

TESE DEFENDIDA POR Celso Alves
Corrêa E APROVADA
COMISSÃO JULGADORA EM 22/08/00
Roseana da Exaltação
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO
APLICADO EM REVESTIMENTO PELO
PROCESSO MIG PULSADO E
CONVENCIONAL**

Autor : Celso Alves Corrêa

Orientadora : Roseana da Exaltação Trevisan

76/00

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTR.
SECÃO CIRCULANT**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

**AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO
APLICADO EM REVESTIMENTO PELO
PROCESSO MIG PULSADO E
CONVENCIONAL**

Autor : Celso Alves Corrêa

Orientadora : Roseana da Exaltação Trevisan

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2000
S.P. – Brasil

iii.



04760700

N.º CHAMADA:	
T/ UNICAMP	
C817a	
V.	Ex.
TOMBO BC/ 44476	
PROC. 16.392101	
C	D <input checked="" type="checkbox"/>
PREC. R\$ 11,00	
DATA 16/05/01	
N.º CPD	

CM-00155192-0

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C817a Corrêa, Celso Alves
 Aço inoxidável martensítico aplicado em revestimento
 pelo processo MIG pulsado e convencional / Celso
 Alves Corrêa.--Campinas, SP: [s.n.], 2000.

 Orientadora: Roseana da Exaltação Trevisan
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

 1. Soldagem – Aspectos econômicos. 2. Arco de
 soldagem a gás de metal. 3. Revestimento de metal. 4.
 Testes não-destrutivos. I. Trevisan, Roseana da
 Exaltação. II. Universidade Estadual de Campinas.
 Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

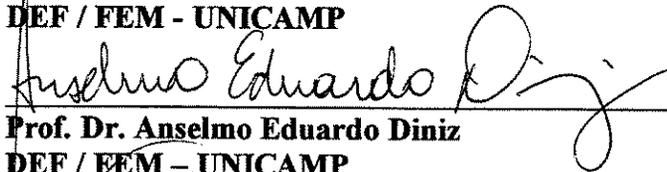
**AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO
APLICADO EM REVESTIMENTO PELO
PROCESSO MIG PULSADO E
CONVENCIONAL**

Autor: Celso Alves Corrêa

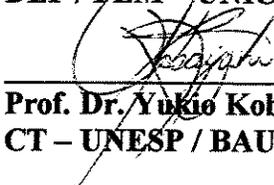
Orientadora: Roseana da Exaltação Trevisan



**Profa. Dra. Roseana da Exaltação Trevisan, Presidente
DEF / FEM - UNICAMP**



**Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz
DEF / FEM - UNICAMP**



**Prof. Dr. Yukio Kobayashi
CT - UNESP / BAURU**

Campinas, 22 de agosto de 2000.

Para Maria Inês e Camila pelo auxílio na conquista de mais um objetivo.

Agradecimentos

Sou grato a todas as pessoas que me ajudaram na realização deste trabalho, porém algumas merecem meu agradecimento especial, prestando minha homenagem:

À Profª. Roseana pela orientação segura, atenção e contribuição científica dedicada a este trabalho, bem como por sua amizade.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UNICAMP pelo convívio e apoio.

Aos meus pais pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao amigos Carlos, Daniella, Eduardo, Luciano, Roseli, pelo auxílio em todas as horas.

Ao Miro pela ajuda técnica prestada.

Ao grupo de pesquisas do Labsolda, da Universidade Federal de Santa Catarina, pelo suporte técnico prestado.

À FAEP e CAPES pela ajuda financeira.

“ Penso 99 vezes e nada descubro.
Deixo de pensar, mergulho no
silêncio, e a verdade me é revelada.”

Albert Einstein

Resumo

CORRÊA, Celso Alves, *Aço Inoxidável Martensítico Aplicado em Revestimento pelo Processo MIG Pulsado e Convencional*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 91p. Dissertação (mestrado).

Uma das maneiras de recuperar equipamentos que sofreram corrosão no seu meio de trabalho é a soldagem de revestimento. Entre os muitos materiais de deposição utilizados, destacam-se os aços inoxidáveis, que possuem uma elevada resistência ao desgaste e à corrosão. O processo de soldagem MIG é frequentemente empregado na soldagem de deposição, e extensivamente aplicado no modo automático para se obter boa qualidade, principalmente nos revestimentos de aços inoxidáveis. Neste trabalho foi realizada uma análise comparativa da morfologia, diluição, microdureza, microestrutura e características econômicas dos cordões de soldas de revestimento, utilizando-se o processo MIG pulsado e convencional. Como metal de base, foi utilizado um aço baixo carbono e como metal de adição, um aço inoxidável martensítico. As variáveis de influência estudadas foram a intensidade da corrente média e a frequência de pulso. Com o aumento da corrente média houve um crescimento da penetração, reforço, largura e diluição dos cordões. A frequência de pulso influenciou a penetração, a largura e a diluição, mas não afetou o reforço. A corrente média e a frequência de pulso não afetaram a microestrutura e a microdureza dos cordões de solda e da ZAC. Assim verificou-se que a corrente média afetou a taxa de fusão e a taxa de deposição, enquanto que a frequência não influenciou estas variáveis e a corrente média e a frequência juntas afetaram o rendimento. A análise econômica mostrou que o rendimento foi satisfatório, independentemente dos níveis das variáveis de influência. Na soldagem de revestimento, verificou-se a vantagem da aplicação do modo pulsado em correntes menores, e que, em correntes maiores, não houve mudanças significativas de resposta.

Palavras-Chave:

Características Econômicas, MIG Pulsado, Morfologia do Cordão, Soldagem de Revestimento.

Abstract

Cladding is often used to increase corrosion and wear resistance of components in mechanical equipments. Stainless steel is very common as a cladding deposition material for its outstanding properties regarding corrosion and wearing strength. Conventional GMAW is often employed in the automated mode in order to produce high quality beads, mainly when using stainless steel as the deposition material. Conventional GMAW has been applied to cladding for a long time and pulsed arc GMAW is becoming more popular lately. In the present work, performance characteristics of cladding are assessed for the conventional and pulsed arc GMAW processes. The following cladding characteristics were compared: morphology, dilution, microstructure, melting rate, consumable deposition rate and efficiency of the process for different levels of welding current and different pulse frequency. Experiments were carried out using a ABNT 1020 steel as base metal and a ABNT 410 martensitic stainless steel as filler metal. The results show that the overall process efficiency slightly improves when pulsed current is employed. No major effect is observed neither on the melting rate nor on the type and magnitude of welding current used. Results also show a slight improvement on weld penetration as well as on the bead width when using pulsed arc. The reinforcement and the resulting microstructure did not change significantly with the variation of the level and the type of the current used.

Key-words: Pulsed GMAW, Cladding, Weld Morphology, Performance Characteristics

Índice

Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
Nomenclatura.....	xiv
1. - Importância e Objetivos.....	1
1.1 – Importância.....	2
1.2 - Objetivos.....	2
2. - Revisão Bibliográfica.....	3
2.1 - Processo de soldagem.....	3
2.2 - Soldagem a arco com proteção gasosa e eletrodo consumível.....	4
2.3 – Soldagem pelo processo MIG convencional e pulsado.....	7
2.4 - Transferência controlada.....	12
2.5 – Vantagens do processo pulsado.....	12
2.6 – Influência dos parâmetros de soldagem na morfologia dos cordões.....	13
2.7 – Sobreposição.....	15
2.8 – Ângulo de soldagem.....	16
2.9 – Distância eletrodo/peça.....	17
2.10 – Diluição.....	18
2.11 – Soldagem de revestimento.....	19
2.12 – Temperatura de interpasse.....	22
2.13 – Características econômicas.....	23

3 – Materiais e Métodos.....	25
3.1 – Equipamentos.....	25
3.2 – Materiais utilizados.....	27
3.2.1 - Preparação dos corpos de prova.....	28
3.3 – Características operacionais e econômicas.....	30
3.4 – Determinação dos parâmetros de soldagem.....	31
3.5 – Metodologia de tratamentos dos dados.....	32
3.5.1 – Fatores e níveis.....	34
3.5.2 – Fundamentos da análise estatística.....	34
3.6 – Planejamento dos experimentos.....	35
3.7 – Confeção dos experimentos.....	34
3.8 - Parâmetros iniciais.....	38
3.9 – Ensaio metalográfico.....	39
3.9.1 – Macrografia.....	39
3.9.2 – Micrografia.....	40
3.10 - Diluição.....	42
3.11 – Microdureza.....	43
4 – Resultados e discussões dos experimentos iniciais.....	44
4.1 – Experimentos iniciais.....	44
4.1.1 – Sobreposição.....	45
4.1.2 - Vazão do gás.....	46
4.1.3 – Ângulo de soldagem.....	47
4.1.4 – Distância eletrodo/peça.....	47
4.1.5 – Tensão de soldagem.....	47
4.1.6 – Determinação da intensidade da corrente de pico e do tempo de pico.....	48
4.1.7 – Determinação dos níveis das variáveis de influência.....	50
4.1.8 – Parâmetros constantes.....	51
4.2 – Experimentos definitivos.....	52
5 - Resultados e discussões dos experimentos definitivos.....	53
5.1 – Estudo da morfologia do cordão.....	53

5.1.1 – Estudo da penetração do cordão de solda.....	55
5.1.2 – Estudo do reforço do cordão de solda.....	60
5.1.3 – Estudo da largura do cordão de solda.....	62
5.2 – Estudo da diluição.....	65
5.3 – Microestrutura e microdureza.....	72
5.4 – Estudo das características econômicas.....	74
6 – Conclusões.....	83
6.1 – Conclusões relativas à corrente média.....	83
6.2 – Conclusões relativas à mudança do tipo de corrente.....	83
6.3 – Conclusões relativas à frequência de pulso.....	84
Referências Bibliográficas.....	85
Bibliografia Complementar.....	89

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Esquema representativo do processo MIG/MAG.....	7
Figura 2.2 – Corrente convencional.....	8
Figura 2.3 - Corrente pulsada.....	9
Figura 2.4 – Detalhe da seção transversal do cordão de solda em simples deposição.....	14
Figura 2.5 – Esquema representativo da sobreposição num cordão de solda.....	16
Figura 2.6 – Ângulos de orientação para o posicionamento da tocha.....	17
Figura 2.7 – Esquema das regiões para cálculo da diluição.....	18
Figura 3.1 – Visão geral dos equipamentos utilizados.....	27
Figura 3.2 – Localização dos termopares.....	28
Figura 3.3 – Dispositivo de posicionamento dos corpos de prova.....	30
Figura 3.4 – Circularidade do método científico.....	33
Figura 3.5 – Representação esquemática do planejamento fatorial.....	36
Figura 3.6 – Esquema de retirada das seções transversais dos cordões de teste.....	40
Figura 3.7 – Esquema do seccionamento dos corpos de prova.....	41
Figura 3.8 – Esquema da região da amostra retirada para análise de micrografia.....	41
Figura 3.9 – Corpo de prova utilizado para medir diluição.....	42
Figura 4.1 – Esquema representativo da sobreposição quando esta foi entre 40 e 50%.....	45
Figura 4.2 – Esquema representativo da falta de fusão entre os cordões ou vazio com a sobreposição de 20%.....	46
Figura 4.3 – Oscilograma de corrente e tensão.....	49
Figura 5.1 - Efeito do tipo e intensidade da corrente sobre a penetração.....	58
Figura 5.2 – Efeito da corrente média e freqüência de pulso sobre a penetração.....	59

Figura 5.3 – Efeito da frequência de pulso e corrente média sobre a penetração.....	59
Figura 5.4 - Efeito do tipo e intensidade da corrente sobre o reforço.....	61
Figura 5.5 – Efeito da corrente média e frequência de pulso sobre o reforço.....	61
Figura 5.6 – Efeito da frequência de pulso e corrente média sobre o reforço.....	62
Figura 5.7 – Efeito do tipo e intensidade da corrente sobre a largura.....	64
Figura 5.8 – Efeito da corrente média e frequência de pulso sobre a largura.....	64
Figura 5.9 – Efeito da frequência de pulso e corrente média sobre a largura.....	65
Figura 5.10 – Efeito da corrente média e frequência de pulso sobre a diluição.....	70
Figura 5.11 – Efeito da corrente média e frequência de pulso sobre a área da penetração.....	70
Figura 5.12 – Efeito da corrente média e da frequência de pulso sobre a área do reforço.....	71
Figura 5.13 – Efeito da frequência de pulso e corrente média sobre a área do reforço.....	71
Figura 5.14 – Microestrutura do cordão de solda na corrente média de 180A e frequência de pulso de 55Hz. Ampliação de 100X.....	72
Figura 5.15– Microdureza para corrente média de 130A e quatro frequências de pulso.....	74
Figura 5.16 – Efeito do tipo e intensidade de corrente média sobre a taxa de fusão.....	78
Figura 5.17 – Efeito do tipo e intensidade de corrente média sobre a taxa de deposição.....	78
Figura 5.18 – Efeito da frequência de pulso e corrente média sobre a taxa de fusão.....	79
Figura 5.19 – Efeito da frequência de pulso e corrente média sobre a taxa de deposição.....	80
Figura 5.20– Efeito do tipo e intensidade de corrente sobre o rendimento.....	81
Figura 5.21 – Efeito da corrente média e frequência de pulso sobre o rendimento.....	82

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Composição química das barras de aço ABNT 1020.....	27
Tabela 3.2 – Composição química do eletrodo ABNT 410.....	28
Tabela 3.3 – Valores dos parâmetros de soldagem mantidos constantes.....	32
Tabela 3.4 – Níveis de soldagem dos corpos de prova.....	39
Tabela 4.1 – Fatores e níveis selecionados para os ensaios definitivos.....	51
Tabela 4.2 – Condições constantes de soldagem dos corpos de prova.....	51
Tabela 5.1 – Resultados da morfologia do cordão.....	55
Tabela 5.2 – Resultado da ANOVA – Morfologia do cordão para três níveis de corrente média.....	55
Tabela 5.3 – Resultado da ANOVA – Morfologia do Cordão para quatro níveis de frequência de pulso.....	56
Tabela 5.4 – Resultados da diluição, área da penetração e área do reforço.....	66
Tabela 5.5 – Resultado da ANOVA – diluição, área da penetração e área do reforço para quatro níveis de frequência de pulso.....	67
Tabela 5.6 – Resultado da ANOVA – diluição, área da penetração e área do reforço para três níveis de corrente média.....	67
Tabela 5.7 – Resultados das características econômicas.....	76
Tabela 5.8 – Resultado da ANOVA – características econômicas para três níveis de corrente média.....	76
Tabela 5.9 – Resultado da ANOVA – características econômicas para quatro níveis de frequência de pulso.....	77

Nomenclatura

Letras Latinas

ma - massa de arame consumida.....	[g]
tb - tempo de aplicação da corrente de base.....	[ms]
tp - tempo de aplicação da corrente de pico.....	[ms]
Ap - Área da penetração.....	[mm ²]
Ar - Área do reforço.....	[mm ²]
Ib - Intensidade da corrente de base.....	[A]
Im - Intensidade da corrente média.....	[A]
Ip - Intensidade da corrente de pico.....	[A]
Mf - Massa final da chapa.....	[g]
Mi - Massa inicial da chapa.....	[g]
Rend - Rendimento do processo.....	[%]
D - Diluição.....	[%]
F - frequência de pulso.....	[ms]
L - comprimento de arame consumido.....	[m]
T - período do pulso.....	[Hz]
TD - Taxa de deposição.....	[kg/h]
TF - Taxa de fusão.....	[kg/h]

Letras Gregas

α - Nível de significância

ρ_a - Densidade do arame..... [g]

Abreviações

ANOVA - Análise de Variância

ASM – American Society for Materials

AWS - American Welding Society

ER - Eletrodo Revestido

MAG - Metal Ativo Gás

MIG - Metal Inerte Gás

TIG - Tungstênio Inerte Gás

Capítulo 1 - Importância e Objetivos

Dentre os processos de fabricação dos metais e suas ligas, o processo de soldagem é aquele que mais se desenvolveu nas últimas décadas. É difícil encontrar uma construção mecânica onde não exista união por soldagem, de forma que a história do desenvolvimento da soldagem se confunde com a própria história da evolução dos materiais nas suas diversas aplicações: em estruturas, na área de transportes, na geração de energia nuclear, na indústria farmacêutica, na indústria de alimentos, em equipamentos para processos petroquímicos, na área espacial etc.

O processo de soldagem a arco com proteção gasosa, com gás inerte ou não, e eletrodo consumível (MIG/MAG) utiliza como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A proteção da região da soldagem é feita por um fluxo de gás inerte ou não. Este processo foi desenvolvido no início dos anos 30 e somente após a II Guerra Mundial foi possível viabilizá-lo, primeiro para a soldagem de magnésio e sua ligas e em seguida para outros metais.

A soldagem de revestimento é popularmente empregada para aumentar a resistência à corrosão, resistência ao desgaste, resistência a altas temperaturas de uma camada num componente, prevendo-se aumentar a vida e reduzir o custo do depósito dos metais de adição. Isto não é somente empregado dentro da manutenção e reparos industriais, mas tem aumentado sua aplicação dentro da fabricação de componentes e processos industriais.

Os processos de soldagem por deposição podem ser classificados de acordo com as propriedades conferidas à camada depositada. Eles são chamados de revestimento, revestimento duro, recobrimento e amanteigamento para conseguir resistência à corrosão (para desgaste

químico), resistência ao desgaste (para desgaste físico) e controle dimensional e metalúrgico (para recuperação de componentes). Entre os materiais empregados para depósito, os aços inoxidáveis são o material mais popular para resistir à corrosão e temperatura elevada de serviço pois têm notável ductilidade, propriedades mecânicas a temperaturas elevadas e são fáceis de serem soldados. O processo MIG tem se tornado o mais escolhido para pequenos e médios depósitos adequando-se com qualidade, para cada uso, cada mecanismo de desgaste possibilidade de soldagem em todas as posições.

1.1- Importância

Os resultados deste trabalho complementarão as informações existentes, sobre a influência dos parâmetros de soldagem no processo MIG pulsado e convencional, em soldas de revestimento de metais dissimilares.

1.2 - Objetivos

Neste trabalho procurar-se-á estudar de maneira comparativa a influência dos parâmetros operacionais da soldagem a arco com proteção de gás inerte e eletrodo consumível (MIG), utilizando-se corrente pulsada e convencional. Para tanto, o processo foi aplicado em soldas de revestimento de metais dissimilares, tendo como variáveis de influência a corrente média e a frequência de pulso e como variáveis de resposta:

- ◆ as características geométricas do cordão de solda (penetração, reforço e largura);
- ◆ a diluição;
- ◆ as características econômicas do revestimento (taxa de fusão, taxa de deposição e rendimento do processo);
- ◆ a microdureza dos revestimentos;
- ◆ a microestrutura dos revestimentos.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

Neste capítulo efetuar-se-á um histórico do processo de soldagem e suas aplicações, sendo necessário apresentar e comentar informações publicadas sobre o tema específico, sua evolução e situação encontrada em particular. Para atingir esta proposta foi necessário um levantamento bibliográfico em diversas bases de dados, sendo a principal fonte consultada a base de dados Compendex Plus e Metadex, que contém o material publicado no Engineering Index, através da Biblioteca das Áreas de Engenharia – BAE/UNICAMP. Tais pesquisas foram feitas em intervalos regulares durante todo o decorrer da pesquisa experimental que permitiram o levantamento de referências relevantes para o assunto, no período de 1989 a 2000. Outra fonte importante de pesquisa foi o rastreamento das referências bibliográficas dos artigos adquiridos, o que permitiu o levantamento de um maior número de referências, de datas antigas, porém mais relevantes.

2.1 - Processos de soldagem

Dentre os processos de fabricação mecânica de metais e suas ligas, o processo de soldagem é aquele que mais se desenvolveu nas últimas décadas. É difícil encontrar uma construção mecânica onde não exista uma união por soldagem, de forma que a história do desenvolvimento da soldagem se confunde com a própria evolução dos materiais nas suas diversas aplicações: em estruturas, na área de transportes, na indústria alimentícia, na geração de energia nuclear, em equipamentos para processos petroquímicos, na área espacial.

Existem diversas definições do processo de soldagem, sendo definida como a união entre dois materiais, através da fusão dos mesmos, ou ainda com a adição de um outro material

fundido, usando uma fonte de calor. O processo de soldagem é um processo relativamente novo, que teve uma grande evolução a partir da segunda guerra mundial. Desde então tem tido a rápida evolução tecnológica, com o desenvolvimento de novas fontes de soldagem e de novos materiais utilizados como metal de adição.

2.2 - Soldagem a arco com proteção gasosa e eletrodo consumível

O processo de soldagem a arco com proteção gasosa e eletrodo consumível (MIG/MAG) é a soldagem a arco elétrico com atmosfera gasosa onde a união das peças metálicas ocorre pelo aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu consumível, maciço ou não, continuamente alimentado, e a peça de trabalho. (Machado, 1996).

O processo de soldagem a arco com proteção gasosa e eletrodo consumível (MIG/MAG), sempre utiliza metal de adição, possuindo uma maior taxa de deposição do que o processo de soldagem a arco com eletrodos revestidos (ER) do que o processo de soldagem a arco com eletrodo de tungstênio (conhecido no Brasil como TIG). A proteção da poça de fusão é feita através de um gás inerte ou não, alimentado continuamente durante a soldagem.

As principais funções do gás de proteção, que pode ser ativo ou inativo são: proteger a poça de fusão, a ponta aquecida do eletrodo de oxidações e outras contaminações atmosféricas, além de ser um meio ionizante do arco elétrico. Para materiais de fácil oxidação, o gás deve ser inerte quimicamente, quando o gás ou mistura de gases utilizados não reagem de forma significativa com a poça de fusão, de onde vem a denominação MIG; e pode ser ativo para aços, quando ocorre reação do gás com a poça de fusão, de onde provém a denominação MAG. O argônio e o hélio são exemplos de gases inertes e o oxigênio e o CO₂, dissociado no arco, são exemplos de gases ativos.

As misturas de Argônio e Oxigênio usualmente contém 1, 2 ou 5% de oxigênio. A pequena quantidade de oxigênio dentro da mistura de gás não se torna oxidante, pois o metal de adição usado contém desoxidantes para ajudar a remoção do oxigênio para fora da poça de fusão e prevenir a porosidade. O argônio puro nem sempre providencia a melhor característica do arco

quando se soldam materiais ferrosos. Se o argônio puro é utilizado como gás de proteção, o metal de adição tem uma tendência a ser projetado para fora da linha de fusão. Com a adição de pequenas quantidades de oxigênio no argônio, o arco se torna mais estável e com o mínimo de respingos, mantendo a transferência por “*spray*”, característica esta do argônio. O oxigênio melhora o ângulo de molhamento da poça de solda e reduz a ocorrência de defeitos por mordedura (depressão sob a forma de entalhe, no metal de base acompanhando a margem da solda). Quando 1 a 2% de oxigênio são adicionados ao argônio, esta mistura é utilizada para a soldagem de aços inoxidáveis. Acima de 5% de oxigênio, esta mistura é utilizada para a soldagem de aços com baixo carbono e ligas de cobre (ASM, 1983a).

Na soldagem de aço inoxidável em corrente pulsada a ASM (1983a) recomenda-se a adição de 1 a 2% de O₂ ao Ar; enquanto que para a soldagem de aço inoxidável deve-se utilizar a aplicação de uma mistura tripla de Ar, He e CO₂. O fato do CO₂ não ser recomendado na soldagem em corrente pulsada de arames de aço inoxidável, reside em problemas tanto de ordem metalúrgica como processual, ou seja, uma atmosfera rica em CO₂ apresenta a característica de que o carbono, preenchendo a região do arco, possa ser transferido para a poça de fusão ou extraído desta, o que acarretaria uma carbonetação ou descarbonetação respectivamente do metal depositado.

O processo MIG/MAG destaca-se também pela alta produtividade, pois possui uma elevada taxa de deposição e alta taxa de ocupação do soldador. O arco do processo MIG/MAG é uma fonte muito eficiente e concentra mais o calor em comparação com outros processos de soldagem.

O processo MIG, quando comparado com os processos de soldagem TIG e ER, apresenta algumas dificuldades, tais como: maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de soldagem, exige um ajuste rigoroso dos parâmetros para se obter um determinado conjunto de características para a solda, possui uma menor variedade de consumíveis e o equipamento e a sua manutenção é de maior custo (Machado, 1996).

O processo de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo consumível (MIG/MAG), pela qualidade da solda, aliada com uma maior produtividade, que normalmente é uma necessidade das indústrias, é um dos principais processos utilizados em soldagem a arco voltaico. Pode ser operado nos modos semi-automático, sendo aplicado praticamente em todos os metais comercialmente importantes (aço comum ao carbono, aços baixa liga, aços inoxidáveis e resistentes ao calor, alumínio, cobre, titânio e suas ligas). É capaz de executar soldas em todas as posições se forem escolhidos gases de proteção, arames eletrodos e parâmetros de soldagem apropriados (Marques, 1991). É muito empregado na fabricação e manutenção de equipamentos e peças metálicas com materiais especiais.

As principais vantagens do processo MIG/MAG citados na bibliografia (Machado, 1996; Marques, 1991; Quites e Dutra, 1979; entre outros) são :

- ◆ soldagem de todos os metais e ligas comerciais;
- ◆ alimentação contínua do eletrodo;
- ◆ soldagem em todas as posições;
- ◆ elevadas taxas de deposição;
- ◆ elevadas velocidades de soldagem;
- ◆ obtenção de cordões extensos sem muitas interrupções;
- ◆ como não existe escória, mínima limpeza após a soldagem é exigida;
- ◆ permite a automatização industrial, possibilitando a utilização de robôs;
- ◆ exigência de menor habilidade do soldador, quando comparada à soldagem com eletrodos revestidos.

As principais limitações do processo MIG/MAG citadas nas literaturas (Machado, 1996; Marques, 1991; Quites e Dutra, 1979; entre outros) são :

- ◆ maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem;
- ◆ equipamentos de soldagem complexos, relativamente caros e menos portáteis;
- ◆ utilização mais restrita em locais de difícil acesso, devido à maior complexidade e dimensões dos equipamentos;

- ◆ o arco deverá ser protegido das correntes de ar, para garantir a eficiência de proteção realizada pelos gases empregados;
- ◆ os altos níveis de radiação e calor gerado fazem com que o operador oponha resistência à utilização deste processo.

O equipamento exigido para a soldagem MIG/MAG consiste basicamente em uma fonte de energia, um sistema de alimentação do arame, uma tocha, um suprimento de gás protetor, um regulador-reductor de pressão do gás e, no caso de pistola refrigerada a água, um sistema de refrigeração da água. A Figura 2.1 mostra o esquema representativo do processo MIG/MAG.

