

TESE

1158

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

Luiz Guilherme Ribeiro

EFEITO DOS PARÂMETROS DE PULSO NO
PROCESSO MIG SOBRE A QUALIDADE E
PRODUTIVIDADE DO CORDÃO DE SOLDA

Dissertação submetida ao programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Produção como
requisito parcial à obtenção do título de Mestre
em Engenharia de Produção

Itajubá, Março de 2002

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

Luiz Guilherme Ribeiro



**EFEITO DOS PARÂMETROS DE PULSO NO
PROCESSO MIG SOBRE A QUALIDADE E
PRODUTIVIDADE DO CORDÃO DE SOLDA**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa.

Itajubá, Março de 2002

CLASS. 621.791(043.2)
CUTTER. R4842
TOMBO. 1158

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá
Bibliotecária Elisete Lefol Nani Carvalho – CRB_6 / 1037

621.791(043.2)

Ribeiro, Luiz Guilherme.

Efeito dos parâmetros de pulso no processo MIG sobre a qualidade e Produtividade do cordão de solda / por Luiz Guilherme Ribeiro;
Orientado por Sebastião Carlos da Costa - - Itajubá-MG: EFEI , 2002.
113 p.: il.

Dissertação (Mestrado) – Escola Federal de Engenharia de Itajubá.

1. Projeto e Análise de Experimentos. 2. Processo MIG – soldagem.
3. MIG pulsado. I. Costa, Sebastião Carlos, orient. II. Escola Federal de Engenharia de Itajubá. III. Título

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

Luiz Guilherme Ribeiro

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE PULSO NO
PROCESSO MIG SOBRE A QUALIDADE E
PRODUTIVIDADE DO CORDÃO DE SOLDA**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 05 de março de 2002,
conferindo ao autor o título de *Mestre em Engenharia de Produção*

Banca Examinadora:

Prof. Messias Borges Silva, Dr.

Prof. João Batista Turrioni, Dr.

Prof. Sebastião Carlos da Costa, Dr. (Orientador)

Itajubá, Março de 2002

AGRADECIMENTOS

Este trabalho deve-se aos seguintes agradecimentos:

• Primeiramente a Deus, por ter criado a vida e a morte.

• Aos meus pais, José e Maria, por terem sido os primeiros a me ensinar a ler e a escrever.

• Aos professores Sebastião, Carlos do Carmo, João Carlos, António, Miguel, António, João, José e a todos os outros que me ensinaram a ler e a escrever.

• Aos meus amigos, especialmente a todos os que me ajudaram a escrever este trabalho e a todos os que me apoiaram.

• Aos meus colegas de trabalho, especialmente a todos os que me ajudaram a escrever este trabalho.

• Aos meus amigos de infância, especialmente a todos os que me ajudaram a escrever este trabalho.

• Ao Sr. José António, Jorge Rodrigues do Instituto Nacional de Estatística, por me ter ajudado a escrever este trabalho.

• A todos os que me ajudaram a escrever este trabalho.

• Aos meus amigos de infância, especialmente a todos os que me ajudaram a escrever este trabalho.

Dedico este trabalho a minha esposa Maria do Carmo, a minha filha Marília Gabriela e aos meus pais, José e Maria

AGRADECIMENTOS

Manifesto meus sinceros agradecimentos:

- Primeiramente a Deus, pelas realizações conseguidas;
- Aos meus pais, pelo incentivo na realização de mais uma etapa da vida acadêmica;
- Ao professor *Sebastião Carlos da Costa*, pela valiosa orientação, a qual tornou possível a realização deste trabalho;
- Aos funcionários da oficina mecânica, pelo apoio e participação durante a fase de realização dos ensaios;
- Aos professores e funcionários da EFEI que contribuíram para alcançar este objetivo;
- Aos meus colegas de turma pelo apoio e amizade dispensados;
- Ao Dr. José Augusto Jorge Rodrigues do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, pela possibilidade de realização do trabalho;
- À CAPES, pelo incentivo financeiro;
- À Escola Federal de Engenharia de Itajubá, através do seu Departamento de Produção, pela oportunidade de capacitação.

SUMÁRIO

Dedicatória	iii
Agradecimentos	iv
Sumário	v
Resumo	viii
Abstract	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
Lista de símbolos	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Importância do tema	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Justificativa da escolha do tema	4
1.4. Contribuições	5
1.5. Organização do trabalho	5
2. PROCESSO DE SOLDAGEM MIG PULSADO	7
2.1. O processo MIG/MAG	7
2.2. Variáveis envolvidas no processo MIG/MAG	9
2.3. Tipos de transferência metálica	17
2.4. O processo MIG pulsado	20
2.4.1. Os parâmetros de pulso	22
2.4.2. Abordagens do MIG pulsado na literatura	25
3. PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS	29
3.1. Introdução	29
3.2. Princípio básicos da Técnica Projeto e Análise de Experimentos	30
3.3. Etapas do Projeto e Análise de Experimentos	31
3.3.1. Conhecimento e exposição do problema	31
3.3.2. Escolha dos fatores e níveis	31
3.3.3. Seleção da(s) resposta(s)	32
3.3.4. Escolha do Projeto de Experimentos	32
3.3.5. Realização do Experimento	32
3.3.6. Análise dos resultados	33

3.3.7. Conclusões e recomendações	33
3.4. Classificação dos Projetos de Experimento	33
3.5. O Planejamento Fatorial	34
3.5.1. Efeitos principais e de interação	35
3.6. O Planejamento Fatorial em dois Níveis	37
3.7. Estimativa do número de efeitos	38
3.8. Nomenclaturas utilizadas	38
3.9. Algoritmo para cálculo dos efeitos	40
3.9.1. Algoritmo adotado por Neto	40
3.9.2. Algoritmo proposto por Yates	44
3.10. Estimativa do erro experimental	46
3.11. O método da variância	46
3.12. Teste de significância dos efeitos	47
3.13. O teste t	48
3.14. Aplicações do Projetos e Análise de Experimentos em Soldagem	49
4. MONTAGEM EXPERIMENTAL	51
4.1. Introdução	51
4.2. Planejamento	51
4.2.1. Formulação do problema	51
4.2.2. Definições operacionais	52
4.2.3. Determinação da sequencia de realização dos experimentos	58
5. RESULTADOS E ANÁLISES	62
5.1. Resultados obtidos dos ensaios	62
5.2. Análise da penetração do cordão de solda	65
5.2.1. Efeitos das variáveis sobre a penetração da solda	66
5.2.2. Influência dos efeitos principais sobre a penetração da solda	66
5.2.3. Influência da interação dos fatores sobre a penetração da solda	67
5.2.4. Comparação dos resultados com a literatura	71
5.3 Análise da diluição do cordão de solda	71
5.3.1 Efeitos das variáveis sobre a diluição da solda	71
5.3.2. Influência dos efeitos principais sobre a diluição da solda	72
5.3.3. Influência da interação dos fatores sobre a diluição da solda	72
5.3.4. Comparação dos resultados com a literatura	75
5.4. Análise do índice de convexidade IC	75

5.4.1. Efeitos das variáveis sobre o índice de convexidade da solda	76
5.4.2. Influência dos efeitos principais sobre o índice de convexidade da solda	76
5.4.3. Influência da interação dos fatores sobre o índice de convexidade da solda	77
5.4.4. Comparação dos resultados com a literatura	79
5.5. Análise do índice de respingos	79
5.5.1. Efeitos das variáveis sobre o índice de respingos da solda	79
5.5.2. Influência dos efeitos principais sobre o índice de respingos	80
5.5.3. Influência da interação dos fatores sobre o índice de respingos	80
5.5.4. Comparação dos resultados com a literatura	82
5.6. Condições ideais de qualidade dos cordões de solda	82
5.7. Considerações finais	84
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	87
6.1 Conclusões gerais	87
6.2 recomendações futuras	87
ANEXOS	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

RESUMO

Este trabalho analisa a influência dos parâmetros de pulso sobre a qualidade e produtividade dos cordões de solda, utilizando o processo MIG pulsado, com transferências de material de adição tipicamente por spray, em soldagens de chapas de aço ABNT 1045, através de simples deposições. Utilizou-se para a preparação e análise do experimento, a técnica estatística de Projetos e Análises de Experimentos, em especial, o Planejamento Fatorial Completo em Dois Níveis (2^K). Dentre os vários parâmetros de pulso, este trabalho analisou a influência dos fatores: corrente de pico, corrente de base, ciclo ativo de soldagem e velocidade de alimentação do arame. Como variável de resposta foi analisada a qualidade do cordão de solda expressa através da penetração, diluição e índice de convexidade e a produtividade através do índice de respingos gerados pelo processo. Fez-se uso de um *software* comercial na manipulação e análise dos dados obtidos dos experimentos. Os algoritmos de Neto e Yates também foram utilizados para mostrar a sistemática de cálculos utilizada por esses *softwares*, além de validar os resultados obtidos.

Em função das condições estabelecidas, este trabalho permitiu definir uma combinação ideal de parâmetros de pulso, baseada na condição de máxima diluição, a qual proporcionou um valor relativamente baixo de corrente média. Esse fato expressa a possibilidade de melhoria das características geométricas dos cordões, impondo-se, ainda, baixos níveis de energia para o metal de base, propiciando, dessa forma, a possibilidade da soldagem de chapas de menores espessuras, através do processo MIG pulsado, com um tipo de transferência por spray.

ABSTRACT

This work analyses the influence of pulse parameters in the GMAW process, spray transfer mode, on the quality and productivity of weld bead in steel plate ABNT 1045. A factorial welding trial was carried out to determine which welding parameters significantly affect weld characteristics. To do this a two-level (2^k) design was designed and run in order to evaluate the influence of peak current, background current, duty cycle (fraction of time at peak current) and wire feed speed upon weld bead geometry and welding productivity. Weld bead geometry aspects studied were penetration; the convexity index and dilution. Welding productivity were evaluated by the spatter level of the runs. In order to analyse the data the commercial software Statgraphics were used. Also, a particular algorithm developed by Neto and Yates were used to validate the results.

