grão de WC tem o tamanho de 0,001 mm a 0,10 mm. A qualidade do núcleo de WC depende muito da quantidade de cobalto, do tamanho dos grãos de WC e a quantidade de poros. Quanto menos poros e menor o tamanho do grão mais duro o núcleo de WC. A maior dureza que um aço trefilado pode ter é cerca de 6 a 7GPa. O núcleo de WC é muito mais duro como mostra a tabela 3.4: (CETLIN, 2007).

Tabela 3. 4 – Resistência WC X Trefilado (CETLIN, 2007).

% de Cobalto	Dureza Vickers (HV – GPa)	
	Grão grosseiro de WC	Grão fino de WC
5	15	18
10	13	14

Fonte: Cetlin (2007)

De acordo com Frigerio (2011) quando se deseja uma resistência ao desgaste ainda maior alcançado com uso do WC, utiliza-se núcleos de diamante. Esses núcleos são também quebradiços e necessitam de carcaças para não fraturar durante a trefilação. Os núcleos de diamantes são na ordem de 20 a 30 vezes mais caros do que aos núcleos de WC, mas duram muito mais. Sua utilização depende de uns cuidados a análise técnica-econômica.

Os núcleos mais comuns são de diamante policristalino (PDC), fabricados a partir de pequenos grãos de diamante sintético (diâmetro de 0,004mm a 0,025mm) misturados com cobalto. Durante a fabricação o cobalto fica somente como pequenas regiões dentro do diamante. Quando os grãos de diamantes são grandes, a resistência ao desgaste é alta, mas o material é difícil de polir e o arame fica com acabamento ruim. Quando os grãos de diamantes são pequenos, o desgaste do núcleo é mais acentuado, mas o acabamento do arame fica melhor.

Segundo (ZWEVEGEM, 1992) a geometria das fieiras é fundamental para a obtenção de um material trefilado de qualidade. A maior parte dos problemas devido à geometria das fieiras considera-se que está nos parâmetro de desenho.

O cone de trabalho é onde ocorre a redução de área do material sendo trefilado. O cone de saída visa quebrar a quina viva que existiria na saída como mostra a figura 3.26. O cone de trabalho deve ser muito bem polido para diminuir o atrito entre a fieira e o material. O raio de entrada não precisa ser polido. Sua função é eliminar cantos vivos, que poderiam danificar o fio máquina caso esse tocasse a fieira nessa região. O cone de entrada também não precisa ser polido. Sua função é auxiliar na entrada do lubrificante para a região do cone de trabalho. A região paralela da fieira visa diminuir o desgaste da saída da fieira e assim manter durante mais tempo a bitola de saída do material. Se o comprimento do paralelo for muito pequeno, o desgaste é mais rápido e o material sai com bitola acima do aceitável. Se o comprimento é grande, o desgaste será menor, mas a força para trefilar aumentará. Normalmente, o comprimento do paralelo fica entre 0,3 a 0,5 da bitola de saída (CETLIN, 2007).

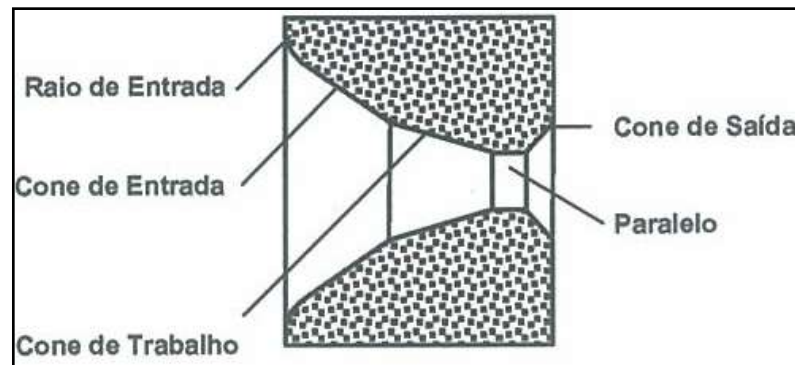
Frigerio (2011) afirma que o paralelo deve ser cilíndrico e não cônico. Se ele for

cônico, haverá redução de diâmetro do material no paralelo, que sofrerá rápido desgaste.

A fieira desgasta-se durante o processo de trefilação, e seu diâmetro de saída vai aumentando. Além disso, a região do cone de trabalho onde o material toca primeiro na fieira é onde ocorrem maiores danos na fieira, podendo se formar um “anel” de desgaste.

Nestas regiões são arrancados grão de carboneto de tungstênio que às vezes aderem a outros lugares do cone de trabalho e começa a arranhar o material trefilado.

Figura 3. 26 – Regiões da Fieira



Fonte: Zwevegem (1992)

Dentro de todas estas análises, algo importantíssimo colocado por (ZWEVEGEM, 1992) é o parâmetro delta (eq. 3.8), que por sua vez relaciona a altura e o comprimento da zona de deformação.

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} (1 + \sqrt{1 - r})^2$$

Eq. 3.8

Com o uso deste parâmetro é possível perceber os efeitos ideais da deformação em relação à resistência à deformação do material e resistência de fricção.

Com vistas a isso pode dimensionar a força de tração e a temperatura do arame garantindo sua qualidade. Conforme tabela 3.5, pode-se observar que um valor baixo

de delta significa uma zona de deformação larga com uma grande quantidade de contato no interior da fieira e um valor alto de delta significa uma zona de deformação curta com um contato limitado no interior da fieira.

Um valor de delta igual a 1 significa que a largura e o comprimento na zona de deformação são iguais.

Ângulos pequenos de fieiras e altas reduções indicam valores baixos de delta, ângulo alto de fieiras e reduções baixas significam valores elevados de delta.

O controle do parâmetro delta é extremamente importante para evitar explosões no núcleo, uma das principais causas de rupturas dos arames no ciclo de trefilação.

Tabela 3. 5 – Valor de Delta em função do semiângulo da fieira

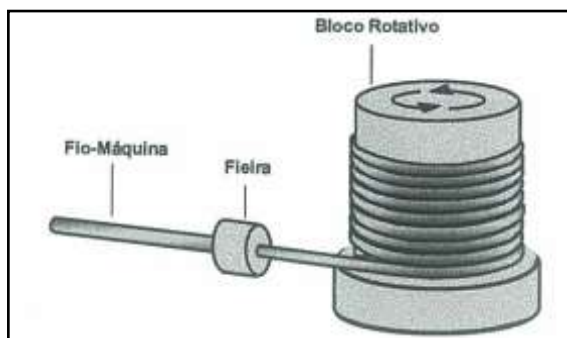
semi-ângulo	% de REDUCCIÓN						
α	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
2°	2.73	1.33	0.86	0.63	0.49	0.39	0.33
4°	5.46	2.66	1.72	1.26	0.97	0.79	0.65
6°	8.19	3.99	2.59	1.88	1.46	1.18	0.98
8°	10.92	5.32	3.45	2.51	1.95	1.57	1.30
10°	13.65	6.65	4.31	3.14	2.44	1.97	1.63
12°	16.30	7.94	5.15	3.75	2.91	2.35	1.95
14°	19.03	9.27	6.01	4.38	3.40	2.74	2.27
16°	21.76	10.59	6.87	5.01	3.89	3.14	2.60

Fonte: Frigerio (2011)

3.2.2.3 Máquinas de Trefilar

Máquinas de trefilar sem deslizamento é uma série de bloco em sequência que acondicionam e resfriam o material reduzido pela fieira. São blocos especiais que possuem geometria que favorecem o deslocamento do material sobre as mesmas.

Cada bloco possui uma velocidade especifica que visa compensar o alongamento do arame ao longo de todo o equipamento. Estes blocos podem ser horizontais ou verticais como mostra a figura 3.27 e com ou sem acumulação de material (CETLIN, 2007).

Figura 3. 27 – Bloco rotativo de Trefilação

Fonte: Zwevegem (1992)

3.2.3. Retrefilação Úmida

A trefilação via úmida é semelhante à trefilação seca, entretanto o lubrificante utilizado é um sabão líquido. O sabão líquido lubrificante é processado numa central de lubrificação, que recolhe o lubrificante aquecido utilizado nas máquinas de trefilar e promove a sua refrigeração em trocadores de calor de placas, logo, o sabão resfriado é novamente bombeado para as máquinas. Todo o processo é controlado, levando-se em conta as variáveis do lubrificante, tais como reações bioquímicas, temperatura e vazão. (ZWEVEGEM, 1992).

Este processo ao contrario da trefilação seca que não possui deslizamento do arame sobre as bobinas, apresenta esta variável importante para o processo de retrefilação. A retrefilação úmida trabalha com reduções menores em que o objetivo principal é ter um material trefilado com diâmetros reduzidos e com superfícies cada vez mais limpas. Neste processo o arame sofre atrito tanto pelas fieiras responsáveis pela redução quanto como pelos cones de trefilação do equipamento onde este material desliza até o bobinamento.

3.2.4. Cobreamento

Uma reação eletroquímica é um processo químico heterogêneo (que envolve uma interface sólido/solução) envolvendo a transferência de cargas para um eletrodo, geralmente um metal ou semicondutor. A transferência de carga pode ser um processo catódico no qual uma espécie é reduzida pela transferência de elétrons do

eletrodo. Ao contrário, a transferência de carga pode ser um processo anódico onde uma espécie é oxidada pela remoção de elétrons para o eletrodo. Um processo eletroquímico só é possível em uma cela que apresente ambas as reações catódicas e anódica de forma a se manter um balanço de cargas, isto é, a quantidade de carga envolvida no processo de redução tem que ser a mesma que a envolvida no processo de oxidação (VAGRAMYAN, 1959).

O material retrefilado ainda possui uma boa carga de resíduos provenientes dos processos anteriores. Com isso, antes do processo de cobreamento o arame passa por um banho de ácido sulfúrico para em seguida iniciar o processo de cobreamento por eletro deposição (ZWEVEGEM, 1992).

De acordo com (VAGRAMYAN, 1959), após certo tempo de exposição, será alcançado equilíbrio de forma que a taxa de redução (reação catódica) se iguale a taxa de oxidação (reação anódica). Sendo assim o cobre é depositado sobre o aço formando uma pequena camada em torno do seu diâmetro. O tempo que o metal permanecer dentro da solução pode influenciar na espessura da camada de cobre depositada.

3.2.5. Acondicionamento

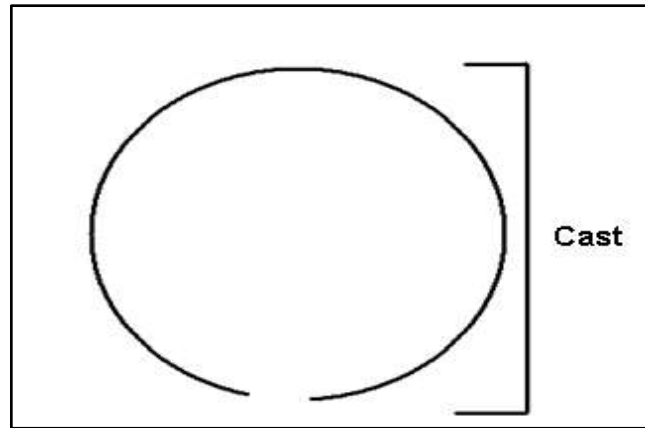
O processo de condicionamento varia em função do tipo de equipamento que irá consumir o arame no processo de soldagem. Neste processo de condicionamento são realizadas medições de *Cast* e *Helix*, explicados a seguir, visando melhor desempenho do arame durante a soldagem.

3.2.5.1 Cast

Se uma espira é retirada do seu modo de condicionamento, e então cortada seu diâmetro pode aumentar ou diminuir. A tendência de abrir ou fechar da espira é denominado *Cast*. A deformação da espira depois de cortada é exclusivamente elástica e é conhecida como “retorno elástico”. O *Cast* de uma espira reflete as operações de dobramento da espira em seu plano.

O *Cast* pode ser entendido como o diâmetro da espira, conforme ilustrado na figura 3.28:

Figura 3. 28 – Ilustração de Cast



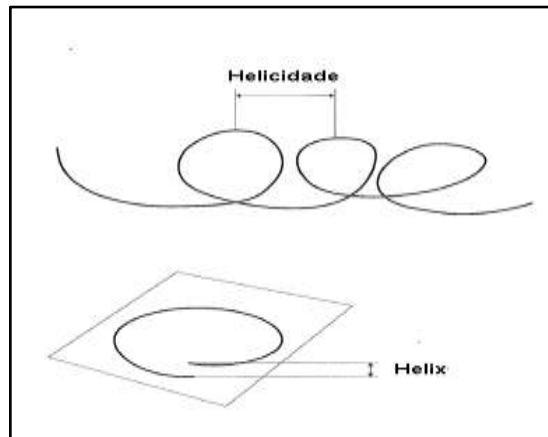
Fonte: Elaborado pelo Autor

O não acompanhamento desta medida pode provocar variações durante a alimentação do material, com o aumento da carga para retirar o arame do carretel durante o processo de soldagem. No desbobinamento do fio pode ocorrer embaraçamento e afetar o alinhamento do arame na saída do bico da tocha.

3.2.5.2 Helix

Para o caso do *Helix* a espira após ser cortada pode permanecer plana ou não. A tendência de a espira assumir a forma de uma hélice é denominada *Helix* da espira. A avaliação do *Helix* pode ser afetada pelo peso do material, especialmente para grandes espiras de material fino. Nestes casos, o *Helix* deve ser avaliado com a espira pendurada na vertical (CETLIN, 2007).

O *Helix* é a medida entre as duas pontas da espira. Logo, quanto mais empenado o material estiver, maior será essa distância, conforme ilustrado na figura 3.29. O arame ideal é aquele com o menor *Helix* possível e com o *Cast* com a mínima variação. A consequência de um arame empenado, ou seja, com o *Helix* fora dos padrões, é o efeito de deslocamento durante a alimentação do arame da poça de soldagem onde o mesmo é fundido.