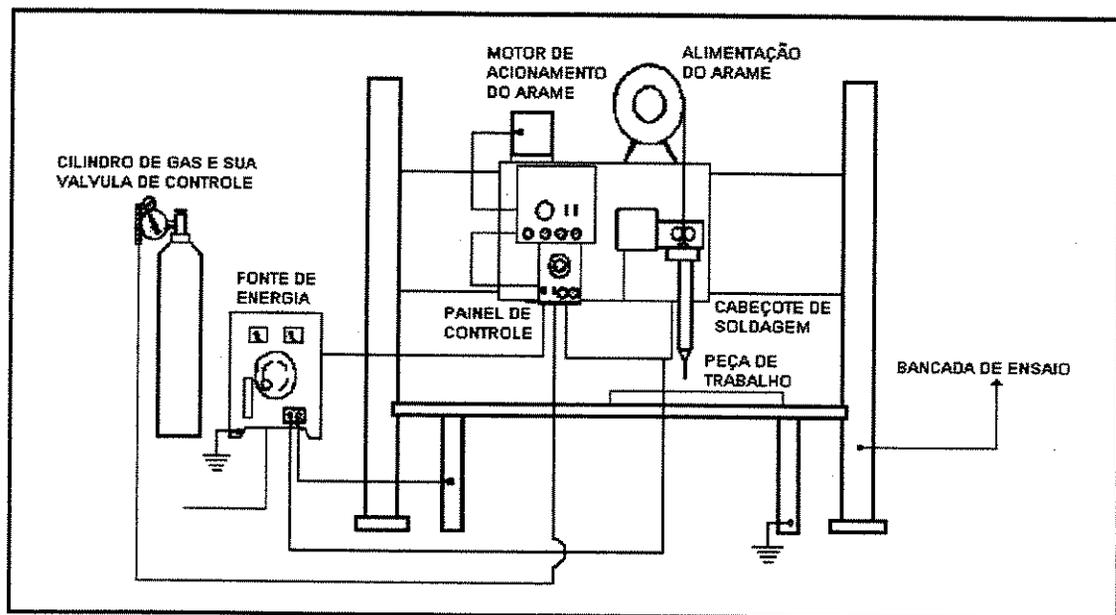


Figura 2.1 – Esquema representativo do processo MIG/MAG (AWS, 1991)

2.3 - Soldagem pelo processo MIG convencional e pulsado

A forma da onda de corrente no processo MIG convencional está mostrada na Figura 2.2, sendo que a intensidade corrente (I_c) aplicada é constante durante todo o tempo de aplicação da mesma.

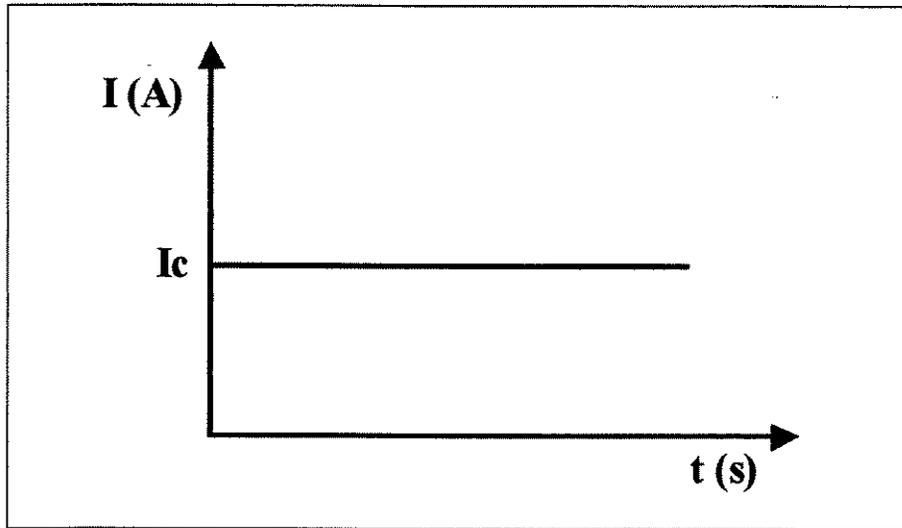


Figura 2.2 – Corrente convencional, onde I_c = Intensidade de corrente

O processo de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo consumível, com corrente pulsada, segundo Norrish & Nixon (1989), teve seu desenvolvimento após a década de 1960, utilizando um nível de intensidade de corrente média inferior à obtida em corrente convencional. A pulsação de corrente foi originalmente introduzida para controlar a transferência do metal, por imposição artificial do ciclo de operação do sistema de arco.

Nesta época as fontes utilizadas não tinham uma faixa de ajuste da frequência, variando segundo Norrish & Nixon (1989), de 50 a 60Hz, limitando sua aplicação em soldagem. A função da pulsação é obter por combinação o rendimento da fonte de trabalho com dois níveis de correntes.

No nível de intensidade de corrente alto, existe uma intensidade de corrente alta aplicada num determinado intervalo de tempo, sendo que neste período deve haver destacamento da gota. No outro nível de corrente, existe uma intensidade de corrente aplicada num nível inferior, aplicada também por um período de tempo, sendo que neste nível haverá a formação da gota, para que esta seja destacada no nível superior de corrente.

A transferência que ocorre em corrente pulsada é do tipo “*spray*”, sendo que esta se dá em intervalos de pulsos regularmente espaçados. Dentro do intervalo de tempo entre os pulsos, a corrente de soldagem é reduzida para que não ocorra transferência. (Norrish, 1992)

As fontes modernas de soldagem apresentam em sua saída formas de onda diferente da corrente constante, e as gotas metálicas são transferidas por meio de pulsos de corrente, com frequência e amplitude preestabelecidas. (ver Figura 2.3).

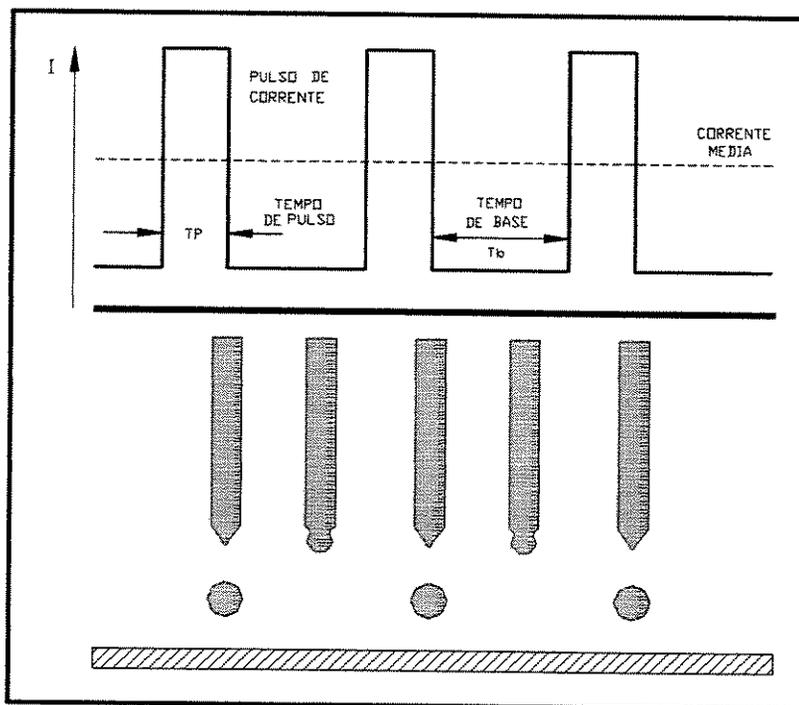


Figura 2.3 - Corrente pulsada, onde: I_m = intensidade da corrente média, I_p = intensidade da corrente de pico, I_b = intensidade da corrente de base, t_p = tempo de duração da corrente de pico e t_b = tempo de duração da corrente de base.

Observa-se na Figura 2.3 que a corrente pulsada é uma onda periódica. Esta passa de um valor de fundo baixo (corrente de base, I_b) para um valor de maior nível (corrente de pico, I_p) e seus respectivos tempos de duração, tempo de base (t_b) e tempo de pico (t_p). Nesta técnica, as variáveis intensidade da corrente de pico e o tempo de pico é que determinam a fusão do metal de adição no metal base, sendo que estas duas variáveis também proporcionam o destacamento da gota, que deve ser apenas de uma gota por pulso, para que se possa ter uma menor quantidade de respingos e uma melhor estabilidade do arco. A intensidade da corrente de base (I_b) proporciona a manutenção e estabilidade do arco na soldagem e, em conjunto com o tempo de base, sustenta a ponta do eletrodo, dando estabilidade ao ânodo e cátodo, enquanto que o tempo de base (t_b) proporcionará o esfriamento da poça de fusão durante a soldagem, além de ocorrer a formação da

gota neste período. (Norrish, 1992; Street, 1990; Welding Technology Data, 1985; Amin, 1983a, b; entre outros)

A corrente média relacionada ao processo pulsado é obtida pela equação 2.1 (Norrish, 1992):

$$I_m = \frac{I_p.t_p + I_b.t_b}{t_p + t_b} \quad \text{Equação 2.1}$$

onde:

I_m é a corrente média, (A);

I_p é a corrente de pico, (A);

I_b é a corrente de base, (A);

t_p é o tempo de pico, (ms);

t_b é o tempo de base, (ms).

O período de pulso é dado por $T = t_p + t_b$, o qual define a frequência de pulso que é dada por $F = 1/T$

Na corrente pulsada a transferência metálica é obtida com uma baixa corrente média, em virtude da aplicação de altas forças eletromagnéticas em curtíssimos espaços de tempo, geradas pela superposição da corrente de pulso acima do valor de transição. Como resultado, a gota metálica é destacada e projetada em direção à poça. Para que o processo de transferência seja estável, apenas uma gota deverá ser transferida a cada pulso de corrente, ou seja, para um determinado material haverá uma relação “região” ótima entre a velocidade de alimentação do arame, intensidade de corrente e tempo de pulso. Uma vez que as gotas metálicas adquirem considerável aceleração em direção a poça, a operação de soldagem poderá ser executada em todas as posições.

Quando se tem uma forma de onda do tipo pulsada, é possível soldar chapas de pequenas espessuras, mais facilmente do que a praticada com corrente convencional, devido ao baixo insumo de calor, que provoca distorções mínimas. Devido ao tipo de transferência da gota

(teoricamente por “*spray*”), é possível soldar em todas as posições. Os eletrodos usualmente utilizados são de 1,2 a 1,6 mm. (ASM, 1983a; Teubel, 1978)

Diversos trabalhos (Dutra et al, 1992; Norrish, 1992; Street, 1990; Allum e Quintino, 1985 a, b; Amin, 1983 a,b; entre outros) abordam a metodologia de cálculo das variáveis em corrente pulsada (I_m , I_p , t_p , I_b , t_b), onde se observa uma relativa complexidade no estabelecimento deste pacote de valores. Fatores como tipo de onda de pulso, tempo de resposta da fonte e sistema de alimentação exercem papel fundamental no êxito desta variante. As condições para que se atinja uma adequada estabilidade no processo de transferência metálica em corrente pulsada recaem basicamente em duas exigências:

1. necessidade de se ter um equilíbrio médio entre a velocidade de alimentação do arame e sua velocidade de fusão;
2. necessidade de que em cada pulso de corrente seja expelida apenas uma gota metálica.

Na determinação do pulso, quando do uso da corrente pulsada, diversas fontes foram consultadas (Gosh et al, 1998; Dutra et al, 1992; Norrish, 1992; Street, 1990; Allum e Quintino, 1985 a, b; Amin, 1983 a,b; entre outros), sendo que estas citam que, se a corrente de pico for pequena, pode ocorrer a formação de grandes gotas, como na transferência globular, e pode ocorrer curto circuito se a tensão for muito pequena. Caso a corrente seja muito elevada, novamente se forma uma grande gota, pois a mesma é incapaz de se separar do arame na taxa necessária. Para que a gota se transfira axialmente, é necessário que o tempo de atuação do pulso seja relativamente curto. Períodos longos levam à transferência do tipo “*spray*”, com várias gotículas se formando ao mesmo tempo, o que é indesejável neste caso, pois não se assegura o domínio completo da operação. Jilong e Apps (1983) citam que o tempo de destacamento é: $t_d = t_1 + t_2 + t_3$; onde t_d é o tempo de destacamento; t_1 é o tempo de aquecimento da gota para a preparação do processo de estrição (redução) da gota, e que usualmente é entre 1 e 1,5ms; t_2 é o tempo de crescimento da gota e sua estrição, e t_3 é o tempo de duração do destacamento que é normalmente da ordem de 0,2ms. Se $t_1 > t_d$ não há tempo suficiente para a gota ser formada; e se $t_d > t_1 + t_2$ poderá ocorrer mais de uma gota destacada no tempo de pico.

2.4 – Transferência controlada

Sob a denominação de transferência controlada estão agrupados outros modos de transferência que podem ser obtidos pela introdução de perturbações controladas na corrente de soldagem e/ou na alimentação do arame. Estas perturbações têm como objetivo obter uma transferência controlada de metal de adição com as características desejáveis da transferência goticular, mas em níveis bem mais baixos de corrente média, de forma a permitir sua utilização na soldagem de chapas finas ou fora da posição plana (Dutra, 1992).

De acordo com as literaturas (Street, 1990, Stenbacka e Person, 1989, Norrish e Richardson, 1988, entre outros) a transferência controlada mais usada é a transferência pulsada, que é um tipo de transferência onde se busca o modo goticular, mas com correntes médias abaixo da corrente de transição, juntando as qualidades da transferência por curto circuito com as do modo goticular. Este mecanismo é ideal quando se consegue uma gota por pulso. Para se obter este modo de transferência, deve-se usar fontes de energia especiais, capazes de fornecer corrente pulsada, com parâmetros de pulso controláveis. Uma limitação deste modo de transferência é a introdução de novas variáveis (de pulsação) no processo MIG/MAG, dificultando ainda mais a seleção e otimização de parâmetros para soldagem.

2.5 - Vantagens do processo pulsado

Conforme várias literaturas (Gosh et al, 1998; Machado,1996; Gosh & Rai 1996; Kalligerakis e Mellor, 1995; Kalligerakis e Mellor, 1992; Dutra, 1992; Street, 1990; Amin, 1983 a,b; entre outros), existem algumas das vantagens de se aplicar o processo pulsado em relação ao convencional são :

1. possibilidade de se soldar em qualquer posição e com taxa de fusão maior do que aquela obtida em curto-circuito;
2. a corrente média é bem menor do que a utilizada com uma fonte convencional, para um mesmo resultado;

3. a produção de respingos é quase nula; há ótima estabilidade do arco e a velocidade de soldagem pode ser bastante elevada;
4. a geometria do cordão se mantém praticamente constante;
5. o sistema pode ser controlado por um único comando (“*one knob control*”), quando sinérgico, facilitando o estabelecimento das condições operacionais ótimas;
6. um mesmo diâmetro de arame pode ser utilizado num amplo intervalo de corrente. Por exemplo, o diâmetro de 1,2mm (aço) permite valores de corrente média desde 80 a 350A, com taxa de deposição equivalente àquela de eletrodos revestidos de diâmetro de 3,2 à 5,0mm;
7. melhor controle da transferência do metal;
8. a solda executada possui melhor qualidade.

Neste processo com gás inerte, consegue-se uma retenção dos elementos de liga, uma formação mínima de respingos, boa visibilidade do arco e uma boa fusão, adicionado à facilidade de soldar chapas e tubos em todas as posições. As soldas podem ser executadas em todas as posições, produzindo uma penetração pequena na região soldada, reduzindo as distorções devido ao menor insumo de calor.

2.6 – Influência dos parâmetros de soldagem na morfologia dos cordões

A largura (L), o reforço (R) e a penetração (P), assim como a diluição (D), caracterizam a geometria do cordão de solda e têm influência marcante nas suas propriedades mecânicas. A Figura 2.4 ilustra o aspecto esquemático de uma seção transversal de um cordão de solda em simples deposição, que define a geometria do cordão de solda.

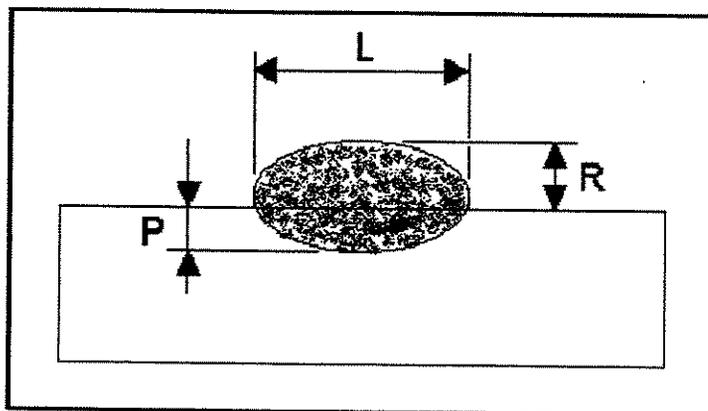


Figura 2.4 – Detalhe da seção transversal do cordão de solda em simples deposição, onde : R = reforço, L = largura e P = penetração.

A tentativa de se estabelecer relações entre os parâmetros de soldagem e a geometria do cordão de solda passa por estudos teóricos, baseados na teoria clássica do fluxo de calor, até estudos empíricos. A maioria dos trabalhos busca o desenvolvimento de modelos a partir da soldagem a arco com eletrodo consumível. Murugan & Parmar (1994) criaram um modelo matemático para relacionar as variáveis de influência com a morfologia do cordão de solda, utilizando o processo de soldagem a arco com gás inerte e eletrodo consumível (MIG). No entanto, as simplificações utilizadas para o desenvolvimento de modelos teóricos, assim como a dificuldade para a medição precisa das grandezas envolvidas (tensões interfaciais, densidade do metal líquido, força do arco, etc.), tornam as suas aplicações muito limitadas. Dentre os processos de soldagem com presença de escória, o arco submerso tem sido o mais estudado com relação à geometria da solda. Deve-se considerar ainda que a geometria da solda é também afetada pela composição dos fluxos, além dos parâmetros de soldagem.

Os principais fatores que influenciam o processo de fusão do metal de base e, conseqüentemente, controlam a quantidade de metal fundido são :

1. o calor gerado nas zonas de queda do cátodo ou do ânodo;
2. o calor gerado na coluna do arco;
3. o superaquecimento das gotas metálicas durante a transferência através do arco.

A penetração da solda é tanto maior quanto maior a concentração e intensidade de energia e também quanto maior a ação de escavação do arco. Essa força resulta da inércia de um fluxo de

gotas metálicas ou de um jato de gás colidindo com a poça de fusão, ou, ainda, uma combinação dos dois mecanismos. A concentração de energia é função do diâmetro do arco e este é tanto menor quanto menor for o seu comprimento, maior a sua condutividade térmica, e menor o diâmetro do eletrodo. Já a intensidade de energia aumenta à medida em que aumenta a corrente e diminui a velocidade de soldagem para a mesma atmosfera do arco (Kobayashi, 1986, “*apud*” Farias, 1993).

Essers & Walter “*apud*” Farias(1993) demonstraram que na soldagem pelo processo MIG a corrente tem uma influência marcante na penetração. Esta influência, na verdade, é indireta porque a variação da corrente afeta a velocidade da gota, e com isso a intensidade do seu impacto na poça de fusão, além de afetar também a temperatura da gota. A transferência de calor das gotas metálicas que se dirigem para a peça é o principal fator na determinação da penetração total da área da seção transversal da solda, enquanto o impacto das gotas na poça de fusão governa a profundidade da penetração.

O cordão de solda é mais largo quanto maior for o diâmetro do arco e menor a viscosidade e tensão superficial da escória. Ela é inversamente proporcional à velocidade de soldagem e diretamente proporcional à tensão de soldagem e ao diâmetro do eletrodo, os quais afetam a área sobre a qual a força do arco é dissipada (McGlone, 1982). A influência da corrente de soldagem, extensão do eletrodo e composição do fluxo na largura do cordão são mais difíceis de se determinar.

2.7- Sobreposição

A sobreposição é um dos fatores que determinam a quantidade de passes a serem executados, e esta variável determina principalmente a planicidade e homogeneidade dos cordões de solda executados. A planicidade deve ser a melhor possível para que, caso seja necessário executar uma operação posterior (Ex. usinagem), retire-se a menor quantidade possível de material.

A sobreposição é definida como a quantidade de material que um cordão de solda sobrepõe sobre o outro. Na soldagem de revestimento, dentre as variáveis de interesse, a sobreposição é uma das variáveis que exercem grande importância. Para uma melhor compreensão da sobreposição, a mesma está representada esquematicamente na Figura 2.5, onde L representa a largura do cordão de solda e a $\%L$ é o valor da sobreposição de um cordão sobre o outro. A sobreposição é que determina a planicidade e homogeneidade dos cordões executados, para que os mesmos não apresentem defeitos, como por exemplo a falta de fusão entre os cordões. Vários autores trabalharam com soldagem de revestimento, com o processo MIG, utilizando diversas sobreposições; Barra et al (1998) variou a sobreposição entre 20 e 50%, Murugan & Parmar (1994) entre 20 e 55%; e Murugan & Parmar (1997) fixou em 30%.

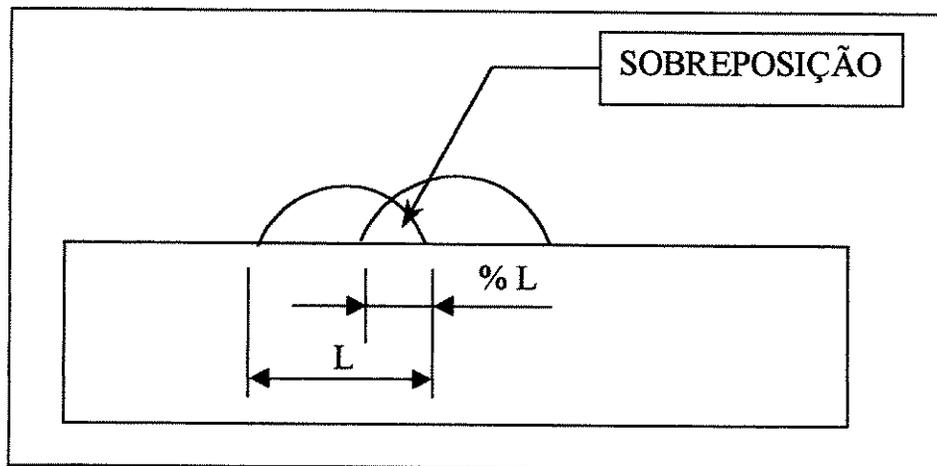


Figura 2.5 – Esquema representativo da sobreposição num cordão de solda.

2.8 - Ângulo de soldagem

A orientação da tocha em relação ao plano do cordão é definida pelos ângulos de deslocamento e ângulo de trabalho (vide Figura 2.6), sendo que:

ângulo de deslocamento: é definido pelo plano paralelo à linha de simetria do cordão e perpendicular ao plano de soldagem;

ângulo de trabalho: é definido pelo plano perpendicular à linha de simetria do cordão e perpendicular ao plano de soldagem.

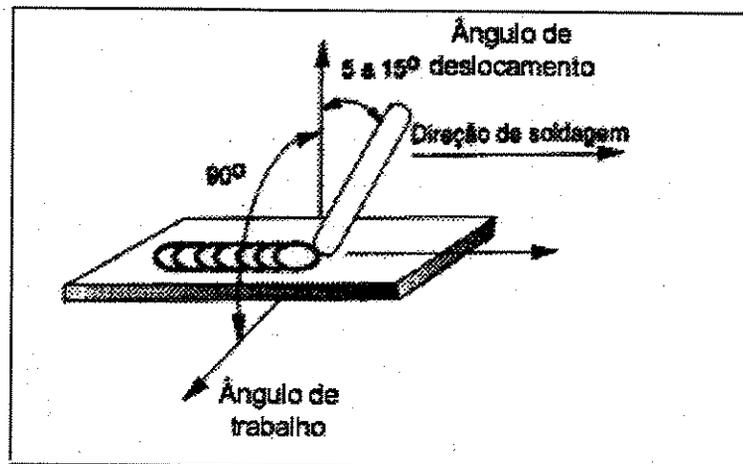


Figura 2.6 - Ângulos de orientação para o posicionamento da tocha. (Marques, 1991)

2.9 - Distância eletrodo/peça

A distância eletrodo-peça é definida como a distância entre a peça e a extremidade do arame em contato com o arco elétrico, porém como é difícil medir operacionalmente esta grandeza, geralmente considera-se a distância eletrodo-peça como a distância entre a extremidade do bico de contato e a peça de trabalho. Quanto maior esta distância maior será o aquecimento do arame por efeito Joule (I^2R) e dentro de certos limites pode ser usado como alternativa para se aumentar a taxa de deposição (Mota et al, 1996).

Para se determinar a distância eletrodo-peça foram consultadas diversas bibliografias que utilizaram o processo MIG em soldagem de revestimento; Brantis e Trevisan (1993) variaram este parâmetro entre 8 e 12mm; Murugan e Parmar (1994), entre 10 e 22mm; Barra (1998) entre 15 e 25mm; Rajasekaran et al (1998) fixaram em 15mm.

Das fontes consultadas, apenas Brantis e Trevisan (1993) trabalharam com metal de adição um aço inoxidável martensítico, sendo que este trabalho foi tomado como referência para se determinar a distância eletrodo-peça.

2.10 – Diluição

A composição do metal de solda não é a mesma que a especificada para o metal depositado, devido à participação do metal de base na constituição da zona fundida. E essa participação é quantificada mediante a diluição (D), que é definida pela relação entre a área fundida do metal de base, ou seja, a área da penetração (A_p) e a área do reforço (A_r). A Figura 2.7 mostra esquematicamente uma camada de cordões de revestimento sendo mostrada cada área dos cordões, enquanto que a Equação 2.2 é a fórmula utilizada no cálculo da diluição.