The results generated allowed to derive an ideal combination of pulse parameters, based on a maximum dilution obtained during welding. This condition resulted in a weld with a reduced medium current level. This fact shows the possibility of using a pulsed GMAW process to improve weld geometric characteristics of thin thickness base metal through the use of lower levels of heat input with a typical spray transfer mode.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Velocidades ótimas de soldagem para diferentes gases utilizados no processo MIG/MAG	11
Figura 2.2	Esquema do comprimento de arco e extensão do eletrodo	12
Figura 2.3	Influência do diâmetro na penetração do cordão de solda	13
Figura 2.4	Tipos de transferência entre o eletrodo e o metal de base e seus sinais de tensão e corrente característicos	18
Figura 2.5	Esquema de uma onda pulsada e seus componentes	23
Figura 3.1	Sistema considerado como função	34
Figura 4.1	Esquema da montagem experimental	57
Figura 4.2	Representação da área da seção transversal do cordão de solda	60
Figura 5.1	Influência dos fatores sobre a penetração	67
Figura 5.2	Interações entre $I_p \cdot CA$, $I_p \cdot v_a$ e $CA \cdot v_a$ sobre a penetração	67
Figura 5.3	Efeito da interação entre $I_p \cdot CA$ sobre a penetração	68
Figura 5.4	Efeito da interação entre $I_p \cdot v_a$ sobre a penetração	68
Figura 5.5	Efeito da interação entre $I_p \cdot CA \cdot v_a$ sobre a penetração	69
Figura 5.6	Efeito da interação entre $I_p \cdot I_b \cdot CA$ sobre a penetração	70
Figura 5.7	Influência dos fatores sobre a diluição	72
Figura 5.8	Interações entre $I_p \cdot CA$, $I_p \cdot v_a$ e $CA \cdot v_a$ sobre a diluição	73
Figura 5.9	Efeito da interação entre $I_p \cdot CA$ sobre a diluição	73
Figura 5.10	Efeito da interação entre $CA \cdot v_a$ sobre a diluição	74
Figura 5.11	Efeito da interação entre $I_p \cdot CA \cdot v_a$ sobre a diluição	74
Figura 5.12	Representação da área da seção transversal do cordão de solda	76
Figura 5.13	Efeito da interação entre $I_b \cdot CA \cdot v_a$ sobre IC	77
Figura 5.14	Interação entre $I_p \cdot v_a$ sobre IC	78
Figura 5.15	Efeito da interação entre $I_p \cdot v_a$ sobre IC	78
Figura 5.16	Influência dos fatores sobre IR	81
Figura 5.17	Efeito da interação entre $I_p \cdot CA \cdot v_a$ sobre IR	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Corrente de transição globular/ <i>spray</i> para arames de aço	16
Tabela 2.2	Influência dos parâmetros na soldagem MIG/MAG	17
Tabela 3.1	Efeito da temperatura e do catalisador no rendimento de uma reação	35
Tabela 3.2	Notações para planejamento fatorial de três fatores e dois níveis	39
Tabela 3.3	Matriz de planejamento	41
Tabela 3.4	Matriz de planejamento utilizando os sinais algébricos	41
Tabela 3.5	Matriz dos coeficientes de contrastes	41
Tabela 3.6	Matriz unitária dos coeficientes de contrastes	42
Tabela 3.7	Matriz $X^t \cdot Y$	43
Tabela 3.8	Vetor dos efeitos dos fatores e interações	44
Tabela 3.9	Cálculo dos efeitos dos fatores segundo Yates	45
Tabela 4.1	Níveis dos parâmetros de pulso	53
Tabela 4.2	Dados de ajustes no modo pulsado	54
Tabela 4.3	Composição química do aço ABNT 1045	55
Tabela 4.4	Níveis operacionais dos fatores	57
Tabela 4.5	Planejamento experimental	59
Tabela 5.1	Dados obtidos do ensaio	63
Tabela 5.2	Resultados obtidos para os parâmetros geométricos dos cordões de solda	64
Tabela 5.3	Sequenciamento e resultados derivados dos experimentos	64
Tabela 5.4	Efeitos principais, de interação e erro experimental das respostas	65
Tabela 5.5	Resultados obtidos do gráfico de interação entre $I_p \cdot CA \cdot v_a$	69
Tabela 5.6	Resultados obtidos do gráfico de interação entre $I_p \cdot I_b \cdot CA$	70
Tabela 5.7	Resultados obtidos do gráfico de interação entre $I_p \cdot CA \cdot v_a$	74
Tabela 5.8	Resultados obtidos do gráfico de interação entre $I_p \cdot CA \cdot v_a$	77
Tabela 5.9	Resultados obtidos do gráfico de interação entre $I_p \cdot CA \cdot v_a$	81
Tabela 5.10	Condições adotadas para a determinação da condição ideal	82
Tabela 5.11	Macrografias obtidas do experimento	83

LISTA DE SÍMBOLOS

b	Largura do cordão
CA	Ciclo Ativo
f	Frequência de pulso
I	Corrente de soldagem
I _b	Corrente de base
IC	Índice de convexidade do cordão
I _m	Corrente média
I _p	Corrente de pico
IR	Índice de respingos do cordão
K	Número de fatores
L	Comprimento do eletrodo
l	Comprimento de arame fornecido
m _{cp}	Massa medida dos corpos de prova
m _f	Massa do corpo de prova após a soldagem
m _t	Quantidade de material de adição teórica fornecida durante a soldagem
m _φ	Massa inicial do corpo de prova
N	Número total de repetições do experimento
OE	Ordem experimental
OP	Ordem padrão ou de Yates
p	Penetração do cordão
r	Reforço do cordão
S _p	Área de penetração do cordão
S _r	Área de reforço do cordão
t _b	Tempo de base
t _p	Tempo de pico
V	Tensão de soldagem
v _a	Velocidade de alimentação do arame
v _s	Velocidade de soldagem
φ	Diâmetro do eletrodo

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Importância do tema

Nos tempos atuais, marcados por acirrada competição entre as organizações, palavras como qualidade e produtividade vêm se tornando cada vez mais familiares no jargão empresarial. As mudanças que ocorreram e vêm ocorrendo no mundo, fazem com que os consumidores e clientes deixem a condição de elementos passivos e passem a assumir um papel preponderante no balizamento estratégico das organizações, forçando estas a se desdobrarem na melhoria de seus processos produtivos. Devido a isso, nova mentalidade vem tomando conta dos nossos empresários que, cada vez mais, buscam o aprimoramento de seus produtos e processos através de métodos científicos.

Segundo Campos (1996), a era em que as empresas podiam ser conduzidas somente por "*homens de bom senso*" parece haver terminado. O gerenciamento está deixando de ser "*politico*" para se tornar "*científico*". A sobrevivência das organizações, somente estará assegurada quando as metas impostas pelo mercado puderem ser atingidas e isto somente poderá ser feito mediante métodos e conhecimento.

O pensamento que antes dominava era que baixos salários, proximidade de matérias-primas e/ou recursos energéticos seriam fatores suficientes para a garantia de vantagens competitivas. Hoje, o componente *informação* é, de fato, tão importante quanto os demais, sendo necessário para:

- Saber captar as necessidades dos clientes através de métodos e instrumentos cada vez mais sofisticados;
- Saber pesquisar e desenvolver novos produtos que melhor se adaptem a essas necessidades;
- Saber pesquisar e desenvolver novos processos que garantam melhor qualidade de conformidade a custos mais baixos;
- Saber gerenciar sistemas administrativos que conduzam a maior produtividade;
- Saber comercializar e dar assistência técnica aos clientes (Campos, 1992).

Dentro deste contexto, o aprimoramento contínuo dos processos produtivos têm sido buscado com muita veemência onde o gerenciamento científico em muito tem contribuído aos que dele se utilizam. Uma área da engenharia que não foge à regra e que gradativamente vem

assimilando técnicas científicas e obtendo resultados consideráveis é a dos processos de soldagem.

Devido ao fato da soldagem de metais ser um processo de união em constante desenvolvimento, resultado de uma crescente diversificação dos aços, bem como de sua aplicação em construções de alto risco, a utilização dessas técnicas muito têm a acrescentar em termos de melhorias.

De acordo com Wainer (1992), dois aspectos devem ser considerados ao se analisar os processos de soldagens:

- Eles são baseados em princípios empíricos e dependem de um grande número de parâmetros, o que os tornam técnicas de difícil formulação matemática;
- Eles dependem quase que totalmente do homem e suas análises são extremamente difíceis, o que os tornam processos de difícil controle.

Além disso, os processos de soldagem se apresentam, hoje em dia, como responsáveis por um número substancial de problemas de cunho industrial, sendo considerados gargalos em muitas empresas, devido a pouca informação disponível a respeito da influência de seus parâmetros no comportamento dos cordões de solda.

Ainda, quando são relacionados qualidade e produtividade com processos de soldagem não se pode deixar de mencionar o processo MIG, o qual apresenta, em relação aos demais processos, alta produtividade e eficiência, cordões com ótima qualidade, tanto em termos estéticos quanto em propriedades físicas e metalúrgicas, além de um menor custo operacional. Com o vertiginoso avanço da eletrônica, o qual possibilitou uma rápida evolução das fontes de soldagens, decorrente de crescentes exigências dos diferentes ramos industriais, surge, por volta da década de 60 no cenário fabril, o MIG pulsado.

A técnica do MIG pulsado, uma variante da transferência por *spray*, onde tem-se cordões com aspecto mais homogêneo que nos demais tipos de transferência, acrescentou ainda, a possibilidade de soldagem em diversas posições, utilizando-se chapas de menor espessura e aumentando também, a gama de materiais a serem soldados, o que ampliou, de maneira significativa, a faixa de utilização desse processo. Nesta modalidade de transferência, foram introduzidos os parâmetros de pulso, incluindo corrente de pico, tempo de pico, corrente de base e tempo de base, em relação aos parâmetros normalmente utilizados na soldagem convencional, o que aumentou, de maneira significativa, o número de fatores a serem estudados.

O grande inconveniente neste caso é que esses parâmetros de pulso causam uma certa dificuldade na seleção das condições ótimas de operação. Dutra (1996) retrata essa

dificuldade com as seguintes palavras: “ *O uso da corrente pulsada tem possibilitado a soldagem fora da posição plana e a união de materiais de menores espessuras. Entretanto, a seleção correta das grandezas envolvidas no processo é de fundamental importância para que os objetivos da utilização da corrente pulsada sejam atingidos. Tal tarefa, porém, tem sido uma das principais razões para a falta de popularidade da soldagem MIG/MAG pulsada na indústria*”.

Um método de tentativa e erro é utilizado de maneira freqüente para se determinar essas condições. Entretanto, a física básica da transferência metálica na corrente pulsada necessita ser entendida de maneira a se controlar com sucesso esse processo, através da manipulação correta dos parâmetros de pulso, de forma a obter um melhor controle da transferência metálica das gotas de metal fundido.