Figura 3. 29 – Ilustração de Helix

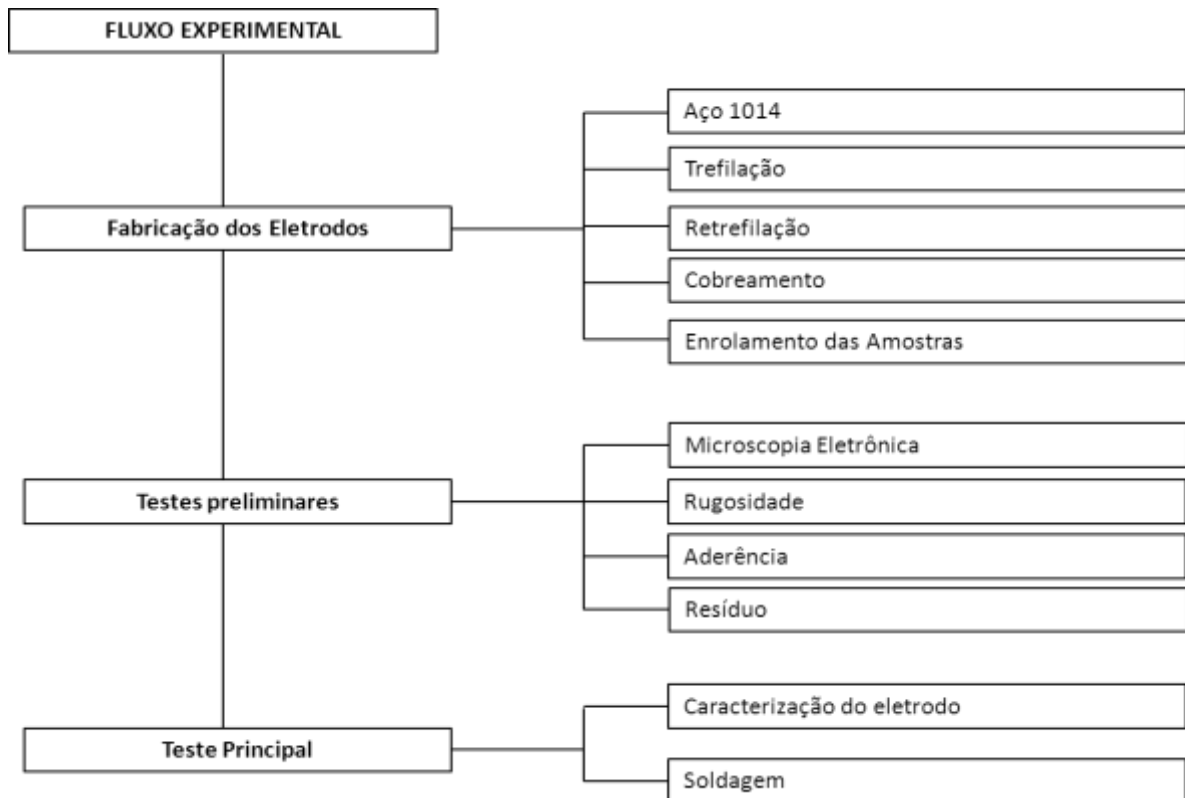
Fonte: Elaborado pelo Autor

A medição é feita em um quadro exclusivo, próprio para esse fim, que possui um sistema de movimentação horizontal e vertical, fita para medição nos dois sentidos, e marcações coloridas. O *Cast* deve ser medido com o quadro na posição horizontal para evitar que o peso do arame camufle a medida real. O *Helix*, por sua vez, deve ser avaliado com o quadro na posição vertical, pois, o peso do fio pode impedir que o material se comporte naturalmente.

4. METODOLOGIA

O trabalho experimental conforme fluxograma mostrado na figura 4.1, foi desenvolvido nesta pesquisa e o mesmo foi dividido em três etapas. A primeira etapa refere-se à produção do material. A segunda etapa refere-se a ensaios preliminares e a última etapa refere-se à análise dos dados.

Figura 4. 1 – Fluxograma do trabalho experimental desenvolvido



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.1 Materiais

4.1.1 Eletrodo

Para o estudo deste trabalho o arame utilizado foi o ASTM 1014, conforme AWS A5.18-05 ER70S6 (2006), no diâmetro de 1,2mm nominal. A escolha deste diâmetro está associada à demanda industrial. A tabela 4.1 apresenta a composição química deste aço.

Tabela 4. 1 – Composição química do aço

Elementos	Limite Inferior	Limite Superior	Resultado
Alumínio	0,00	0,080	0,0015
Carbono	0,07	0,150	0,0870
Cobre	0,00	0,500	0,0340
Cromo	0,00	0,150	0,0219
Enxofre	0,00	0,025	0,0144
Fósforo	0,00	0,025	0,0136
Manganês	1,40	1,600	1,4200
Molibdênio	0,00	0,150	0,0062
Nitrogênio	0,00	0,006	0,0026
Níquel	0,00	0,020	0,0200
Silício	0,80	1,100	0,8370
Vanádio	0,00	0,030	0,0020

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.1.2 Fieiras para fabricação do arame

Na tabela 4.2 são apresentadas as especificações geométricas das fieiras utilizadas para confecção dos arames deste trabalho, bem como as faixas de trabalho de cada uma.

Conforme a especificação, em detalhes, tem sua composição maior que é o caso do carbeto de tungstênio e também a faixa de aplicação nos diâmetros.

Tabela 4. 2 – Especificação de Fieiras

ESPECIFICAÇÃO DE FIEIRAS									
Carçaça	Núcleo			Ângulo de entrada	Ângulo de redução	Ângulo de saída	Comprimento do paralelo	Tolerância diâmetro	Aplicação
	Especificação	Tamanho	% Co						
42X28	H6N	16 X 16	6 +/- 0,3	-	6° +/- 1°	40° +/- 5°	15% - 60%	+ 0,000 - 0,010 mm	0,50 - 1,60 mm
					6° +/- 1°			+ 0,000 - 0,014 mm	1,60 - 2,02 mm
					9° +/- 1°			+ 0,000 - 0,014 mm	2,03 - 2,40 mm
					9° +/- 1°			+ 0,00 - 0,02 mm	2,41 - 3,25 mm
					12° +/- 1°			+ 0,00 - 0,02 mm	> 3,26 mm

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2 Bancada para a execução dos testes de soldagem

O principal dispositivo utilizado neste trabalho foi a bancada de testes, onde foram realizados todos os testes de soldagem. Esta banca foi equipada com sensores, de modo a tornar possível a captura dos valores das variáveis de soldagem ao longo de toda a execução da solda. A seguir serão apresentadas as descrições dos principais componentes desta bancada.

- a) Cabeçote de alimentação de arame.
- b) Tensionador do mangote da tocha, no formato circular, de diâmetro 320mm, posicionado na região central do mangote da tocha. Este tensionador é responsável por aumentar a resistência ao deslizamento do arame dentro do conduíte.
- c) Tocha mecanizada para soldagem, resfriada à água, de ângulo reto e cabo de 3 metros de comprimento, equipada com um tacômetro ótico, responsável pela leitura da velocidade de alimentação do arame na entrada da tocha e um bocal de tocha com resfriamento à parte por água.
- d) Mesa para posicionar o metal de base utilizado para os testes, composta por estrutura principal que sustenta os eixos de movimentação, quadro de sustentação da placa de teste, motor elétrico e respectivo alimentador e uma coluna para fixação do suporte da tocha. O quadro de sustentação da placa de teste é movimentado em ambos os sentidos por dois fusos perpendiculares, sendo o principal – eixo X – movimentado por um motor elétrico e limitado por duas chaves de fim de curso, e o secundário – eixo Y – movimentado manualmente.
- e) Extrator de fumos, composto por unidade de extração principal, tubo flexível de extensão e bocal extrator. Este extrator tem a função de remover os fumos provenientes do processo de soldagem nas proximidades da placa de teste auxiliando a visualização do operador.

f) Componentes auxiliares

- fonte de soldagem MIG/MAG eletrônica que permite trabalhar no modo de operação em corrente constante;
- cilindro de gás com regulador de pressão;
- nível de bolha;
- balança calibrada com resolução de 0,1kg;
- cronometro digital;
- micrometro para conferir o diâmetro do arame com resolução de 0,01mm;
- sistema de aquisição e tratamento de dados que permite monitorar os valores dos parâmetros de soldagem como: corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame, composto por um microcomputador com software de aquisição de sinais, um conversor A/D com comunicação USB para a aquisição, uma interface de proteção e tratamento de sinais elétricos além de um tacômetro com saída analógica.

4.3 Análises da Superfície do Material Trefilado

Estas análises foram realizadas com o objetivo de revelar as condições de cada amostra de arame.

4.3.1 MEV

Análise da superfície do material trefilado foi realizada por meio de observação, conduzida, empregando a técnica de microscopia eletrônica de varredura para a avaliação da rugosidade, verificação da aderência do revestimento de cobre e qualificação. Além disto, o teste do MEV possibilitou analisar todos os elementos presentes na superfície da camada residual.

4.3.2 Teste de rugosidade

A medição da rugosidade de superfície pode fornecer informação relevante para avaliar o grau de agressão superficial provocado pelo processo de fabricação, conforme descrito por Novovic, et al. (2004). Logo, neste trabalho, a rugosidade do

arame é um parâmetro importante a ser verificado, pois este ensaio possibilitou verificar em cada amostra de arame o seu nível de acabamento superficial.

Neste trabalho, a rugosidade foi medida considerando diversos parâmetros normalizados (R_q , R_z , R_t , etc.). O parâmetro que apresentou a maior variação foi a rugosidade média (R_a). Assim, para este trabalho, o parâmetro escolhido e utilizado para a análise da rugosidade foi o R_a , obtido por um rugosímetro SurfTest SJ-201P fabricado pela Mitutoyo. Segundo a norma ABNT NBR 6405, o parâmetro R_a é a média aritmética de um perfil de rugosidade em relação a uma linha média dos picos e vales. O R_a é um parâmetro de controle, indicando qualquer alteração ocorrida em uma superfície. Constitui uma importante ferramenta para qualificar e quantificar uma rugosidade, sendo utilizado para análise em superfícies em que o acabamento apresenta sulcos bem orientados. É o parâmetro de medição mais utilizado, permitindo uma comparação com resultados alcançados por outros pesquisadores.

O teste de rugosidade foi realizado em todos os pontos do processo produtivo para verificar o comportamento da rugosidade do arame à medida que se altera a superfície de contato do mesmo com as fieiras e também após a deposição da camada de cobre sobre a superfície.

4.3.3 Teste de resíduo

Para avaliar a quantidade de resíduo que ficou aderido ao arame em função do seu processo de fabricação foi adotado o seguinte procedimento.

Inicialmente foi cortado um pedaço de amostra de arame após o término de sua fabricação e foi realizado a pesagem do mesmo em uma balança analítica, registrando o valor encontrado como peso 1 (P_1). Em seguida essa amostra foi imersa em um recipiente com água em ebulição, durante 10 minutos, para que pudesse ser feita a remoção dos resíduos de lubrificante ou neutralizadores. Após esse tempo, a amostra ainda quente foi imersa em uma mistura de álcool/éter. É importante salientar que a amostra não foi esfregada, pois esse procedimento poderia remover o revestimento de cobre do arame. Em seguida, a amostra foi seca, utilizando um secador, e foi pesada novamente na balança analítica, o valor

encontrado foi registrado como peso 2 (P2). Após todos os valores registrados, a quantidade de resíduo de cada amostra foi calculada utilizando a equação (4.1) de resíduos, materiais usados (chapa de aquecimento, estopa, Erlemeyer, proveta e balança de precisão).

$$P1 - P2 \times 1000 = g/Kg$$

$$P1 = g/m^2 = g/Kg \times \varnothing \times 1,96 \quad \text{eq. 4.1}$$

4.3.4 Teste de aderência

Para avaliar a aderência do cobre ao arame foi adotado o seguinte procedimento:

Inicialmente a amostra do arame com aproximadamente 500mm de comprimento foi cortado. Um arco em formato de anel com uma volta de 360° a mesma foi reduzida. Em seguida, foi colocada a ponta do arame na guia e o anel foi preso na garra do equipamento após etapa anterior. O arame foi enrolado sobre o próprio diâmetro com velocidade em torno de 1 volta por segundo, enrolando no mínimo cinco voltas.

Por fim, foi verificado se o arame que foi enrolado sobre o diâmetro estava escamando, ou seja, soltando o cobre. Esta etapa foi feita visualmente. O equipamento utilizado foi um enrolador manual da Belgo Bekaert Arames Ltda.

4.3.5 Testes de soldagem

Após a finalização da fabricação dos arames, os mesmos foram submetidos aos testes de soldagem utilizando o processo GMAW. Cada teste realizado obedeceu a seqüência dos seguintes passos.

Para cada teste foi selecionado uma amostra de arame. É importante ressaltar que para cada novo teste foi necessário que a amostra de arame fosse retirada do cabeçote de alimentação de arame para receber a nova regulagem e assim obter a massa da amostra (carretel + arame). Para obter essa massa foi necessário retirar o adaptador central. Caso a amostra de arame seja submetida a um novo teste, é necessário descartar o arame presente no conduíte e medir as características

dimensionais do arame (diâmetro nominal, cast, helix e torção residual). Montar o sistema de aquisição de dados dos valores da corrente e tensão de soldagem. Fazer a limpeza de todo o conduíte com argônio e recolocar o mesmo na tocha, passando o arame pelo alimentador, posicionando-o corretamente nos roletes, regulando a pressão correta de acordo com o diâmetro, acionar o motor do cabeçote alimentador, fazendo com que o arame se movimente, verificando o valor da pré-carga informada pelo transdutor. Após abrir o sensor óptico para verificar se o arame está corretamente alinhado no sistema interno de conduítes, é preciso verificar a leitura do sensor óptico através do gráfico “velocidade do sensor óptico” e verificar se o difusor de gás não está danificado.