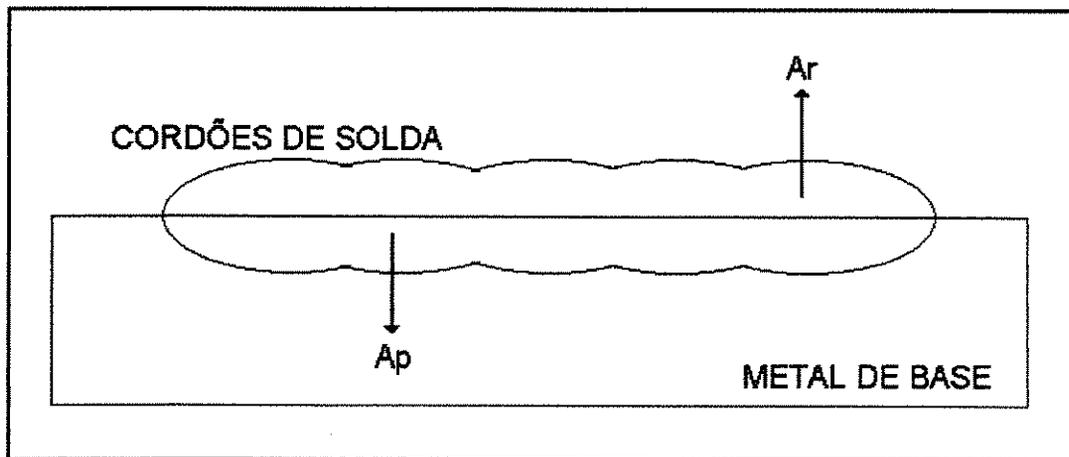


Figura 2.7 – Esquema das áreas para cálculo da diluição.

$$D = \frac{A_p}{A_p + A_r} * 100 \quad (\%) \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde :

D = diluição (%)

A_p = área da penetração (mm^2)

A_r = área do reforço (mm^2)

Na soldagem de revestimento com metais dissimilares a diluição é um fator extremamente importante, pois uma diluição excessiva poderia causar mudanças nas propriedades do aço martensítico, através da influência do metal de base (menos nobre) no metal de solda, prejudicando desta maneira o desempenho do revestimento (Zeeman, 1998).

A diluição do cordão de solda (D), é diretamente proporcional à corrente e inversamente proporcional à velocidade de soldagem e ao diâmetro do eletrodo. Chandel & Bala “*apud*” Farias(1993), mostram em seu trabalho que a área da solda aumenta com a tensão de soldagem, enquanto McGlone(1982) revela que não há efeito da tensão sobre a diluição. Quanto aos valores de diluição, existem controvérsias a respeito. Para Wainer(1992), a diluição esperada no processo MIG deve ser entre 10 e 50%; já a Welding Technology Data (1983) cita que a diluição para este processo deve ser de 20 a 30%.

2.11 - Soldagem de revestimento

O desgaste é definido como um dano a uma superfície sólida, envolvendo uma perda progressiva de material, devido à movimentação relativa entre a superfície de um ou vários materiais, sendo um fenômeno tipicamente superficial.

A soldagem de revestimento é muito empregada para aumentar ou melhorar a vida de componentes de engenharia mecânicos e reduzir o custo deles, pois se trata de um processo repetitivo de fabricação e pode ser utilizado para compor uma ou várias camadas de uma determinada seção, obtendo-se desta maneira o revestimento desejado. A soldagem de revestimento é definida como um depósito de uma solda, numa camada de uma parte do metal, para obter-se uma desejada propriedade diferente do metal base.

Segundo a ASM (1983b), a deposição pode variar de 5 a 50% do total da espessura do material, mas geralmente as aplicações são da ordem de 10 a 20%, com a espessura mínima de 1,5mm. Durante a deposição pelo processo de soldagem, devido às características requeridas no revestimento, deseja-se obter uma penetração relativamente pequena. Já o reforço e a largura do

cordão devem ser os maiores possíveis, aumentando-se desta maneira a espessura do revestimento e, conseqüentemente, diminuindo o número de cordões a serem aplicados.

A aplicação da soldagem de revestimento necessita estar bem definida, pois a altura do cordão de solda não pode ser excessiva de tal maneira a implicar na perda acentuada de material do revestimento num processo de fabricação subsequente à soldagem (Exemplo: usinagem), conciliando uma penetração do cordão que não produza uma grande zona afetada pelo calor e regiões de alta dureza, bem como baixa diluição para não mudar as características do revestimento.

A técnica de soldagem de revestimento pode ser classificada de acordo com as propriedades conferidas à camada depositada. As camadas denominadas revestimento, revestimento duro e amanteigamento, servem para conseguir resistência à corrosão (para desgaste químico), resistência ao desgaste (para desgaste físico), controle dimensional (para recuperação de componentes desgastados) e necessidades metalúrgicas, respectivamente. Dentre os materiais de deposição utilizados, destacam-se os aços inoxidáveis, que possuem uma elevada resistência ao desgaste por abrasão, oxidação ou corrosão. Os aços inoxidáveis são os mais utilizados contra a corrosão e resistência a altas temperaturas de trabalho, pois têm uma notável ductilidade, durabilidade, resistência, tenacidade e são facilmente soldados. Estes aços podem ser classificados em austeníticos, martensíticos e ferríticos (Zeeman, 1999, 1998, 1995; Murungan e Parmar, 1997).

Cada aplicação requerida é diferente, pois há um campo muito grande de utilizações, como por exemplo, pode ser necessário conseguir uma camada com 50 a 55HRC de dureza, numa determinada região. Isto pode ser encontrado com as estruturas martensita, austenita de dureza de trabalho ou com uma camada rica em carboneto de cromo, mas cada uma poderá resistir a diferentes formas de desgaste. Enquanto a estrutura martensítica é mais indicada para o desgaste metal-metal, o carboneto de cromo poderá prover melhor resistência a abrasão, e a austenita de dureza de trabalho pode ser escolhida para melhorar a resistência ao impacto (Kotecki, 1992).

Vários autores utilizaram a soldagem de revestimento. Kotecki (1996) estudou o efeito das variáveis do processo de soldagem a arco submerso (tais como : diâmetro do arame, tensão de soldagem, velocidade de soldagem, etc.) na solda de revestimento, tendo como metal de adição um aço inoxidável austenítico e como metal base aço ao carbono. Foi verificado que a distância entre os passes é uma variável importante na determinação da diluição, e quando se aumenta a velocidade de alimentação do arame a diluição também aumenta.

Já Mallya & Snirivas (1989), utilizando também o processo de soldagem arco submerso, verificaram as características do cordão da solda de revestimento (largura, reforço e penetração) de um aço inoxidável austenítico, depositado num aço ao carbono. Foram observados os seguintes resultados: aumentado-se a intensidade da corrente tem-se um aumento da largura e do reforço do cordão; aumentando-se a voltagem tem-se um acréscimo da largura do cordão, e o reforço e a penetração não obedecem à mesma proporção de aumento.

Os pesquisadores que utilizaram a soldagem de revestimento, com o processo de soldagem arco com gás de proteção e eletrodo consumível (Gosh et al, 1998; Kalligerakis & Mellor, 1995; Murugan & Parmar, 1994; Brantis e Trevisan, 1993; entre outros) obtiveram os mesmos resultados que aqueles que utilizaram a soldagem a arco submerso.

A maior parte das combinações de metais dissimilares pode ser unida por soldagem no estado sólido, ou brasagem. Dentro destes casos, somente as diferenças dentro das propriedades físicas e mecânicas do metal de base e sua influência na junta, devem ser consideradas. Quando metais dissimilares são unidos por processo de soldagem por fusão, as ligas entre o metal de base e o metal de adição, tornam-se a principal consideração. A união das peças depois de soldadas pode comportar-se diferentemente de um ou ambos metais durante os processos subsequentes ou dentro do serviço especificado.

Na soldagem de revestimento com metais dissimilares, a diluição é um fator extremamente importante, pois uma diluição excessiva poderia causar mudanças nas propriedades do aço martensítico, através da influência do metal de base (menos nobre) no metal de solda, prejudicando desta maneira o desempenho do revestimento. Com relação a resistência à corrosão,

há normalmente requisitos particulares para cada tipo de junta, porque as ligas de aço de baixo carbono não são resistentes à corrosão. Como aços de estruturas diferentes são unidas, pode haver certa dificuldade durante a soldagem. Aços de baixa liga, por exemplo, normalmente requerem controle de pré-aquecimento e temperatura de interpasse durante a soldagem., baixa taxas de resfriamento e alguns requerem tratamento térmico após a soldagem (Welding Handbook, 1991).

O Processo MIG pulsado, aplicado na soldagem de revestimento, apesar de se apresentar como uma inovação tecnológica, ainda não foi sistematicamente estudado, ou seja, existe pouquíssima literatura sobre o assunto, verificando se este processo é operacionalmente e economicamente viável, em relação às características econômicas, à morfologia dos cordões.

2.12 – Temperatura de interpasse

O pré-aquecimento é utilizado para prevenir os efeitos indesejados e pronunciados de uma não controlada taxa de resfriamento dentro da região soldada, especificamente a zona afetada pelo calor. A principal finalidade do pré-aquecimento e da manutenção da temperatura de interpasse é a prevenção de trincas durante a soldagem.

Estes revestimentos normalmente exigem cuidados de pré-aquecimento e resfriamento lento após a soldagem, e o depósito pode ser usinado com ferramentas de metal duro classe K. A espessura do depósito é limitada, costumando-se aplicar duas a três camadas de revestimento, para melhorar as propriedades de resistência contra o desgaste, e ainda apresentar características de boa tenacidade. Quando se adiciona à solicitação de desgaste metal-metal e requisitos de resistência à corrosão, utilizam-se aços inoxidáveis martensíticos (tipo 410, 410NiMo ou 420), que mantém a dureza em temperaturas um pouco mais elevadas (Zeemann, 1995; Chavanne, 1983).

Segundo Manning (1983), existem três termos definidos e conhecidos em soldagem, os quais são muito importantes, sendo definidos a seguir:

- Pré-aquecimento – aquecimento do metal de base anterior a soldagem;
- Pós-aquecimento – aquecimento após a soldagem;

- Temperatura de interpasse – temperatura de aquecimento da área total ou parcial, do corpo de prova durante a soldagem.

2.13 - Características econômicas

Um dos fatores de grande importância na seleção de um consumível de soldagem é o seu desempenho econômico, para se determinar quanto material está sendo fundido por unidade de tempo e o quanto deste material realmente está sendo incorporado ao cordão de solda. Entretanto, são muitas as variáveis capazes de interferir no desempenho econômico de um consumível. Destacam-se a sua composição química, os parâmetros operacionais do processo de soldagem, o modo de transferência metálica, entre outros. Quanto ao consumível, deve-se considerar se é um eletrodo revestido, um arame contínuo sólido ou tubular, o seu diâmetro, o tipo de proteção por fluxo fundente ou por gás. Dentre os parâmetros operacionais de soldagem, destacam-se o valor e a natureza da corrente e a sua polaridade no caso de corrente contínua, os valores da tensão, da distância eletrodo-peça.

A taxa de fusão (TF), a taxa de deposição (TD) e o rendimento real (Rend) definem o desempenho econômico do consumível na soldagem a arco voltaico. A taxa de fusão (TF) é representada pela massa do consumível fundida por unidade de tempo, na passagem do arco elétrico. A taxa de deposição (TD) é definida pela quantidade de material (massa) do consumível (eletrodo ou arame) realmente incorporada ao metal de solda por unidade de tempo e está relacionada ao custo total da operação de soldagem. O rendimento de deposição real (Rend) é a razão entre a massa do consumível incorporada ao metal de solda (TD) e a massa de arame consumida durante a operação de soldagem (TF), na mesma unidade de tempo. Para a soldagem com arame sólido, o cálculo destas características econômicas pode ser realizado através das seguintes equações matemáticas:

◆ Taxa de Fusão

$$TF = \frac{3,6 \cdot \rho_a \cdot L}{t} \quad [\text{kg/h}] \quad \text{Equação 2.3}$$

◆ Taxa de Deposição

$$TD = \frac{3,6 \cdot (Mf - Mi)}{t} \quad [\text{kg/h}] \quad \text{Equação 2.4}$$

◆ Rendimento de Deposição Real

$$\text{Rend} = \frac{Mf - Mi}{ma} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde:

L é o comprimento do arame consumido (m)

t é o tempo de soldagem (s)

Mi é a massa inicial da chapa (g)

Mf é a massa final da chapa (g)

ρ_a é a densidade do arame (g/m)

$ma = \rho_a \times L$, é a massa de arame consumida (g)

Capítulo 3 - Materiais e Métodos

Neste capítulo, são descritos os materiais e métodos utilizados durante a fase experimental do trabalho, e o tipo de planejamento experimental utilizado. São descritas, ainda, as dificuldades e limitações encontradas durante este desenvolvimento experimental.

3.1 – Equipamentos

Para a confecção dos cordões, foi utilizada uma bancada de ensaios constituída por uma central de soldagem multiprocesso e por um sistema de aquisição computadorizada de dados da tensão e corrente de soldagem. A Figura 3.1 mostra uma visão dos equipamentos utilizados durante a realização dos cordões de solda. Descreve-se, a seguir, as principais características dos componentes da bancada de ensaios.

1 – Central de soldagem multiprocesso

Tipo : Fonte eletrônica inversora chaveada no secundário

Modelo : Inversal 300

Fabricante : IML/LABSOLDA-UFSC

Corrente : Contínua ou alternada (constante ou pulsada)

Corrente Nominal : 300A

Corrente Máxima : 300A

Tensão : 220, 380 ou 440V trifásica

Tensão em vazio : 56V

1.1 - Acessórios

Tocha refrigerada à água

Modelo : MB 501D

Arame: 1 a 2,4mm

Fabricante : Binzel

Carro motriz (tartaruga)

Modelo: 5302

Fabricante: BUG-O SYSTEM

2 – Sistema de medição

◆ Sistema de alimentação do arame

Modelo : STA-20 / digital

Fabricante : IML/LABSOLDA-UFSC

◆ Placa de aquisição dos dados

Modelo : INTERDATA I

Fabricante : IML/LABSOLDA-UFSC

Frequência máxima de aquisição (Microcomputador 386/100MHz)

em 8 bits : 43kHz

em 12 bits : 28kHz

Faixa de leitura : -10 a + 10V

◆ Caixa de alimentação do arame (tempo, metragem e velocidade)

Fabricante : IML/LABSOLDA-UFSC

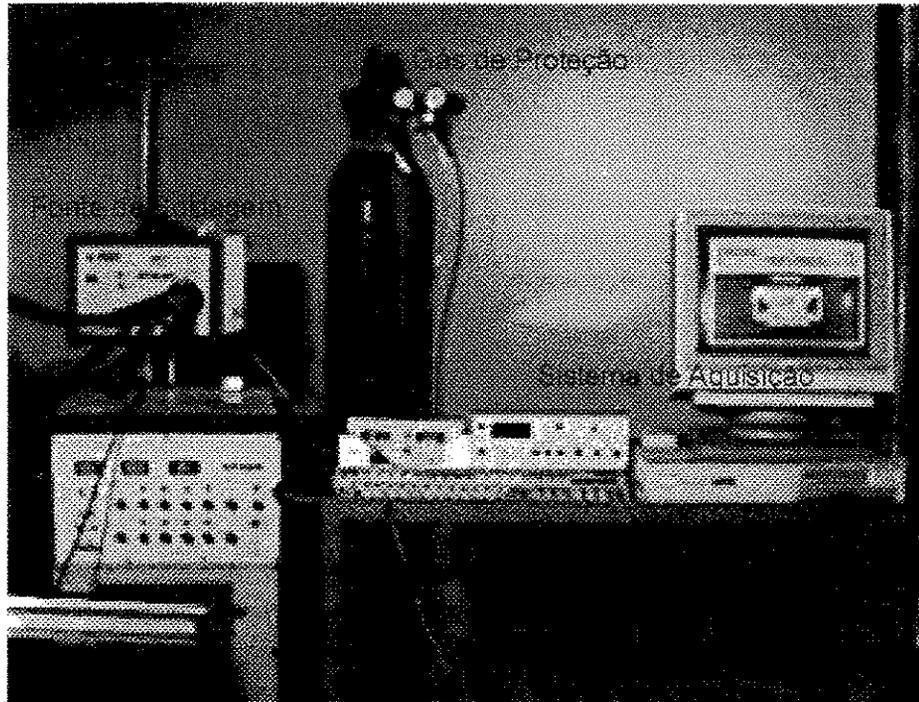


Figura 3.1 – Visão geral dos equipamentos utilizados.

3.2 - Materiais utilizados

Os corpos de prova utilizados como metal de base, neste experimento, foram chapas de aço ABNT 1020 trefiladas com 120mm de comprimento, 76mm de largura e 19mm de espessura. A composição química das chapas de aço é apresentada na Tabela 3.1, sendo que estes dados foram fornecidos pelo fabricante através de certificado de inspeção.

Tabela 3.1 – Composição Química das barras de aço ABNT 1020.

	C	Mn	P	S
Fornecida	0,21	0,44	0,01	0,03

Para a soldagem dos cordões, o metal de adição utilizado foi o eletrodo consumível segundo especificação AWS 5.10 ER 410 (similar ABNT ER 410); aço inoxidável martensítico, com diâmetro de 1,2mm, apresentado em rolos de aproximadamente 15kg. A composição química do arame também foi fornecida pelo fabricante, e é apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composição química do eletrodo ABNT 410.

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Cu	Outros
Fornecida	0,10	0,35	0,5	13,15	0,31	0,04	0,013	0,007	0,1	resto

3.2.1 - Preparação dos corpos de prova

Objetivando evitar a ocorrência de trincas e a necessidade de se fazer um controle da temperatura de pré-aquecimento e interpasse, os corpos de prova foram furados em uma fresadora-furadeira marca KONE, modelo KFF-30, sempre do lado oposto ao cordão de solda, com um diâmetro de 3,125mm e uma profundidade de 10mm, visando a instalação de termopares para controle de temperatura. Também cada corpo de prova foi identificado, individualmente, para que posteriormente fossem feitas análises metalográficas de cada condição utilizada no experimento. Na Figura 3.2 a localização dos furos, está esquematicamente demonstrada.

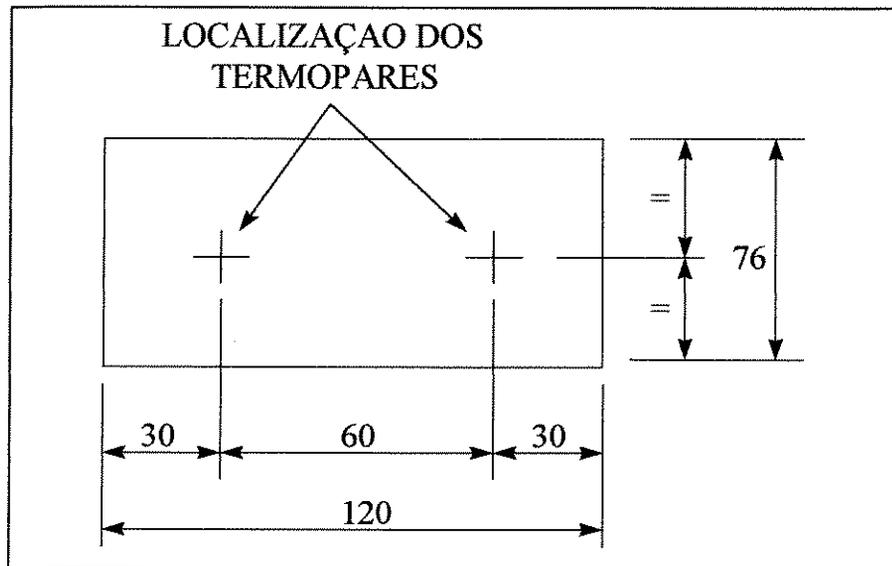


Figura 3.2 – Localização dos termopares.

Para a aquisição e controle da temperatura, foi utilizado um termopar do tipo K (Níquel-Cromo), com diâmetro de 3mm, recomendado para uso em atmosferas oxidantes ou inertes, o qual possui uma faixa de trabalho entre 0 e 1370°C.

Para que fosse possível montar os termopares e posicionar os corpos de prova, a temperatura de pré-aquecimento deveria ser maior do que a temperatura de interpasse, para que se tivesse tempo suficiente para retirar o corpo de prova do forno, levá-lo até o dispositivo, montar e posicionar os termopares e a tocha de soldagem e, após todo este procedimento, executar a soldagem (Figura 3.3).

No aquecimento dos corpos de prova, foi utilizado um forno de gaveta da marca EDG-modelo MC2, até a temperatura de 180°C. Após atingir esta temperatura, esperava-se uma hora para homogeneizar a temperatura do forno e dos corpos de prova. Após a temperatura estar estabilizada, o corpo de prova era retirado do forno e levado até o dispositivo de soldagem, sendo feito um monitoramento da temperatura, através de um medidor de temperatura, até esta atingir 150°C, dando início à soldagem. Este procedimento foi adotado para todos os ensaios.

Antes da execução da soldagem, todos os corpos de prova sofreram jateamento abrasivo, para que se obtivesse uma superfície isenta de óxidos, óleo, gorduras e outros contaminantes. Para que isto fosse possível, foram utilizadas micro-esferas de vidro com granulometria de 105-210µm. Em seguida, as superfícies foram limpas com ar comprimido limpo e isento de água. Este jateamento abrasivo foi executado em um jateador de gabinete NORTOF-Modelo SV-600.

Para que os corpos de prova ficassem sempre posicionados no mesmo local (na realização dos experimentos), foi construído um dispositivo de posicionamento e fixação dos termopares, o qual foi fixado à mesa de soldagem. A Figura 3.3 mostra o dispositivo de fixação dos corpos de prova, os termopares e a tocha de soldagem. Os termopares foram montados, com uma mola, de tal maneira que a mesma os empurra contra os corpos de prova, fazendo com que sempre se tenha um bom contato entre termopar/corpo de prova.

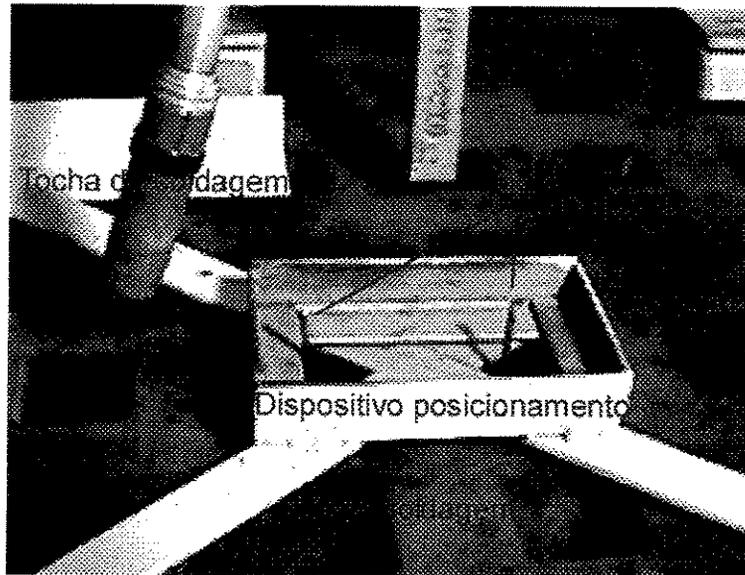


Figura 3.3 – Dispositivo de posicionamento dos corpos de prova.

3.3 – Características operacionais e econômicas

A forma de verificar se o processo aplicado responde satisfatoriamente às condições estabelecidas para a soldagem, é a análise das características econômicas (taxa de fusão, taxa de deposição e rendimento do processo).

Para se determinar as características econômicas, descritas no capítulo 2.10, através das equações 2.3, 2.4 e 2.5, foi necessário determinar a densidade linear do metal de adição. Para tanto, foram cortadas e pesadas 30 amostras do metal de adição, com comprimento de 100mm. Na pesagem foi utilizada uma balança eletrônica marca BEL, modelo MARK-500, com capacidade máxima de pesagem de 500g, e com uma precisão de 0,001g. Após a pesagem das 30 amostras, foi feita uma média destes valores, obtendo-se assim a densidade linear do metal de adição, a ser utilizada para o cálculo das características econômicas.

Após a determinação da densidade linear do arame, todos os corpos de prova, já identificados individualmente, foram pesados antes e depois da soldagem, para se determinar as características econômicas (taxa de fusão, taxa de deposição e rendimento do processo). Para a realização deste procedimento foi utilizada uma balança marca SARTORIUS WERKE GMBH –

modelo 1103, com capacidade máxima de 2000g e precisão de 0,10g. Também foi necessário a utilização do aparelho denominado Sistema de alimentação do arame, descrito no item Equipamentos (3.2), que registra o tempo em segundos de cada cordão soldado, a metragem utilizada e a velocidade de alimentação do arame.

Após a realização de cada cordão de solda, os valores de tempo de soldagem e de metal de adição consumido eram anotados, para posteriormente efetuar os cálculos das características econômicas do trabalho em questão.

3.4 – Determinação dos parâmetros de soldagem

Quando executado o levantamento bibliográfico, verificou-se a pouca quantidade de artigos recuperados e ainda os que foram recuperados não continham todas as informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho. Desta forma, definiu-se que a quantidade de cordões a serem executados seriam no total de cinco cordões para cada ensaio. Também ficou definido que a sobreposição seria de 50% entre os cordões, e que seria necessário realizar alguns experimentos iniciais, para verificar se os objetivos conseguiriam ser atingidos.

Para se determinar os parâmetros de soldagem que foram mantidos constantes, diversas fontes foram consultadas (Barra et al, 1998; Kalligerakis & Mellor, 1995; Murungan & Parmar, 1994; Allum, 1983, ASM, 1983b; Dutra, 1992, entre outros), sendo que os valores dos parâmetros de soldagem mantidos constantes estão mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Valores dos parâmetros de soldagem mantidos constantes.

PARÂMETRO	NÍVEL
Quantidade de cordões paralelos	05
Gás de proteção	Ar + 2%O
Temperatura de interpasse (°C)	150
Velocidade de soldagem (mm/min.)	300
Posição de soldagem	Plana
Eletrodo	CCEP

3.5 – Metodologia de tratamento dos dados

Na pesquisa científica geralmente formulam-se uma ou mais hipóteses e procura-se verificá-las por meio de um conjunto de observações. O planejamento experimental é uma ferramenta fundamental para a verificação das hipóteses formuladas, a qual é feita por meio de métodos de análises estatísticas, selecionadas em função da forma de obtenção das observações. Logo, está implícita a ligação íntima existente entre o planejamento dos experimentos e a análise dos resultados, os quais devem ser utilizados obedecendo-se uma seqüência nas pesquisas científicas das diversas áreas do conhecimento. De acordo com Peres e Saldiva (1982), “*apud*” Farias (1993), isto pode ser visto por meio da representação gráfica da circularidade do método científico ilustrado na Figura 3.4. As técnicas de planejamento devem ser empregadas entre as etapas 1 e 2, enquanto que os métodos de análise estatística devem ser utilizados na etapa 3.