Baseado nestes aspectos, um método científico, fundamentado na estatística e que gradativamente vem sendo utilizado com grande êxito na elucidação de problemas de cunho industrial é o Planejamento e Análise de Experimentos (em inglês conhecido como DOE - *Design Of Experiments*) por definir quais dados, em que quantidades e em que condições devem ser coletados e controlados durante um determinado experimento buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: resultados mais confiáveis e precisos, com menor custo operacional.

É portanto, uma técnica de extrema importância para os processos industriais, pois seu emprego permite resultados mais confiáveis, com economia de tempo e dinheiro, parâmetros fundamentais em tempos de concorrência acirrada. Como exemplo, McConnell e McPherson (1997) relatam o sucesso na aplicação desta técnica, a qual permitiu a redução do índice de defeitos em um determinado processo de soldagem, de 47% para 0,074%, com a realização de apenas 18 testes (tratamentos) contra mais de 2000 que seriam necessários, caso essa técnica não fosse aplicada.

Desta maneira, os conceitos de Projeto e Análise de Experimentos, em especial, o planejamento fatorial em dois níveis, foram aplicados ao processo MIG pulsado, com o intuito de se obter mais informações a respeito do comportamento dos parâmetros de pulso sobre a qualidade e produtividade dos cordões de solda, procurando com isto, ampliar a faixa de conhecimentos que envolvem o assunto. Para isto, utilizou-se o *software* comercial *Statgraphics* para o cálculo dos efeitos dos fatores e suas interações, bem como o erro experimental, além da análise gráfica dos resultados. Ainda, de forma validar os resultados obtidos, além de elucidar a sistemática de cálculos adotada por esses *softwares* comerciais, utilizou-se, através de planilhas elaboradas pelo Microsoft Excel, os algoritmos de Neto e

Yates, os quais são frequentemente utilizados na elucidação de um número substancial de problemas industriais. Demonstra-se que, apesar da diferença na sistemática de cálculos entre esses métodos, as repostas obtidas são praticamente as mesmas para todos eles.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem por objetivo a análise dos efeitos dos parâmetros de pulso sobre a qualidade e a produtividade dos cordões de solda, em chapa de aço, pelo processo MIG pulsado, utilizando como ferramenta o Projeto e Análise de Experimentos.

No caso da qualidade, optou-se medi-la através das características geométricas do cordão de solda, representadas pela penetração (p), diluição (D) e pelo índice de convexidade (IC). A produtividade foi avaliada pelo índice de respingos (IR) gerados durante o processo.

Para este objetivo ser alcançado, houve a necessidade de se estabelecer alguns objetivos secundários, tais como:

- Definição dos fatores e repostas a serem analisados.
- Determinação da maneira de se medir as repostas do sistema.
- Definição dos métodos de análise.
- Determinação do banco de ensaios bem como aferição dos instrumentos utilizados.
- Realização de ensaios preliminares com o intuito de familiarização com o processo e determinação dos níveis, inferior e superior, de cada fator.
- Realização dos ensaios definitivos utilizando o Planejamento de Experimentos.
- Análise dos resultados obtidos através de um software comercial e acompanhamento dos resultados através dos algoritmos de Neto e Yates.

1.3. Justificativa da escolha do tema

Diversos são os motivos que justificam a escolha do tema estudado. O item 1.1. mostra a relevância do assunto e pode, preliminarmente, ser considerado como o principal fator que justifica essa escolha. Além disso, outros fatores em muito influenciaram nessa escolha, entre eles tem-se:

- Expressivo interesse industrial, em função do pouco conhecimento que envolve o assunto.
- Banco de ensaios adequado, através de fontes digitalizadas, possibilitando controle preciso dos parâmetros o que facilita, de maneira significativa, a coleta e análise dos dados, além de garantir a repetibilidade dos ensaios.

- Pouca informação encontrada em artigos e publicações referente ao emprego do Planejamento de Experimentos como ferramenta de estudo para o processo MIG pulsado.

1.4. Contribuições

A principal contribuição deste trabalho se refere à análise da influência dos parâmetros de pulso na soldagem de chapas de aço, objetivando, desta forma, um maior domínio do processo por parte das pessoas envolvidas. A intenção é que essa análise seja de grande valia no aprimoramento deste processo, no que se refere às características referentes à qualidade e produtividade do mesmo. Na revisão bibliográfica, foram encontrados poucos artigos referenciando a utilização da técnica do Planejamento de Experimentos associado ao estudo da corrente pulsada, dentre eles, Lambert (1989), du Pin *et al* (1998) e Subramanian *et al* (1998), os quais serão abordados oportunamente.

Uma outra contribuição é mostrar uma aplicação prática da técnica Projeto e Análise de Experimentos, através de softwares comerciais e dos algoritmos de Neto e Yates, demonstrando, assim, o potencial analítico desta ferramenta e, com isso, motivar outros experimentadores à dela se utilizarem.

1.5. Organização do trabalho

De maneira a facilitar a compreensão, o trabalho foi estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1 - Introdução: Apresenta a importância do tema, o objetivo que se pretende almejar, as justificativas da escolha do tema, as contribuições e, por fim, a organização do trabalho.
- Capítulo 2 - Aborda o processo de soldagem MIG, em especial, o MIG pulsado, através de um conjunto de informações dispersas, encontradas em livros e artigos pertinentes ao assunto.
- Capítulo 3 - Mostra a técnica Projeto e Análise de experimentos, desde a coleta até a análise dos dados através da utilização do software *Statgraphics*. São mostradas aplicações dos métodos de Neto e Yates, onde se confrontam os resultados obtidos para ambas as metodologias, com o intuito abordar a sistemática de cálculos efetuadas pelos *softwares* comerciais, além de garantir a precisão dos cálculos efetuados.

- Capítulo 4 - Montagem experimental: Apresenta o procedimento experimental, abordando informações a respeito do banco de ensaios, dos equipamentos e consumíveis utilizados e dos níveis adotados para cada fator, além da montagem experimental utilizada.
- Capítulo 5 - Análises e Resultados: Apresenta os dados obtidos das experimentações, bem como a análise dos mesmos, o cálculo do erro experimental e o teste de significância dos efeitos, realizados mediante utilização do *software* comercial *Statgraphics*.
- Capítulo 6 - Retrata as conclusões, bem como as referências para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

PROCESSO DE SOLDAGEM MIG PULSADO

2.1. O Processo MIG/MAG

O processo de soldagem **GMAW** - *Gas Metal Arc Welding* ou MIG/MAG como também é conhecido, tem como princípio de funcionamento a utilização de um arco elétrico para aquecer a superfície a ser soldada e um eletrodo metálico alimentado continuamente. O calor gerado pelo arco funde a ponta do eletrodo e a superfície do metal de base para formar a poça de fusão, a qual é protegida dos efeitos nocivos do ar atmosférico por intermédio de um gás de proteção proveniente de uma fonte externa.

Sua concepção se deu no início da década de 50 por um grupo de pesquisadores da Airco, localizada em New Jersey, EUA. O mérito pela patente foi de três cientistas: Muller, Gibson e Anderson. A visão do novo processo iniciou-se com a compreensão de que a polaridade, a velocidade de alimentação do eletrodo e a densidade de corrente eram fatores críticos na forma como as transferências metálicas ocorriam. O objetivo principal era a criação de um processo que combinasse a suavidade de arco e ausência quase que total de respingos, inerentes ao processo TIG, com a facilidade de uso do processo com eletrodos revestidos (Sullivan, 1998).

Phillips (1968) relata que, em sua fase inicial, era usual a utilização de correntes com altas densidades e eletrodos com pequenos diâmetros, aproximadamente 0,8-1,2 milímetros, além da utilização de um gás inerte como proteção. Devido à esse fato, o processo ficou preliminarmente intitulado de **MIG** - *Metal Inert Gas*. Com sua evolução, um gás ativo também passou a ser utilizado, quando o processo passou a ser denominado de **MAG** - *Metal Active Gas*. Dessa forma, genericamente convencionou-se chamar o processo de MIG/MAG. Além disso, foi introduzida a prática da união de peças utilizando-se baixas densidades de corrente, com a possibilidade de se utilizar correntes pulsadas e ainda utilizar uma mistura de gases.

O MIG é visto atualmente como um processo em crescente adoção pelas empresas, decorrente de sua eficiência e baixo custo. Durante os últimos anos, o processo tem-se desenvolvido rapidamente como um eficiente método de manufatura para a produção de vários tipos de estruturas soldadas. Na Europa, sua parcela de mercado foi de aproximadamente 30% em 1974. Esta proporção aumentou para mais de 50% em 1984. Durante esse mesmo período, a parcela de mercado do processo com eletrodo revestido caiu

de 60% para abaixo de 40%. Esta mudança ocorreu simultaneamente com a redução da participação da Europa ocidental, no mercado de soldagem, de 10 à 15% em relação à utilização dos métodos de soldagem mais usuais (Stenbacka & Persson, 1989).

O processo MIG/MAG continuamente vem aumentando sua parcela no mercado de soldagem. Esse crescimento pode ser atribuído à vários fatores, tais como, versatilidade, confiabilidade, impacto econômico favorável em relação à outros processos e a excelente qualidade obtida dos cordões de solda (Lyttle, 1983).

Além dos aspectos citados anteriormente, o processo MIG/MAG ainda apresenta outras vantagens, tais como: problemas reduzidos de distorções e tensões residuais, possibilidade de controlar a penetração e diluição durante a soldagem e taxa de deposição elevada, devido às altas densidades de corrente na ponta do arame (Wainer *et al*, 1992). Stenbacka & Persson (1989) ainda acrescentam a presença de maiores ciclos ativos (Duty Cycles), ou seja, tempo de soldagem/tempo de fabricação, em relação ao eletrodo revestido, além da possibilidade de utilização de robôs no processo.

Lyttle (1983) complementa essas informações, acrescentando alta produtividade, capacidade de soldagem em todas as posições, ampla área de aplicação, facilidade de uso e baixo custo como características inerentes ao processo. Em relação à alta produtividade, é importante destacar que normalmente 92 à 98% do material consumido se torna metal depositado, dependendo do tipo de proteção utilizado e de regulagens de corrente e tensão. Essa eficiência de deposição é muito favorável quando comparada aos processos com eletrodo revestido e eletrodo tubular. No caso dos eletrodos tubulares, 82 à 90% de eficiência é obtida, enquanto somente 60 à 70% de cada eletrodo revestido se torna metal depositado.