Para cada soldagem de amostra de arame foi utilizado um bico de contato novo. A fixação do metal de base antes da soldagem foi feita com o auxílio de sargentos. Estes sargentos foram colocados em cada uma das extremidades do metal de base, para que o mesmo não sofresse distorções. Antes da soldagem foi realizada a limpeza mecânica na região da solda. A distância do bico de contato peça de trabalho (DBCP) foi ajustada.

Em todos os testes de soldagem foram feitos a aquisição dos valores da corrente e tensão de soldagem, através de um sistema de aquisição de dados específico para soldagem.

4.3.5.1 Metal de base para os testes de soldagem

O metal de base utilizado para a realização dos testes de soldagem foi o aço carbono SAE 1020 e os copos de provas com as seguintes dimensões (400 x 300 x 12,7mm).

A superfície do corpo de prova na qual se fez a deposição do metal de solda foi lixada com uma lixadeira rotativa com o objetivo de padronizar a superfície e diminuir a influência dos elementos provenientes de oxidação do material e que não são pertencentes ao arame, uma vez que poderiam prejudicar a estabilidade do arco.

Toda superfície do corpo de prova foi preenchida por cordões colocados lado a lado (sobreposição de 50% na largura) de forma automatizada. Devido ao fato de o eixo X da mesa de soldagem ser mecanizado e, em consequência, ser capaz de movimentar o corpo de prova com o mínimo de variação, definiu-se que o movimento principal do corpo de prova fosse realizado por este ficando o eixo Y responsável pelo deslocamento lateral da direção da soldagem (passo).

4.3.5.2 Caracterização dos arames

Antes de realizar cada teste de soldagem, as características dimensionais de todos os arames tiveram de ser avaliadas conforme critérios estabelecidos na norma AWS SFA-5.18. Esta norma estabelece para arames em bobinas os seguintes critérios:

a) Medição do diâmetro do arame

A medida do diâmetro real do arame, em milímetros, foi feita com o uso de um micrômetro, conforme mostra a figura 4.2. Segundo a norma AWS SFA-5.18, para arames com diâmetros entre 0,80 e 1,6mm, o valor do mesmo pode variar entre (-0,04mm) e (+0,01mm).

Figura 4. 2 – Forma de medir o diâmetro real do arame conforme norma AWS SFA-5.19.



Fonte: Elaborado pelo Autor

b) Cast:

O valor do cast foi obtido através da medição do diâmetro da circunferência, em milímetros, formada por um pequeno comprimento de arame quando este se

encontra desenrolado sobre uma superfície preferencialmente lisa.

Para se realizar esta medida foi preciso retirar cerca de três voltas de arame da bobina e coloca-lo sobre uma superfície que não oferecesse resistência ao seu desenrolamento natural, medindo assim o diâmetro da circunferência que este formou. A figura 4.3 exemplifica esta medição.

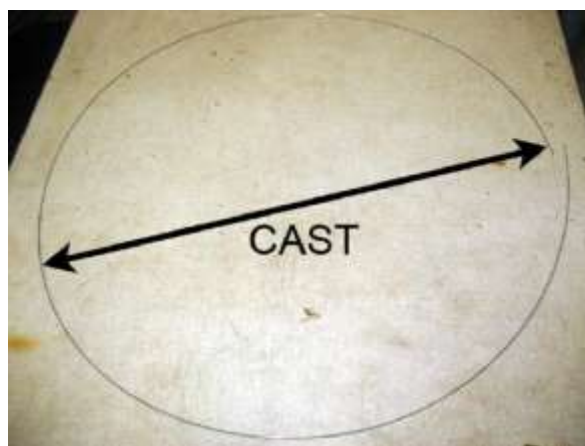
Os valores dos Casts recomendados pela norma SFA-5.18 estão apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4. 3 - Valores de Cast em função do tipo de embalagem e da bitola do arame,

Tipo de embalagem	Diâmetro do arame (mm)	Cast (mm)
Bobinas de 100 mm de diâmetro externo	Qualquer	Entre 100 e 200
Outras	Menor ou igual a 0,80mm	Maior ou igual a 300
	Maior ou igual a 0,90mm	Maior ou igual a 380

Fonte: AWS (1991)

Figura 4. 3 - Medição do cast de acordo com a norma SFA-5.18



Fonte: Elaborado pelo Autor

c) Helix

O valor do helix é a altura medida entre a ponta do arame, utilizado para medição do “Cast” e a superfície que o arame se encontra. A unidade do helix também é em

milímetros. Sua medição foi feita na mesma amostra retirada para obtenção do valor do Cast. A figura 4.4 exemplifica esta medição. Na tabela 4.4 são apresentados os critérios aceitáveis desta medição.

Figura 4. 4 - Medição do helix de acordo com a norma SFA-5.18.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 4. 4 - Valores do helix segundo AWS SFA-5.18

Tipo de embalagem	Diâmetro do arame (mm)	Helix (mm)
Bobinas de 100 mm de diâmetro externo	Qualquer	Menor que 7 mm
Outras	Menor ou igual a 0,80mm	Máximo de 25 mm
	Maior ou igual a 0,90mm	

Fonte: Elaborado pelo Autor

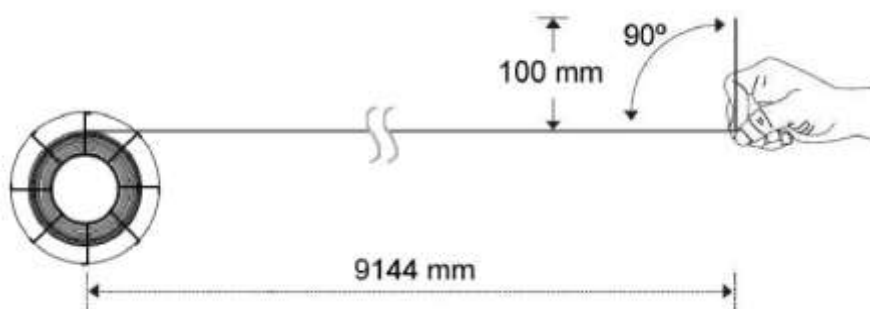
d) Torção Residual

A torção residual de um arame é a rotação medida, em graus, na ponta do arame a um comprimento de 9 metros da bobina.

É aceitável, para qualquer diâmetro de arame, uma rotação menor ou igual a 360° em um comprimento de aproximadamente 9144mm de arame esticado a partir da bobina. A figura 4.5 exemplifica esta medição.

De forma amostral da bobina, uma quantidade de arame, em metros, foi descartada a partir do segundo teste, sempre antes da verificação das características dimensionais e de sua recolocação no cabeçote alimentador, de acordo com a massa inicial da bobina e com sua bitola de arame, conforme indicado na tabela 4.5.

Figura 4. 5 - Demonstração da medição da torção residual ()



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 4. 5 - Quantidade de arame a ser descartado em função da massa inicial e bitola do arame da bobina

Massa Inicial da Bobina	Bitola do Arame (mm)	Metragem do descarte antes de cada teste (m)
Até 10Kg	até 0,90mm	100 +/- 10
	acima de 0,90mm	50 +/- 5
Acima de 10Kg	até 0,90mm	200 +/- 10
	acima de 0,90mm	100 +/- 10

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3.5.3 Pré-ajuste de pressão do arame da bobina

O eixo-suporte da bobina de arame, localizado no cabeçote alimentador, possui uma regulagem para aumentar ou diminuir o atrito entre sua parte móvel (cilindro externo, onde a bobina é colocada) e sua parte fixa (eixo de sustentação), através de duas molas localizadas em seu interior. Esta regulagem altera o comportamento do arame durante a alimentação. Se esta regulagem é muito apertada, o rolo dificultará sua alimentação por resistência (mascarando, por aumento, a carga de alimentação) e poderá acontecer a invasão do arame na camada imediatamente inferior à que esta sendo desenrolada, provocando assim um aumento ainda maior da carga de alimentação. Se a regulagem é insuficiente (“frouxa”), em princípio não se altera a carga de alimentação, mas pode acontecer de haver variação da carga, podendo acontecer “trancos” periódicos.

Ao iniciar o movimento de rotação da bobina, existe um pico de carga para vencer a inércia rotacional que tende a ajudar a alimentação, mas como a rotação do alimentador é constante, o arame perde o tensionamento à jusante e o rolo tende a parar novamente. E um novo ciclo se inicia.

Dessa forma, deve-se regular o aperto das molas do mecanismo, de forma que a carga despendida para desenrolar o arame seja a mínima possível, e dessa forma não mascarar a carga, mas que ela seja suficiente para evitar trancos.

A determinação da carga inicial na alimentação dos arames utilizados no processo de soldagem GMAW é calculada de acordo com a equação 4.2. Para bobinas com 300mm de diâmetro de arames de aço ao carbono de 1,2mm, ou seja, espiras lado a lado, deve-se regular as molas até que seja lido, no transdutor, o valor de carga em kg, calculado em função da massa da bobina (m_B), em kg, e da velocidade de alimentação (v_a) em m/min, quando o mesmo é alimentado livre (sem uso do mangote da tocha).

$$\text{Carga Inicial} = -0,39 + 0,08 m_B + 0,13 V_A \quad \text{eq.4.2}$$

Obs: Equações para outras bobinas (material e diâmetro do arame, tipo de desbobinamento e dimensão da bobina) precisam ser levantadas.

4.3.5.4 Deposição do Cordão

Os cordões de solda foram depositados sobre chapa, por um tempo máximo de até 10 minutos para cada teste, em toda a extensão da mesma. Pelo menos três testes foram feitos por bobina-amostra.

A regulagem da vazão do gás de proteção, composto por Ar + 8% CO₂, foi definida em 15 +/-1 /min, e a regulagem da distância bico de contato peça (DBCP) foi fixada em 20+/-0,5mm.

O acionador do motor que movimenta o eixo X da mesa posicionadora foi regulado para que a chapa de teste se movimentasse a uma velocidade (V_s).

A soldagem foi iniciada em uma das extremidades da placa de teste (placa nova) ou no final do ultimo cordão de solda realizado.

A fonte de soldagem foi programada para operar em modo corrente constante, definida de acordo com a bitola do arame, pois não é possível manter níveis altos de corrente em bitolas menores devido às limitações do cabeçote alimentador.

A velocidade de alimentação do arame foi definida para cada bitola, de forma a proporcionar um arco de soldagem estável com altura de 5 +/-1 mm. Já a velocidade de soldagem foi determinada a partir da premissa de manutenção do volume depositado de material, como definido na Equação 4.3.

A Tabela 4.6 apresenta os valores de corrente, os valores de velocidade de alimentação do arame e os valores das velocidades de soldagem referente a cada bitola.

$$\frac{V_A}{V_S} \cdot d^2 = 0,49 \quad \text{eq.4.3}$$

Onde V_A é a velocidade de alimentação, V_S é a velocidade de soldagem e d o diâmetro do arame.

Tabela 4. 6 - Velocidades de Alimentação e de Soldagem e Correntes nominais padronizadas em função da bitola de arame

Diâmetro do Arame (mm)	Velocidade de Alimentação	Velocidade de Soldagem (cm/min)	Corrente (A)
0,80	20,0	26 +/- 1	250 +/- 5
0,90	15,0	25 +/- 1	250 +/- 5
1,00	21,0	43 +/- 1	350 +/- 10
1,20	12,0	35 +/- 1	350 +/- 10
1,32	9,0	32 +/- 1	350 +/- 10

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os consumíveis utilizados na tocha de soldagem, no caso do conduíte e roletes, foram proporcionais ao diâmetro e ao material do arame.

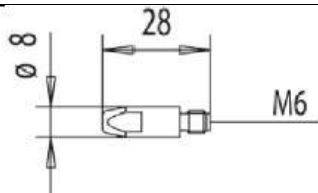
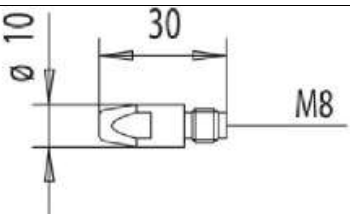
O manuseio, principalmente da bobina de arame, sempre foi feito com uso de luvas

protetoras limpas, para que não ocorresse oxidação de suas superfícies resultante do contato com a pele dos dedos.

Os bicos de contato utilizados nos testes foram compostos por uma liga de CuCrZr (cobre-cromo-zircônio), e para cada nível de corrente utilizado nos testes de soldagem, tem-se as dimensões recomendadas dos mesmos. A tabela 4.7 apresenta as dimensões dos bicos de contato indicados para cada nível de corrente de soldagem.

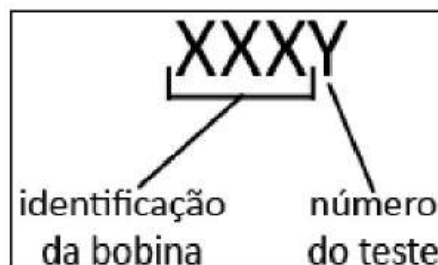
Toda a marcação dos corpos de prova após o teste seguiu a identificação do arame e o número do teste, de acordo com o modelo apresentado na Figura 4.6.

Tabela 4. 7 - Dimensões dos bicos de contato indicados para cada nível corrente

Corrente (A)	Dimensões do bico de contato (mm)
Até 250	
Acima de 250	

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 4. 6 - Modelo de Identificação dos Bicos de Contato



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os parâmetros de soldagem foram rigorosamente monitorados. O sistema de aquisição de dados foi instalado e configurado de acordo com a metodologia

descrita.

A aquisição dos sinais elétricos pertinentes a este ensaio foi obtida a uma taxa de 5 kHz, em dois momentos distintos do teste:

- a) durante os 10 segundos iniciais de teste, logo após a estabilização do arco, obteve-se os dados referentes ao comportamento inicial do arame.
- b) durante os 30 segundos finais de teste obteve-se os dados referentes ao comportamento final do arame.