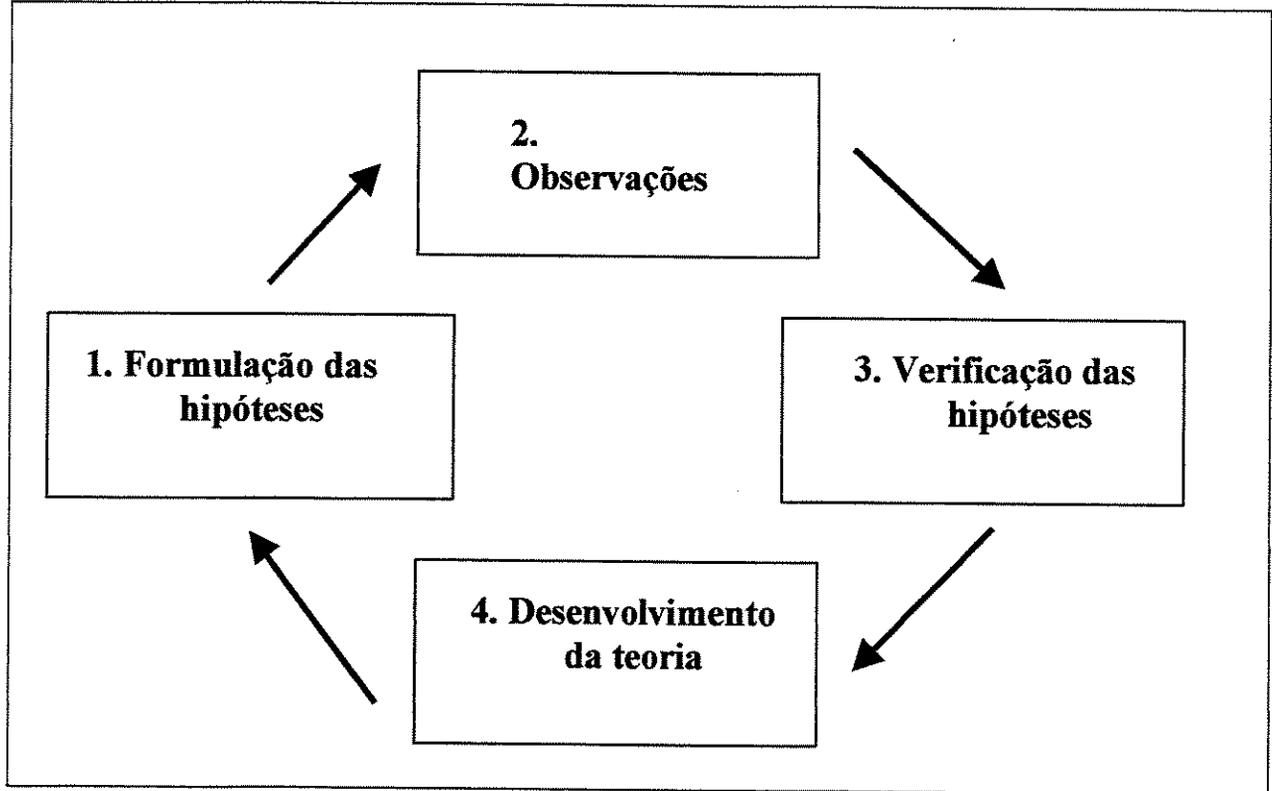


Figura 3.4 – Circularidade do método científico (Farias, 1993).

Ainda segundo Peres e Saldiva (1982), “*apud*” Farias (1993), de uma forma geral, pode-se afirmar que uma pesquisa científica estatisticamente planejada acompanha as seguintes etapas:

- a) enunciado do problema com formulação das hipóteses;
- b) escolha dos fatores (variáveis independentes) que devem ser incluídos no estudo;
- c) escolha da unidade experimental e da unidade de observação;
- d) escolha das variáveis que serão medidas nas unidades de observação;
- e) determinação das regras e procedimentos pelos quais os diferentes tratamentos são atribuídos às unidades experimentais (vice-versa);
- f) análise estatística dos resultados;
- g) relatório final contendo conclusões com medidas de precisão das estimativas, interpretação dos resultados com possível referência a outras pesquisas similares e uma avaliação dos itens “a” a “f” (desta pesquisa) com sugestões para possíveis alterações em pesquisas futuras.

3.5.1 – Fatores e níveis

Os fatores representam as variáveis independentes, enquanto os níveis indicam as suas variações. A Tabela 4.2 apresenta as variáveis e os respectivos níveis para os diferentes tipos de experimentos onde estará envolvida a análise estatística. O modelo de efeito fixo é considerado quando os efeitos resultantes da classificação, segundo linhas e colunas, forem ambos fixos, ou seja, as condições dadas pelas várias linhas e colunas representam a totalidade de todas as condições existentes. Uma vez que os fatores são fixos, as conclusões obtidas a partir desta análise serão válidas somente entre os intervalos definidos pelas variáveis escolhidas, modelo conhecido como de efeitos fixos (Costa Neto, 1977; Button, 1999).

3.5.2 – Fundamentos da análise estatística

O objetivo da análise estatística é verificar as hipóteses formuladas no início da pesquisa científica, não se apresentando todos os aspectos relevantes envolvidos no método estatístico.

Descreve-se a seguir, o procedimento adotado neste trabalho com base nas abordagens de Peres e Saldiva(1982) “*apud*” Farias(1993) e Costa Neto(1977). Acredita-se que esta descrição esclareça o método para o caso onde apenas um fator está envolvido. O problema consiste na verificação da influência dos “k” níveis deste fator sobre uma variável “y” sob o efeito do “k” tratamentos. A técnica mais importante para a solução deste problema é a Análise de Variância (ANOVA), desenvolvida pelo estatístico britânico Sir. R.A. Fischer como instrumento para a análise de experimentos agrícolas (Costa Neto, 1977). Este método é muito poderoso na identificação de diferenças entre médias populacionais devido a várias causas atuando simultaneamente sobre os elementos da população.

3.6 – Planejamento dos experimentos

Um dos objetivos do planejamento experimental é a otimização do número de ensaios a ser realizado. Esse número deve ser adequado, de modo a minimizar os erros experimentais (aleatórios), mas também deve contribuir para a viabilidade econômica e prática da experimentação (Button, 1999).

Dentre os diversos tipos de planejamento de experimentos, o planejamento fatorial completo é indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência. Devido ao pequeno número de ensaios utilizados no planejamento fatorial, esse planejamento é indicado para o início do procedimento experimental, quando há necessidade de definir-se as variáveis de influência e estudar seus efeitos sobre a variável de resposta escolhida. Deve-se destacar também que o planejamento fatorial é um modelo de efeito fixos. Assim, os resultados não podem ser transferidos para outros níveis que não os analisados no planejamento (Costa Neto, 1977).

O planejamento fatorial completo, utilizado neste trabalho, é com k fatores (denominados variáveis de influência) e 3 (três) níveis, denominado 3^k . As variáveis de influência são a Intensidade da corrente média (I_m) e a Frequência de pulso (F), e os níveis representados por -1 , 0 e $+1$; sendo o nível mínimo -1 , o nível intermediário 0 e o nível máximo $+1$. A Figura 3.5 mostra esquematicamente este tipo de planejamento.

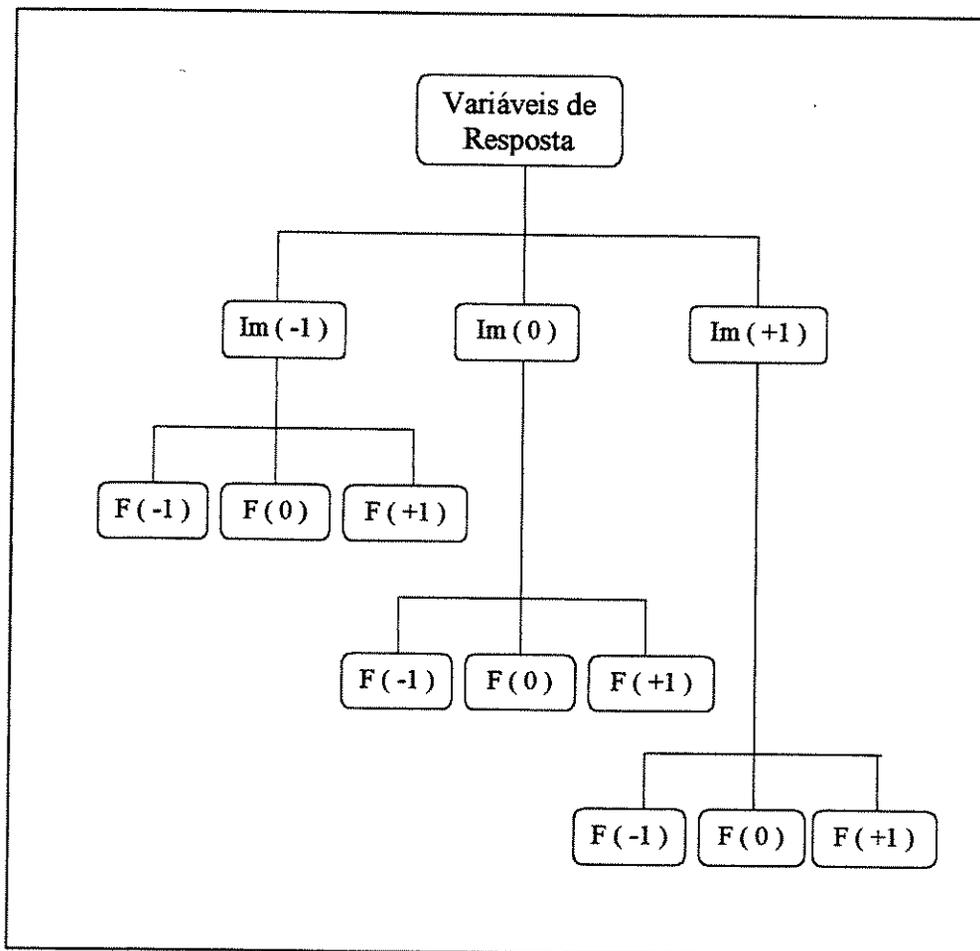


Figura 3.5 – Representação esquemática do planejamento fatorial.

Na Figura 3.5 consegue-se visualizar melhor os ensaios, de modo a realizar todas as combinações possíveis das 2 variáveis e 3 níveis, totalizando 9 ensaios. Com a execução das réplicas, foram feitos 27 ensaios com corrente pulsada. Foram ainda realizados ensaios com corrente convencional, de modo a compor um referencial para a comparação com a corrente pulsada. Realizaram-se, então, 3 ensaios e 3 réplicas, perfazendo um total de 9 ensaios. Portanto, foram realizados, no total 36 ensaios, sendo estes e suas réplicas executados de forma totalmente aleatorizada, de modo a prevenir a ocorrência de erros sistemáticos.

O erro experimental é definido como a diferença entre o valor real e o valor medido. Esse erro é tanto menor quanto maior a precisão do equipamento empregado. Desta forma, o erro experimental devido à instrumentação é inevitável e deve ser limitado a valores aceitáveis para a precisão exigida na aplicação. Para minimizar possíveis erros aleatórios (funcionamento

impróprio de algum instrumento, erros de medições, erros do sistema de instrumentação, precisão dos equipamentos, outras fontes de erro: cabos, ruídos, operadores), optou-se por fazer uma combinação aleatória dos ajustes empregados na execução dos corpos de prova (Button, 1999).

3.7 – Confecção dos experimentos

Para a realização dos revestimentos, os ensaios foram divididos em duas etapas, sendo que estas foram chamadas de Experimentos Iniciais e Experimentos Definitivos. Em todas as etapas, as condições de cada ensaio foram enumeradas, para que fosse possível analisar as variáveis de resposta de cada condição. Os corpos de prova obtidos foram identificados para que se facilitasse estudos posteriores, como também, possibilitar identificar os níveis da intensidade da corrente média e frequência de pulso.

A soldagem dos corpos de prova foi realizada conforme descrito a seguir, tanto para os experimentos iniciais como para os experimentos definitivos, sendo que os corpos de prova eram posicionados no dispositivo, mostrado anteriormente na Figura 3.3. Então eram instalados os termopares e posicionada a tocha de soldagem. Monitorava-se a temperatura, até esta atingir 150°C. Então dava-se início ao primeiro cordão de solda. Após o término de cada cordão de solda, a temperatura atingia em torno de 230°C. Procedia-se, então, à limpeza do corpo de prova com uma escova de aço para eliminar óxidos superficiais e fazer o cordão seguinte. Do primeiro para o segundo cordão, esperou-se a temperatura estar em torno de 170°C, para medir a largura do cordão. Calculava-se, então, a sobreposição entre os cordões e deslocava-se lateralmente a tocha, que, com o deslocamento necessário, era posicionada e monitorava-se a temperatura, até esta atingir 150°C. Então dava-se início ao próximo cordão de solda, sendo que do segundo ao quinto cordão este deslocamento lateral foi mantido constante. Durante a soldagem, entre um cordão e outro, procedia-se à desmontagem e limpeza do bico de contato da tocha, eliminando-se desta maneira qualquer respingo do metal de adição que tenha ficado no bico. Estes procedimentos de limpeza e monitoramento de temperatura foram feitos até o quinto e último cordão. A cada posicionamento da tocha, anterior ao início de soldagem de cada cordão, foi conferida a distância entre eletrodo/peça e o ângulo da tocha, sendo que qualquer alteração era corrigida, antes da execução de cada cordão.

Para possibilitar o controle dos níveis de corrente e tensão, foi utilizado um “*shunt*” (derivação com voltímetro e amperímetro interligados), acoplado à fonte retificadora e a um microcomputador 386, com 1,2Gb de memória.

Para a aquisição e processamento dos dados instantâneos da corrente e da tensão de soldagem, empregou-se um sistema de aquisição e de processamentos de dados numa frequência de 2Khz/canal em 12 bits. O tempo de aquisição para cordão do ensaio foi de 8 segundos, totalizando 40 segundos para cada corpo de prova.

3.8 – Parâmetros iniciais

Após a consulta a diversos autores (Gosh et al, 1998; Barra et al, 1998; Gosh & Rai, 1996; Machado, 1996; Kalligerakis & Mellor, 1995; Murugan & Parmar, 1994; Norrish, 1992; ASM, 1983b, Brantis & Trevisan, 1983; Kim & Eagar, 1993; entre outros) foi elaborada a Tabela 3.4, com os níveis e os parâmetros que deveriam ser confirmados durante a soldagem dos experimentos iniciais.

Conforme descrito anteriormente no item 3.5, os parâmetros de soldagem e seus respectivos níveis, que permaneceram constantes durante toda a fase experimental, foram determinados através da consulta à bibliografia citada anteriormente, e os mesmos foram apresentados na Tabela 3.3. Porém nestas fontes não se encontraram a aplicação específica da corrente pulsada em soldagem de revestimento, fazendo-se necessário a realização de experimentos para se determinar em que nível cada variável permaneceria constante. (a sobreposição, a vazão do gás, o ângulo de soldagem; a distância eletrodo/peça, a tensão de soldagem, a intensidade da corrente de pico e o tempo de pico). Nesta fase, cada parâmetro foi variado individualmente.

Tabela 3.4 – Níveis de soldagem dos corpos de prova.

PARÂMETRO	NÍVEL
Sobreposição (%)	20 a 50
Vazão do Gás (l/min.)	12 a 18
Distância eletrodo/peça (mm)	8 a 12
Ângulo de deslocamento da tocha	60 a 90°
Tensão de Soldagem (V)	22 a 27

3.9 – Ensaios metalográficos

Os ensaios metalográficos são procedimentos empregados para revelar várias fases presentes dentro de todas as regiões do revestimento (metal de solda, zona afetada pelo calor e metal de base), pois além de possibilitar medir-se a geometria dos cordões de solda, servem como complemento de informações às variáveis de influência utilizadas.

Na retirada dos corpos de prova para análise metalográfica, tomou-se sempre o cuidado de retirá-los da mesma região, para que se obtivesse para cada variável de resposta, uma homogeneidade dos resultados. Para tanto, foram feitos exames de macrografia, microdureza e microestrutura, sendo que os mesmos estão descritos a seguir.

3.9.1 – Macrografia

Os cortes para a retirada das amostras, para que fosse possível a realização das medições da morfologia do cordão, foram realizados em uma serra tipo “*cut-off*”, da marca PRESI MECATOME – modelo OS-250, sendo que a Figura 3.6 ilustra, esquematicamente, o seccionamento das amostras.

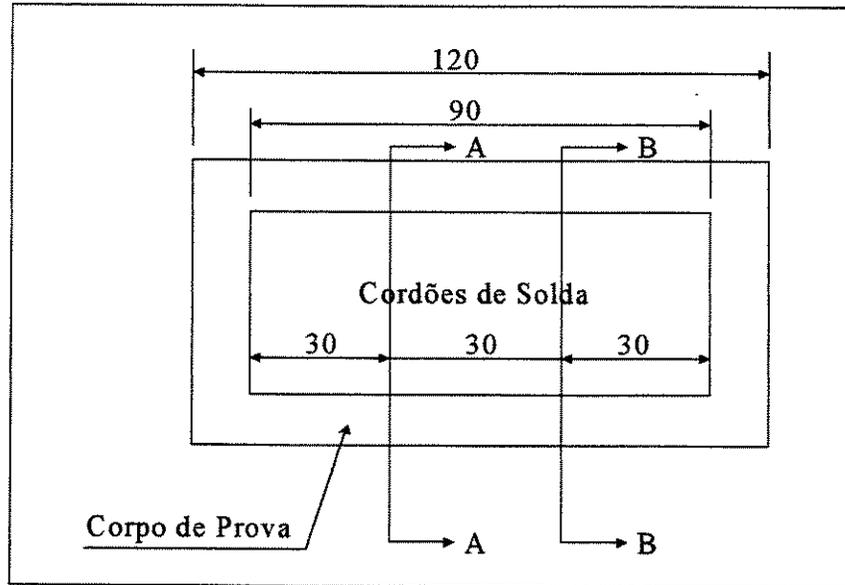


Figura 3.6 – Esquema de retirada das seções transversais dos cordões de teste.

Após o corte, cada corpo de prova foi polido metalograficamente, numa politriz Strues/Panambra – Modelo DP10, sendo utilizadas lixas de granulometrias gradativamente menores (120, 220, 320, 400, 600 e 1200mesh), nesta ordem. O ataque após o polimento foi realizado com reagente Nital 2%, durante 15 segundos, sendo em seguida as amostras lavadas em água corrente, com acetona e secas, utilizando-se ar quente. As amostras, assim preparadas, foram então levadas a um microscópio óptico marca CARL ZEISS JENA, modelo ZKM 01-250C, com precisão de 0,0001mm, para as medições da morfologia do cordão (largura, penetração e reforço).

3.9.2 – Micrografia

Objetivando verificar a estrutura obtida no metal de solda, zona afetada pelo calor, e verificar as influências das variáveis, foi realizado a micrografia. Para sua realização, os corpos de prova foram identificados pelas regiões A, B e C. Foi analisada na micrografia sempre a região “C” de cada corpo de prova, conforme mostra esquematicamente a Figura 3.7.

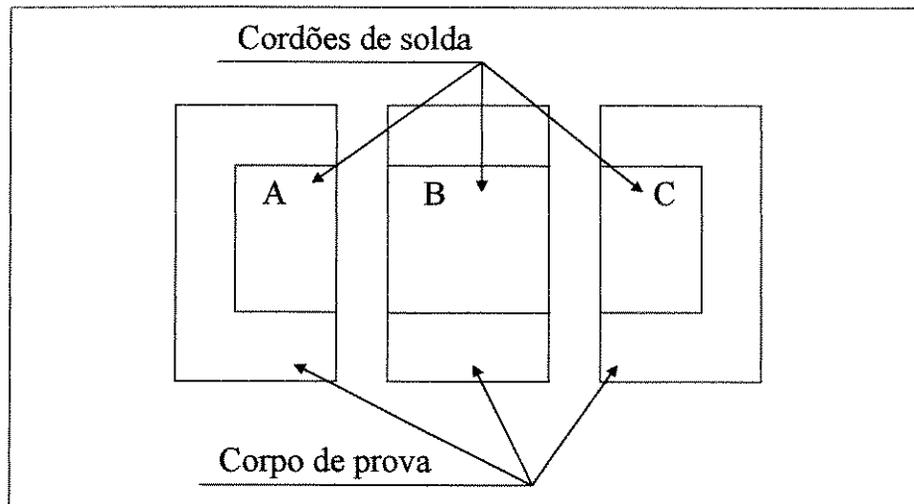


Figura 3.7 – Esquema do seccionamento dos corpos de prova.

Para fazer a análise de microestrutura, optamos pela região superior do corpo de prova, ou seja, a região “C”, a qual está demonstrada esquematicamente de acordo com a Figura 3.8. Para tanto, cada corpo de prova foi usinado, retirando-se 0,5mm de profundidade, sendo que a seta mostra a região que cada corpo de prova foi analisado (3º cordão de solda).

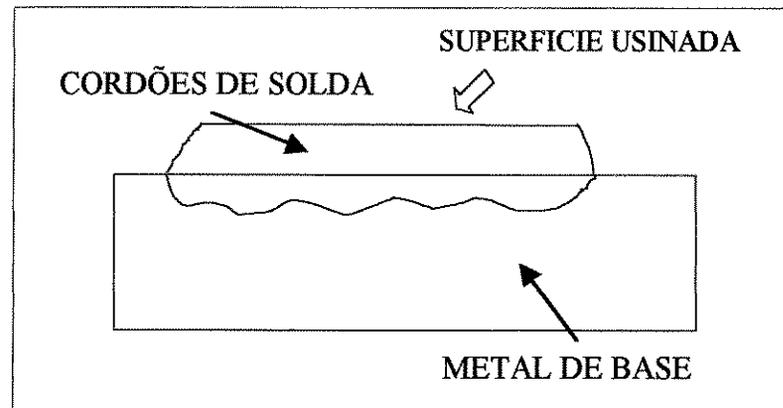


Figura 3.8 – Esquema da região da amostra retirada para análise de micrografia.

Após a usinagem dos corpos de prova, as regiões em que deveriam ser feitas as análises metalográficas foram demarcadas. Após as demarcações, as peças foram cortadas em uma serra tipo “cut-off”, marca PRESI MECATOME, modelo OS-250, originando os corpos de prova para metalografia, sendo que estes tinham aproximadamente 5 x 5mm. Após a retirada de corpo de prova, este foi identificado na região superior de cada um, para que quando fossem embutidos em baquelite, fossem facilmente identificados.

Após esta etapa, procedeu-se ao lixamento das mesmas com lixas de granulometrias gradativamente menores (120, 220, 320, 400, 600 e 1200mesh), nesta ordem. Em seguida, foram polidas em feltro, com pasta de diamante para ferrosos, com granulometria de 6, 3 e 1 μ m, respectivamente. Após o polimento, foi feito um ataque utilizando o reagente de Vilella, por 1 minuto, sendo, em seguida as amostras lavadas em água corrente, lavadas com acetona, e secas utilizando-se ar quente.

As análises metalográficas foram feitas em um microscópio óptico, marca ZEISS, modelo Neophot 32, com ampliação de 100 vezes.

3.10 – Diluição

Na medição da diluição, foram utilizados os mesmos corpos de prova atacados anteriormente, para a realização da morfologia do cordão. Os corpos de prova foram identificados e fotografados individualmente, utilizando-se uma máquina Pentax. Na Figura 3.9 está ilustrada uma foto de um corpo de prova, com corrente média de 180A e frequência de pulso de 70Hz.

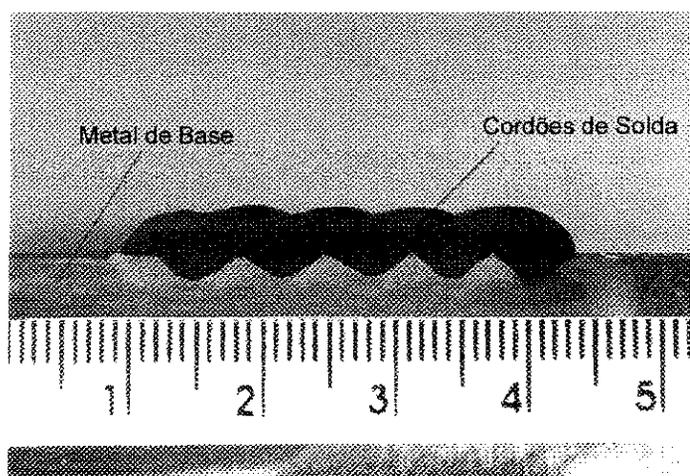


Figura 3.9 – Corpo de prova utilizado para medir diluição.

Estas fotos posteriormente foram “scaneadas”, para se fazer a medição da diluição, através do software AUTOCAD – versão 14. As fotos, então, eram importadas para o software. Fez-se uma correção da escala das fotos e posteriormente, a região da solda foi dividida em duas partes, através de uma linha a partir da superfície do corpo de prova. A área da penetração é área delimitada pela parte inferior da linha, e a área do reforço pela parte superior da linha. Em seguida criou-se uma linha contínua (“polyline”) para delimitar a área do reforço, e depois outra linha contínua (“polyline”) para delimitar a área do penetração. Após isto, foi utilizada a ferramenta do próprio AUTOCAD para calcular a área de cada região.

3.11 – Microdureza

Para a medição da microdureza foi utilizada a norma ASTM E-384, sendo que a mesma especifica os limites da carga entre 1 e 100gf. Na medição da microdureza foi utilizado um microdurômetro marca LEITZWETZAR, modelo 5385, sendo que foi estipulada a superfície do revestimento como ponto inicial das medições (zero). A partir deste ponto, mediu-se a microdureza com o mesmo espaçamento para todos os corpos de prova, sendo este intervalo medido de 1 em 1mm.

Para que fosse possível a medição de todas as regiões dos corpos de prova (metal de solda, zona afetada pelo calor), foi necessário diminuir este intervalo entre o metal de solda e o metal de base, para se medir a zona afetada pelo calor. Durante a medição da microdureza foi utilizada durante todo o ensaio uma carga de 100g, aplicada por 30 segundos. Para que houvesse uma diminuição dos erros de cada resultado, foram executadas três medições paralelas entre si, com espaçamento lateral de 0,5mm, obtendo-se três resultados de microdureza. Após este procedimento, foi calculado a média destes valores, obtendo-se a medida final da microdureza.

Capítulo 4 - Resultados e Discussões dos Experimentos Iniciais

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, quando da determinação dos níveis dos parâmetros que permaneceram constantes durante toda a fase experimental. Foi necessário a execução de vários experimentos, para que se obtivesse as melhores condições de soldagem, sendo aqui denominados experimentos iniciais. Estes parâmetros foram variados individualmente durante a realização dos experimentos iniciais.

4.1 - Experimentos iniciais

Para que fosse possível determinar se os níveis dos parâmetros adotados seriam mantidos durante todos os ensaios, foi necessário a realização dos experimentos iniciais. Durante esta etapa, cada parâmetro foi variado individualmente, para se obter os melhores resultados. Os níveis e os parâmetros utilizados nos experimentos iniciais foram descritos na Tabela 3.4, do capítulo 3.8, e serão discutidos individualmente, a seguir, os resultados obtidos de cada parâmetro.