Devido à sua versatilidade, a operação com o processo MIG/MAG pode ser realizada tanto nos modos semi automático, com a tocha de soldagem sendo operada manualmente pelo soldador, quanto no automático. Utilizando uma enorme gama de materiais ferrosos e não ferrosos, tais como aços carbono, aços liga, aços inoxidáveis, alumínio, cobre, bronze, titânio e finalmente, ligas de níquel e magnésio, é possível soldar em todas as posições. É empregado em processos de fabricação, em manutenção de equipamentos e peças metálicas, na recuperação de peças desgastadas e no recobrimento de superfícies metálicas. Graig (1987) complementa, dizendo que materiais de alta liga e materiais sensíveis ao calor, os quais eram considerados difíceis, ou até mesmo impossíveis de serem soldados, têm sido unidos com êxito ao se utilizar este processo, apesar de sua maior complexidade.

Zhu *et al* (1997) enfocam sua complexidade, mostrando ser o MIG/MAG um dos mais importantes processos industriais. Contudo, devido à sua complexa natureza, a qual envolve a

matéria em todos os quatro estados: sólido, líquido, gasoso e plasmático, várias características inerentes à ele, ainda merecem ser esclarecidas. Sullivan (1998) finalmente relata que este processo tem sido reconhecido por vários especialistas como a tecnologia que marcou o início da soldagem moderna, sendo, hoje em dia, utilizado pelas principais indústrias do planeta. Segundo Davies (1996), o MIG/MAG está substituindo os métodos mais tradicionais de soldagem, ou seja, o processo oxi-acetileno e o eletrodo revestido, por propiciar, em termos metalúrgicos, baixa taxa de calor fornecida à peça, ZTAs - Zonas Termicamente Afetadas - mais estreitas, além de menor custo operacional.

A respeito destas características, o processo MIG/MAG apresenta algumas desvantagens relativas aos outros processos de soldagem por arco elétrico, entre as quais pode-se destacar a maior velocidade de resfriamento por não haver escória, o que aumenta a possibilidade de ocorrência de trincas, principalmente nos casos de aços temperáveis. Além disso, há uma dificuldade de operação em locais de difícil acesso, pois o bocal da pistola precisa ficar próximo do metal a ser soldado. Nota-se também, um aumento de projeções de gotas de metal líquido durante a soldagem, associado a uma grande emissão de raios ultravioletas. Por sua vez os equipamentos de soldagem são mais caros e complexos que o do processo com eletrodo revestido.

2.2. Variáveis envolvidas no processo MIG/MAG

Diversas variáveis influenciam nas características do cordão de solda, dentre elas destacam-se a corrente de soldagem, a tensão, a velocidade de soldagem, o comprimento e diâmetro do eletrodo, a proteção gasosa e a velocidade de alimentação do arame.

A corrente de soldagem tem influência direta na taxa de deposição, no modo de transferência metálica e nas características geométricas do cordão. Sendo assim, sua escolha correta vai depender da espessura das peças a serem unidas, do diâmetro do eletrodo e das características desejadas dos cordões de solda. Além disso, uma corrente de baixa intensidade pode acarretar pouca estabilidade ao arco elétrico.

Mantendo-se constantes as variáveis do processo e aumentando-se o valor da corrente de soldagem, percebe-se a ocorrência de aumento na penetração da solda, na taxa de deposição do metal de adição e no diâmetro da gota de solda até o ponto de transição. Phillips (1968) relata que a penetração é particularmente pequena com uma corrente situada abaixo do nível de transição entre as transferências globular/*spray*. O nível de corrente também é responsável pelo tipo de transferência metálica. Assim, baixas intensidades são características da transferência por curto-circuito. À medida que a corrente aumenta, o volume da gota

também aumenta, caracterizando a transferência globular, até o instante em que a corrente atinge o nível de transição globular/*spray*. Nesse instante, pequenas gotículas passam a ser projetadas para a poça de fusão sob a forma de névoa ou pulverização, caracterizando assim, a transferência por *spray*.

Uma outra consideração importante, com relação à corrente de soldagem, é o fato de se poder manipular a corrente através de pulsos, atingindo-se com isto, correntes médias inferiores à corrente de transição, fato esse que permite a soldagem por *spray* em chapas finas e em posições não planas.

A tensão é considerada como um dos parâmetros mais influentes neste processo, por afetar tanto o modo de transferência metálica quanto a geometria do cordão de solda. A tensão de soldagem e o comprimento do arco estão diretamente relacionados sob o mesmo aspecto, ou seja, baixas tensões tenderão a produzir baixos comprimentos de arco e vice-versa. O comprimento do arco é uma variável independente porém, a tensão no arco não, pois, além de depender desse parâmetro, sofre também a influência de outras variáveis, como a composição e o diâmetro do eletrodo, o tipo de gás de proteção utilizado e as técnicas de soldagem.

Wainer (1992) sustenta que a potência do arco, dada pelo produto entre sua tensão e corrente, é responsável pela largura do cordão de solda. Assim, para uma corrente constante, aumentando-se a tensão, aumenta-se também a largura deste, e vice versa. Ainda, conforme o valor da tensão utilizada, determinados tipos de defeitos podem ser introduzidos. Desta forma, valores elevados podem gerar porosidades, excesso de respingos e mordedura. Valores baixos favorecem o aparecimento de sobreposições e instabilidades no arco.

A velocidade de soldagem, definida como a taxa de deslocamento do arco ao longo da junta, influencia a energia de soldagem, ou seja, a quantidade de calor cedida à peça. Com todas as variáveis do processo mantidas constantes, tem-se penetração máxima sob condições de velocidades intermediárias. Velocidades elevadas resultam em menores penetração, reforço e largura do cordão. Podem ainda ocorrer redução da concavidade da solda, favorecendo o aparecimento de mordeduras e problemas metalúrgicos, decorrentes da elevada energia de soldagem. Phillips (1968) informa que a penetração e o tamanho da gota de solda são inversamente proporcionais à velocidade de soldagem. A penetração pode ser reduzida em velocidades de soldagem muito baixas. Uma velocidade de soldagem maior do que um certo valor, dependente do metal de base e do ajuste das outras condições de soldagem, resulta em mordeduras, podendo ainda ocorrer descontinuidades no cordão.

Um fator importante na determinação da velocidade de soldagem ideal se refere aos gases de proteção. Para ilustrar tal influência, a **Figura 2.1** mostra velocidades ótimas para



alguns gases utilizados no processo, de acordo com experimentos realizados por Stenbacka & Persson (1989), em testes realizados com chapas de aço temperado de 6 mm de espessura, com arames de 1mm de diâmetro e velocidade de alimentação de 12 m/min, soldagem de filete na posição horizontal, com comprimento do eletrodo (*stick-out*) de 17 mm.

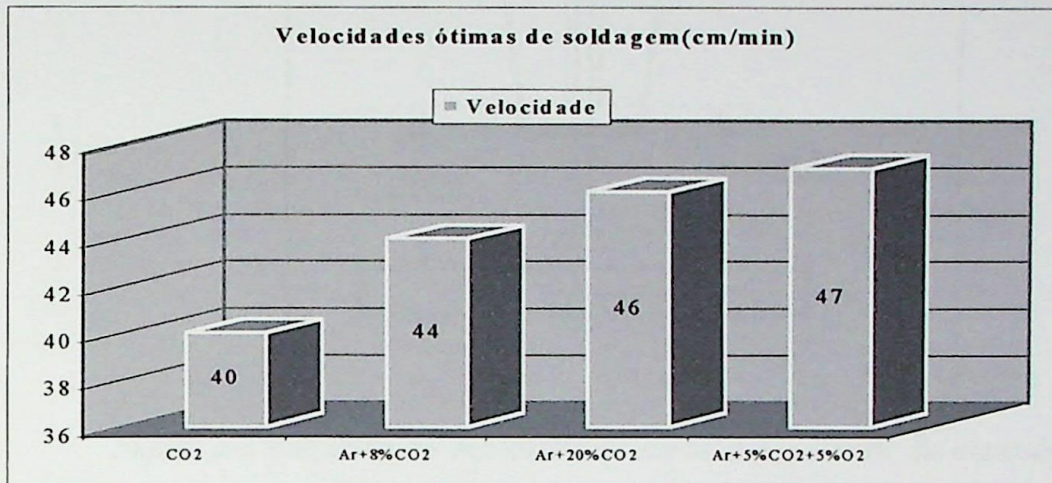


Figura 2.1. Velocidades ótimas de soldagem para diferentes gases utilizados no processo MIG/MAG. Fonte: Stenbacka & Persson (1989).

O comprimento do eletrodo, **Figura 2.2**, é definido como a distância entre a ponta do tubo de contato e o final do eletrodo, ou seja, a soma das distâncias da ponta do tubo de contato à ponta da tocha, acrescida da distância da ponta da tocha até a ponta do eletrodo. O comprimento do arco, no entanto, é caracterizado pela distância entre a ponta do eletrodo e a peça a ser soldada.

Phillips (1968) informa que é possível controlar a largura e a penetração do cordão através da regulagem do comprimento do arco, sendo que, um arco mais curto tende a ser mais penetrante do que um mais longo, porém, o nível de alteração no comprimento de arco é limitado, pois, comprimentos menores que 5 mm ou maiores que 8mm produzem mais respingos, são mais instáveis e resultam em porosidades, fato esse reforçado por Stenbacka & Persson (1989). O efeito de um arco mais longo tem como consequência a redução, ou, até mesmo, interrupção da proteção gasosa, o que pode causar oxidação, porosidades e aumento na produção de respingos.