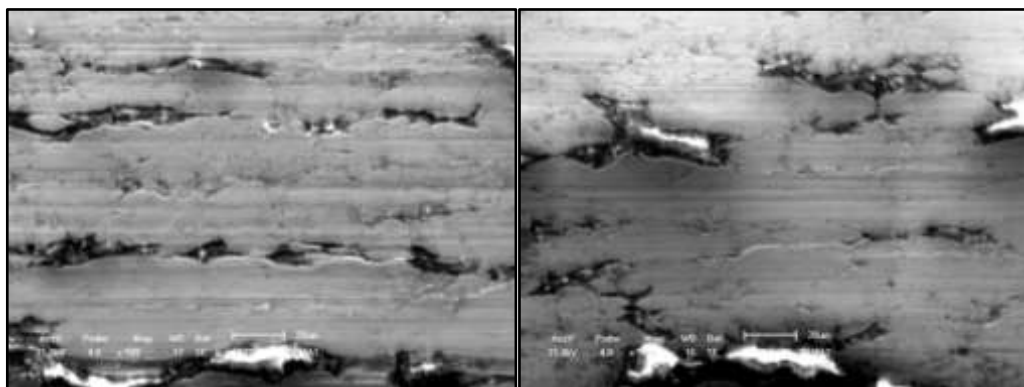
5. RESULTADOS E DISCUSÕES

5.1 Caracterização microestrutural da superfície do arame

Nesta análise são exibidas as imagens de duas seções de cada amostra de um ponto específico do processo produtivo, com ampliação de 500 vezes e 1000 vezes, mostrando a superfície da amostra em dois momentos diferentes.

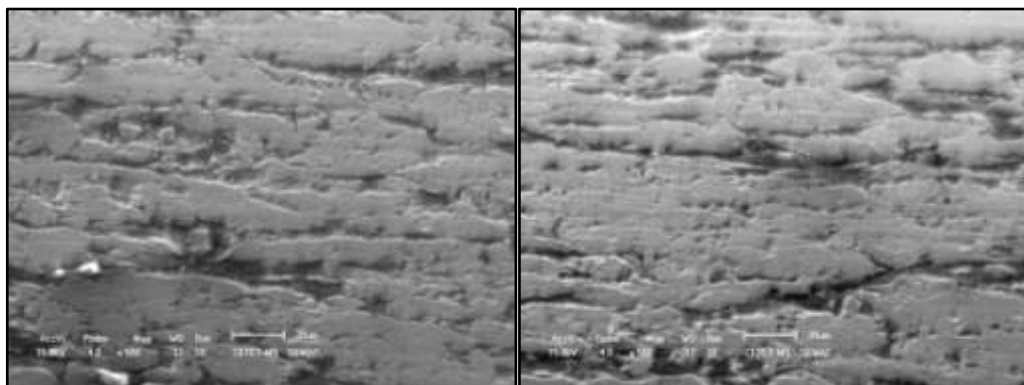
As figuras 5.1 à 5.6 se referem às superfícies produzidas pelas fieiras de semiângulos de 4°, 6°, 9°, 12°, 14° e 16° no ponto de produção – SCS (Sem cobre e sem limpeza). Neste ponto o arame possui diâmetro de 1,21mm e ainda não recebeu nenhum tratamento em sua superfície.

Figura 5. 1 – Superfície do arame com fieira de semiângulo 4° SCS



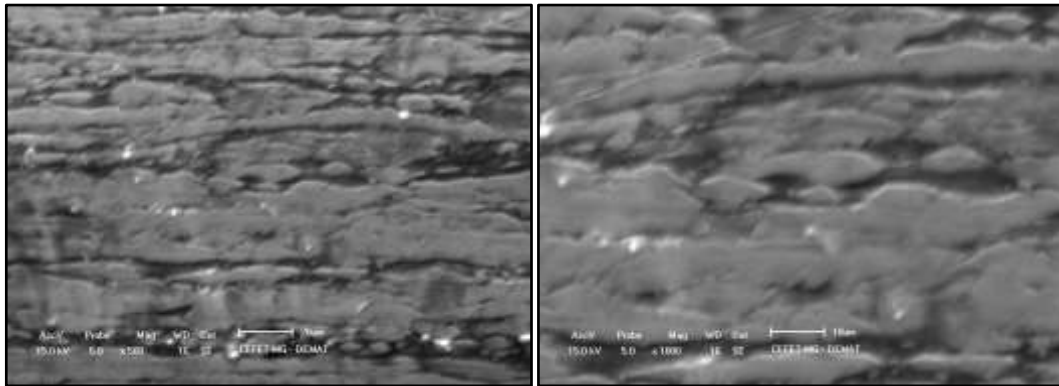
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 2 - Superfície do arame com fieira semiângulo 6° SCS



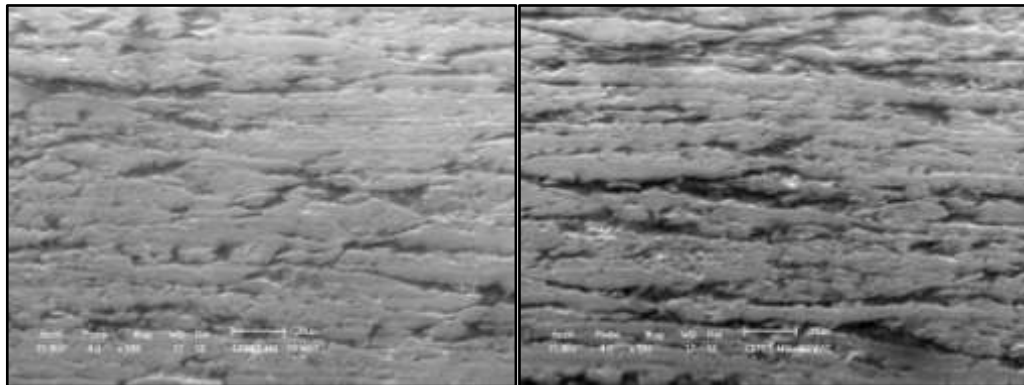
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 3 - Superfície do arame com fieira semiângulo 9° SCS



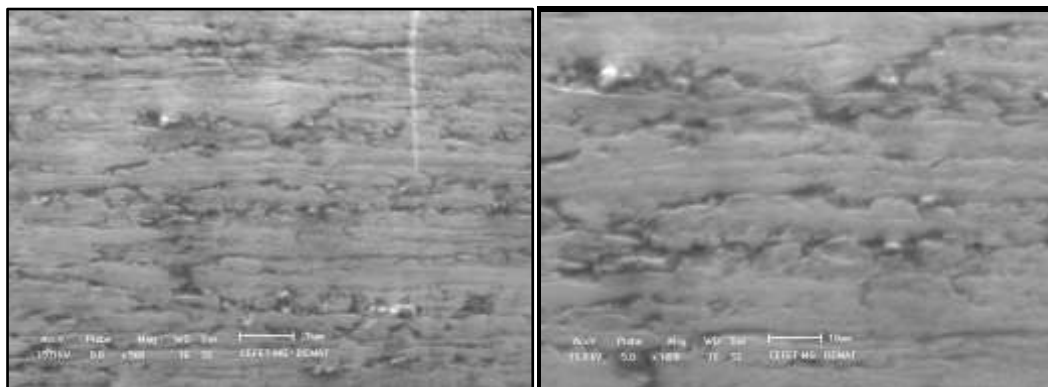
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 4 - Superfície do arame com fieira semiângulo 12° SCS



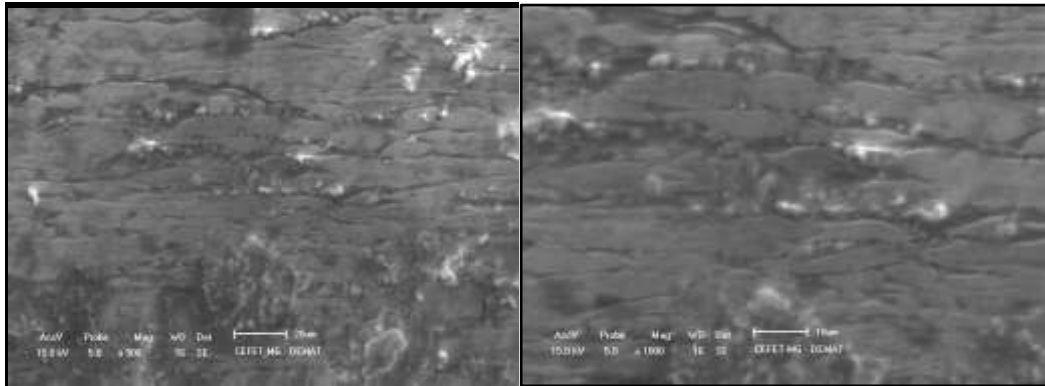
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 5 - Superfície do arame com fieira semiângulo 14° SCS



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 6 - Superfície do arame com fieira semiângulo 16° SCS

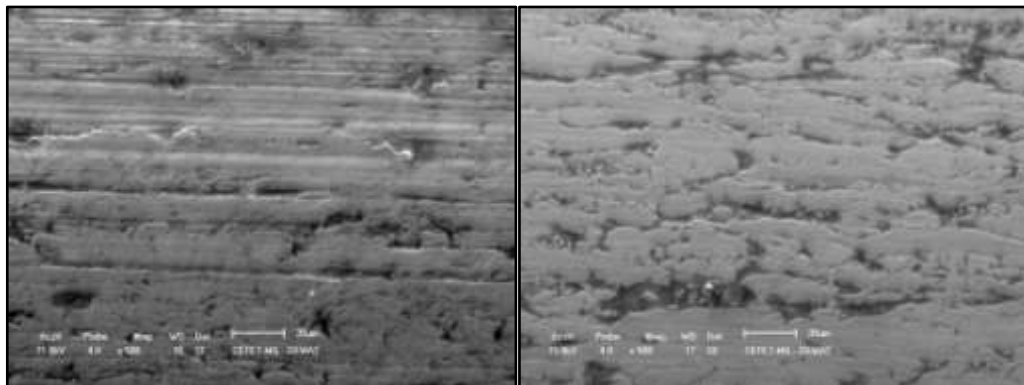


Fonte: Elaborado pelo Autor

Nestas imagens pode-se observar a presença de resíduos de lubrificante que foram utilizados no processo de trefilação e também o acabamento superficial onde são verificadas umas series de defeitos superficiais provenientes do processo produtivo.

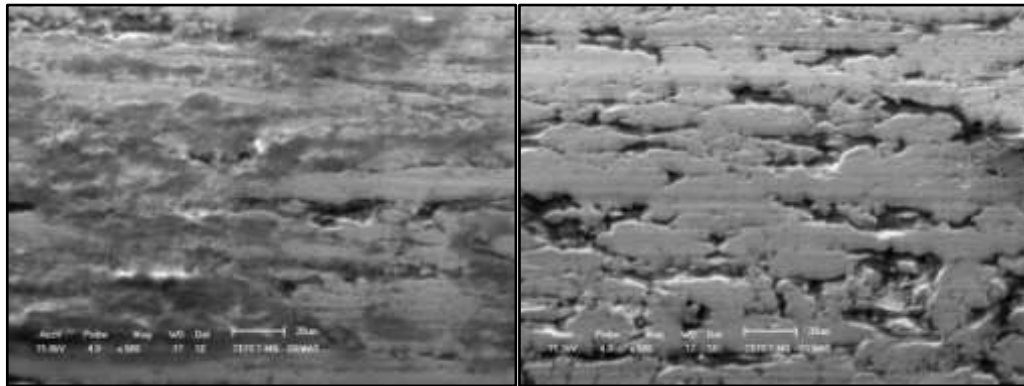
As figuras 5.7 à 5.12 se referem à superfície produzida pelas fieiras de semiângulos de 4°, 6°, 9°, 12°, 14° e 16° no ponto de produção – SCL (sem cobre e com limpeza), neste ponto o arame possui diâmetro de 1,21mm e recebeu um tratamento em sua superfície.

Figura 5. 7 - Superfície do arame com fieira semiângulo 4° SCL



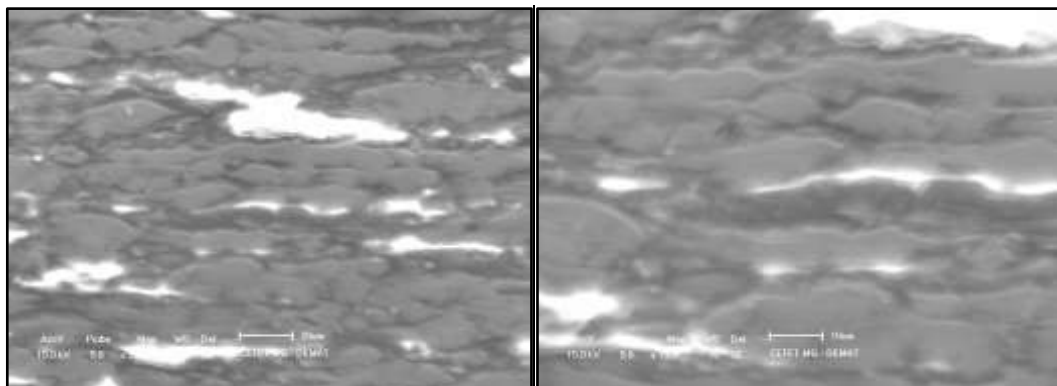
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 8 - Superfície do arame com fieira semiângulo 6° SCL



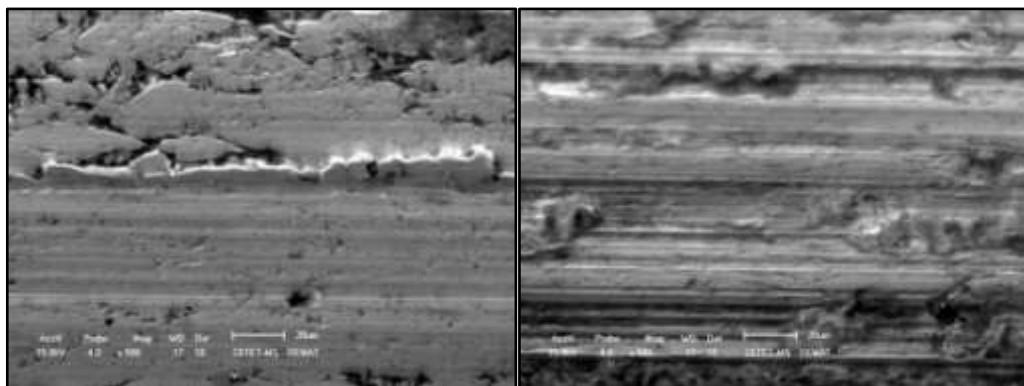
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 9 - Superfície do arame com fieira semiângulo 9° SCL