Na soldagem de revestimento com metais dissimilares, o reforço dos cordões deve ser o mais alto possível, para se diminuir a quantidade de camadas a serem executadas. A largura também deve ser a maior possível, para minimização do número de passes a serem executados. Já a penetração e a diluição devem ser as menores possíveis, para se minimizar a mistura do metal de adição com o metal de base.

4.1.1 - Sobreposição

Neste trabalho, durante os experimentos iniciais, variou-se a sobreposição entre 20 e 50%, de 10 em 10%, para verificar-se o comportamento desta variável nos cordões de solda de revestimento.

Quando a sobreposição foi variada entre 40 e 50%, os cordões de solda não tinham um bom acabamento superficial, pois não se obteve uma camada uniforme e plana dos cordões de revestimento. O reforço cresceu muito e a largura não teve um aumento na mesma proporção. Este fato está ilustrado de maneira esquemática na Figura 4.1.

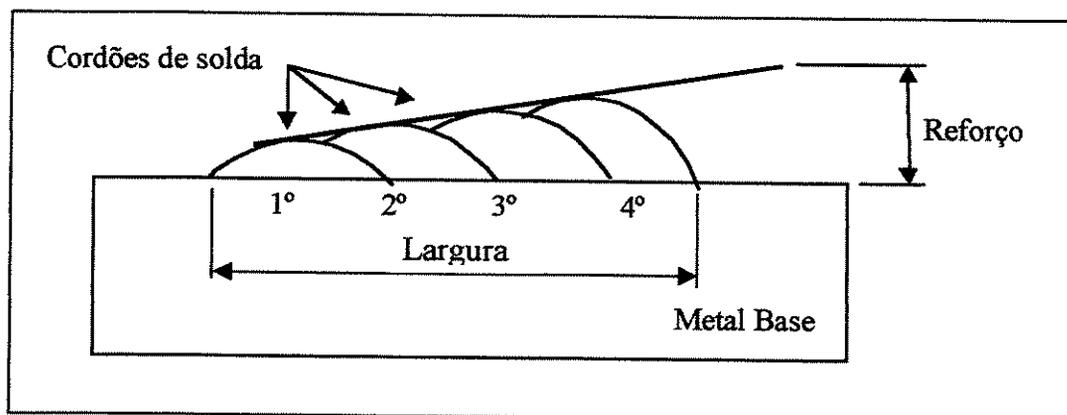


Figura 4.1 – Esquema representativo da sobreposição quando esta foi entre 40 e 50%.

Quando a sobreposição foi fixada em 20%, os cordões às vezes, não se tocavam; ou ainda houve uma região denominada de vazio entre os cordões. Em alguns casos, chegou a 1mm de separação. Este fato está representado de maneira esquemática na Figura 4.2. Nesta condição, não se caracterizou uma soldagem de revestimento, pois demandaria uma nova confecção de cordões para se eliminar este defeito. Caso ainda fosse necessário uma operação subsequente, a remoção de material seria excessiva, comprometendo desta maneira o revestimento.

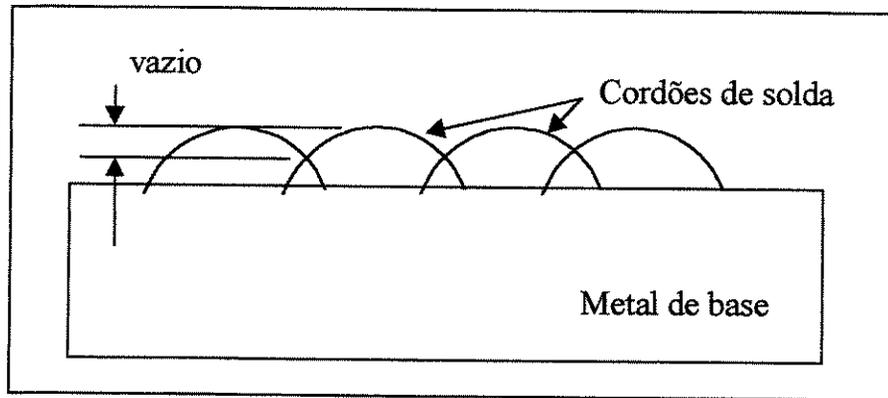


Figura 4.2 – Esquema representativo da falta de fusão entre os cordões ou vazão com a sobreposição de 20%.

A melhor condição para a sobreposição ocorreu quando esta foi fixada em 30%, fazendo com que se obtivesse uma camada de revestimento sem defeitos como falta de fusão entre os cordões, ou um aumento do reforço de maneira irregular. Nesta condição, a largura teve um crescimento proporcional em relação ao reforço, conseguindo-se revestir o metal desejado com 5 cordões em apenas uma camada de revestimento. Nesta situação, o revestimento era homogêneo e uniforme, com uma boa planicidade superficial. Para ilustrar esta camada obtida, a mesma é mostrada na Figura 3.9.

4.1.2 - Vazão do gás

Ainda de acordo com a Tabela 3.4, o nível de variação da vazão do gás encontrado na literatura foi de 12 a 18 l/min., sendo adotado este nível durante a realização dos experimentos iniciais. Quando a vazão do gás foi de 12 l/min., a proteção gasosa não foi suficiente, pois no final de cada cordão verificava-se visualmente que uma região do cordão de solda não tinha sido protegida pelo gás. Na vazão do gás fixada em 18 l/min., o arco tornava-se turbulento devido ao excesso de gás, propiciando uma instabilidade verificada visualmente. A melhor vazão do gás durante a realização dos cordões de solda de revestimento foi quando se utilizou 15 l/min. Com esta vazão observou-se que o arco elétrico se comportava de maneira estável, sem nenhuma turbulência, proporcionando cordões uniformes e planos, sem que nenhuma região ficasse defeituosa, ou sem proteção gasosa.

4.1.3 - Ângulo de soldagem

O ângulo de trabalho durante a realização dos experimentos iniciais e experimentos definitivos foi mantido constante a 90°. Durante a realização dos experimentos iniciais o ângulo entre a peça e a tocha de soldagem (ângulo de deslocamento) foi variado entre 0 e 30°, de 5 em 5°. Quando se utilizou valores entre 0 e 10, ou entre 20 e 30°, os cordões de solda realizados tinham falta de fusão entre si, e o reforço crescia de maneira irregular, não se obtendo, desta maneira, uma camada uniforme e plana dos cordões na soldagem de revestimento. A melhor condição para a soldagem de revestimento, durante os experimentos iniciais, foi quando se utilizou o ângulo de deslocamento em 15°, sendo que, com este ângulo, o cordão de solda de revestimento não apresentou defeito em todo o seu comprimento, e a camada obtida foi uniforme e plana em toda a extensão dos cordões.

4.1.4 - Distância eletrodo/peça

Durante a realização dos experimentos iniciais esta distância foi variada em 8, 10 e 12mm. Na condição de 8mm, percebeu-se que o arco estava com excesso de curtos-circuitos, pois o mesmo visualmente estava dentro da poça de fusão. Quando a distância entre o eletrodo e a peça foi de 12mm, o arco se tornou instável, pois havia uma formação excessiva de respingos. Na distância entre o eletrodo e a peça de 10mm, não se verificou uma quantidade excessiva de respingos, nem uma instabilidade do arco elétrico inserido dentro da poça de fusão, conseguindo-se executar os cordões de solda de revestimento.

4.1.5 - Tensão de soldagem

Durante os experimentos iniciais, a tensão de soldagem foi variada em 22, 25 e 28V. Quando a tensão de soldagem foi de 22V, o cordão formado era estreito e convexo e o comprimento do arco era muito pequeno, dificultando a confecção do revestimento. Quando a

tensão adotada foi de 28V, o cordão formado tinha uma largura excessiva e o reforço era muito pequeno, havendo também um grande número de respingos. A melhor condição para a tensão foi quando utilizada 25V. A largura e o reforço tinham a morfologia desejada e cordões executados não tinham defeitos.

4.1.6 – Determinação da intensidade da corrente de pico e do tempo de pico

Para se determinar a intensidade da corrente de pico e o tempo de aplicação da corrente de pico, foram consultadas diversas fontes (Barra et al, 1998; Gosh et al, 1998; Rajasekaran et al, 1998, entre outros), que utilizaram a corrente pulsada. Devido à dificuldade de se obter uma aplicação específica de soldagem de revestimento com aço inoxidável martensítico, neste trabalho a intensidade da corrente de pico foi variada entre 300 e 350A, de 10 em 10A; e o tempo de pico de 2 a 6ms, de 0,5 em 0,5ms.

Primeiramente foi fixada a frequência de pulso de 4ms, e variada a corrente média. Com a corrente entre 320 a 350A, ou 300A, não se obteve uma boa estabilidade arco, dificultando a confecção dos cordões. A melhor condição para a corrente média foi obtida quando se utilizou a corrente média de 310A.

Após a determinação da corrente de pico (sendo esta fixada em 310A), o tempo de pico foi variado entre 2 e 6ms, de 0,5 em 0,5ms. Com o tempo de pico variado entre 3 e 6ms, ocorreu mais de um destacamento por pulso, e às vezes este destacamento ocorria durante a aplicação do tempo de base. Quando utilizado o tempo de pico em 2ms, o destacamento ocorria fora deste, pois não havia tempo suficiente para se destacar a gota, resultado este observado também por Jilong & Apps(1983).

Durante os experimentos iniciais, para que se pudesse afirmar que seria apenas destacada uma gota por pulso, todos os valores de tensão e corrente, durante os ensaios realizados foram adquiridos através de um sistema de aquisição, monitorado por computador, sendo o tempo de aquisição de 6 segundos para cada cordão. Após a realização de cada condição, era verificado o

destacamento da gota através de oscilogramas de tensão e corrente, e observado se apenas uma gota tinha se destacado por pulso de corrente.

Quando o tempo de pico foi fixado em 2,5ms e a corrente de pico em 310A, o destacamento da gota ocorria na região correta, ou seja, durante a aplicação da corrente de pico e do tempo de pico, não havendo destacamento no tempo de base. Nesta condição a formação da gota ocorria no tempo de base e corrente de base e o seu destacamento acontecia no tempo de pico, pois este era suficiente para esperar a gota se destacar, e de não ser tão grande para ocorrer uma nova formação de gota. A Figura 4.3 ilustra um oscilograma de corrente e tensão de um intervalo de aquisição, onde se verifica uma estabilidade da frequência de pulsação, durante vários intervalos da pulsação do arco, com relação aos valores de corrente e tensão. Por esta Figura pode-se afirmar que apenas uma gota foi destacada por pulso de corrente e que em nenhum momento houve um destacamento da gota no tempo de base.

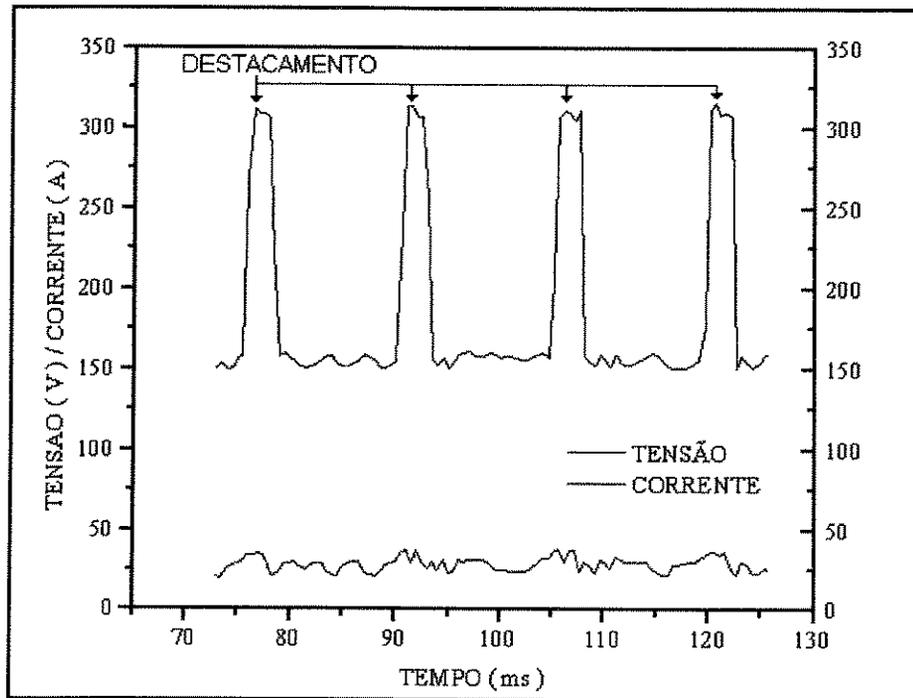


Figura 4.3 – Oscilograma de corrente e tensão , $I_m = 180A$ e $F = 70Hz$.

4.1.7 – Determinação dos níveis das variáveis de influência

Após a fixação da corrente de pico e do tempo de pico, em 310A e 2,5ms respectivamente, foi necessário estabelecer os níveis de trabalho das variáveis de influência (a intensidade da corrente média e a frequência de pulso). Após a consulta a diversos pesquisadores (Gosh et al, 1998; Kalligerakis & Mellor, 1995; Kim & Eagar, 1993, Amin, 1983a,b; Brantis & Trevisan, 1993, entre outros), a intensidade da corrente média foi variada entre 100 e 250A; de 10 em 10A, já a frequência de pulsação ficou entre 45 e 100Hz; de 5 em 5Hz.

Quando a corrente média aplicada estava abaixo de 120A, não se conseguiu executar os cordões, pois o insumo de calor era insuficiente para fundir o metal de adição, ocorrendo falta de fusão entre os cordões. Com correntes acima de 240A, o arco comportava-se instavelmente, pois a tensão de soldagem foi mantida constante durante todo o experimento em 25V. Nestas condições, os cordões tinham excesso de material, pois com o aumento da corrente houve um aumento do insumo de calor e ocorreu, às vezes, de parte deste material ser fundida no bico de contato da tocha de soldagem. As melhores condições para a corrente de soldagem foram quando se utilizou correntes de soldagem entre 130 e 230A.

Na determinação da frequência de pulsação, quando foram usadas frequências abaixo de 55Hz, ou acima de 85Hz, verificou-se através dos oscilogramas de corrente e tensão que o destacamento da gota não se comportava regularmente, comprometendo desta maneira a estabilidade do arco. Nestas condições percebeu-se ainda que ocorriam destacamento de gota no tempo de base, um excesso de respingos, e, às vezes, a obstrução do bico de soldagem. As melhores condições para a frequência de pulso ocorreram quando do uso de frequências entre 55 e 85Hz. Após a determinação dos níveis da corrente média e frequência de pulso (ou seja, as variáveis de influência), os mesmos níveis foram divididos igualmente para a realização dos ensaios experimentais e definitivos, sendo os mesmos mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Fatores e níveis selecionados para os ensaios definitivos.

Variável	Código	Nível			
		1	2	3	4
Corrente Média (A)	Im	130	180	230	-
Frequência de Pulso (Hz)	F	0	55	70	85

4.1.8 - Parâmetros constantes

Quando se obteve os níveis desejados para os parâmetros que permaneceriam constantes durante todos os experimentos, foram realizados alguns testes para comprovar estes resultados, levando-se em conta a planicidade do depósito e o reforço mais simétrico do cordão. Os parâmetros constantes estão mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Condições constantes de soldagem dos corpos de prova.

PARÂMETRO	NÍVEL
Sobreposição (%)	30
Vazão do gás (l/min)	15
Distância eletrodo-peça (mm)	10
Ângulo de deslocamento da tocha	75°
Tensão de soldagem (V)	25
Intensidade da corrente de pico (A)	310
Tempo de pico (ms)	2,5

4.2 – Experimentos definitivos

Após a obtenção dos níveis foi aplicado um planejamento, para determinar a quantidade de ensaios a serem realizados. Optou-se por aplicar um planejamento experimental do tipo fatorial, que é configurado como um modelo de efeitos fixos (Button, 1999), pois os níveis já estavam determinados e os resultados obtidos não podem ser estendidos a outros níveis aplicados. O tipo de planejamento fatorial utilizado foi o 3^k , sendo que o número 3 é o número de níveis utilizados e k os fatores. Primeiramente foram executados os ensaios utilizando-se corrente pulsada e, a seguir, corrente convencional.

Capítulo 5 - Resultados e Discussões dos Experimentos Definitivos

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados de maneira comparativa dos experimentos definitivos, em relação à morfologia do cordão (penetração, reforço e largura), diluição, microestrutura, microdureza e características econômicas (taxa de fusão, taxa de deposição e rendimento) entre soldas de revestimento, utilizando o processo MIG pulsado e convencional.

5.1 - Estudo da morfologia do cordão

Na soldagem de revestimento de metais dissimilares, é interessante obter-se uma penetração e uma diluição pequenas, porém o revestimento deve ter uma resistência mecânica ao arrancamento; já o reforço e a largura devem ser o maior possível, para se diminuir a quantidade de passes a serem executados.

Na realização dos experimentos definitivos, foram realizados 36 ensaios e as medições das variáveis de resposta foram descritas anteriormente no capítulo 3.10, sendo que os valores médios obtidos de cada resultado estão apresentados na Tabela 5.1. Nesta tabela, estão apresentados os valores quando da utilização da corrente convencional e pulsada. Na corrente convencional foi utilizada a frequência de pulso de 0Hz, enquanto que na corrente pulsada as frequências de pulso de 55, 70 e 85Hz é que foram usadas.

Quando se observa a Tabela 5.1, verifica-se que houve um crescimento da penetração, reforço e largura, com o aumento da corrente média. Ainda na Tabela 5.1, quando comparada a

corrente pulsada à convencional, verifica-se que a penetração ficou praticamente estável nas correntes médias de 180 e 230A, e que na corrente de 130A houve um crescimento quando da aplicação da corrente pulsada. Talvez isto se deva ao fato de que na utilização da corrente pulsada há um melhor controle da transferência, fazendo com que se melhore a morfologia do cordão.

Ainda na Tabela 5.1, o reforço, quando da mudança do modo de corrente convencional para o pulsado, nas correntes de 130 e 180A foi menor, e na corrente de 230A este ficou igual. Os resultados da largura na Tabela 5.1, com exceção da corrente de 230A e frequência de pulso de 85Hz, foram sempre maiores na corrente pulsada do que na corrente convencional. Esta tabela mostra ainda que a aplicação da corrente pulsada, na corrente de 230A com o aumento da frequência de pulso, a largura diminuiu. Nas correntes médias de 130 e 180A a largura praticamente ficou estável, com o aumento da frequência.

Conforme descrito no capítulo 3.6 de metodologia e tratamento de dados, para se obter uma melhor confiabilidade destes resultados, os mesmos foram submetidos a um tratamento estatístico de análise de variância (ANOVA), através de um software comercial. O nível de significância (α) foi igual a 5%; portanto a confiabilidade dos resultados foi de 95%. As Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam, respectivamente, os dados da análise de variância (ANOVA), para os três níveis de corrente média e para os quatro níveis de frequência de pulso utilizados. Quando o valor do nível de significância (α) está próximo de 0%, a influência desta variável é máxima; e quando este valor está próximo de 5%, a influência é mínima.

Na Tabela 5.2, quando o fator de influência é a frequência de pulso, observa-se que esta afetou a penetração para as correntes de 130 e 230A ($\alpha=0,18$ e $4,95$), respectivamente. O reforço foi afetado apenas na corrente de 130A ($\alpha=3,51$) e a largura nas correntes de 130 e 180A ($\alpha=0,26$ e $3,95$), respectivamente. Na Tabela 5.3, quando o fator analisado é a corrente, observa-se que a penetração foi afetada apenas na corrente convencional (frequência de pulso 0Hz) com $\alpha=0,04$. O reforço e a largura foram afetados em todas as frequências de pulso.

Será discutido a seguir, cada parâmetro da morfologia dos cordões de solda (penetração, largura e reforço) e apresentado graficamente, para que se consiga uma melhor compreensão das Tabelas 5.1 a 5.3.

Tabela 5.1 – Resultados da morfologia do cordão.

Im (A)	f (Hz)	Morfologia do cordão		
		Penetração (mm)	Reforço (mm)	Largura (mm)
130	0	1,1	3,0	24,6
	55	1,7	2,7	30,4
	70	2,0	2,8	29,5
	85	1,9	2,8	30,2
180	0	2,0	3,8	32,2
	55	2,1	3,5	35,0
	70	2,0	3,7	35,5
	85	2,1	3,5	35,3
230	0	2,0	4,5	36,8
	55	2,0	4,3	39,4
	70	2,0	4,5	38,8
	85	2,3	4,5	36,6

Tabela 5.2 – Resultado da ANOVA – Morfologia do cordão para três níveis de corrente média.

Im (A)	Fator	Morfologia do cordão		
		Penetração	Reforço	Largura
130	Frequência	0,18	3,51	0,26
180	Frequência	55,44	70,83	3,95
230	Frequência	4,95	74,60	35,33

Obs. : Nível de significância, α em %.

Tabela 5.3 – Resultado da ANOVA – Morfologia do cordão para quatro níveis de frequência de pulso.

Frequência (Hz)	Fator	Morfologia do cordão		
		Penetração	Reforço	Largura
0	Corrente Média	0,04	0,31	0,00
55	Corrente Média	21,99	0,94	4,27
70	Corrente Média	90,73	1,03	0,40
85	Corrente Média	8,15	1,51	0,57

Obs. : Nível de significância, α em %.

5.1.1 – Estudo da penetração do cordão de solda

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 5.1, a penetração dos cordões variou entre 1,1 e 2,0mm na corrente convencional (frequência de pulso de 0Hz), enquanto que na corrente pulsada (frequências de pulso de 55, 70 e 85Hz) a penetração variou entre 1,7 e 2,3mm. Para uma melhor interpretação dos resultados obtidos através da Tabela 5.1, e da análise de variância das Tabelas 5.2 e 5.3, estes são apresentados de maneira gráfica nas Figuras 5.1 a 5.3.

A Figura 5.1 mostra o efeito do tipo e intensidade de corrente sobre a penetração, e quando se ilustra a corrente pulsada, esta é uma média da frequências de pulso (55, 70 e 85Hz) para a variável de resposta (penetração). Verifica-se nesta figura que há um crescimento da penetração com a passagem da corrente do modo convencional para o pulsado, e que há um aumento da penetração com o aumento da corrente média. Esta constatação está de acordo com vários autores (Gosh et al, 1998; Gosh & Rai, 1996; Mota et al, 1996; Brantis & Trevisan, 1993; Kalligerakis & Mellor, 1992; entre outros). Para eles, com o aumento da corrente média, sendo esta pulsada ou não, tem-se um aumento da penetração. Isto se deve ao fato de que o aumento da corrente gera um maior insumo de calor na ponta do eletrodo, fazendo com que uma maior quantidade de material seja depositada.

Ainda na Figura 5.1, observa-se que a penetração na corrente pulsada teve um pequeno crescimento quando do aumento da corrente. Na corrente convencional a penetração com o aumento de 180 para 230A, teve o mesmo comportamento da corrente pulsada; e na corrente de 130A a penetração foi muito menor na corrente convencional do que na corrente pulsada. Possivelmente este comportamento seja decorrente do nível utilizado neste parâmetro, pois segundo Machado (1996), deve ser aplicada uma corrente mínima na soldagem de aços inoxidáveis de 150A. Já Dutra (1995) cita que a transferência globular ou curto-circuito ocorre em correntes baixas e é influenciada pela tensão superficial, além de uma pequena influência de arraste do plasma. Na transferência por repulsão, ocorre uma alta contração do arco, o que acontece com gases de alta condutividade térmica. O arco se estrangula no contato com o eletrodo, provocando uma intensa vaporização, com a formação de um núcleo brilhante claro de vapor metálico, cuja densidade é muito maior que o restante do plasma. Este núcleo exerce uma pressão concentrada sobre a poça de fusão e gota, que resulta num aumento da penetração. Na corrente de 130A para a corrente convencional, o tipo de transferência ocorrido possivelmente foi curto-circuito ou globular, fazendo com que a penetração obtida fosse pequena. Provavelmente para este parâmetro houve uma maior dificuldade de transferência metálica na corrente convencional de 130A, fato este que não ocorreu na corrente pulsada, devido ao controle imposto de transferência metálica, pela pulsação do arco, fazendo com que a penetração fosse maior em corrente pulsada que em convencional, concordando com os resultados obtidos por Dutra (1995). Os resultados obtidos pela análise de variância (ANOVA) na Tabela 5.3, quando o fator analisado é a corrente média, verifica-se que esta afetou a penetração apenas na frequência de pulso de 0Hz (corrente convencional) com $\alpha=0,04$, justificando a grande variação na corrente de 130A.

A Figura 5.2 mostra o efeito da corrente média e frequência de pulso sobre a penetração. Logo, com o aumento da frequência de pulso, houve um crescimento da penetração na passagem da corrente média de 130 para 180A, e que de 180 para 230A, praticamente a penetração ficou estável. Na frequência de pulso de 70Hz, a penetração permaneceu constante com o aumento da corrente. Os resultados obtidos para este parâmetro são contrários aos encontrados por Gosh et al (1998), que trabalhou com soldagem de revestimento, porém com tecimento do cordão. Este comportamento talvez se deva ao fato de que não foi estudado a estabilidade do arco elétrico.

A Figura 5.3 mostra o efeito da frequência de pulso e corrente média sobre a penetração. Assim, houve uma tendência de crescimento da penetração com o aumento da frequência de pulso na corrente média de 130A, e na corrente média de 230A este crescimento somente ocorreu quando da passagem da frequência de pulso de 70 para 85Hz. Para a corrente média de 180A, a penetração permaneceu estável com o aumento da frequência de pulso. Os resultados obtidos na Tabela 5.2 da análise de variância (ANOVA) justificam estes resultados, pois quando o fator de influência analisado foi a frequência de pulso, verifica-se que esta afetou significativamente a penetração na corrente de 130A ($\alpha=0,18$); que teve pouca influência na corrente de 230A ($\alpha=4,95$), e que não teve nenhum efeito na corrente de 180A ($\alpha=55,44$).

Para as condições utilizadas neste trabalho, na soldagem de revestimento, analisando somente a penetração dos cordões de solda, não é interessante aplicar a corrente pulsada. As menores penetrações obtidas foram conseguidas utilizando a corrente convencional.