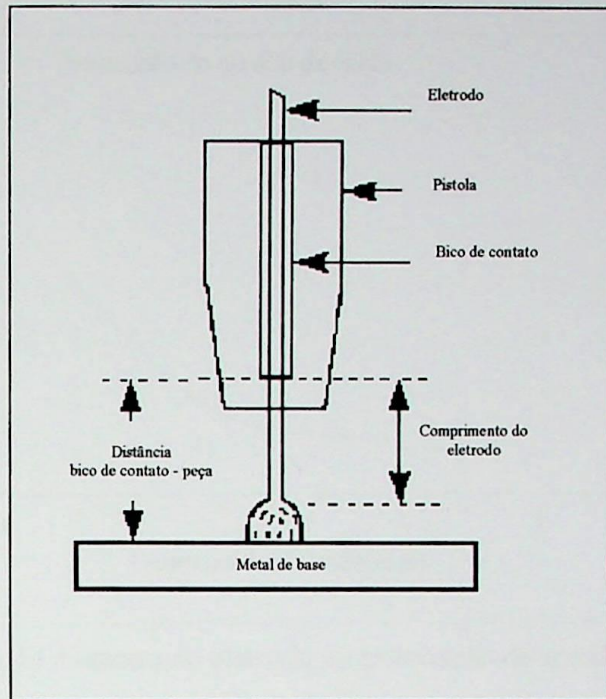


Figura 2.2 Esquema do comprimento de arco e extensão do eletrodo.

O aumento do comprimento do eletrodo ou "*stick-out*" acarreta, por efeito Joule, aumento na resistência elétrica, aumentando conseqüentemente a temperatura e a taxa de fusão do eletrodo, quando mantidas constantes as outras variáveis. Isso pode ser utilizado como condição de aumentar a taxa de deposição dentro de certos limites. Todavia, o aumento da resistência elétrica faz com que a tensão caia, sendo, dessa forma, compensada com um acréscimo de corrente de soldagem, o que aumenta a taxa de fusão do eletrodo, permitindo redução do comprimento do eletrodo. Decorrente disso, o cordão de solda tende a ficar estreito e com uma grande cratera.

A influência do diâmetro do eletrodo tem relação direta com a configuração do cordão de solda. Aumentando-se o diâmetro do arame, maior será a corrente necessária para sua fusão. Contudo, cordões mais largos e profundos serão produzidos nesta situação, com maior quantidade de metal de adição sendo depositada. Existe também influência do diâmetro na penetração do cordão de solda. Como mostrado na **Figura 2.3**, para as condições de corrente=300(A), tensão de soldagem=25(V), velocidade de soldagem=38(cm/min) e espessura do metal de base=8(mm), a penetração reduz significativamente com o diâmetro do eletrodo (Phillips, 1968). Ainda, para um mesmo nível de corrente, o arco se torna mais penetrante à medida que o diâmetro do eletrodo decresce. Com a utilização das posições vertical e sobre-cabeça, menores diâmetros de arame, inferiores à 1,2 mm, são utilizados com baixas correntes de soldagem.

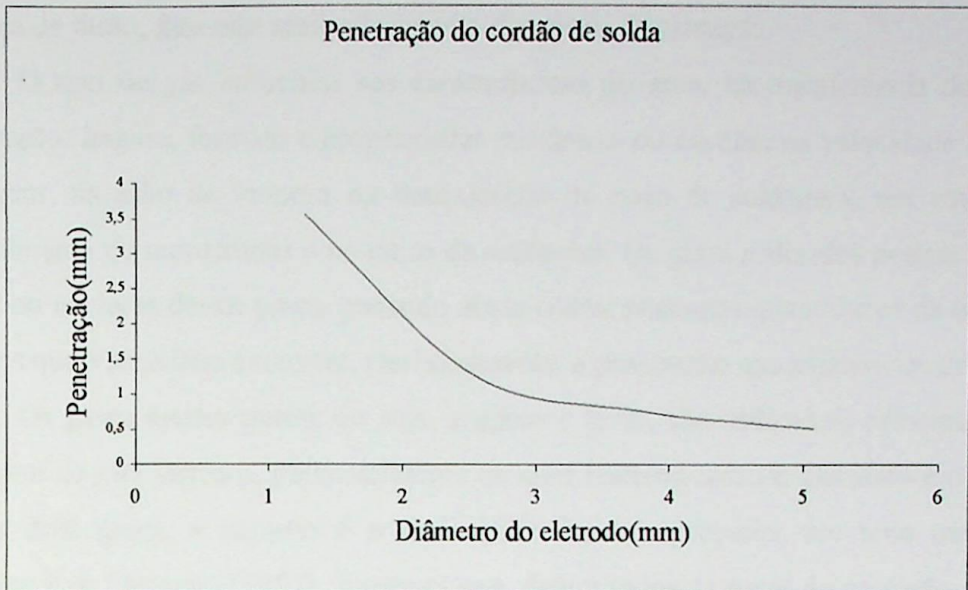


Figura 2.3. Influência do diâmetro do eletrodo na penetração do cordão de solda.

Fonte: Phillips (1968).

Existe uma faixa de corrente apropriada para cada diâmetro de eletrodo, de maneira a permitir boas condições de operação. Cada diâmetro é escolhido em função da espessura do metal de base, da posição de soldagem, do tamanho da poça de fusão e da quantidade de energia à ser cedida para a peça.

Wainer (1992) relata que, na utilização de dois eletrodos de diâmetros diferentes, submetidos às mesmas condições de soldagem, o de maior diâmetro dará maior taxa de deposição e penetração. Eletrodos de grandes diâmetros originam cordões mais longos quando comparados com os de menor diâmetro. A espessura do metal de base também influencia na escolha do diâmetro do eletrodo. Dessa forma, quanto mais espesso for o material de base maior deverá ser o diâmetro do eletrodo. Weber (1982) informa que a introdução da corrente pulsada permitiu a utilização de eletrodos de grandes diâmetros com menor taxa de calor. Além disso, para fornecer deposições mais rápidas de metal, eletrodos de grandes diâmetros minimizam problemas relativos à alimentação de arame, especialmente na soldagem do alumínio.

O tipo de gás protetor, bem como sua vazão, são responsáveis diretos por vários fenômenos observados nos cordões de solda. A finalidade primeira dos gases é proteger a região soldada dos efeitos dos gases atmosféricos, os quais são compostos principalmente por oxigênio, nitrogênio e hidrogênio. Estes componentes podem acarretar a formação de óxidos e, em menores proporções, nitretos. As conseqüências desse fato podem ser expressas por soldas deficientes com retenção de escória, porosidades e fragilizações do cordão. Portanto,

precauções devem ser tomadas com o intuito de excluir esses gases nocivos das proximidades da poça de fusão, fato esse realizado através dos gases de proteção.

O tipo de gás influencia nas características do arco, na transferência do metal, na penetração, largura, formato e propriedades mecânicas do cordão, na velocidade máxima de soldagem, na ação de limpeza ou desoxidação da poça de soldagem, nas tendências ao aparecimento de mordeduras e no custo da soldagem. Os gases utilizados podem ser inertes, ativos ou misturas destes gases, podendo ainda conter pequenas quantidades de oxigênio ou CO_2 , os quais permitem aumentar, paulatinamente, a penetração nas adjacências do cordão.

Os gases inertes puros, ou seja, argônio e hélio, são utilizados, principalmente, na soldagem de não ferrosos, particularmente os mais reativos como o alumínio e o magnésio. Destes dois gases, o argônio é o mais utilizado, por propiciar um arco mais estável. Dillenbeck & Castagno (1987) mostram que, dentre todos os gases de proteção, o argônio, além de ser o mais disponível no mercado, tem demonstrado ser um excelente gás devido ao seu baixo potencial de ionização. Por liberar elétrons muito facilmente, o arco tende a se tornar mais estável durante a soldagem, reduzindo, assim, a quantidade de respingos. Entretanto, esse baixo potencial de ionização também oferece algumas desvantagens quando são utilizadas chapas de aço, por reduzir a tensão, criando desta maneira, baixa energia no arco e, portanto, menores níveis de penetração e aparecimento de mordeduras. Lowery (1977), informa que, para soldagem de aços de baixa liga ou não ligados, emprega-se argônio puro por se tratar de um gás inerte pois, devido à sua baixa energia de ionização e condutividade térmica, este propicia um arco estável de baixa queda de tensão que facilmente se estabelece.

Na mistura de gases inertes, ou seja, 50 à 70% de hélio, ocorre um aumento na tensão de soldagem para um mesmo comprimento de arco, quando comparado com a utilização de argônio puro. Devido à esse fato, essa mistura passa a ser muito utilizada para soldar alumínio, magnésio e cobre pois, o alto calor de fusão, devido à alta tensão, reduz os efeitos da alta condutividade térmica desses metais.

Na soldagem de ferrosos, a adição de pequenas quantidades de gases ativos, CO_2 e O_2 ao argônio melhora, sensivelmente, a estabilidade do arco e a transferência metálica. Para aços carbono e de baixa liga, o custo da soldagem pode ser reduzido com o uso do CO_2 . Phillips (1968) mostra que a quantidade adicionada de O_2 deverá se situar na faixa entre 1-5% e a de CO_2 entre 3-25%, sendo essas porcentagens dependentes da junta soldada, da composição do metal base e da técnica de soldagem. Adições de CO_2 ao argônio, normalmente não devem exceder 10% quando se deseja realizar a transferência no modo

spray. Essas misturas permitem a soldagem com melhor estabilidade de arco e isenção de mordeduras no cordão.

De um modo geral, na mistura de hélio e CO₂, devido à sua baixa condutividade térmica, obtém-se maiores quedas de tensão e maior quantidade de calor gerado no arco, para mesmas corrente e comprimento de arco, em relação ao argônio. Misturas contendo estes gases são geralmente utilizadas na soldagem de chapas mais espessas.

Adições de CO₂ ao Argônio superiores à 25%, elevam a corrente mínima de transição, aumentando, destarte, as perdas por respingos, a profundidade da penetração e diminuindo a estabilidade do arco. Argônio e CO₂ são, principalmente, utilizados na transferência por curto-circuito, podendo ser utilizados na transferência por *spray*, em especial, com a utilização de corrente pulsada. De acordo com Davies (1996), a adição de CO₂ ao argônio, para a soldagem de aços, melhora a ação de umedecimento, reduz a tensão superficial e faz com que a poça se torne mais fluídica. As misturas Ar+5%CO₂ e Ar+20%CO₂ resultam em excelentes resultados com as transferências globular e *spray*. Contudo, a mistura com 20% de CO₂ fornece resultados insatisfatórios com o modo pulsado enquanto que, a mistura com 5% produz resultados muito melhores. Stenbacka and Persson (1989) alertam que, se uma mistura de Ar+CO₂ for utilizada, o conteúdo de CO₂ não deve exceder 15% por aumentar a quantidade de respingos. Isto, porém, também aumenta a penetração nas adjacências do cordão de solda. Essers and Gompel (1984) relatam que, testes realizados com adições de 10 e 15% de CO₂ mostraram que o destacamento de pequenas gotas ainda é alcançado com tais misturas. Porém, a corrente de pulso deverá ser ajustada para valores superiores àqueles utilizados com baixas proporções de CO₂. Lowery (1977) informa que, para aços não ligados e de baixa liga, o Ar+20%CO₂ é empregado, devido à sua baixa condutibilidade térmica, pequena taxa de ionização, baixa queda de tensão, fácil ignição e boa estabilidade, assim como fácil transferência de material, sem perdas por respingos. O aspecto do cordão fica melhor do que com o argônio puro, devido à maior penetração, não necessitando, com isso, de acabamento. Pode-se empregar altas velocidades em espessuras de até 10 mm, assim como utilizar os processos *spray* e curto-circuito. Wainer (1992) relatam que a adição de gases ativos ao argônio visa melhorar a estabilidade do arco, mudar o contorno do cordão na seção transversal, diminuir a ocorrência de respingos e mordeduras e aumentar a penetração.