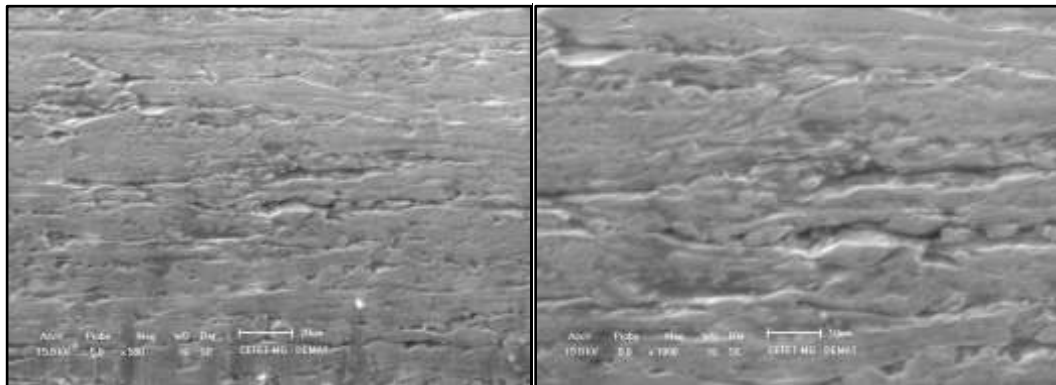
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 10 - Superfície do arame com fieira semiângulo 12° SCL



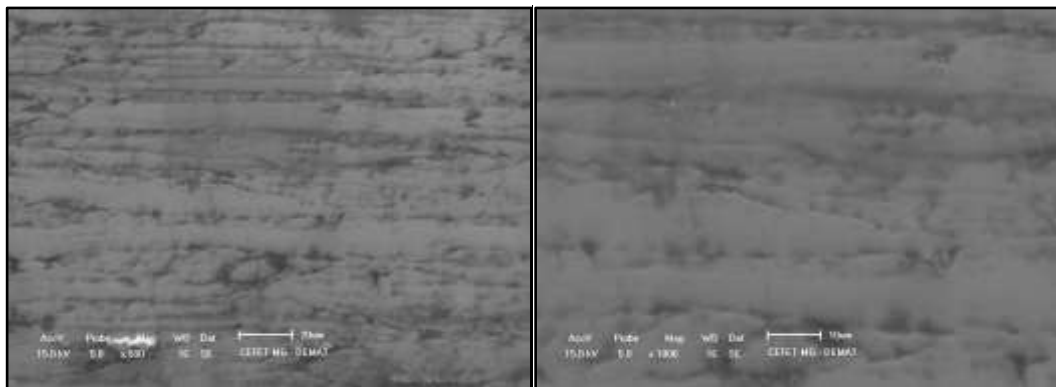
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 11 - Superfície do arame com fieira semiângulo 14° SCL



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 12 - Superfície do arame com fieira semiângulo 16° SCL

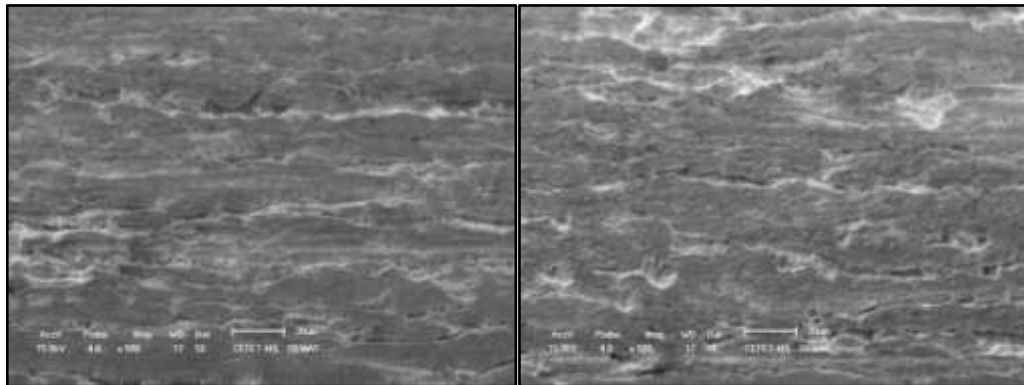


Fonte: Elaborado pelo Autor

Como o arame passou por um tratamento em sua superfície, nestas imagens pode-se observar que a presença de resíduo de lubrificante utilizado no processo de trefilação é menor e que os defeitos superficiais são mais visíveis e menos camuflados pelo resíduo.

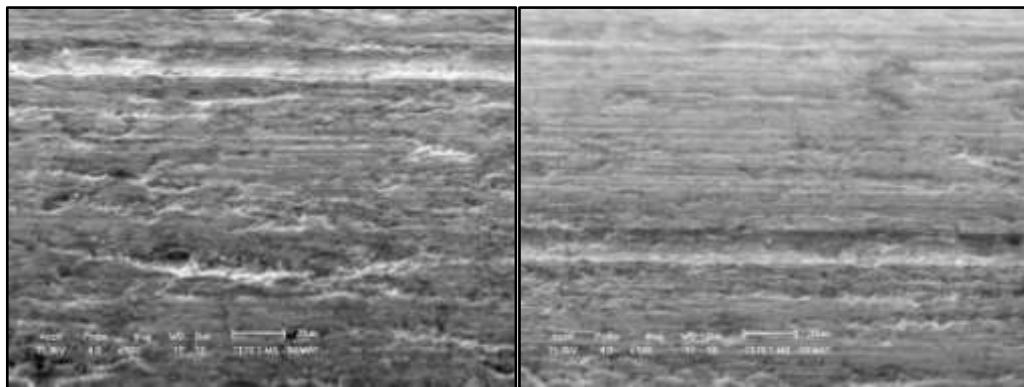
As figuras 5.13 à 5.18 retratam uma superfície mais diferenciada das anteriores agora estas se referem a superfícies produzidas pelas fieiras de semiângulos de 4°, 6°, 9°, 12°, 14° e 16° no ponto de produção – CSP (com cobre sem polimento), neste ponto o arame possui diâmetro de 1,21mm e também uma camada de cobre depositada sobre a sua superfície.

Figura 5. 13 - Superfície do arame com feira semiângulo 4° CSP



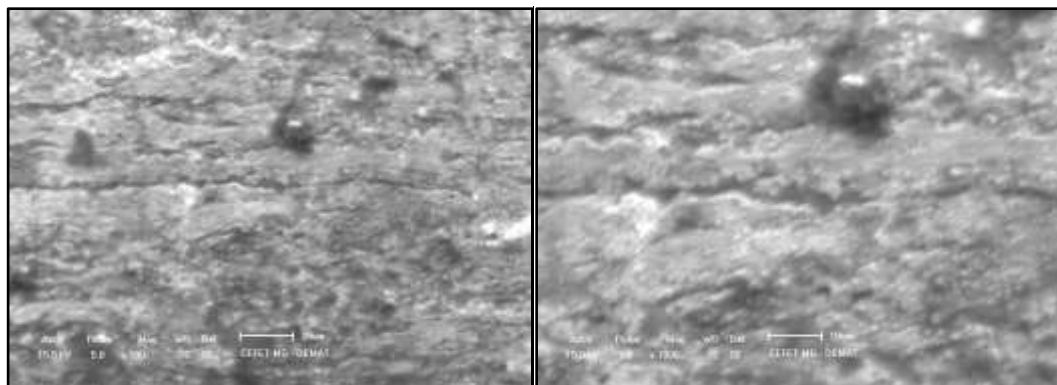
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 14 - Superfície do arame com feira semiângulo 6° CSP



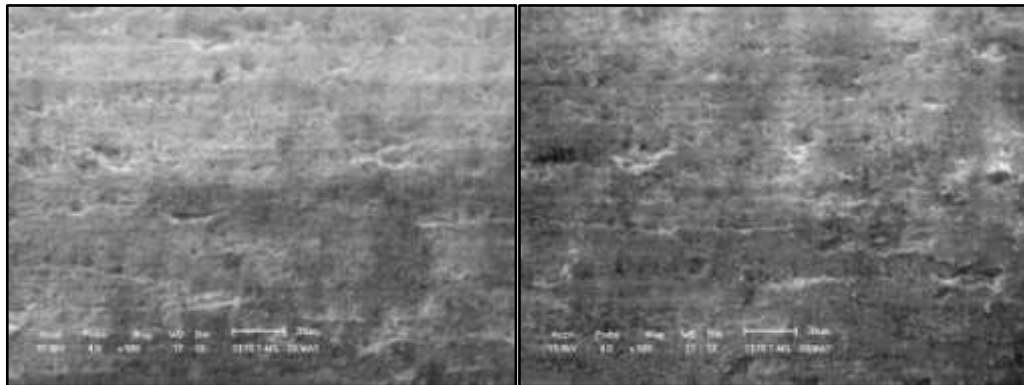
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 15 - Superfície do arame com feira semiângulo 9° CSP



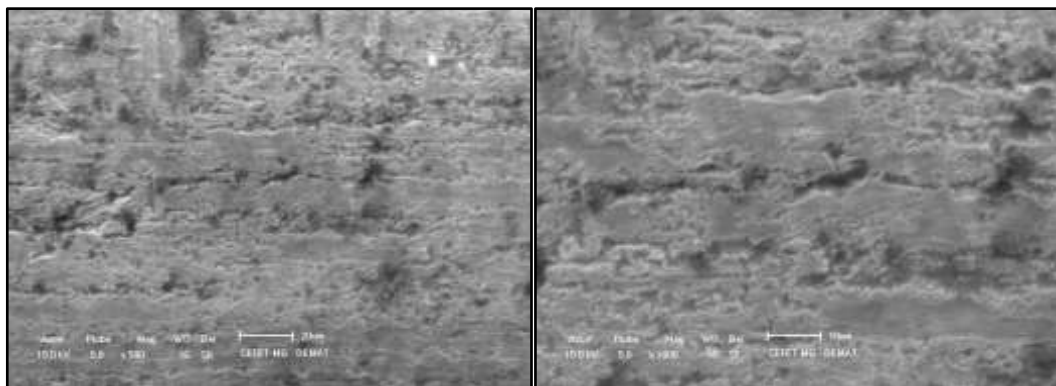
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 16 - Superfície do arame com fieira semiângulo 12° CSP



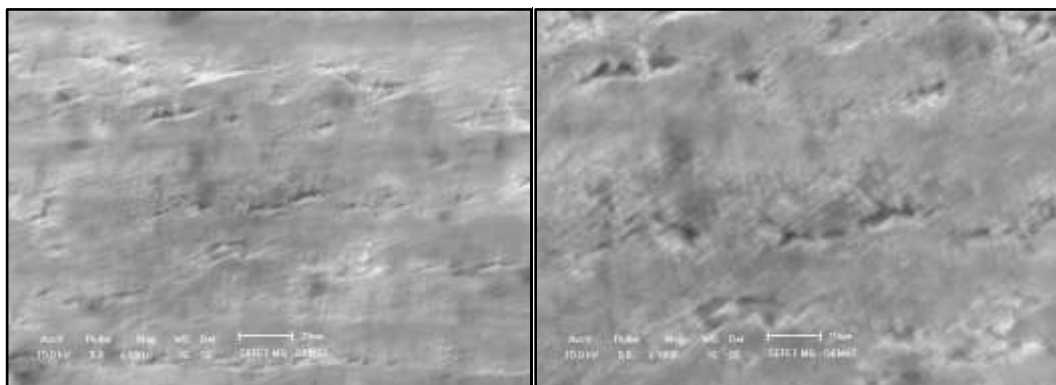
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 17 - Superfície do arame com fieira semiângulo 14° CSP



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 18 - Superfície do arame com fieira semiângulo 16° CSP



Fonte: Elaborado pelo Autor

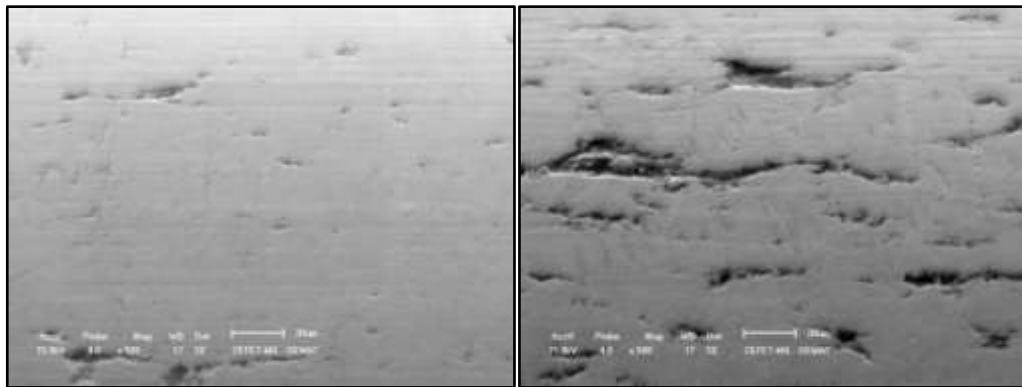
O arame neste ponto do processo recebeu uma camada de cobre em sua superfície, onde pode observar que, os defeitos superficiais do arame tornam-se menos

visíveis.

Percebe-se que após o processo de eletrodeposição a superfície do arame se torna mais regular de forma que a camada de cobre depositada regulariza a superfície reduzindo o número de vales existentes anteriormente.