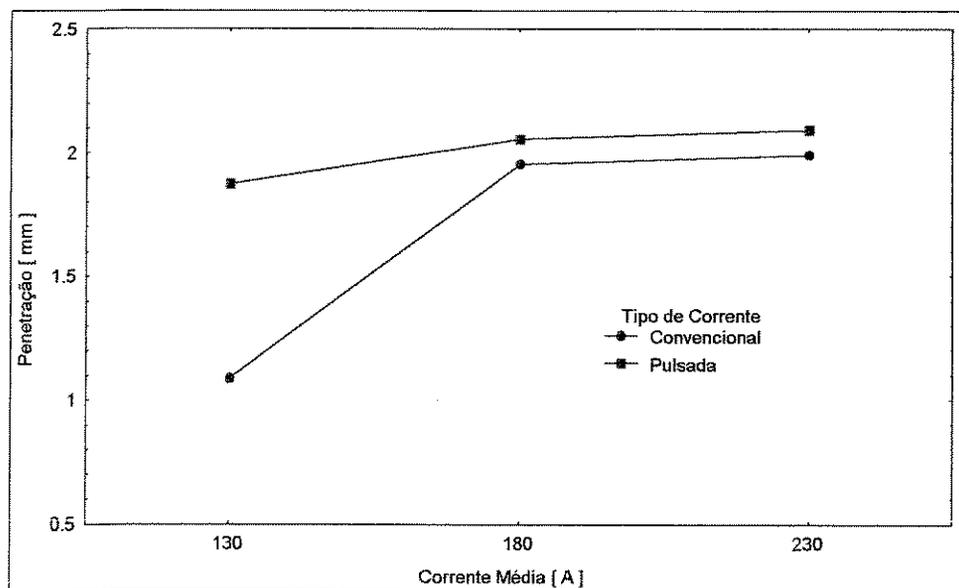


Figura 5.1 – Efeito do tipo e intensidade de corrente sobre a penetração.

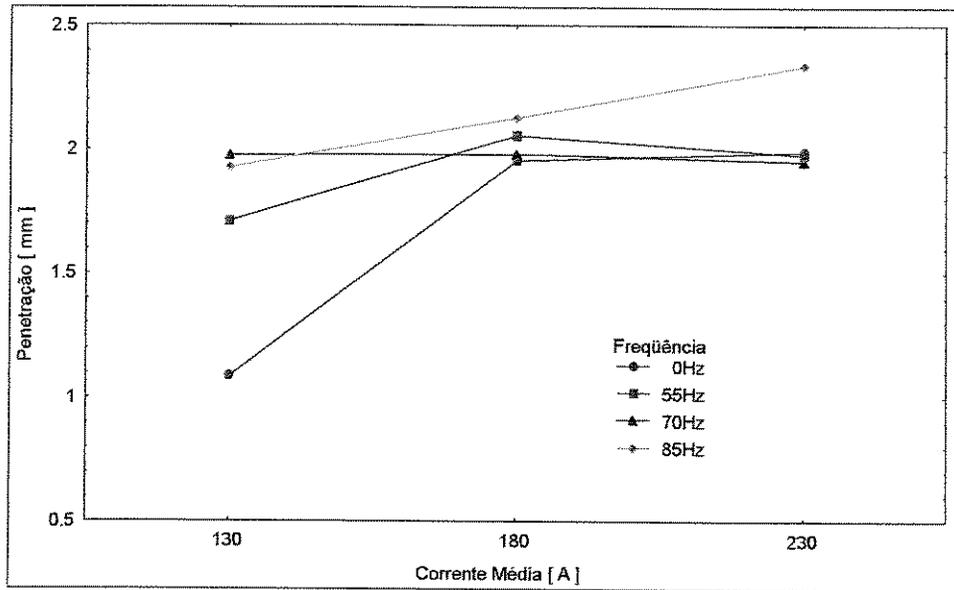


Figura 5.2 – Efeito da corrente média e frequência de pulso sobre a penetração.

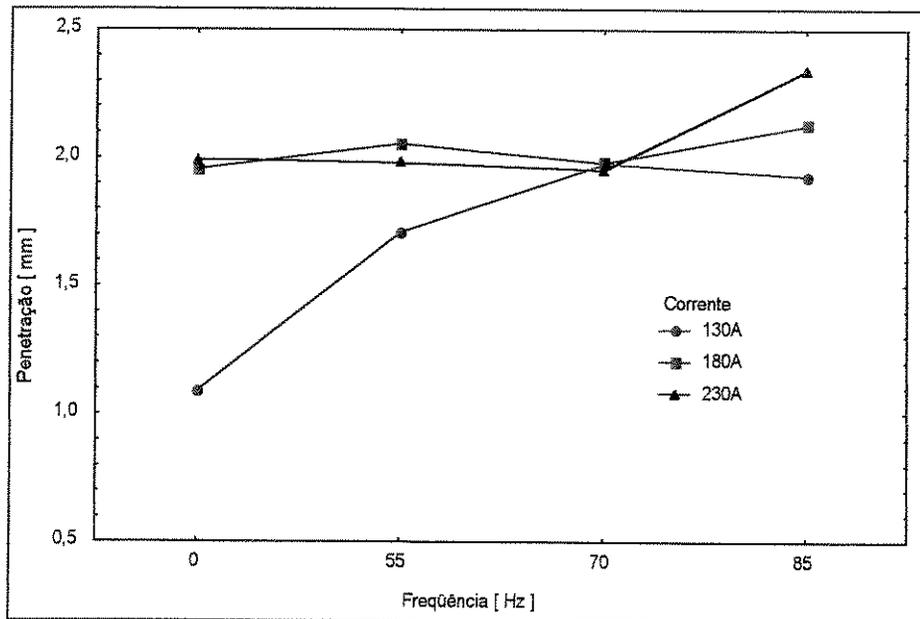


Figura 5.3 – Efeito da frequência de pulso e corrente média sobre a penetração.

5.1.2 – Estudo do reforço do cordão de solda

Analisando-se os resultados obtidos do reforço apresentados na Tabela 5.1, verifica-se que este variou na corrente convencional entre 3,0 e 4,5mm, enquanto que na corrente pulsada este variou entre 2,7 e 4,5mm. Embora o reforço tenha sido menor com a aplicação da corrente pulsada, verificamos que a soma do reforço e penetração é praticamente igual, indiferente do tipo de corrente utilizada; e que houve um crescimento desta soma (reforço mais penetração) com o aumento da corrente média, confirmando que houve um crescimento da quantidade de material depositado com o aumento da corrente. Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos do reforço, os mesmos estão apresentados de maneira gráfica nas Figuras de 5.4 a 5.6.

A Figura 5.4 mostra o efeito do tipo e intensidade de corrente sobre o reforço, e quando se ilustra a corrente pulsada, esta é uma média da freqüências de pulso (55, 70 e 85Hz) para a variável de resposta (reforço). Verifica-se na Figura 5.4 que o reforço foi maior em corrente convencional do que em pulsada, e houve um crescimento do reforço com o aumento da corrente, independente do tipo de corrente utilizado. Também nas correntes médias de 130 e 180A há uma pequena variação do reforço; já na corrente de 230A, o reforço é igual, indiferente do tipo de corrente utilizado. Conforme citado anteriormente, com o aumento da corrente há um crescimento do insumo de calor e o depósito maior de material.

A Figura 5.5 mostra o efeito da corrente média e freqüência de pulso sobre o reforço. Verifica-se nesta figura que o comportamento do reforço é igual independente da freqüência de pulso utilizada. Quando se observa a análise de variância (ANOVA) da Tabela 5.3, onde o fator analisado é a corrente média, verifica-se que o reforço foi afetado pela corrente em todas as freqüências de pulso.

A Figura 5.6 mostra o efeito da freqüência de pulso e corrente média sobre o reforço. Verifica-se nesta figura que há um crescimento do reforço com o aumento da corrente média, e que a freqüência de pulso praticamente não afetou o reforço. Porém quando se observa a análise de variância (ANOVA) da Tabela 5.2, onde o fator analisado é a freqüência de pulso, verificamos que somente na corrente de 130A o reforço foi afetado, com um nível de significância α de 3,51.

Na soldagem de revestimento, é interessante obter-se o maior valor para o reforço, para a minimização do número de camadas a serem aplicadas. Para as condições utilizadas neste trabalho, somente o aumento da corrente propiciou o crescimento do reforço, e a mudança da corrente, do modo convencional para o pulsado, não afetou o reforço.

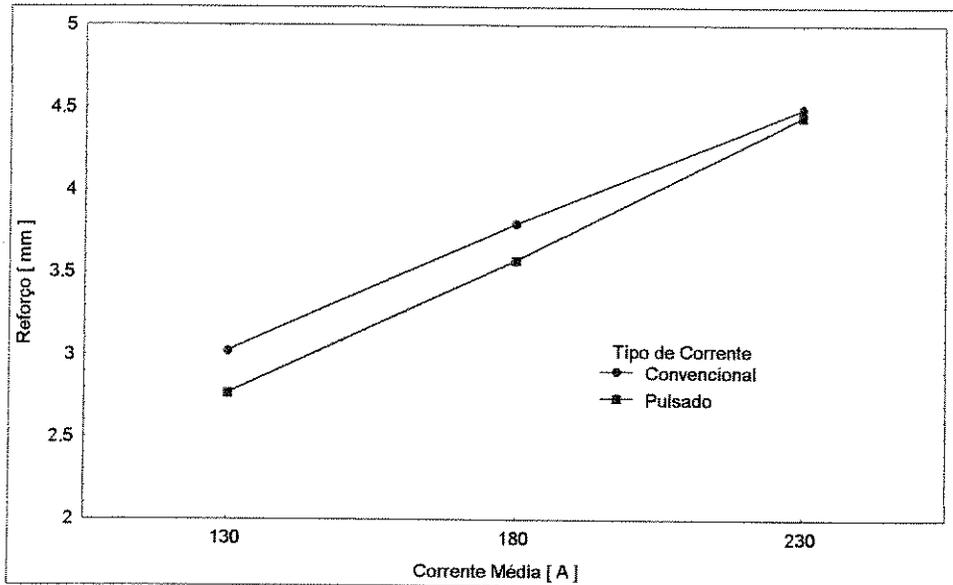


Figura 5.4 – Efeito do tipo e intensidade de corrente sobre o reforço.

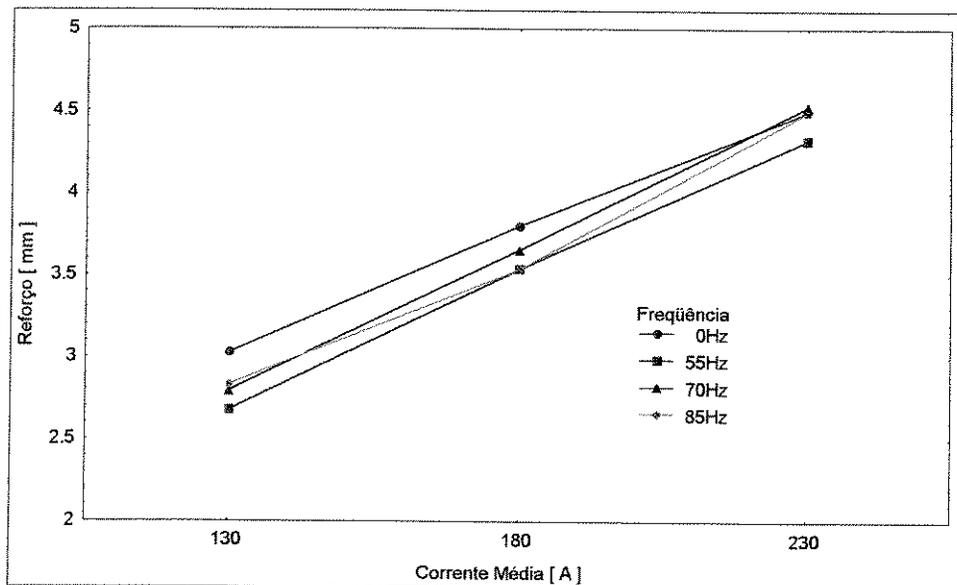


Figura 5.5 – Efeito da corrente média e frequência de pulso sobre o reforço.

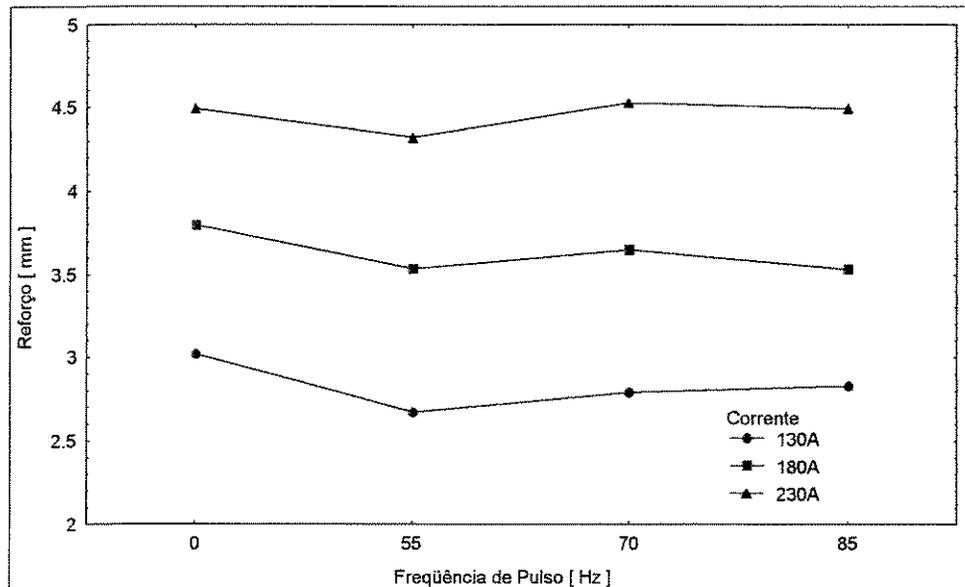


Figura 5.6 – Efeito da frequência de pulso e corrente média sobre o reforço.

5.1.3 – Estudo da largura do cordão de solda

Os resultados obtidos da largura do cordão estão apresentados na Tabela 5.1. Verifica-se nesta tabela que a largura variou entre 24,6 e 36,8mm, para a corrente convencional e na corrente pulsada a largura esteve entre 29,5 e 39,4mm. Para uma melhor compreensão destes resultados, os mesmos estão apresentados de maneira gráfica nas Figuras 5.7 a 5.9.

A Figura 5.7 mostra o efeito do tipo e intensidade de corrente sobre a largura, e quando se ilustra a corrente pulsada, esta é uma média da frequências de pulso (55, 70 e 85Hz) para a variável de resposta (largura). Verifica-se nesta figura que há um crescimento da largura com o aumento da corrente, independente do tipo de corrente utilizado. Também nesta figura, verifica-se que a largura foi maior em corrente pulsada que em convencional. Este comportamento, possivelmente está relacionado com o impacto da gota com a poça de fusão. Segundo Kalligeralis & Mellor(1995), Jilong & Apps (1983), a velocidade de impacto da gota com a poça de fusão é maior quanto menor for seu volume. Como em corrente pulsada o volume da gota é menor do que em corrente convencional, a velocidade de transferência é maior, fazendo com que a largura aumente com a aplicação da corrente pulsada.

Na Figura 5.8, mostra-se o efeito da corrente média e frequência de pulso sobre a largura. Verifica-se que a largura teve um menor crescimento na corrente pulsada, com a utilização da frequência de pulso de 85Hz, quando a corrente foi aumentada de 180 para 230A. O crescimento da largura, com aumento da corrente, já foi explicado pelo aumento do insumo de calor na ponta do eletrodo. A Tabela 5.3 da análise de variância (ANOVA) quando o fator analisado foi a corrente, mostra que esta influenciou a largura em todos os níveis de frequência de pulso, justificando os resultados obtidos. Na frequência de pulso de 55Hz, a corrente influenciou com menor intensidade a largura, com um nível de significância α de 4,27.

A Figura 5.9 mostra o efeito da frequência de pulso e corrente média sobre a largura. Verifica-se que com o aumento da corrente há um crescimento da largura. O crescimento da frequência de pulsação praticamente não afetou a largura. Na corrente de 130A a maior variação da largura ocorreu quando do aumento da frequência de pulso de 0 para 55Hz. Porém na Tabela 5.2 da análise de variância(ANOVA), quando o fator analisado é a frequência de pulso, percebe-se a influencia da largura nas correntes de 130 e 180A, com maior intensidade na corrente de 130A($\alpha=0,26$).

Na soldagem de revestimento, é interessante se obter o maior valor para a largura, para a minimização da quantidade de cordões a serem aplicados. Para as condições utilizadas neste trabalho, o aumento da corrente propiciou o crescimento da largura. A mudança da corrente, do modo convencional é interessante, pois aumentou a largura.

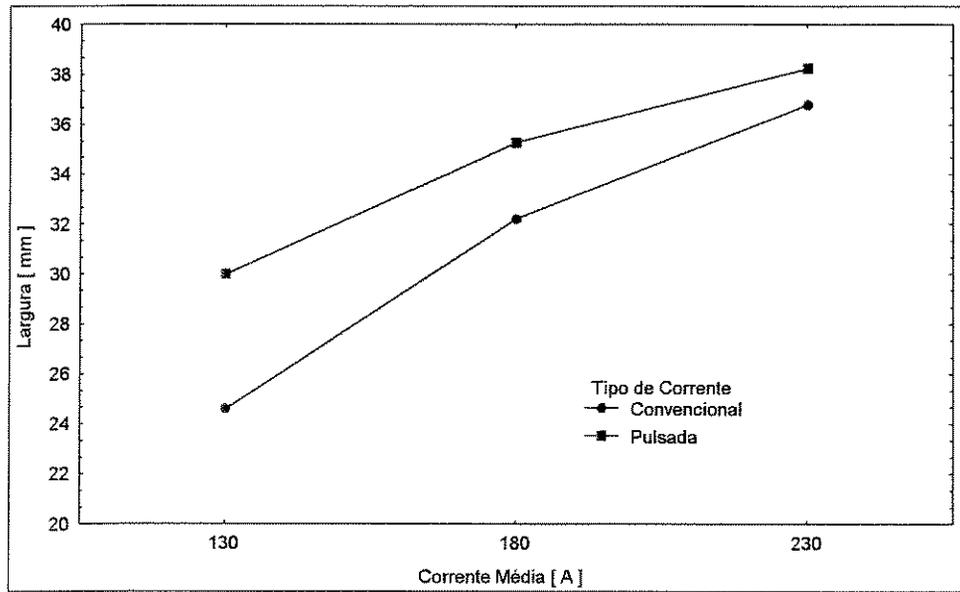


Figura 5.7 – Efeito do tipo e intensidade de corrente sobre a largura.

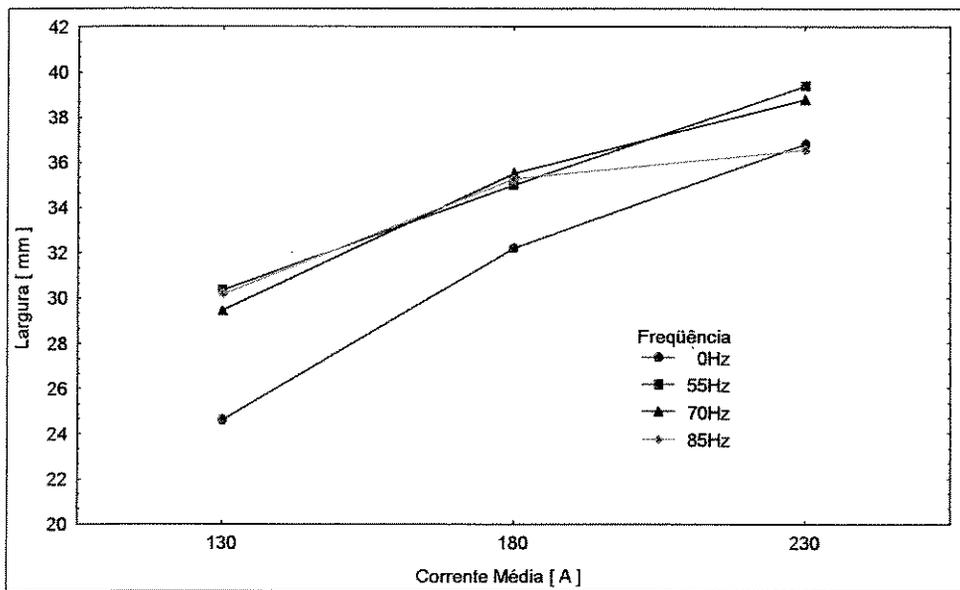


Figura 5.8 – Efeito da corrente média e frequência de pulso sobre a largura.

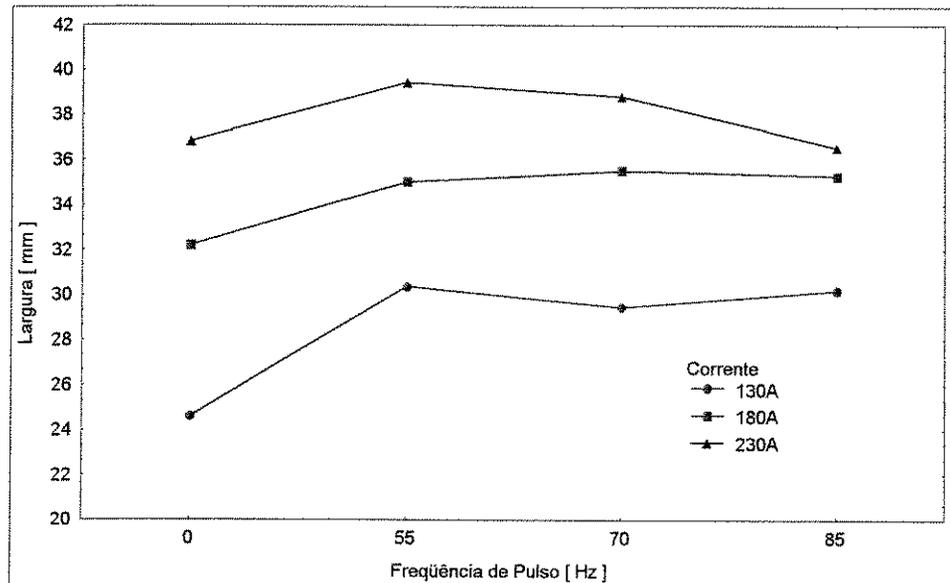


Figura 5.9 – Efeito da frequência de pulso e corrente média sobre a largura.

5.2 - Estudo da diluição

Na soldagem de revestimento com metais dissimilares, a diluição é um fator extremamente importante. No caso específico deste trabalho, uma diluição excessiva poderia causar mudanças nas propriedades do aço martensítico, através da influência do metal de base (menos nobre) no metal de solda, prejudicando desta maneira o desempenho do revestimento.

Para a obtenção dos resultados da diluição, foi necessário medir a área da penetração e a área do reforço, descritas anteriormente no capítulo 3.11. Após a medição destes valores, foram calculados os resultados da diluição, sendo utilizada a equação 2.2, do capítulo 2.10. Foi calculada a média destes valores de diluição, além da área da penetração e área do reforço, sendo os mesmos apresentados na Tabela 5.4. De acordo com esta tabela, na corrente convencional (frequência de pulso de 0Hz) a variação da diluição ficou entre 19,0 e 21,6%; enquanto que na corrente pulsada (frequências de pulso de 55, 70 e 85Hz) a diluição ficou entre 20,4 e 28%.

Os resultados da diluição, área da penetração e área do reforço, também foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA), para verificar quanto as variáveis de influência afetaram as variáveis de resposta. As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam, respectivamente, os dados da análise de

variância (ANOVA) para os três níveis de corrente média e quatro níveis de frequência de pulso, respectivamente. Na Tabela 5.5 observa-se que a corrente média afetou a diluição nas frequências de pulso de 55Hz ($\alpha=2,91$) e 70Hz ($\alpha=1,29$). A área da penetração e do reforço foi afetada pela corrente média em todos os níveis de frequência de pulso. Pela análise de variância da Tabela 5.5 verifica-se que a corrente média afetou principalmente a área do reforço, com um nível de significância $\alpha = 0,00$.

A Tabela 5.6 mostra que a diluição foi afetada pela frequência de pulso nas correntes médias de 130A($\alpha=0,40$) e 230A($\alpha=1,96$). A área da penetração foi afetada pela frequência de pulso em todas as correntes médias. Já a área do reforço foi afetada pela frequência de pulso somente na corrente média de 130A($\alpha=1,11$).

Tabela 5.4 – Resultados da diluição, área da penetração e área do reforço.

Im (A)	F (Hz)	Diluição (%)	Área penetração (mm²)	Área reforço (mm²)
130	0	19,0	15,3	65,5
	55	24,8	23,8	72,0
	70	28,0	28,4	73,2
	85	27,9	28,6	74,1
180	0	21,6	29,9	108,8
	55	27,8	40,5	105,4
	70	26,4	38,6	107,5
	85	27,4	41,5	110,1
230	0	20,0	37,2	148,7
	55	21,9	42,6	151,6
	70	20,4	39,3	153,3
	85	24,2	46,9	146,7

Tabela 5.5 – Resultado da ANOVA – diluição, área da penetração e área do reforço para quatro níveis de frequência de pulso.

Frequência (Hz)	fator	Diluição	Área penetração	Área reforço
0	Corrente Média	33,71	0,00	0,00
55	Corrente Média	2,91	0,06	0,00
70	Corrente Média	1,29	0,40	0,00
85	Corrente Média	29,91	0,14	0,00

Obs. : Nível de significância, α em %.

Tabela 5.6 – Resultado da ANOVA – diluição, área da penetração e área do reforço para três níveis de corrente média.

Im (A)	fator	Diluição	Área penetração	Área reforço
130	Frequência	0,40	0,01	1,11
180	Frequência	5,83	1,94	86,40
230	Frequência	1,96	2,59	5,04

Obs. : Nível de significância, α em %.

Para uma melhor interpretação dos resultados obtidos das Tabela 5.4 a 5.6, estes são apresentados de maneira gráfica nas Figuras 5.10 a 5.13.

A Figura 5.10 mostra o efeito dos três níveis da corrente média e os quatro níveis da frequência de pulso sobre a diluição, sendo que nesta figura estão representadas apenas as médias de cada condição. Verifica-se que a diluição foi sempre maior em corrente pulsada do que em corrente convencional. Nota-se, ainda, que a diluição teve uma tendência de crescimento na corrente convencional, com o aumento da corrente média e na pulsada houve uma tendência de diminuição, independente da frequência de pulso utilizada. Verifica-se ainda na Figura 5.10 que a maior variação da diluição ocorreu na corrente de 130A e a menor variação na corrente de 230A. Na Tabela 5.5, da análise de variância, onde o fator analisado é a corrente média, vê-se que este fator afetou a diluição nas frequências de pulso de 55 e 70Hz, com o nível de significância α igual a 2,91 e 1,29, respectivamente. Na Tabela 5.6, da análise de variância, onde o fator

analisado foi a frequência de pulso, este fator afetou a diluição nas correntes de 130 e 230A, com α igual a 0,40 e 1,96, respectivamente.