Nixon and Norrish (1992) mostram que, quanto maior a adição de CO₂ ao argônio, maior será a corrente de transição globular/*spray*, como mostra a **Tabela 2.1**.

O gás ativo, geralmente utilizado neste processo é o CO₂, o qual pode ser utilizado para a soldagem de aços carbono e de baixa liga. Altas velocidades de soldagem, boa

penetração e baixo custo são geralmente as características que fazem com que a utilização não seja vultuosa. Pode-se fazer uso tanto da transferência por curto-circuito quanto da globular, à qual gera grandes quantidades de respingos. Contudo, suas propriedades mecânicas são afetadas devido a natureza oxidante do arco.

ϕ Arame(mm)	Gás de proteção		
	Ar+5%CO ₂	Ar+15%CO ₂	Ar+20%CO ₂
0,8	140	155	160
1,0	180	200	200
1,2	240	260	275
1,6	280	280	280

Tabela 2.1 Corrente de transição globular/*spray* para arames de aço (A).

Fonte: Nixon & Norrish (1992).

No que se refere à vazão do gás protetor, a mesma deve proporcionar boas condições de proteção. Normalmente, com uma maior corrente de soldagem, uma maior área da poça de fusão é obtida, portanto será requerida uma maior área a proteger, exigindo-se assim, uma maior vazão de gás. Vazões reduzidas podem acarretar o aparecimento de porosidades e outros problemas associados à falta de proteção. Vazões elevadas causam depressões na poça de fusão, tornando o cordão irregular, além de aumentar, desnecessariamente, o custo operacional.

A velocidade de alimentação governa o fluxo de corrente e, portanto, é uma variável importante no processo. Wainer (1992) mostra que existe uma relação direta entre a velocidade do arame e a corrente de soldagem e uma relação inversa destas com o comprimento de arco. Destarte, sua correta utilização se faz necessária de forma a garantir cordões com boas características geométricas e ausentes de defeitos. Altas velocidades de alimentação resultam em altas correntes de soldagem, o que pode acarretar o aparecimento de mordeduras e deformações no metal de base. Baixas velocidades acarretam falta de penetração, falta de fusão entre passes e um formato irregular dos cordões de solda.

De uma forma geral, a **Tabela 2.2** estabelece um quadro esquemático com a influência dos principais parâmetros de soldagem na geometria do cordão de solda, sugerindo as principais modificações necessárias para se atingir determinados objetivos específicos.

Variáveis a mudar	Mudanças desejáveis							
	Penetração		Taxa deposição		Tamanho cordão		Largura cordão	
	Aumento	Redução	Aumento	Redução	Aumento	Redução	Aumento	Redução
I e va	↑	↓	↑	↓	↑	↓	o	o
V	□	□	o	o	o	o	↑	↓
Vs	□	□	o	o	↓	↑	↓	↑
L	↓	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↓
φ	↓	↑	↓	↑	o	o	o	o
%CO ₂	↑	↓	o	o	o	o	↑	↓

Obs.: ↑ - Aumento ↓ - Diminuição □ - Nenhum efeito o - pouco efeito
 I - corrente de soldagem va - velocidade de alimentação do arame
 V - tensão vs - velocidade de soldagem
 L - comprimento do eletrodo φ - diâmetro do eletrodo

Tabela 2.2: Influência dos parâmetros na soldagem MIG/MAG.(Adaptado de The American Welder (2000))

2.3. Tipos de transferências metálicas

Dentre as características fundamentais de operacionalidade e eficiência do processo MIG/MAG destacam-se as formas como as transferências do material de adição ocorrem. É reconhecido que três formas de transferências metálicas basicamente podem ocorrer no processo, dependendo da forma de ajuste das variáveis operacionais e do modo como as forças atuantes no processo interagem. Estas formas de transferências podem ser:

- Transferência por curto-circuito: quando uma certa quantidade do eletrodo se acumula em sua extremidade, na forma de uma grande gota, a qual é transferida no momento do toque no metal-base (**Figura 2.4a**);
- Transferência globular: quando uma certa quantidade do metal de adição se acumula na ponta do eletrodo, formando uma gota que é transferida para a peça ao se atingir um certo volume (**Figura 2.4b**);
- Transferência por “*spray*”: quando pequenas quantidades do eletrodo são transferidas na forma de uma chuva de pequenas gotículas (**Figura 2.4c**);

Cada um destes tipos de transferência apresenta formas de onda características de tensão e corrente que podem ser monitoradas a partir da fonte de energia, através de um sistema de aquisição de dados. A partir destas formas de onda, pode-se analisar as relações existentes entre os parâmetros de soldagem, os tipos de transferências que ocorrem e as características finais dos elementos soldados. Na **Figura 2.4** apresenta-se também, a forma

mais comum dos sinais de tensão e corrente pertinente ao tipo de transferência que está acontecendo no momento.

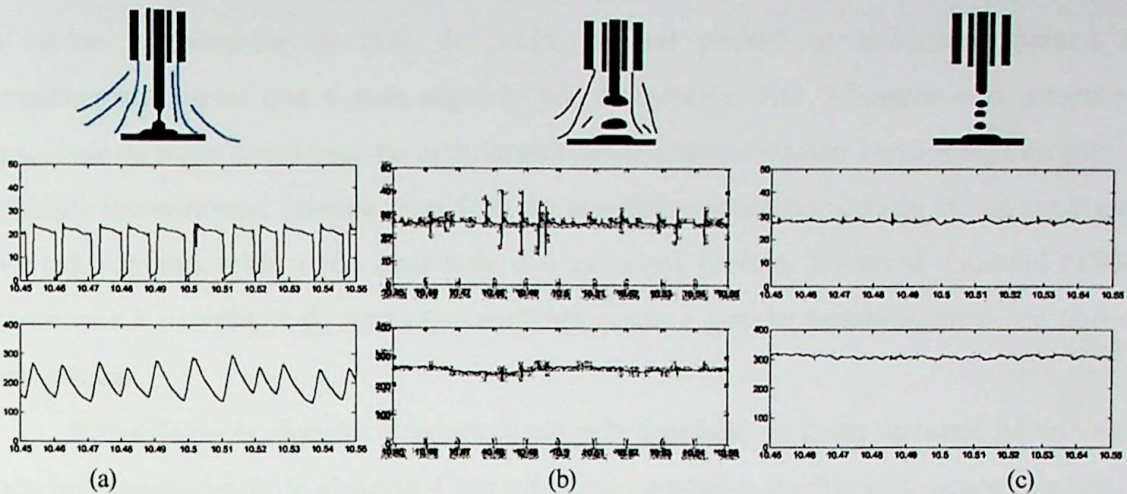


Figura 2.4 : Tipos de transferências entre o eletrodo e o metal de base e seus sinais de tensão e corrente característicos: (a) transferência por curto-circuito, (b) transferência globular e (c) transferência por “*spray*” (Adolfsson, 1998).

A natureza das transferências metálicas tem importantes efeitos práticos na soldagem de materiais. Segundo Subramanian *et al* (1998), elas afetam a habilidade de soldagem em várias posições, o grau de penetração, a estabilidade da poça de solda e a quantidade de material de deposição perdida através de respingos.

Stenbacka & Persson (1989) informam que as características da transferência são bastante dependentes da composição do gás de proteção, da composição química do metal de adição e dos parâmetros elétricos.

O tipo de transferência irá depender dos seguintes parâmetros elétricos do arco: tipo e valor da corrente, tensão, polaridade, diâmetro e composição do metal de adição, tipo e composição do meio de proteção, comprimento energizado do eletrodo e pressão atmosférica.

Na transferência por curto-circuito, a soldagem ocorre com um pequeno comprimento de arco e conseqüentemente com uma baixa tensão. A taxa de fusão do arame normalmente é inferior à sua velocidade de alimentação. Neste tipo de transferência, o arco pode ser mantido relativamente constante, caso os parâmetros ótimos sejam selecionados e os gases de proteção adequadamente utilizados. Esta técnica de soldagem, segundo Lyttle (1983), é utilizada para unir materiais finos em todas as posições, materiais espessos nas posições vertical e sobre-cabeça e no preenchimento de grandes espaços.

Craig (1987) mostra que, utilizando-se diâmetros de arame de 0,6 à 1,2mm, a faixa de corrente para a ocorrência da transferência por curto-circuito se situa entre 30 e 200 A.

Dependendo da corrente utilizada, a frequência de transferência das gotas pode ser de 20 a 200 vezes por segundo.

Contudo, Graig (1987) relata que o principal aspecto negativo desse método se situa no rápido resfriamento da gota de solda, a qual poderá se solidificar, parcial ou completamente, antes que a gota seguinte seja transferida. Isto influencia não somente a capacidade de fusão como também permite que contaminantes fiquem aprisionados na gota. A qualidade inconsistente, oriunda desse fato, faz com que o processo não seja utilizado em uma variedade de aplicações onde qualidade é o principal critério. Essers & Gompel (1984) alegam que a ocorrência de respingos continua sendo a grande desvantagem desse tipo de transferência.

A transferência globular é caracterizada pela formação de gotas de metal líquido com diâmetros superiores ao do eletrodo. Com o aumento gradativo do diâmetro da gota, aumenta-se, conseqüentemente, seu peso até o ponto onde a força gravitacional passa a superar a força devido à tensão superficial, responsável pelo aprisionamento dessa gota. Neste momento, a gota se desprende do eletrodo vindo a se depositar na poça de solda.