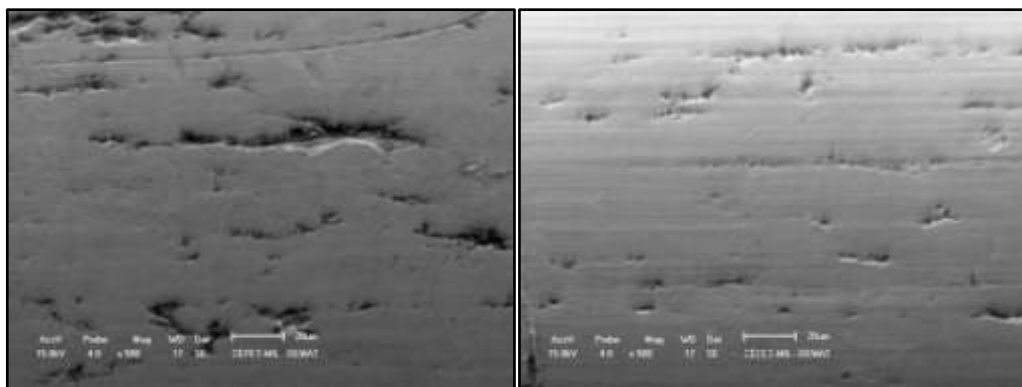
As figuras 5.19 à 5.24 apresentam arames com uma superfície mais uniforme que as demais, agora estas imagens se referem às superfícies produzidas pelas fieiras de semiângulos de 4°, 6°, 9°, 12°, 14° e 16° no ponto de produção – CP (com cobre e com polimento), neste ponto o arame já possui diâmetro de 1,18mm e também uma camada de cobre depositada sobre a sua superfície e polida.

Figura 5. 19 - Superfície do arame com fieira semiângulo 4° CP



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 20 - Superfície do arame com fieira semiângulo 6° CP



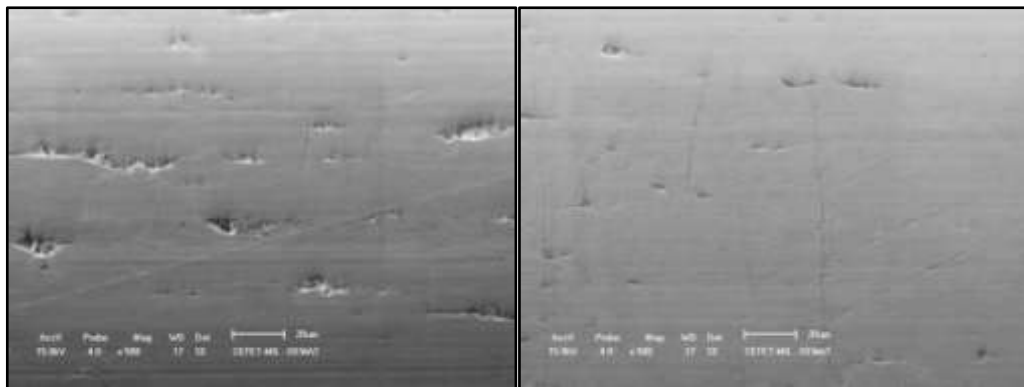
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 21 - Superfície do arame com feira semiângulo 9° CP



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 22 - Superfície do arame com feira semiângulo 12° CP



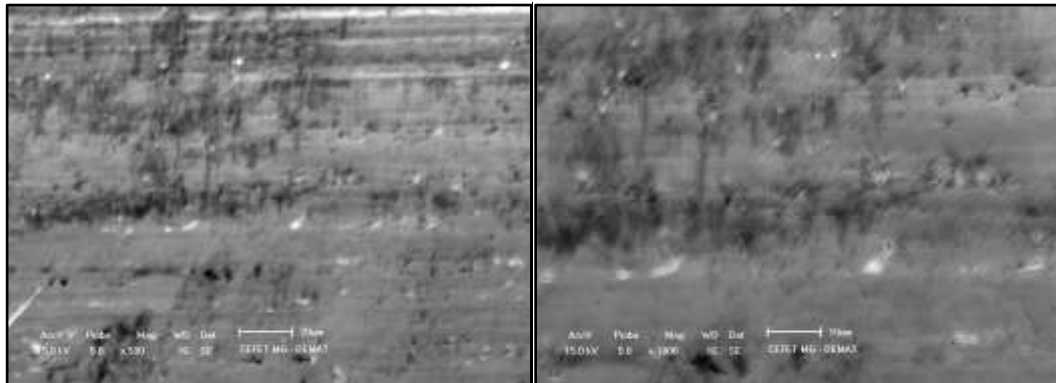
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 23 - Superfície do arame com feira semiângulo 14° CP



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 24 - Superfície do arame com fieira semiângulo 16° CP



Fonte: Elaborado pelo Autor

As figuras 5.22 à 5.24 mostram a superfície do arame após o último momento do processo produtivo. Pode-se visualizar uma superfície bem menos rugosa e com a presença de defeitos superficiais bem menores do que os apresentados nas figuras 5.19 à 5.21. Neste ponto o arame possui a geometria de especificação e está pronto para ser reenrolado e consumido no processo de soldagem.

5.2 Resultados do teste de Rugosidade

O teste de rugosidade foi realizado em todos os pontos do processo produtivo assim como no MEV. A tabela 5.1 mostra como se comporta a rugosidade do arame à medida que a superfície de contato do mesmo com as fieiras é alterada e também após a deposição da camada de cobre sobre sua superfície.

É importante observar que o teste de rugosidade apresenta rugosidade média das amostras que foram testadas. Neste teste observa-se o quanto a rugosidade das amostras variou em função da evolução do processo produtivo e também que existiu uma nítida alteração na rugosidade quando os semiângulos das fieiras variam.

Fazendo uma análise de cada condição de amostra com o mesmo semiângulo entende-se que após a deposição da camada de cobre sobre o arame a rugosidade do mesmo tem uma redução significativa. De forma global para semiângulos maiores percebe-se que realmente a rugosidade aparece mais suave devido a menos superfície de contato proporcionado por semiângulos maiores.

Tabela 5. 1 – Rugosidade Média

Amostra	Ra1	Ra2	Resultado
4SCS	0,53	0,46	0,07
4SCL	0,73	0,82	0,09
4CSP	0,37	0,31	0,06
4CP	0,31	0,2	0,11
6SCS	0,21	0,27	0,06
6SCL	0,32	0,34	0,02
6CSP	0,42	0,54	0,12
6CP	0,3	0,45	0,15
9SCS	0,35	0,51	0,16
9SCL	0,72	0,79	0,07
9CSP	0,37	0,46	0,09
9CP	0,18	0,26	0,08
12SCS	0,37	0,52	0,15
12SCL	0,62	0,76	0,14
12CSP	0,35	0,26	0,09
12CP	0,12	0,2	0,08
14SCS	0,35	0,41	0,06
14SCL	0,58	0,67	0,09
14CSP	0,31	0,28	0,03
14CP	0,1	0,12	0,02
16SCS	0,35	0,4	0,05
16SCL	0,52	0,51	0,01
16CSP	0,32	0,36	0,04
162CP	0,13	0,17	0,04

Fonte: Elaborado pelo Autor

5.3 Resultados do teste de resíduo

No teste de resíduo foi observado que para cada semiângulo de fieira o resíduo é diferente a cada ponto específico do processo produtivo. Analisando a camada média residual das amostras, mostrado na tabela 5.2, pode-se afirmar em peso que à medida que se altera o semiângulo das fieiras o resíduo também apresenta valores variados.

As ocorrências de variação se devem à superfície de contato onde se encontra também falta de igualdade no volume de defeitos superficiais. A relação entre o aumento do semiângulo e a variação de defeitos superficiais faz com que a camada residual não se destaque. Para semiângulos menores os defeitos superficiais são mais intensos e absorvem resíduos em seus interiores e para semiângulos maiores os defeitos superficiais são menores, mas estes semiângulos são mais adequadas devido a queda da superfície de contato.

Tabela 5. 2 – Camada Residual

Amostra	Bitola	P₁	P₂	(g/Kg)	(g/m²)
4SCS	1,229	1,0649	1,0643	0,563751	1,36
4SCL	1,220	0,8503	0,8500	0,352941	0,84
4CSP	1,227	0,9547	0,9544	0,314334	0,76
4CP	1,187	0,9323	0,9322	0,107273	0,25
6SCS	1,223	1,1733	1,1730	0,255754	0,61
6SCL	1,219	1,1440	1,1433	0,612263	1,46
6CSP	1,221	1,1099	1,1097	0,180229	0,43
6CP	1,180	0,9295	0,9294	0,107596	0,25
9SCS	1,178	1,0306	1,0305	0,097040	0,22
9SCL	1,219	1,0237	1,0235	0,195408	0,47
9CSP	1,220	1,0326	1,0325	0,096852	0,23
9CP	1,178	1,0338	1,0337	0,096740	0,22
12SCS	1,225	1,3533	1,3528	0,369604	0,89
12SCL	1,234	0,8983	0,8982	0,111334	0,27
12CSP	1,213	1,1200	1,1195	0,446628	1,06
12CP	1,171	0,9156	0,9155	0,109230	0,25
14SCS	1,223	1,0795	1,0789	0,556122	1,33
14SCL	1,219	1,0789	1,0785	0,370885	0,89
14CSP	1,221	1,0605	1,0601	0,377323	0,90
14CP	1,180	1,0564	1,0561	0,284064	0,66
16SCS	1,229	1,0938	1,0931	0,640381	1,54
16SCL	1,220	1,0888	1,0882	0,551369	1,32
16CSP	1,225	1,0777	1,0770	0,649954	1,56
16CP	1,186	1,0754	1,0750	0,372093	0,86

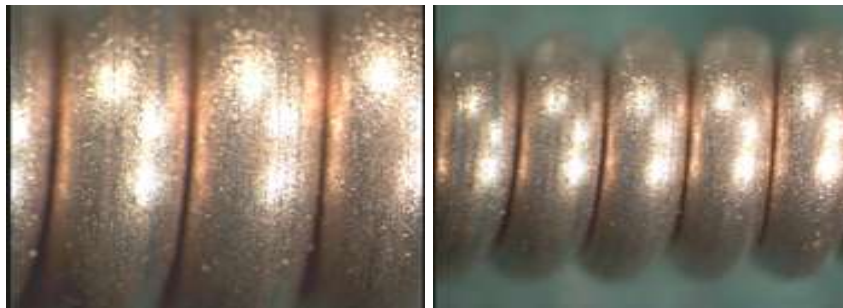
Fonte: Elaborado pelo Autor

5.4 Resultados do teste de Aderência

No teste de aderência compreende que o acabamento superficial não apresenta muitas alterações.

Nas figuras 5.25, 5.26 e 5.27 foi visualizado uma pequena variação na tonalidade das amostras devido à variação no processo de registro das imagens.

Figura 5. 25 - Aderência do arame com fieira semiângulo 40°



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 26 - Aderência do arame com fieira semiângulo 6°



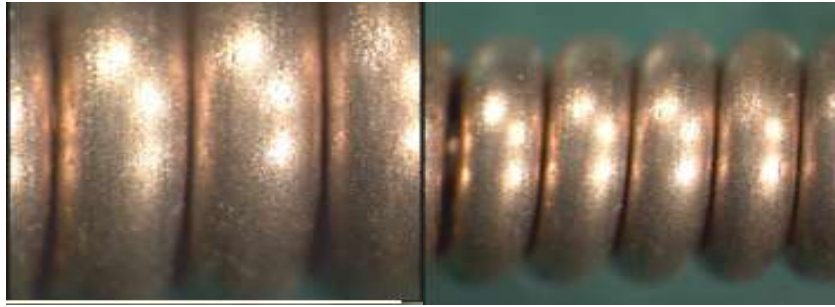
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 27 - Aderência do arame com fieira semiângulo 9°



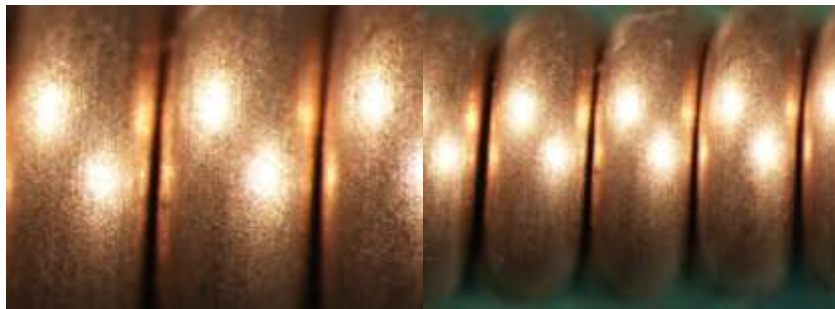
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 28 - Aderência do arame com fieira semiângulo 12°



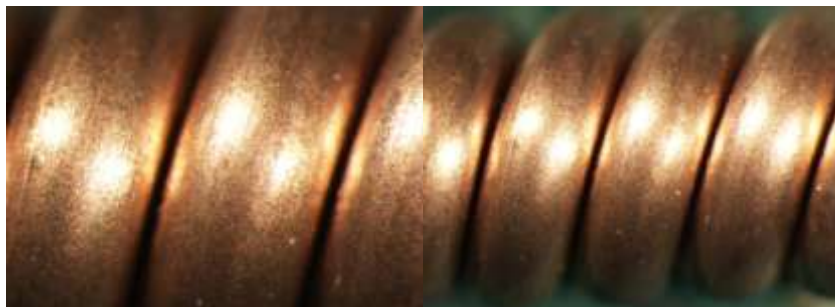
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 29 - Aderência do arame com fieira semiângulo 14°



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5. 30 - Aderência do arame com fieira semiângulo 16°



Fonte: Elaborado pelo Autor

Após o teste de enrolamento com o qual se caracteriza a aderência do cobre na superfície do arame, é possível verificar o surgimento de zonas mais escuras e mais claras ao longo da amostra.