As Figuras 5.11 e 5.12 mostram o efeito do tipo e intensidade de corrente sobre a área da penetração e área do reforço, respectivamente. A área da penetração (Figura 5.11) e a área do reforço (Figura 5.12) tiveram um crescimento linear quando do aumento da corrente, independente do tipo de corrente utilizado (pulsado ou convencional). Observa-se na Figura 5.11 que, quando da passagem do modo convencional para o modo pulsado, a área da penetração cresce. Já na Figura 5.12, a mudança do modo convencional para o pulsado não afetou a área do reforço, e praticamente não existe variação da área do reforço com o nível de frequência utilizado. Na Tabela 5.5, da análise de variância, onde o fator analisado é a corrente média, este fator afetou a área da penetração e de reforço em todas as frequências de pulso, com uma maior intensidade na área do reforço.

A Figura 5.13 mostra o efeito da frequência de pulso e corrente média sobre a área do reforço. Nesta figura verifica-se que com o aumento da corrente há um crescimento da área do reforço, e que não há praticamente nenhum efeito da frequência de pulso sobre a área do reforço. Na Tabela 5.6, da análise de variância, quando o fator analisado é a frequência de pulso, verifica-se que apenas na corrente média de 130A este fator afetou a área do reforço, com um nível de significância α igual a 1,11.

Os resultados obtidos da diluição neste trabalho, para a corrente convencional (frequência de pulso de 0Hz), estão de acordo com vários autores (Gosh et al, 1998; Machado, 1996, Kalligerakis & Mellor, 1994; Brantis e Trevisan, 1993; Marques, 1991, entre outros), os quais citam que, com o aumento da corrente, se tem um crescimento da diluição, independente desta ser pulsada ou não, devido ao aumento do insumo de calor. Também na corrente convencional houve um crescimento tanto da área da penetração como na área do reforço, fazendo com que a diluição crescesse. Este fato é observado através das Figuras 5.10 a 5.12, verificado na Tabela 5.4 e ainda confirmado pela análise de variância(ANOVA) da Tabela 5.5, onde o fator de influência é a corrente média, sendo que esta afetou a área da penetração e a área do reforço, além de afetar a diluição nas frequências de pulso de 55 e 70Hz.

A diminuição da diluição da corrente pulsada neste trabalho, também está de acordo com Gosh et al (1998), que trabalharam com revestimento, utilizando o processo MIG, porém este trabalho foi feito com tecimento. Estes autores citam que a diminuição da diluição, com a utilização da corrente pulsada, se deve ao fato do aumento do reforço. Nesta pesquisa, este comportamento também foi observado. Como foram medidas as áreas de penetração e de reforço, tanto na corrente pulsada como na convencional estas aumentaram devido ao aumento do insumo de calor, fazendo com que uma maior quantidade de material fosse depositada. Na corrente pulsada, a área da penetração e a área do reforço cresceram, porém com a pulsação do arco, a área do reforço cresceu mais do que a área da penetração, fazendo com que a diluição diminuísse.

Para as condições utilizadas neste trabalho, quando comparadas em relação ao tipo de corrente aplicada (corrente pulsada e convencional), os resultados mostram que, para correntes menores ou intermediárias, é interessante utilizar corrente convencional, e em correntes maiores, não há variação da diluição com a aplicação da corrente pulsada. A aplicação da corrente pulsada mostra-se interessante na soldagem de revestimento de metais dissimilares, pois há um aumento da área do reforço, fato este desejado neste tipo de aplicação.

Quando se trabalha com solda de revestimento de metais dissimilares é importante conseguir um revestimento com microestruturas igual ao metal escolhido para o revestimento, para que as propriedades físicas tenham poucas alterações. Para conclusão dos níveis de diluição aceitáveis nesta aplicação, torna-se necessário complementar com a análise da microestrutura resultante dos cordões e o perfil de distribuição de microdureza, conforme descrito no capítulo 3, item 3.10.2.

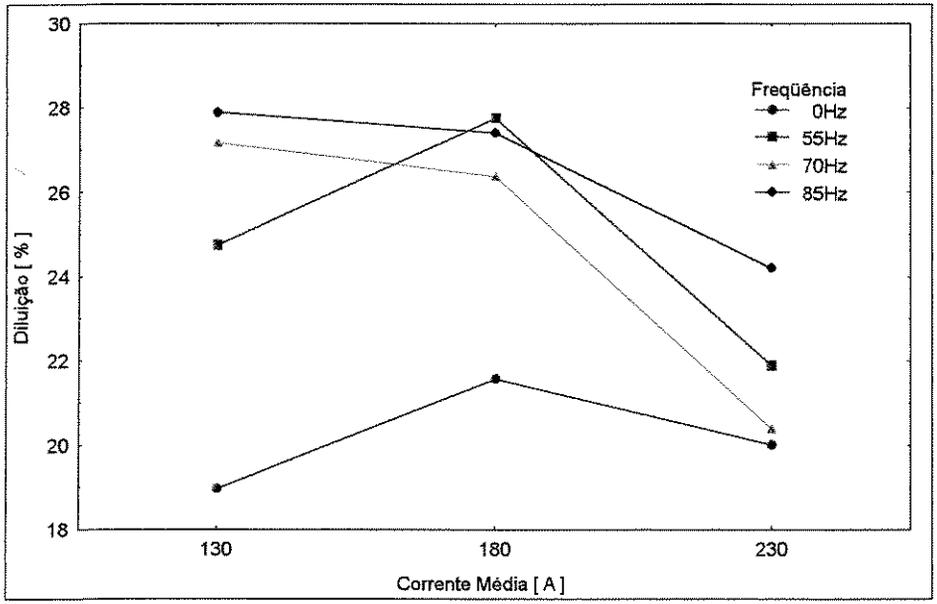


Figura 5.10 – Efeito da corrente média e frequência de pulso sobre a diluição.

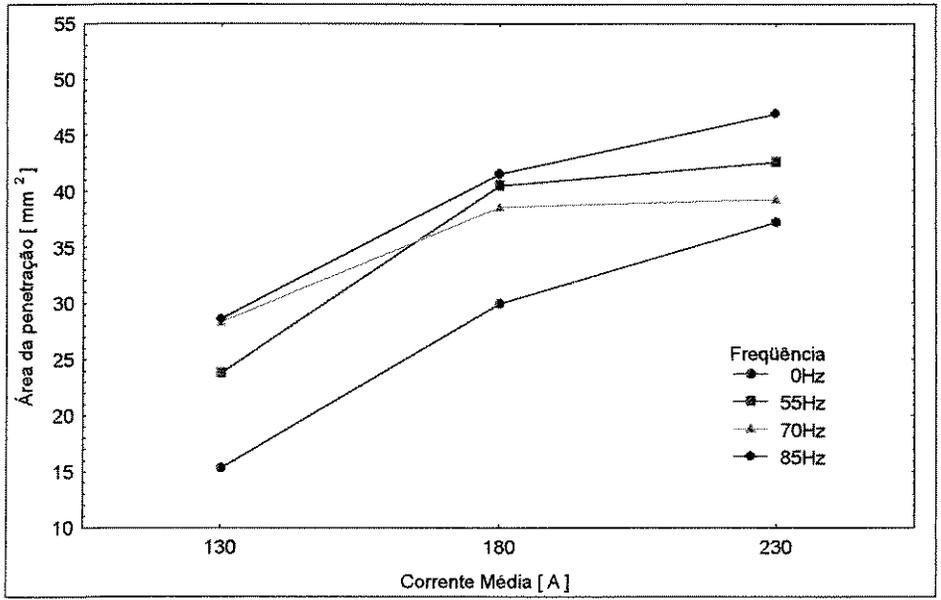


Figura 5.11 – Efeito da corrente média e frequência de pulso sobre a área da penetração.

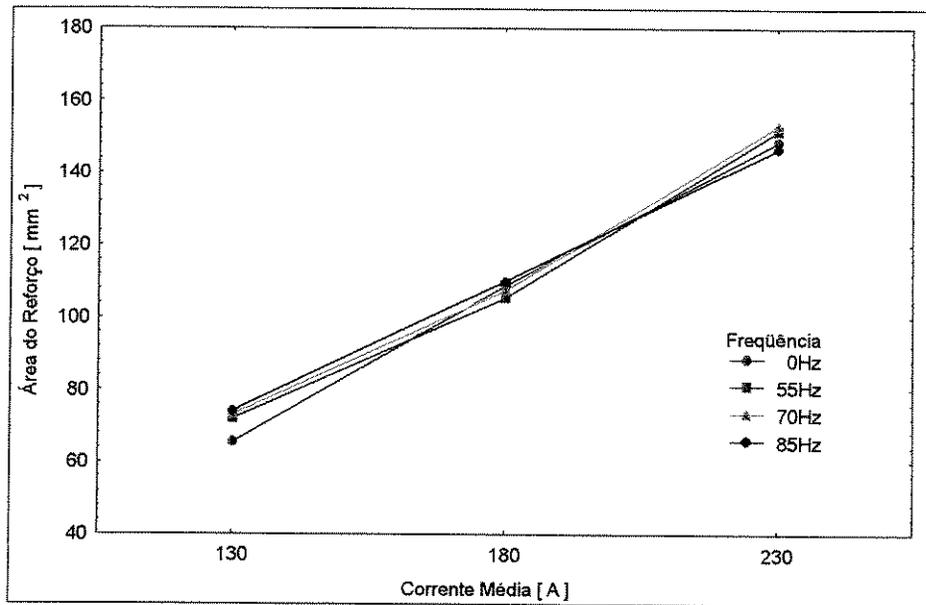


Figura 5.12 – Efeito da corrente média e frequência de pulso sobre a área do reforço.

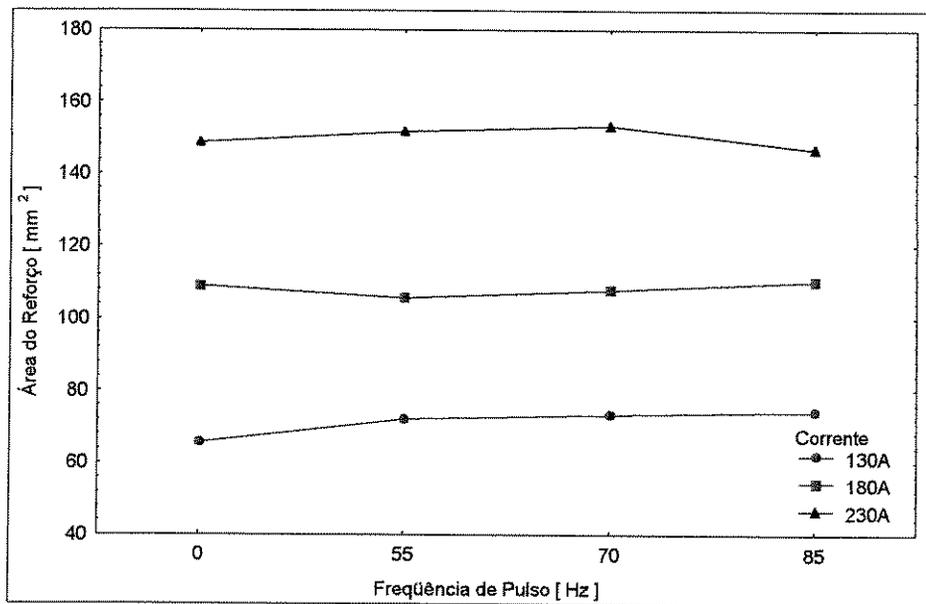


Figura 5.13 – Efeito da frequência de pulso e corrente média sobre a área do reforço.

5.3 – Microestrutura e microdureza

Os resultados obtidos com a micrografia mostraram que, independentemente das condições de soldagem utilizadas, se obteve somente microestrutura martensítica em todos os revestimentos. Uma microestrutura martensítica, representativa de todos os revestimentos é apresentada na Figura 5.14.

Neste trabalho, durante a análise das microestruturas, não se observou a ocorrência de trincas, em nenhuma condição de soldagem. Este fato possivelmente é explicado pelo pré-aquecimento dos corpos de prova antes da soldagem.

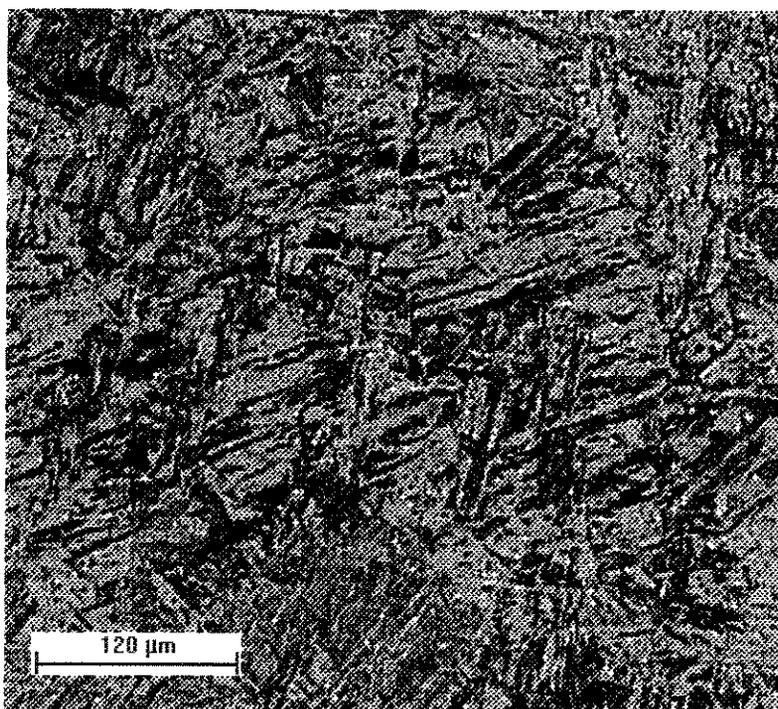


Figura 5.14 – Microestrutura do cordão de solda na corrente média de 180A e frequência de pulso de 55Hz. Ampliação de 100X.

Ainda visando a uma melhor caracterização da estrutura dos revestimentos e a complementar os estudos de diluição, foram feitos também, ensaios de microdureza, descritos anteriormente no capítulo 3.12. Por se tratar de microestruturas polifásicas, o ideal seria trabalhar-se com ensaios de macrodureza, porém tratando-se de soldagem, o tamanho das regiões a serem ensaiadas é bastante limitado para a utilização deste método. Portanto, para complementação dos resultados da microestrutura, foram construídos perfis de dureza utilizando-se o ensaio de microdureza.

Os resultados obtidos da microdureza revelaram que, embora tenham ocorrido variações nos valores de microdureza, estes estão dentro da faixa da martensita. Na realização dos ensaios da microdureza, embora a diluição tenha variado entre 19 e 28%, verificou-se que não houve variação significativa da microdureza nas condições utilizadas. Foi constatada, através da distribuição das microdurezas e análise visual com microscópio, a ocorrência de regiões bem definidas durante as medições (cordões de solda, zona afetada pelo calor e metal de base). Os valores encontrados de microdureza na região do metal de base e zona afetada pelo calor são próximos, independente das condições de soldagem utilizadas. Os resultados obtidos da microdureza nos cordões de solda, praticamente não tiveram variação significativa para os níveis das variáveis de influência (corrente média e frequência de pulso) utilizados neste trabalho. A Figura 5.15 mostra um gráfico representativo dos valores da microdureza, para cada região do corpo de prova.

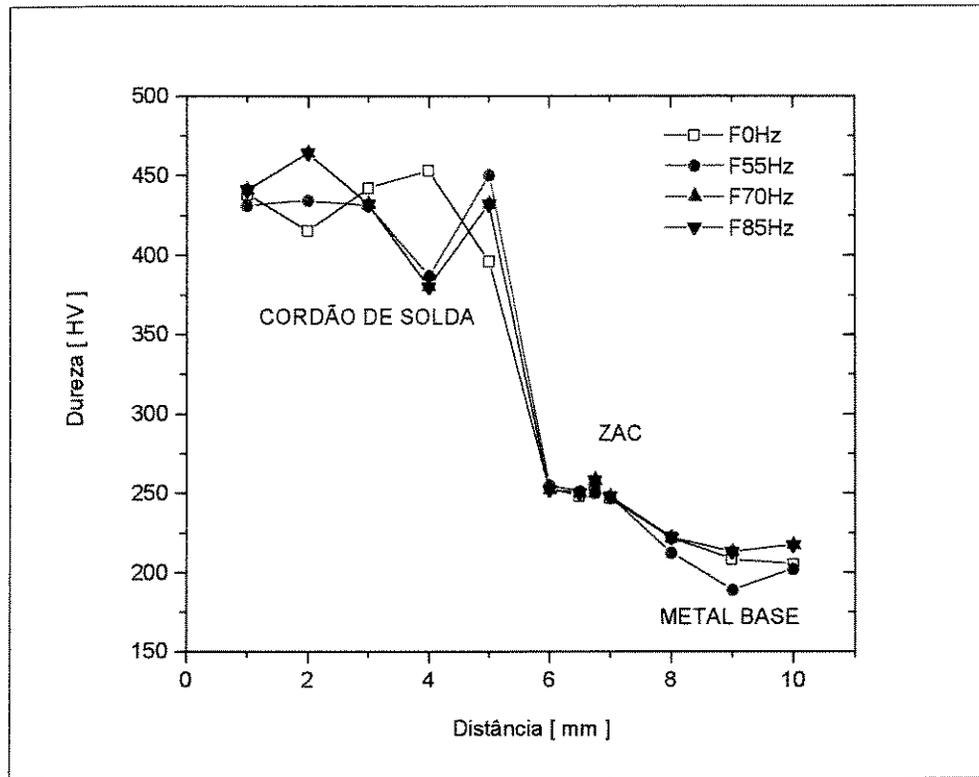


Figura 5.15– Microdureza para corrente média de 130A e quatro frequências de pulso.

5.4 – Estudo das características econômicas

O desempenho das características econômicas do consumível foram calculados utilizando-se as equações 2.3, 2.4 e 2.5 do capítulo 2.13. Os valores médios obtidos estão apresentados na Tabela 5.7. Nesta tabela são apresentados os valores da taxa de fusão (TF), que variou de 1,65 a 3,77kg/h; a taxa de deposição (TD) que ficou entre 1,62 e 3,73kg/h e o rendimento (Rend) entre 96 e 99%.

Observou-se que, durante a soldagem, os respingos do primeiro passe foram incorporados ao metal de solda do segundo, e assim sucessivamente durante os ensaios. Deste modo, podemos justificar os altos valores obtidos para o rendimento, independente das variáveis utilizadas.

Conforme descrito no item 3.6, para se obter uma melhor confiabilidade destes resultados, os mesmos foram submetidos a um tratamento estatístico de análise de variância (ANOVA), através de um software comercial. O nível de significância (α) foi igual a 5%; portanto, a confiabilidade dos resultados foi de 95%. Quando o valor do nível de significância (α) está próximo de 0%, a influência desta variável é máxima; e quando este valor está próximo de 5%, a influência é mínima.

As Tabelas 5.8 e 5.9 apresentam, respectivamente, os dados da ANOVA, para três níveis de corrente média e quatro níveis de frequência de pulso utilizados. Verifica-se na Tabela 5.8 que a frequência de pulso afetou o rendimento, para as correntes médias de 130 e 180A ($\alpha=1,87$ e $3,15$), enquanto que para as demais condições estabelecidas, não se percebe nenhum efeito da frequência de pulso sobre o desempenho econômico. Já pelos dados da Tabela 5.9, a corrente média afetou a taxa de fusão (TF) e a taxa de deposição (TD) para todos os níveis de frequência utilizados, assim como o rendimento na frequência de pulso de 70Hz ($\alpha=0,85$).

Tabela 5.7 – Resultados das características econômicas.

Im (A)	f (Hz)	Características econômicas		
		TF (kg/h)	TD (kg/h)	Rendimento (%)
130	0	1,65	1,62	98
	55	1,75	1,70	97
	70	1,83	1,76	96
	85	1,80	1,75	97
180	0	2,72	2,67	98
	55	2,75	2,65	96
	70	2,70	2,65	98
	85	2,72	2,64	97
230	0	3,65	3,58	98
	55	3,72	3,69	99
	70	3,77	3,73	99
	85	3,73	3,70	99

Tabela 5.8 – Resultado da ANOVA – características econômicas para três níveis de corrente média.

Im (A)	fator	Características econômicas		
		TF (kg/h)	TD (kg/h)	Rendimento (%)
130	Frequência	7,60	15,12	1,87
180	Frequência	97,82	94,13	3,15
230	Frequência	43,59	66,42	57,29

Obs.: Nível de significância, α em %.

Tabela 5.9 – Resultado da ANOVA – características econômicas para quatro níveis de frequência de pulso.

F (Hz)	fator	Características econômicas		
		TF (kg/h)	TD (kg/h)	Rendimento (%)
0	Corrente média	0,00	0,00	6,29
55	Corrente média	0,05	0,07	10,60
70	Corrente média	0,09	0,06	0,85
85	Corrente média	0,18	0,09	8,02

Obs.: Nível de significância, α em %.

Para uma melhor visualização, os resultados da Tabela 5.7 são apresentados de maneira gráfica nas Figuras 5.16 a 5.21. As Figuras 5.16 e 5.17 mostram a influência do tipo e da intensidade de corrente média sobre a taxa de fusão e a taxa de deposição, respectivamente; e quando se ilustra a corrente pulsada, esta é uma média da frequências de pulso (55, 70 e 85Hz) para a variável de resposta (taxa de fusão e taxa de deposição). Observa-se que, com o aumento da intensidade da corrente, houve um aumento significativo, tanto da taxa de fusão como da taxa de deposição do consumível.

Conforme amplamente divulgado por várias literaturas (Surian et al, 1997; Chandel, 1997; Machado, 1996; Mota et al, 1996; Silva et al, 1996; Norrish, 1992; entre outros), a taxa de fusão (TF) e a taxa de deposição (TD) aumentam com o aumento da corrente, tanto para a corrente pulsada como corrente convencional, sendo explicado pelo crescimento do calor gerado no arco, devido ao aumento da corrente na conexão da ponta do eletrodo com o arco voltaico e do calor gerado por efeito “*joule*”, ou seja, um aumento do insumo de calor.

Pode ser observado ainda nas Figuras 5.16 e 5.17, que não houve efeito significativo na passagem do modo convencional para o pulsado, o que nos mostra que se pode soldar tanto em corrente convencional quanto em pulsada e que o comportamento destes fatores não se alterara. Este fato fica ainda confirmado pelo análise de variância da Tabela 5.9, onde se verifica que a corrente média afetou a taxa de fusão e taxa de deposição em todos os níveis de frequência de pulso.

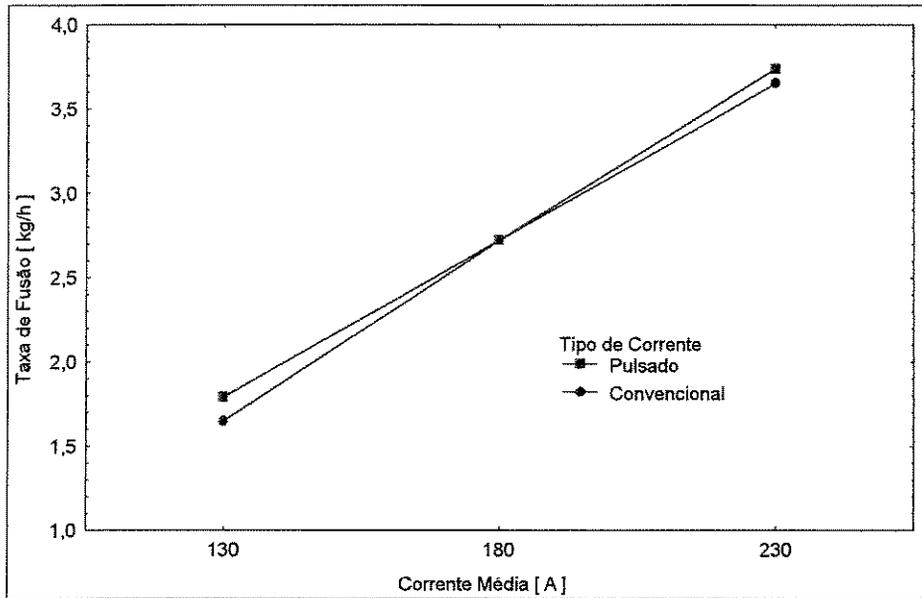


Figura 5.16 – Efeito do tipo e intensidade da corrente média sobre a taxa de fusão.

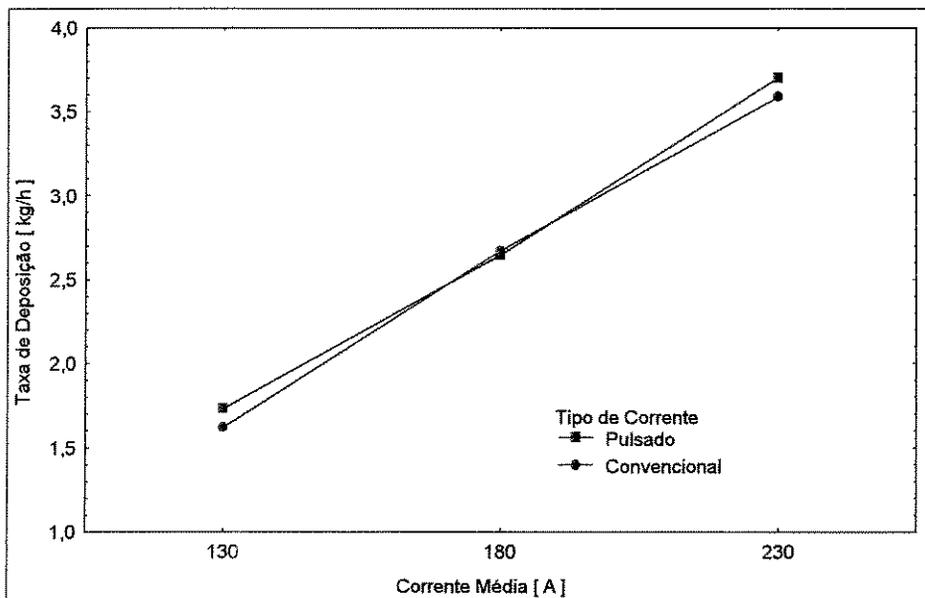


Figura 5.17 – Efeito do tipo e intensidade da corrente média sobre a taxa de deposição.

As Figuras 5.18 e 5.19 mostram a influência da frequência de pulso e corrente média sobre a taxa de fusão e a taxa de deposição, respectivamente. Verifica-se que, com o aumento da frequência de pulso, não houve qualquer alteração tanto na taxa de fusão como na taxa de deposição. Possivelmente a frequência de pulso, para as condições deste trabalho, não tem nenhuma influência na taxa de fusão ou taxa de deposição. Este fato pode ser confirmando pela análise de variância da Tabela 5.8, que a frequência de pulso não afetou a taxa de fusão ou a taxa de deposição.