As correntes e tensões utilizadas se situam acima daquelas utilizadas na transferência por curto-circuito. Este tipo de transferência é típico de ambientes que utilizam CO₂ ou argônio com alto percentual de CO₂ como gases de proteção. Com a utilização de argônio, observam-se baixas correntes e altas tensões e comprimentos de arco. Já na soldagem de aços, utilizando gases à base de CO₂, a transferência globular acontece, mesmo com valores elevados de corrente.

Contudo, Lyttle (1983) informa que devido à natureza ocasional dessa transferência, o nível de respingos pode ser alto, podendo ser proveniente tanto do eletrodo quanto da poça de fusão. Wainer (1992) menciona que esse tipo de transferência pode gerar falta de penetração e fusão, além de reforço excessivo do cordão de solda. Finalmente, Collard (1988) relata que, devido à grande quantidade de respingos, sua utilização se torna limitada somente para a soldagem na posição plana.

À medida em que se aumenta a corrente de soldagem, ocorre simultaneamente um crescimento no diâmetro das gotas até se atingir um determinado patamar de corrente, o qual denomina-se *corrente de transição*, I_t , onde ocorre abruptamente uma redução no tamanho das gotas e um aumento da frequência de transferência, ou seja, velocidades extremamente altas, ao mesmo tempo que o arco, antes confinado à porção inferior da gota, passa a envolvê-la completamente. Nestas condições, a transferência não é mais controlada pela gravidade, com as gotas passando a serem transferidas em direção à poça de fusão, independentemente

da posição de soldagem, o que passa a caracterizar a transferência por *spray*. Collard (1988) e Essers & Gompel (1984) relatam que o gás de proteção utilizado, o comprimento do eletrodo e a tensão do arco influenciam significativamente a corrente de transição.

A transferência por *spray* ocorre de maneira muito estável, com mínimas perturbações ao arco e com pouca produção de respingos. O grande inconveniente são as altas correntes utilizadas, as quais dificultam e até mesmo inviabilizam a união de chapas finas. A força responsável pela transferência é de origem magnética, induzida pela passagem da própria corrente através da gota de metal fundido. Collard (1988) expõe que este processo fornece o mais estável e desejado modo de transferência. Entretanto, altas densidades de correntes tornam-na impraticável em certas situações. Soldagem nas posições vertical e sobre-cabeça requerem reduzidas taxas de calor, uma vez que o metal fundido não terá tempo suficiente para se resfriar, podendo assim, fluir para fora da junta soldada. Certas ligas também requerem controle preciso sobre o fluxo de calor durante a soldagem, de maneira a assegurar boas qualidades metalúrgicas. Phillips (1968) mostra que a concentração de energia na região central do arco e a energia cinética das gotas metálicas incidindo na poça líquida produzem profundas penetrações de solda. Contudo, Graig (1987) retrata que as principais limitações do modo de transferência por *spray* são o seu uso em materiais mais finos que 3,2 mm de espessura e sua restrição quanto à capacidade de posição, a qual fica limitada para a soldagem plana e horizontal. Sob este aspecto o modo de soldagem pulsada permite alternativas interessantes.

O advento da eletrônica trouxe mudanças significativas nas fontes de soldagem, fazendo surgir no cenário fabril, em meados da década de 60, o processo MIG pulsado, o qual revolucionou as técnicas convencionais anteriormente utilizadas. Com o modo pulsado tornou-se possível a obtenção de uma transferência tipicamente por *spray*, com a vantagem de se utilizar baixas correntes médias, fato esse que permitiu sua utilização na soldagem de chapas de menor espessura. Dutra (1996) ainda acrescenta que o uso do modo pulsado tem possibilitado a soldagem fora da posição plana e a união de materiais de menor espessura. Contudo, o autor atenta para a importância da correta seleção das grandezas envolvidas no processo para que os objetivos da utilização adequada da corrente pulsada sejam atingidos, pois, tal tarefa tem sido uma das principais razões de sua falta de popularidade na indústria.

2.4. O Processo MIG pulsado

As aplicações do processo MIG convencional tem sofrido fortes restrições devido às limitações sobre o controle da transferência metálica o que torna o processo muito instável e

de difícil controle. Dentre os modos de transferência, o modo por *spray* é aquele que oferece maior estabilidade dentre os demais, proporcionando maiores recursos para o operador, além de melhor qualidade dos cordões. Apesar disso, são observadas sérias restrições quanto ao seu uso na soldagem de chapas finas, decorrente do alto aporte de calor apresentado. Através do fornecimento de pulsos intermitentes de alta corrente é possível então, obter uma transferência tipicamente por *spray* com pouca quantidade de energia liberada, fato esse que reduz de maneira significativa a ocorrência de distorções e amplia a faixa de utilização do processo (Craig (1987), Dutra (1996), Kim & Eagar (1993), Lambert (1989), Weber (1982), Lyttle (1983), Davies (1996), Collard (1988) e Stenbacka & Persson (1989)).

A tecnologia do MIG pulsado começou a ser disponibilizada comercialmente após a década de 70, sendo considerada atualmente como um processo em constante evolução. Recentes avanços nos projetos de fontes de soldagens tem melhorado consideravelmente o desempenho do processo e estendido sua aplicação para áreas anteriormente inviáveis, permitindo melhor controle dos parâmetros e da energia transferida para o metal de base.

Em soldagens convencionais, utiliza-se transferência por curto-circuito quando se deseja obter baixas correntes médias. A concepção da corrente pulsada seria então uma maneira de antecipar picos de corrente para transferência de gotas antes que as mesmas curto-circuitem a peça. Desta forma, intensas salpicagens são evitadas, obtendo-se assim, um arco com uma pressão relativamente homogênea sobre a poça líquida, além de baixa energia transferida ao metal de base. Entretanto, esses picos de corrente devem satisfazer certos requisitos para que esses objetivos sejam alcançados. Assim, o tempo de permanência no valor de pulso deve ser tal que a energia gerada seja suficiente para se completar toda a formação da gota bem como sua expulsão. Dessa forma, elevados níveis de corrente de pulso são necessários para destacamento das gotas impondo, como critério, que a corrente de base seja ajustada num patamar tal que se atinja uma corrente média dentro dos valores desejáveis às operações de soldagem. No modo pulsado, a corrente média tem como característica principal um baixo nível de intensidade. Essers & Gompel (1984) informam que as correntes médias obtidas no modo pulsado são tão baixas quanto aquelas referentes à transferência globular.

Devido às vantagens inerentes deste modo de transferência, o mesmo tem sido alvo de estudo de diversos pesquisadores. O controle preciso dos parâmetros, a pequena produção de respingos, a pressão homogênea do arco sobre a poça de fusão e pequeno grau de distorções, resultante do relativo resfriamento da peça durante o tempo de base, também são características deste modo de transferência onde, segundo Weber (1982), isso é um adicional

substancial quando são soldados materiais pouco espessos e componentes de precisão. Davies (1996) informa que espessuras situadas na faixa de 2 à 6,5 mm, as quais caem nas faixas correspondentes às transferências globular e *spray*, são facilmente soldadas no modo pulsado.

Outra vantagem em se pulsar a corrente é a possibilidade de utilização de eletrodos de diâmetros maiores que 1,6 mm, obtendo-se assim, maiores taxas de deposição em relação à utilização de eletrodos mais finos. Como conseqüência desse fato, percebe-se um aumento na eficiência do processo em relação à deposição, decorrente de uma menor perda ocasionada por respingos. Weber (1982) acrescenta que a utilização de eletrodos de diâmetros maiores minimiza problemas relacionados à alimentação do arame, principalmente na soldagem de alumínio.

Contudo, o MIG pulsado introduziu alguns fatores adicionais ao modo convencional de transferência por *spray*, denominados de parâmetros de pulso, os quais devem ser analisados conjuntamente com os parâmetros convencionais, tais como comprimento do arco, velocidade de alimentação do arame, atmosfera de proteção, composição e diâmetro do eletrodo. O acréscimo desses fatores aumentou ainda mais a complexidade do processo no que se refere à determinação de parâmetros operacionais adequados, de modo a promover boas características dos cordões de solda.

2.4.1. Os Parâmetros de pulso

Os parâmetros de pulso foram introduzidos com o intuito de ampliar a faixa de utilização do processo MIG convencional com transferência por *spray*. Pode-se observar, através da **Figura 2.5**, que a corrente pulsada é uma onda periódica. Nela, um valor de fundo baixo, ou seja, uma corrente de base, se alterna com um valor de maior nível, uma corrente de pico, tendo essas duas grandezas seus respectivos tempos de duração t_b e t_p .

Na caracterização deste modo de transferência, diversos parâmetros de pulso podem ser utilizados. Entre eles podem ser citados os parâmetros básicos, os quais são: corrente de pico (I_p), corrente de base (I_b), tempo de pico (t_p) e tempo de base (t_b), ou ainda utilizar parâmetros derivados destes, como a corrente média (I_m), a freqüência de pulso (f) e o ciclo ativo ou “*Duty cycle*” (CA).

A corrente de pico (I_p), considerada como um dos parâmetros mais influentes sobre a geometria do cordão de solda, deve ser mantida acima da corrente de transição de tal forma a assegurar uma transferência tipicamente por *spray* e assegurar uma quantidade de energia necessária durante cada pulso para promover o destacamento da gota. Trevisan *et al* (1998) informam que a corrente de pico tem por finalidade garantir a boa fusão e a penetração do



cordão. Collard (1988) expõe que correntes de pico mais altas resultarão em maiores forças axiais, devido ao campo magnético gerado pela corrente transportada através do eletrodo e picos de corrente extremamente altos, maiores que 600 A, não são praticáveis devido às limitações de capacidade das fontes de alimentação.

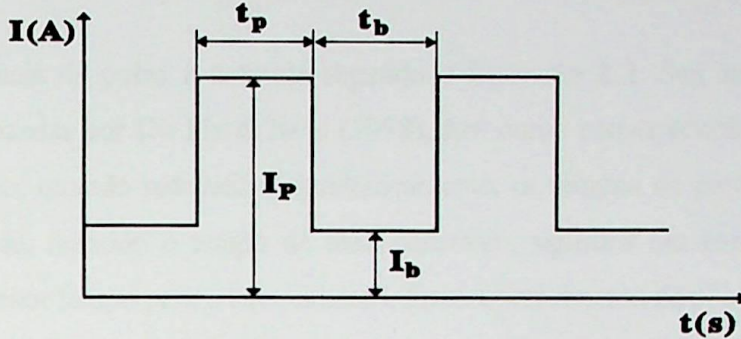


Figura 2.5. Esquema de uma onda pulsada e seus componentes.