A figura 5.25 apresentou o acabamento superficial do semiângulo de 4°, nesta amostra observa-se que o cobre após o enrolamento apresenta uma superfície mais porosa, o que pode ser entendido como o semiângulo que mais provoca defeitos superficiais no arame. O brilho do seu polimento é maior, porém a quantidade de

cobre suscetível ao deslocamento foi muito maior. Isso é justificado pela maior área de contato matriz/arame na trefilação.

As figuras 5.26 e 5.27 apresentam o acabamento superficial do semiângulo de 6° e 9°, esta amostra tem uma superfície menos porosa que a da figura 5.25. Mas ainda possui muitas zonas escuras que caracterizam a suscetibilidade de deslocamento de cobre.

A figura 5.28 apresenta o acabamento superficial do semiângulo de 9°, o brilho desta amostra não é o mais ofuscante, mas é a amostra que apresenta menor porosidade e menor número de zonas escuras.

As figuras 5.29 e 5.30 apresentam uma qualidade superficial diferente de todos os demais resultados. A homogeneidade da superfície e a ausência de material deslocado são evidentes. Isto se dá em função da menor área de contato.

5.5 Resultados do teste de Soldagem

Na tabela 5.3 são apresentados os resultados dos testes de soldagem para todos os semiângulos analisados.

Ao longo da tabela pode-se perceber a grande variação das características das amostras de arame.

Os diâmetros tiveram pouca variação, o registro de variação foi no máximo 1mm. Já o helix das amostras variou bastante assim como o cast, apresentando valores mais baixos para o helix e valores mais altos de cast em semiângulos maiores.

Os melhores resultados de tempos de soldagem aparecem também em semiângulos maiores que também coincidem com baixos valores de carga utilizada.

Tabela 5. 3 – Resultado das características dimensionais e padrões de soldagem

Amostra	Bitola (mm)	Helix (mm)	Cast (mm)	CARGA UTILIZADA (kgf)	TEMPO MÉDIO DE ARCO ABERTO (min)
4C1	1.18	4	580	de 1,1 a 1,4	3,5
	1.18	17	780		
	1.18	24	650		
4C2	1.18	6	540	de 1,1 a 1,4	0,6
	1.18	85	735		
	1.18	13	735		
6C1	1.17	6	850	de 1,1 a 1,4	1,2
	1.17	174	765		
	1.17	32	990		
6C2	1.17	3	635	de 1,1 a 1,4	0,8
	1.17	10	640		
	1.17	7	680		
9C1	1.18	12	641	de 1,1 a 1,5	1,1
	1.18	75	721		
	1.18	31	568		
9C2	1.18	28	674	de 1,1 a 1,6	0,9
	1.18	35	589		
	1.18	43	623		
12C1	1.17	19	630	de 1,0 a 1,4	0,7
	1.17	6	670		
	1.17	12	660		
12C2	1.17	3	930	de 1,0 a 1,3	0,7
	1.17	22	690		
	1.17	34	760		
14C1	1.17	15	880	de 1,0 a 1,2	4,8
	1.17	12	764		
	1.17	5	905		
14C2	1.17	9	774	de 1,0 a 1,2	4,6
	1.17	5	865		
	1.17	11	695		
16C1	1.18	17	970	de 1,0 a 1,1	5,7
	1.18	0	820		
	1.18	14	835		
16C2	1.18	15	671	de 1,0 a 1,1	5,3
	1.18	10	1005		
	1.18	6	1021		

Fonte: Elaborado pelo Autor

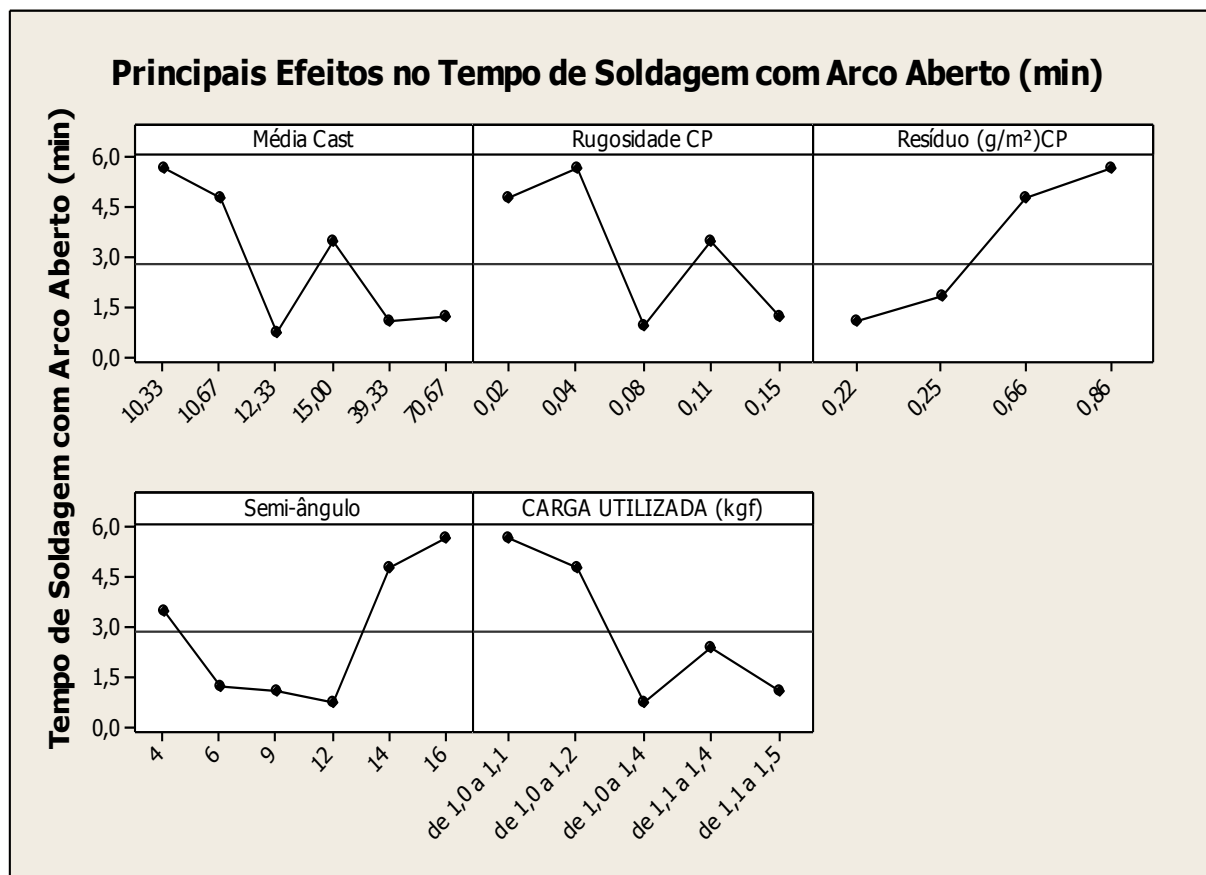
5.6 Discussões Gerais

A rugosidade teve efeito positivo no tempo de soldagem com arco, porque o deslizamento do arame é facilitado em função do menor atrito.

O resíduo e o semiângulo de soldagem também são diretamente proporcionais ao tempo de soldagem, pois o resíduo existente no arame acabado também facilita o deslizamento do mesmo. Porém, o excesso de resíduo pode causar outros problemas como entupimento do bico de soldagem.

Observa-se que a carga utilizada durante a soldagem se comporta conforme a figura 5.31. Este comportamento se dá porque quanto mais fechado o cast maior será a carga utilizada.

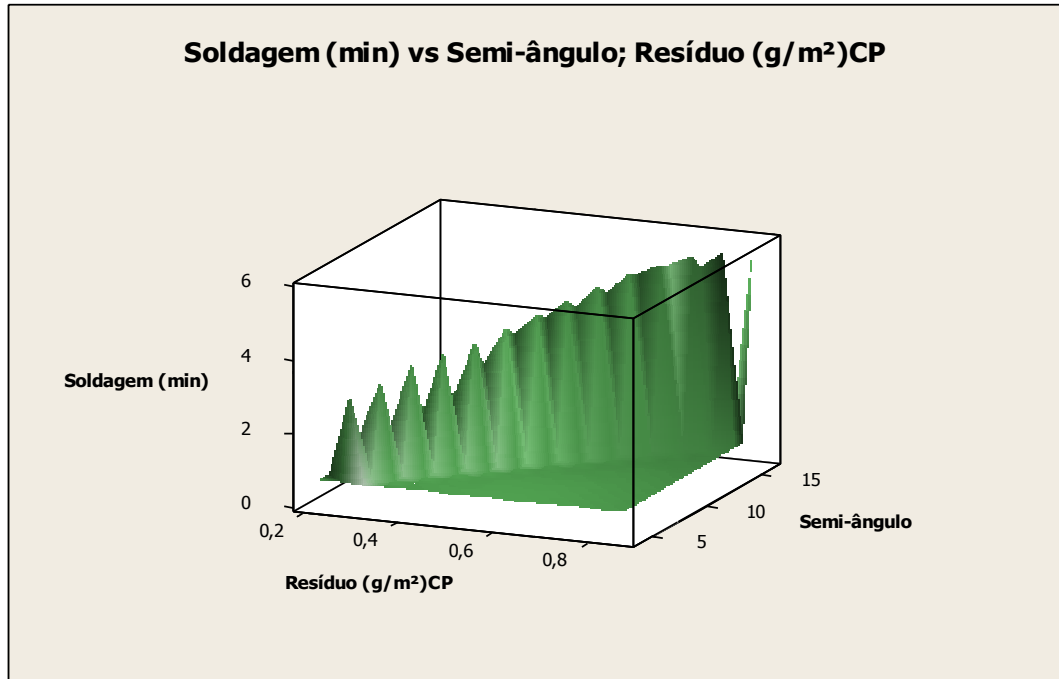
Figura 5.31 – Principais Efeitos no Tempo de Soldagem



Fonte: Elaborado pelo Autor

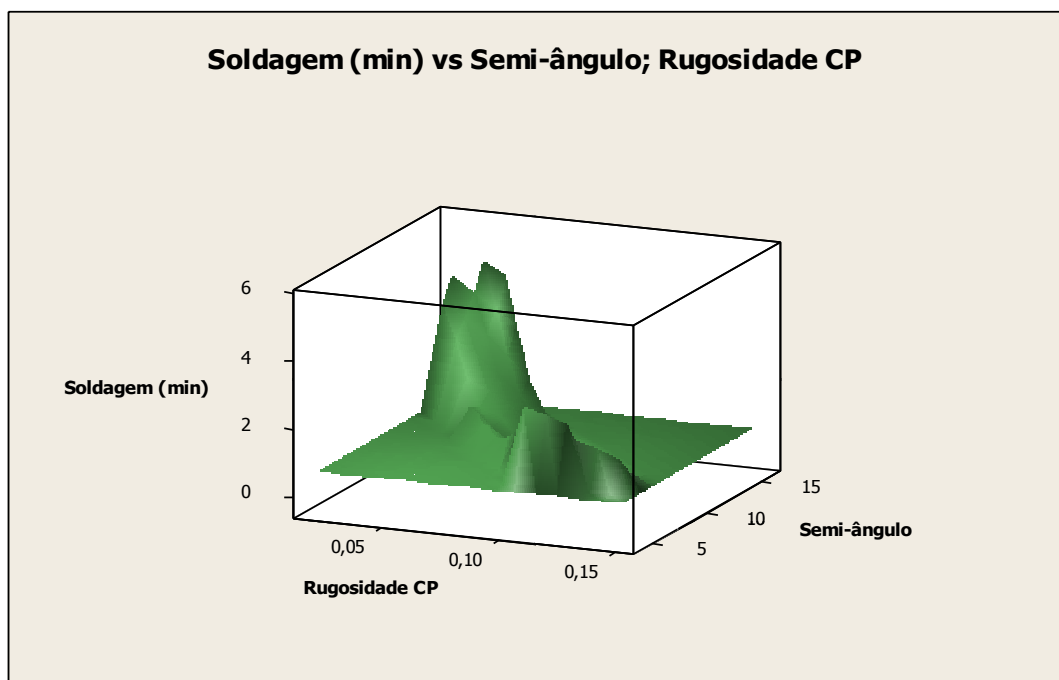
As figuras 5.32 e 5.33 esboçam o comportamento da soldagem em função da rugosidade e do resíduo, demonstrando o perfil do gráfico de cada um, comprovando os efeitos evidenciados na figura 5.31.