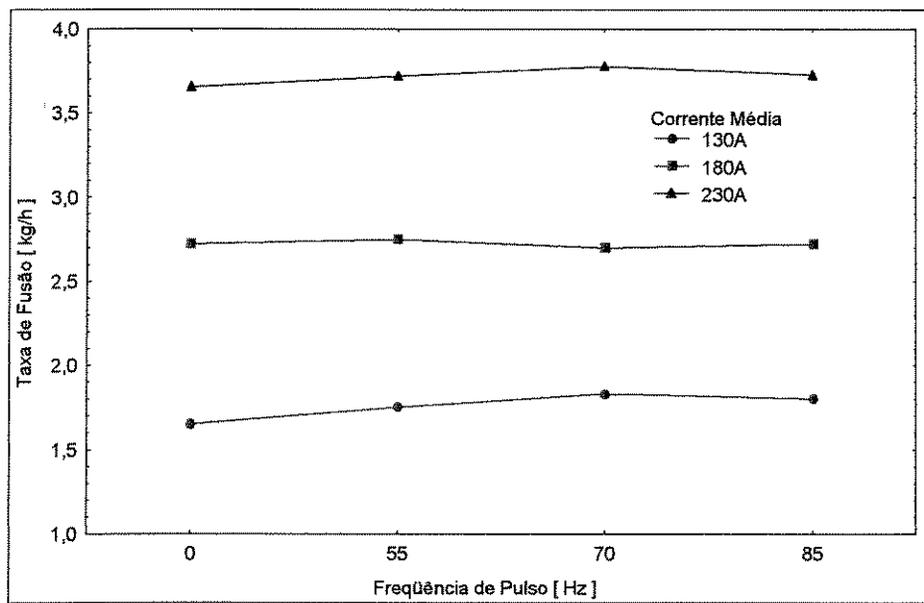


Figura 5.18 – Efeito da frequência de pulso e corrente média sobre a taxa de fusão.

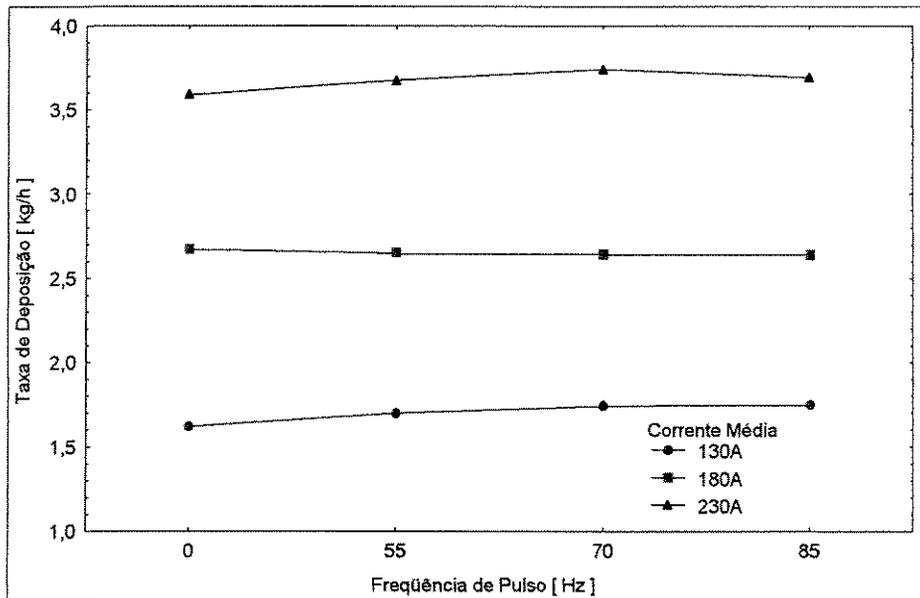


Figura 5.19– Efeito da frequência de pulso e corrente média sobre a taxa de deposição.

A Figura 5.20 mostra o efeito do tipo e intensidade da corrente média sobre o rendimento; e quando se ilustra a corrente pulsada, esta é uma média da frequências de pulso (55, 70 e 85Hz) para a variável de resposta (rendimento). A Figura 5.21 mostra o efeito da corrente média e frequência de pulso sobre o rendimento.

Na Figura 5.20 verifica-se que na corrente convencional não houve efeito da corrente média sobre o rendimento, mantendo-se constante para os níveis de corrente utilizadas. Observa-se, ainda, que quando da soldagem em corrente pulsada, o crescimento da corrente média proporcionou um aumento do rendimento. Este fato é confirmado pela análise de variância da Tabela 5.9, que fornece um valor de $\alpha=0,85$ para o nível de significância na frequência de pulso de 70Hz, ou seja, a corrente afetou o rendimento quando do uso da corrente pulsada.

A Figura 5.21 mostra o efeito da corrente média e frequência de pulso sobre o rendimento. Observa-se que houve, em todos os níveis de frequência de pulso utilizados, um crescimento do rendimento. Entretanto, ao compararmos os tipos de corrente utilizadas, pulsada e convencional, observa-se que nas correntes de 130 e 180A, os valores para o rendimento foram superiores quando do uso do modo convencional. Já na corrente de 230A, o rendimento para o modo pulsado

foi maior. Este fato é confirmado pela análise de variância da Tabela 5.8, que a frequência de pulso afetou o rendimento nas correntes médias de 130 e 180A($\alpha=1,87$ e $3,15$), respectivamente.

Embora se tenha variações significativas do rendimento durante este trabalho, pode-se dizer que os resultados obtidos para esta variável de resposta foram acima dos valores mínimos recomendados por algumas literaturas (Machado, 1996; ASM, 1983b; entre outros), as quais dizem que o rendimento mínimo deve ser de 82%. De maneira geral, com o uso da corrente pulsada, houve uma pequena melhoria do rendimento, em relação ao modo convencional, quando da comparação destes fatores na corrente média de 230A. Portanto, pode-se se dizer que independente do tipo de corrente utilizado (pulsado ou convencional) na soldagem de revestimento, para as condições deste trabalho, estes praticamente não afetam o rendimento.

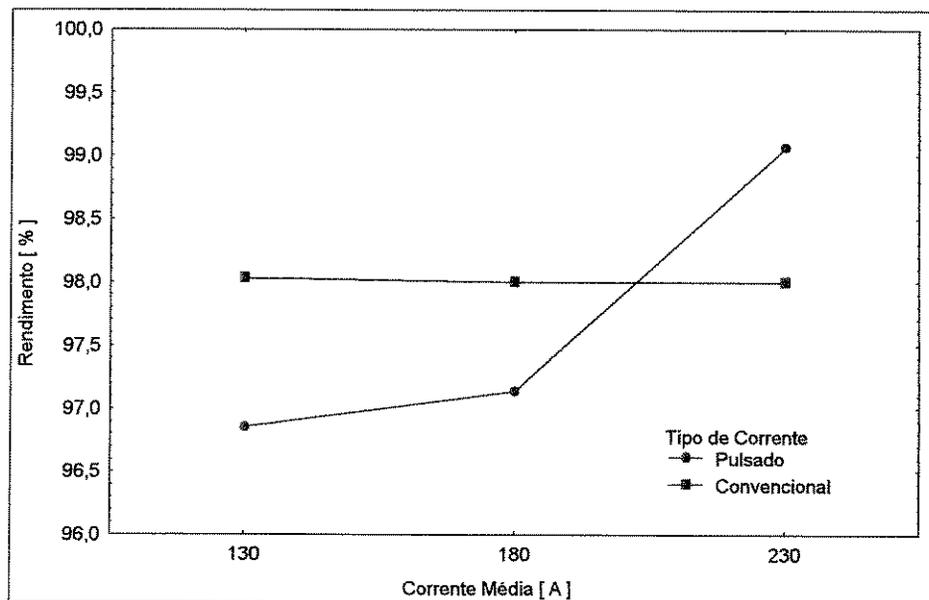


Figura 5.20 – Efeito do tipo e intensidade da corrente média sobre o rendimento.

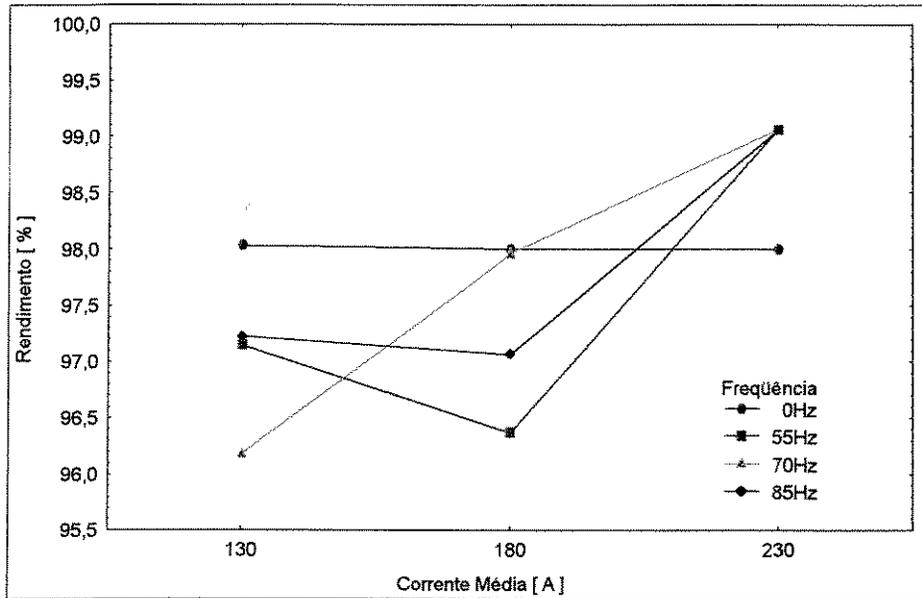


Figura 5.21 – Efeito da corrente média e frequência de pulso sobre o rendimento.

Capítulo 6 - Conclusões

Baseado nos resultados experimentais obtidos, podemos concluir que:

6.1 – Conclusões relativas à corrente média

- Aumentando a corrente média, há um crescimento da penetração, do reforço e da largura.
- A diluição, a área da penetração e a área do reforço cresceram com o aumento da corrente média.
- A corrente média não afetou a microestrutura e a microdureza dos cordões.
- O crescimento da corrente média propicia um aumento da taxa de fusão e a taxa de deposição.
- O rendimento do processo não foi afetado pela corrente média.

6.2 – Conclusões relativas à mudança do tipo de corrente

- Na passagem do modo convencional para o pulsado, há uma pequena melhora da penetração e largura dos cordões.
- Na mudança do modo convencional para o pulsado, a diluição tende a diminuir.
- Não houve mudanças na microestrutura e microdureza dos cordões, na passagem do modo convencional para o pulsado.
- A passagem do modo convencional para o pulsado não afetou a taxa de deposição, a taxa de fusão e o rendimento do processo.

6.3 – Conclusões relativas à frequência de pulso

- A frequência de pulso tem influência na penetração, principalmente em correntes baixas.
- A pulsação do arco não tem influência no reforço e na largura dos cordões.
- Aumentando-se a frequência de pulso, a diluição diminui.
- A frequência de pulso não afetou a área do reforço, mas afetou a área da penetração.
- A pulsação do arco não afetou a microestrutura dos cordões de solda, assim como a microdureza dos mesmos.
- A frequência de pulso não afetou a taxa de fusão, a taxa de deposição e o rendimento do processo.

Referências Bibliográficas

- Allum, C.J. MIG welding - time for a reassessment. *Metal Construction*, v.15, n.6, p.347-353, june 1983.
- Allum, C.J., Quintino, L. Control of fusion characteristics in pulsed current MIG welding - Simple model of fusion characteristics, part 2, *Welding and Metal Fabrication*, may 1985a, p.314R-317R.
- Allum, C.J., Quintino, L. Control of fusion characteristics in pulsed current MIG welding - Dependence of fusion characteristics on process parameters, part 1, *Welding and Metal Fabrication*, april 1985b, p.242R-245R.
- American Society For Metals, Metals Handbook: "Gas Metal Arc Welding (MIG Welding)", v.6, 9ª Ed., Metal Park, Ohio, ASM, p.153-181, 1983a.
- American Society For Metals, Metals Handbook: "Weld Overlays", v.6, 9ª Ed., Metal Park, Ohio, ASM, p. 526-534, 1983b.
- Amin, M. Pulse current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding. *Metal Construction*, v.15, n.5, p.272-278, may 1983a.
- Amin, M. Prediction of pulse parameters for MIG welding. *Welding Institute Research Bulletin*, v.24, p.48-54, feb 1983b.
- Barra, S.R., Dutra, J.C., Ribas, F.A.C. Avaliação dos Efeitos da Variação dos Parâmetros/Procedimentos de Soldagem e Automação Sobre a Planicidade e Aspecto Superficial dos Revestimentos Empregados em Turbinas Hidráulicas. In: *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM*, 24, 1998, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza : Associação Brasileira de Soldagem, 1998. (CD-ROM).
- Brantis, F.C.A., Trevisan, R.E. Efeito dos parâmetros do processo de soldagem nas propriedades do revestimento. In: *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM*, 19,

- 1993, Águas de São Pedro-SP. *Anais... Águas de São Pedro* : Associação Brasileira de Soldagem, 1993. p.245-263.
- Button, S.T. Notas de aula da disciplina Tópicos em Engenharia de Materiais: Instrumentação e Planejamento Experimental, oferecida no curso de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. 2º Semestre de 1999.
- Chavanne, R.L. Forty-Four Ways to Improve Your Hardfacing Operation. *Welding Journal*, v.62, n.5, p.15-18, may 1983.
- Costa Neto, P.L.O. *Estatística*. 11Ed., São Paulo, Ed. Edgard Blücher Ltda, 1977, 264p.
- Dutra, J.C., Baixo, C.E.I., Ollé, L.F., Júnior, R.G. O Processo MIG/MAG Pulsado com Pulsção Térmica. In: *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM*, 21, 1995, Caxias do Sul. *Anais...* Rio de Janeiro : Associação Brasileira de Soldagem, 1995. p.889-902.
- Dutra, J.C. et al. Uma contribuição ao estudo da seleção de variáveis na soldagem MIG/MAG pulsada. In: *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM*, 18,1992, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro : Associação Brasileira de Soldagem, 1992. p.925-942.
- Farias, J.P. *Magnésio metálico como componente do revestimento na soldagem com eletrodo ao C-Mn-Ni*. Florianópolis: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1993. 224p. Tese (Doutorado).
- Gosh, P.K., Gupta, P.C., Goyal, V.K. Stainless Steel Cladding of Structural Steel Plate Using the Pulsed Current GMAW Process. *Welding Journal, Welding Research Supplement*, v.77, n.7, p.307s-314s, jul 1998.
- Gosh, P.K., Rai, B.K. Characteristics of Pulsed Current Bead on Plate Deposit in Flux Cored GMAW Process. *ISIJ International*, v.36, n.8, p.1036-1045, 1996.
- Jilong, MA; Apps, R.L. Analyzing metal transfer during MIG welding. *Welding Metal and Fabrication*, v.51, p.119-128, apr 1983.
- Kalligerakis, K., Mellor, B.G. Overlay welding using pulsed MIG welding: bead profile and dilution. *International Journal for the Joining of Materials*, v.7, n.1, p.16-22, jan 1995.
- Kim, Y.S., Eagar, T.W. Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal, Welding Research Supplement*, v.72, n.7, p.279s-287s, jul 1993.
- Kotechi, D. Dilution Control in Single-Wire Stainless Steel Submerged Arc Cladding. *Welding Journal, Welding Research Supplement*, v.75, n.2, p.35s-45s, feb 1996.

- Kotechi, D. Hardfacing Benefits Maintenance and Repair Welding. *Welding Journal*, v.71, n.11, p.51-53, nov 1992.
- Machado, I.G. *Soldagem e Técnicas Conexas : Processos*. Porto Alegre. Editado pelo Autor, 1996. *Cap. 8 : Soldagem a Arco com Proteção por Gás e Eletrodo Consumível (MIG/MAG)*, p.193-217.
- Mallya, U.D., Srinivas, H.S. Bead Characteristics in Submerged Arc Strip Cladding. *Welding Journal*, v.68, n.12, p.30-36, dec 1989.
- Manning, R.M. The Importance of Preheat/Postheat in Repair Welding. *Welding Journal*. v.63, n.5, p.27-34, may 1983.
- Marques, P.V. *Tecnologia da Soldagem*, Belo Horizonte: ESAB, 1991, 352p.
- Mcglone, J.C. Weld bead geometry prediction - a review. *Metal Construction*, v.14, n.7, p.378-384, jul 1982.
- Mota, C.A.M., Buschinelli, A.A., Farias, J.P. Efeito dos Parâmetros de Soldagem Sobre as Características Operacionais e Econômicas de Arames Tubulares Autoprottegidos. In: *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM*, 22, 1996, Blumenau. *Anais...* Blumenau : Associação Brasileira de Soldagem, 1996, p.827-838.
- Murungan, N., Parmar, R.S. Stainless Steel Cladding Deposited by Automatic Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal, Welding Research Supplement*, v.76, n.10, p.391s-403s, oct 1997.
- Murungan, N., Parmar, R.S. Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v.41, n.4, p.381-398, 1994.
- Norrish, J. *Advanced Welding Process*. IOP Publishing Ltd, 1992. *Cap. 7: Gas Metal Arc Welding*. p.131-173.
- Norrish, J., Nixon, J. A history of pulsed MIG welding, *Joining and Materials*, v.2, n.6, p.264-268, jun 1989.
- Norrish, J., Richardson, I.F. Metal transfer mechanisms, *Welding and Metal Fabrication*, v.56, p.17-22, jan 1988.
- Quites, A. M., Dutra, J.C. *Tecnologia a arco voltaico*, Florianópolis, Ed. EDEME, 1979,252p.

- Rajasekaran, S., Kulkarni, S.D. Mallya,U.D., Chaturvedi, R.C. Droplet Detachment and Plate Fusion Characteristics in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal, Welding Research Supplement*, v.77, n.6, p. 254s-269s, jun 1998.
- Silva, J.R., Guimarães, A.S., Neto, F.C. Otimização da Taxa de Deposição no Revestimento de Rolos de Lingotamento Contínuo Utilizando Soldagem Arco Submerso. In: *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM*, 22, 1985, Blumenau. *Anais...* Blumenau : Associação Brasileira de Soldagem, 1996. p.789-800.
- Stenbacka, N., Persson, K. A. Shielding gases for Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*, v.68, n.11, p.41-47, nov 1989.
- Street, J.A. *Pulsed Arc Welding*. Cambridge, Columbus. 1990. 57p.
- Surian, E., Mota, C.A.M., Farias, J.P. Efeito do Tipo de Fonte nas Características Operacionais e Econômicas de Arames Tubulares Autoprotetidos. In: *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM*, 23, 1997, São Paulo. *Anais...* São Paulo : Associação Brasileira de Soldagem, 1997. p.227-235.
- Teubel, G. A Técnica do Arco Pulsante e sua Aplicação. *Metalurgia-ABM*, v.34, n.251, p.729-731, 1978.
- Wainer, E. (Coordenador). *Soldagem: Processos e Metalurgia*, São Paulo: E. Edgard Blücher, 1992. 494p.
- Welding Handbook, v 2, 80ª Ed., American Welding Society, Miami, 1991, cap. 4 – Gás Metal Arc Welding, p.109-155.
- Welding Technology Data. Pulsed MIG Welding. *Welding & Metal Fabrication*, v.53, n.1, p.24-30, jan/feb 1985.
- Welding Technology Data. MIG Welding Stainless Steels. *Welding & Metal Fabrication*, v.51, n.10, p.499-503, dec 1983.
- Zeeman, A. Revestimentos Contra Desgaste, *Soldagem e Inspeção*, v.5, n.1, p.11-17, jan 1999.
- Zeeman, A. Diluição, *Soldagem e Inspeção*, v.4, n.5, p.14-46, mai 1998.
- Zeeman, A. Revestimentos Duros. *Soldagem e Inspeção*, v.2, n.3, p.36-38, 1995.

Bibliografia complementar

- Altamer, A. Automatic welding and cladding in heavy fabrication. *Metal Construction*, v.12, n.5, p.222-224, may 1980.
- Arima, A. A . et al; Aplicação do Processo GMAW no Modo Pulsado na Soldagem de Aços Inoxidáveis Austeníticos; In: *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM*, 21, 1995, Caxias do Sul. *Anais...* Caxias do Sul : Associação Brasileira de Soldagem, 1995, v.2, p.613-625.
- ASTM, Microhardness of Materials, E 384-84, *Annual Book of ASTM*, 1984, p.525-546.
- Campbell, H. C.; Welding Specific Dissimilar Metal Combinations; *Welding Journal*, v.73, n.4, p.77-78, apr 1994.
- Castner, H.R., Singh, R. Pulsed vs. Steady Current GMAW : Wich Is Louder? *Welding Journal*, v.76, n.11, p.47-51, nov 1997.
- Connel, I.A. MC, MC Pherson, N.A. The Application of Statistical Process Design to a FCAW Process. *Welding Journal. Welding Research Supplement*, v.76, n.10, p.412s-416s, oct 1997.
- Dutra, J.C. Procedimento Computadorizado de Estudo de Transferência Metálica para a Determinação das Variáveis de Soldagem com Corrente Pulsada. In: *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM*, 15, 1989, São Paulo. *Anais...* São Paulo : Associação Brasileira de Soldagem, 1989. p.637-652.
- Engblom, I.G. Alta Produtividade na Sodagem MIG/MAG. In: *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM*, 20, 1994, Contagem. *Anais...* Contagem : Associação Brasileira de Soldagem, 1994. p.201-208.
- Folkhard, E. and collaborations. *Welding Metallurgy of Stainless Steels.*, Springer-Verlag Wien New York, 1988, 278p.

- French, I.E., Bosworth, M.R. A Comparison of Pulsed and Convencional Welding with Basic Flux Cored and Metal Cored Welding Wires. *Welding Journal, Welding Research Supplement*, v.74, n.6, p.197s-205s, jun 1995.
- Hilton, D.E. Shielding gases for arc welding. *Welding and Metal Fabrication*, v.58, p.332, 334-336, jul 1990.
- Hilton, D.E., Norrish,J. Shielding gases for arc welding. *Welding and Metal Fabrication*, v.56, p.189-196, may/jun 1988.
- Jonhson, P.G.; Murphy, A.B.; Szekely, J. The Influence of Oxygen Additions on Argon-Shielded Gas Metal Arc Welding Process. *Welding Journal, Welding Research Supplement*, v.74, n.2, p.48s-58s, feb 1995.
- Jones, L.A., Eagar, T.W., Lang, J.H. Images of a Steel Electrode in Ar-2%O₂ Shielding during Constant Current Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal, Welding Research Supplement*, v.77, n.4, p.135s-141s, apr 1998.
- Kalligerakis, K., Mellor, B.G. Double spiral overlay welding - an alternative to single spiral and multilayer techniques. *Welding and Metal Fabrication*, v.60, n.6, p.277-280, jul 1992.
- Kalligerakis, K., Mellor, B.G. Metal Transfer in Pulsed MIG Welding for Cladding Applications. *Joining Sciences*, v.1, n.3, p.140-144, 1992.
- Lucas, W. Choosing a shielding gas - part 2. *Welding and Metal Fabrication*, v.60, n.7, p.269-276, jul 1992.
- Lucas, W. Arc surfacing and cladding processes - to enhance performance in service and to repair worn components. *Welding and Metal Fabrication*. v.62, n.2, p.55-56,58,60-62, feb 1994.
- Manz, A.F. ; The Dawn of Gas Metal Arc Welding; *Welding Journal*, v.69, p.67-68, jan 1990.
- Menon, R.; New Developments in Hardfacing Alloys; *Welding Journal*, v.75, p.43-49, feb 1996.
- Miller, D.K. Controllling Weld Variables from Design to Deposition. *Welding Journal.*, v.76, n.8, p.39-43, aug 1997.
- Mills,K.C.; Keene, B.J. Factors affecting variable weld penetration. *International Materials Reviews*, v.35, n.4, p.185-216, 1990.
- Nugent, B.T. Weld overlaying by submerged arc. *Metal Construction*, v.14, n. 5, p.241-243, may 1982.

- Pagani, S.M., Robinson, F.P.A. Microstructure and mechanical and electrochemical properties of martensitic weld deposits developed for welding of a 12% Cr duplex stainless steel. *Materials Science and Technology*, v.4, n.6, p.554-559, jun 1988.
- Papritan, J.C., Helzer, S.C. Statistical Process Control for Welding. *Welding Journal*, v.70, n.3, p.44-48, mar 1991.
- Quintino, M.L.C.G.A. Soldadura MIG/MAG com corrente pulsada – Estado actual da evolução. In: *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM*, 11, 1985, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro : Associação Brasileira de Soldagem, 1985. p.44-59.
- Rhee, S., Kannatey-Asibu, JR. Observation of Metal Transfer during Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal, Welding Research Supplement*, v.71, n.10, p.381s-386s, oct 1992.
- Santos, J.F. de . Soldadura MIG Pulsada de Aço Inoxidável. In: *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM*, 11, 1985, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro : Associação Brasileira de Soldagem, 1985. p.60-79.
- Skiles, J.; Campbell, H. C. Selecting the Proper Filler Metal. *Welding Journal*, v.73, n.4, p.119, apr 1994.
- Smati, Z. Automatic pulsed MIG welding. *Metal Construction*, v.18, n.1, p.38R-44R, jan 1986.
- Souza, S.A. *Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos*, 2ª ed., Ed. Edgard Blucher Ltda., 1984, 289p.
- Thorn, K., Feenstra, M., Young, J.C., Lawson, W.H.S., Kerr, H.W. The interaction of process variables-their influence on weld dimensions in GMA welds on steel plate. *Metal Construction*, v.14, n.3, p.128-133, mar 1982.
- Ueguri, S.; Hara, K.; Komura, H. Study of Metal Transfer in Pulsed GMA Welding. . *Welding Journal, Welding Research Supplement*, v.64, n.8, p.242s-250s, aug 1985.
- Wang, Q.L., Li, P.J. Arc light sensing of droplet transfer and analysis in Pulsed GMAW Process. *Welding Journal, Welding Research Supplement*, v.76, n.11, p.458s-469s, nov 1997.
- Welding Handbook, v 4, 7ª Ed., American Welding Society, Miami, 1983, cap. 12 – Dissimilar metals, p.514-547.
- Welding Technology Data. MIG Welding Defects. *Welding & Metal Fabrication*, v.52, n.2, p.69-74, mar 1984.