Figura 5. 32 – Soldagem (min) vs Semiângulo e Resíduo (gm²)



Fonte: Elaborado pelo Autor

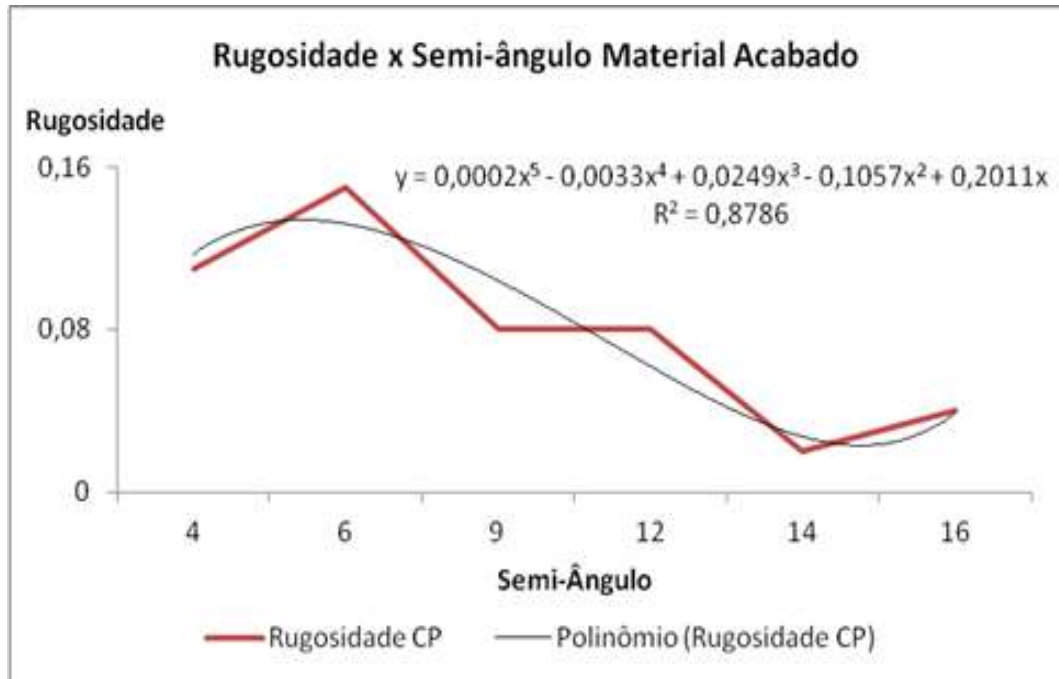
Figura 5. 33 – Soldagem (min) vs Semiângulo e Rugosidade



Fonte: Elaborado pelo Autor

A relação entre rugosidade e semi-ângulo do material acabado é apresentada na figura 5.34. Tanto as amostras de C1 quanto as amostras C2 demonstraram o mesmo resultado e a mesma equação de reta, ou seja, a repetibilidade confirmada

Figura 5. 34 – Rugosidade vs Semiângulo



Fonte: Elaborado pelo Autor

6. CONCLUSÕES

Ao concluir este trabalho pode-se perceber que, quando se reduz o ângulo das fieiras, a superfície de contato aumenta, ou seja, o arame passa a ter mais contato no núcleo da fieira apresentando acabamentos superficiais distintos. À medida que o semiângulo das fieiras é reduzido, maiores foram os defeitos superficiais no arame.

A rugosidade do arame também apresentou variação significativa à medida que se alterou o semiângulo da fieira e também quando o arame recebeu a camada de cobre. Através das medições de rugosidade média foi observado uma grande variação da mesma em função deste dois pontos.

Através dos testes feitos conclui-se também que o semiângulo das fieiras pode afetar a camada residual do arame após no processo produtivo. À medida que se altera o semiângulo a taxa de resíduo variou juntamente com os defeitos superficiais onde partes dos resíduos estão presentes.

A variação do semiângulo de fieira avaliado ao longo do processo produtivo também mostrou que a aderência da camada de cobre sobre a superfície do arame sofreu alterações. Quanto menor o semiângulo da fieira maior foi o brilho devido à maior superfície de contato. Nos semiângulos menores, apresentaram mais ilhas de cobre por causa dos defeitos superficiais e que sobre o esforço gerado no teste de aderência observa-se que existe quantidade maior de cobre se deslocando ao longo do arame. No caso dos semiângulos maiores os defeitos superficiais foram mais suaves e conseqüentemente proporcionaram melhores aspectos quanto à aderência.

No processo de soldagem é nítido o efeito da variação dos semiângulos sobre as características físicas do arame. Boa parte do material produzido em semiângulos menores apresentou valores na caracterização que não favorecem o processo de soldagem. Semiângulos de fieira são capazes de alterar as características físicas do arame. Semiângulos de fieiras maiores que 14° proporcionaram melhores características ao arame sólido para o processo de soldagem.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Analisar o efeito da espessura da camada de cobre no processo de soldagem.
- Avaliar o efeito da variação do teor de carbono no processo de soldagem.
- Estudar a relação entre o processo de eletrodeposição versus aderência da camada de cobre.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASME, II Part C, **Specification for welding rods, eletrodes and filler metals**, Asme SSA5.18 ed.07 ER70S6, 2009.
- AWS, Welding Handbook, AWS A5.18-05ER70S6, 2006.
- AGUSA, K.; NISHIYAMA, N.; TSUBOI, J. MIG welding with pure argon shielding – arc stabilisation by rare earth additions to electrode wires. *Metal Construction*, p.571-574, set. 1981.
- ALLEMAND, C.D; SCHOEDER, R; RIES, D.E; EAGAR, T.W.A method of filming metal transfer in welding arcs.*Welding Journal*, p. 45-47, 1985.
- AMIN, M. Pulsed current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding.*Metal construction*, p. 272-278, may.1983.
- AMSON, J.C. An analysis of the gas – shielded consumable metal arc welding system.*Welding Journal*, v.41, n.4, p. 232-249, 1962.
- AWS.Gas metal arc welding.*Welding Handbook*.8.ed. Miami: AWS, v.2, 1991. p. 109-155.
- BÁLSAMO, P.S.S. Desenvolvimento de um sistema sinérgico não linear para soldagem MIG pulsado de aço inoxidável. 2000. 193 f. Tese (Doutorado em Materiais e Processos de Fabricação) – Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia, 2000a.
- BÁLSAMO, P.S.S. et al. Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: Synchronized shadowgraphy. *Inst. J. for the Joining of Materials*, v.12, n.1, 12p. 2000b.
- BARRA, S.R. Influência do processo MIG/MAG térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida. 2003. 209f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Florianópolis, 2003.
- BEUNENS, Paul. Tecnologia del alambre, servicio de formación – T.B.E Zwevegem, ed. 92/03.
- BROSILOW, R. Gases for shielding metal arc welding.*Welding Design e Fabrication*, p. 63-69, oct. 1978.
- CETLIN, Paulo. Trefilação de arames de aço, UFMG (Brasil), 2007.
- DUTRA, J.C. Análise estatística de estabilidade de arco em soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito. In: Encontro Nacional de

- Tecnologia da Soldagem – ABS, 15, 1989, São Paulo. Anais... São Paulo: ABS, v.1, p.327-347. 1989.
- FRIGERIO, Mario. The Drawing Technology, 3^o edição – Luxemburgo, 2011.
 - GIBSON, G.J.; ROTHSCCHILD, G.R. The effects of DC component in AC inert-gas-arc welding of aluminum. Welding Journal, p. 496s, 1948 apud Pateet. al. Theoretical and experimental study of cathodic cleaning with the plasma arc. Welding Journal Research Supplement, p. 12, apr. 1968(a).
 - GUILLE, A.E. Arc cathode and anode phenomena. International Institute of Welding, Doc. 212-170-69, p87, 1970.
 - GUILLE, A.E. Arc-electrode phenomena. Proceedings IEE Reviews, England, v.118, n.9R, p. 1131-1154, sept. 1971.
 - GUILLE, A.E.; JUTTNER, B. Basic erosion processes of oxidized and clean metal cathodes by electric arcs. IEEE trans. Plasma Sci, n.8 p. 259-69, sept. 1980.
 - HEALD, P.R. et al. Mapping the droplet transfer modes for an ER 100S - 1 GMAW electrode. Welding Journal, Miami, p.38s-44s, apr.1994.
 - HELMBRECHT, W.H.; OYLER, G.W. Shielding gases for inert-gas welding. Welding Journal, Miami, p. 969 – 979, oct. 1957.
 - HERBST, H.T. Electrical characteristics of the arc in “heliarc” welding. Welding Journal, p. 600, 1948 apud Pateet. al. Theoretical and experimental study of cathodic cleaning with the plasma arc. Welding Journal Research Supplement, p. 12, apr. 1968a.
 - HILTON, D.E. He/Ar gas mixtures prove more economic than Ar for Al welds. Welding and Metal Fabrication, p. 232-240, jun. 1982.
 - HILTON, D.E.; NORRISH, J. Shielding gases for arc welding. Welding e Metal fabrication, Cambridge, p.189-196, may/june. 1988.
 - JOHNSON, J.A et al. Process control of GMAW: sensing of metal transfer mode. Welding Journal, Miami, p.91s-99s, apr.1991.
 - JONSSON, P.G.; MURPHY, A.B.; SZELELY, J. The influence of oxygen additions on argon-shielded GMAW processes. Welding Journal, Miami, p.48s-58s, feb.1995.
 - JUTTNER, B. Characterization of the cathode spot. IEEE Trans. On Plasma Science, n. 15 (5), p. 474-479, oct. 2001a.
 - JUTTNER, B. Cathode spots of electric arcs. Journal of Physics D: Applied Physics, n. 34, p. R103-R123, 2001b.

- KENNEDY, C.R. Gas mixtures in welding. The Australian Welding Journal, Australian, p. 38-52, sept. 1970.
- KIM, Y.S; EAGAR, T.W. Analysis of metal transfer in gas metal arc welding. Welding Journal, Miami, v.72, n.6, p.269s-278s, june.1993.
- KUJANPAA, V.P. et al.. Role of shielding gases in discontinuity formation in GTA welding of austenitic steel strips.Welding Journal, v. 63, p. 150s – 155s, may.1984.
- LANCASTER, J.F. Mass flow from electrode to the workpiece. In: Welding Metalurgy, 4, , London. p.21-26. 1987
- LANCASTER, J.F. The physics of welding.2.ed. Pergamon Press, International Institute of Welding, 340p. 1986.
- LESNEWICH, A. Control of melting rate and metal transfer in gas shielding metal arc welding: part II - control of metal transfer. Welding Journal, v.37, n.9, p.418s-425s, 1958.
- LUCAS, W.; AMIN, M. Effect of wire composition in spray transfer mild steel MIG welding.Metal Construction, p.77-83, feb. 1975.
- MACHADO, I.G. Soldagem e tecnologia e técnicas conexas: processos. Porto Alegre, 1996. 477p. editado pelo autor.
- MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem – fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 362p.
- MARQUES, Paulo Villani., MODENESI, Paulo José., BRACARENSE, Alexandre Queiroz. Soldagem: fundamentos e tecnologia. 3ª edição atualizada – Belo Horizonte; Editora UFMG, 2009.
- MODENESI, P.J. Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalurgia da UFMG, 2004. 141p.(Apostila).
- MODENESI, P.J. Procedimento para obtenção de oscilogramas de corrente e tensão em soldagem. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalurgia da UFMG, 2005. Apostila.
- MODENESI, P.J. Statistical modelling of the narrow gap gas metal arc welding process. 1990. 308 f. Tese (PhD Thesis – School of Industrial Science) – Cranfield Institute of Technology, Inland, 1990.
- MODENESI, P.J.; NIXON, J.H. Arc instability phenomena in GMA welding. Welding Journal, v.73, n.9, p.219s-224s, sept.1994.

- NORRISH, J.; RICHARDSON, I.F. Metal transfer mechanisms. *Welding and Metal Fabrication*, p.17-22, jan./feb.1988.
- PATTEE, H.E; ANNO, J.N; RANDALL, M.D. Theoretical and experimental study of cathodic cleaning with the plasma arc. *Welding Journal Research Supplement*, p. 12, apr. 1968a.
- PATTEE, H.E; MEISTER, R.P; MONROE, R. E. Cathodic cleaning and plasma arc welding of aluminum. *Welding Journal Research Supplement*, p. 08, may. 1968b.
- PONOMARAVEV, V. et al. Investigation of the mechanism of short arc MIG/MAG welding metal transfer mixed modes. *International Journal for the Joining of Materials*, v. 16, n.3, p.65-70, sept. 2004.
- PUMPHREY, W.I. Researches into the welding of aluminum and its alloys. Aluminum Development Association Report, n. 27, july 1955 apud Patee et. al. Theoretical and experimental study of cathodic cleaning with the plasma arc. *Welding Journal Research Supplement*, p. 12, apr.1968(a).
- RODWELL, M.H. A preliminary investigation into arc disturbances and poor weld appearance in the spray transfer MIG welding os steel. *Weld. Institute Research Report*, 7851.01/84/422.2, 1985.
- SALTER, G.R.; DYE, A.S. Selecting gas mixtures for MIG welding. *Metal Construction and British Welding Journal*, p.230-233, june 1971.
- SILVA, A.V. Avaliação da soldagem GMAW de um aço ABNT 304 com misturas Ar-O₂-H₂ e Ar-O₂-N₂. 1995. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte, 1995.
- SMITH, A.A. et al.. Characteristics of the short-circuiting CO₂ – shielding arc. In: *Symposium the Institute of Welding*, 29,1962, London.p.76-91.
- STENBACKA, N.; PERSON, K.A. Gases de proteção para soldagem MIG/MAG de aços inoxidáveis. Rio de Janeiro: AGA, 1992.
- SUBAN, M; TUSEK, J. Methods for the determination of arc stability. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 430-437, 2003.
- SUBRAMANIAM, S. et al. Droplet transfer in pulsed gas metal arc welding of aluminum, *Welding Journal*, p.458s-464s, nov.1998.
- TONG, H. et al. Observations of the phenomenon of abnormal arc voltage occurring in pulsed metal inert gas welding of aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, v.10, n.6, p. 695-700, 2005.

- TUSEK, J.; SUBAN, M. Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, Slovenia, v.25, n.25, p. 369-376, 2000.
- URMSTON, S.; HILTON, D.; STARES, I. Developmente of shielding gases for stainless steel welding. *Welding e Metal Fabrication*, v.62, n.4, p. 165-168, apr. 1994.
- USHIO, M. Arc discharge and electrode phenomena. *Pure e Appl. Chem*, v.60, n.5, p. 809-814, 1988.
- VAGRAMYAN, A.T. *Technology of Electrodeposition*, - Moscow, 1959.
- VILARINHO, L.O. Desenvolvimento e avaliação de um algoritmo alternativo para soldagem MIG sinérgica de alumínio. 2000. 111f. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação) – Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia - MG, 2000.
- WASZINK, J. H. et al. Heat generation and heat flow in the filler mel in GMA welding. *Welding Journal*, Miami, v. 61, n.8, p.269-280, aug.1982.
- WASZINK, J. H.; Graat, J.H.L. Experimental investigation of the forces acting on a drop of weld metal. *Welding Journal*, v. 62, n.4, p.109s-116s, 1983.
- WIKTOROWICZ, R; CROUCH, J. Shielding gas developments for TIG welding of duplex and super duplex stainless steels. *Welding e Metal Fabrication*, Cambridge, v.62, n.9, p.379-382, oct.1994.