A corrente de base (I_b), segundo Trevisan *et al* (1998), mantém o arco estável e permite que a área da solda fique mais fria. Nixon & Norrish (1992) informam que considerações à respeito da instabilidade do arco requerem que a corrente de base seja sempre maior que 25 A. Collard (1988) expõe que a corrente de base é provavelmente o parâmetro de onda menos crítico, embora tenha várias funções além da manutenção do arco elétrico. O controle sobre a poça de solda e a forma das gotas podem ser melhorados significativamente através da manutenção de correntes de bases apropriadas. De maneira a reduzir a energia liberada para o metal de base, a corrente de base é normalmente ajustada para valores mínimos. Níveis adequados de corrente de base auxiliam também no pré-aquecimento do eletrodo. Subramaniam *et al* (1998) relatam que destacamentos de gotas no período de base são ótimos para a redução do fluxo de calor e para a manutenção da estabilidade do arco, promovendo assim, a redução de respingos. Weber (1982) informa que somente é possível realizar soldagens fora de posição no modo pulsado quando utilizadas correntes de base muito baixas, as quais permitem o resfriamento necessário da poça de solda de modo a garantir boas características do cordão.

O tempo de pico é o intervalo de tempo necessário a promover o destacamento da gota do eletrodo para o metal de base. Essers & Gompel (1984) definem o tempo de pico como o período entre o momento no qual a corrente começa a crescer e o momento no qual a mesma começa a reduzir chegando ao final desse pulso. Collard (1988) diz que um pulso estreito e elevado tende a produzir um arco mais constrito do que um pulso largo e baixo, oferecendo portanto, algumas vantagens distintas para a soldagem de juntas herméticas.

A corrente média, dada pela **Equação 2.1**, tem a característica, na transferência pulsada, de apresentar baixos níveis de intensidade. Devido à essa característica, esse processo pode ser utilizado na soldagem de chapas finas.

$$I_m = (I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b) / (t_p + t_b) \quad (2.1)$$

A frequência de pulso é definida segundo a **Equação 2.2**. Seu aumento, mediante experiências realizadas por Du Pin & Neto (1998), tem como consequência uma redução na largura do cordão, quando reduzidos, simultaneamente, os tempos de pico e de base. Uma frequência elevada, mantido o tempo de base constante, significa um tempo de pico mais curto, ou seja, menor tempo para o aquecimento, fusão e crescimento da poça. Após decorrido um intervalo, dentro do tempo de pico, suficiente para produzir a fusão da poça, o tempo restante é responsável pelo crescimento da poça. Logo, o aumento da frequência, acompanhado pela redução do tempo de pico, causa a redução da largura da poça de fusão.

$$f = 1 / (t_p + t_b) \quad (2.2)$$

O ciclo ativo (CA) pode ser definido pela **Equação 2.3**, onde percebe-se a relação entre o tempo de deposição e o tempo total de soldagem. Essa grandeza é normalmente utilizada em substituição aos tempos de pico e de base em alguns experimentos abordados na literatura, devido à menor variabilidade apresentada, o que permite uma maior facilidade quanto à regulação dos parâmetros.

$$CA = [t_p / (t_p + t_b)] \times 100(\%) \quad (2.3)$$

Contudo, Davies (1996) e Dutra (1996) mostram que apesar dos benefícios trazidos pela utilização do modo pulsado de transferência, especialmente para os aços inoxidáveis e alumínio, a complexa natureza deste processo e o alto grau de habilidade exigida por parte dos soldadores na correta seleção dos parâmetros operacionais, tem limitado de maneira significativa sua aceitação pelas indústrias de soldagem. Moore *et al* (1997) relatam que um bom soldador é aquele que conhece o melhor caminho para se especificar parâmetros de soldagem corretos para uma dada aplicação, embora, segundo ele, isso seja mais uma arte do que uma ciência.

2.4.2. Abordagens do MIG pulsado na literatura

A necessidade em se obter um maior número de informações à respeito das características do modo pulsado de transferência metálica vem crescendo bem como sua utilização nas aplicações industriais. Assim, uma maior compreensão do processo se faz necessária, de modo a explicar certas peculiaridades funcionais deste, provendo assim, sua melhor utilização. Desta forma, diversos pesquisadores tem se empenhado nessa árdua tarefa de desvendar todos os segredos que envolvem o assunto.

Corrêa *et al* (1999), através de um planejamento fatorial completo, estudaram a influencia da corrente média e da freqüência de pulso nos processos MIG convencional e pulsado, sobre as características econômicas de revestimento, representadas pelas taxas de fusão e deposição e pelo rendimento de deposição real. A taxa de fusão foi definida como a quantidade fundida de eletrodo por unidade de tempo, a taxa de deposição refere-se a quantidade de material do eletrodo que foi efetivamente incorporada ao metal de solda por unidade de tempo e entende-se como rendimento de deposição real a razão entre a massa de consumível incorporada ao metal de solda e a massa de arame consumida durante a soldagem. Adotou-se três níveis de corrente media, 130,180 e 230 A e quatro níveis de freqüência de pulso, 0, 55, 70 e 85 HZ, onde a freqüência de 0 HZ caracteriza o processo convencional. Concluiu-se, neste trabalho que não há diferenças significativas quanto as taxas de fusão e deposição, na passagem do modo convencional para o modo pulsado. De uma maneira geral, com o modo pulsado ocorre uma pequena melhoria no rendimento em relação ao modo convencional, quando utilizada corrente media de 230 A. Neste nível de corrente o rendimento foi da ordem de 99%. Independente do tipo de corrente utilizada, os rendimentos foram superiores a 96%. Isto ocorreu devido a incorporação de salpicos entre os cordões, em função de uma sobreposição de 30%. Com o modo convencional, o rendimento foi de 98% para todos os níveis de corrente utilizados, valor esse superior ao modo pulsado para os níveis de correntes de 130 e 180 A.

Scotti e Dutra (1993) estudaram a influencia do tipo de gás de proteção na formação de irregularidades nos cordões de solda, representadas pela falta de fusão e penetração, em soldagem MIG automatizada com corrente pulsada, na posição vertical ascendente. Constatou-se a existência de um fenômeno de auto-crescimento do arco voltaico, independentemente do tipo de gás utilizado, como responsável pelos defeitos do cordão. Verificou-se que as irregularidades do cordão podem ser evitadas pela utilização de um comprimento de arco pequeno, mantido pela utilização de um controle externo no alimentador do arame.

Pereira e Ferraresi (1999) analisaram quais os parâmetros mais influentes sobre a instabilidade do cordão de solda em soldagem MIG pulsada automatizada. Percebeu-se a velocidade de soldagem, a direção de soldagem, a posição do cabo terra na peça, a posição da fonte em relação a chapa, a distancia bico de contato-peça (DBCP), o tipo e vazão do gás de proteção, o angulo de inclinação da tocha, a corrente media, o comprimento do arco e o tamanho da gota.

Quanto a velocidade de soldagem e a corrente media, ambas mostraram ter certa influencia sobre a instabilidade do cordão, porém não demonstraram serem as causadoras desta. A direção de soldagem, as posições do cabo terra e da fonte e a vazão do gás de proteção não demonstraram influência significativa. Dentre os parâmetros operacionais estudados, o gás de proteção e o comprimento do arco mostraram ser os mais influentes sobre a instabilidade do cordão. As influencias do tamanho da gota e da inclinação da tocha se mostraram muito pequenas. Finalmente, misturas de gases com maior quantidade de CO₂ promoveram uma ampliação na faixa útil dos parâmetros de soldagem.

Wahab & Painter (1997) mediram no processo MIG convencional, a forma completa da poça de solda em três dimensões, utilizando para isso, métodos numéricos adequados para esse fim. Analisou-se a influencia da corrente, da tensão, da velocidade de soldagem e a composição do gás de proteção sobre a geometria do cordão de solda. Chegou-se à conclusão que a corrente, acompanhada da velocidade de soldagem, tiveram maior influencia na geometria do cordão de solda. Assim, o aumento desses parâmetros acarretou aumento no comprimento e redução na largura do cordão. Verificou-se que a porcentagem de CO₂ no gás de proteção, dentro dos limites operacionais adotados, não influenciou nas características geométricas.

Lambert (1989), através de um Planejamento fatorial completo com um nível de significância de 99%, estudou a influência das velocidades de soldagem e de alimentação do arame, do standoff e da posição do eletrodo na peça, sobre a penetração, a largura e o reforço do cordão de solda em tubos, através de soldagem *bead-on-tube*. Concluiu-se que a penetração e a largura aumentaram com o aumento da velocidade de alimentação do arame e reduziram com um aumento na velocidade de soldagem. A penetração também sofreu redução com um aumento no standoff. O reforço não sofreu influência de nenhum parâmetro de soldagem.

Subramanian *et al* (1998) estudaram a influência dos parâmetros Ciclo Ativo e frequência de pulso sobre a transição da transferencia globular pulsada para *spray* pulsada, ajustando os parâmetros de pulso de forma a obter a condição de Uma Gota Por Pulso

(UGPP), com diâmetro de gota igual ao do eletrodo. Os resultados desse estudo mostraram que o destacamento e a formação das gotas podem ser controlados através de alterações nos parâmetros de pulso. Além do modo de transferência das gotas, outros fatores podem ser controlados, tais como a taxa de calor, o tamanho e a velocidade das gotas, para diferentes condições de soldagem. Este tipo de flexibilidade sobre o controle do processo não é possível com o processo MIG convencional. A transição do modo globular pulsado para *spray* pulsado ocorreu de forma abrupta, onde o modo globular exigiu, ainda, um tempo de pico muito curto para sua manutenção.

Kim & Eagar (1993) desenvolveram um modelo teórico, através da combinação da análise do balanço da força estática, utilizada para prever o tamanho das gotas e o cálculo ponderado da taxa de fusão, usada para controlar a taxa de fusão do eletrodo, através do processo MIG pulsado, para determinar regiões de frequência onde pudesse ser obtida Uma Gota Por Pulso (UGPP). Os resultados do modelo foram comparados com resultados experimentais. Dessa forma, variaram-se as correntes de pico e de base, o Ciclo Ativo e o tipo de material, de forma a obter uma região ótima de frequência. A corrente de pico no modo *spray* pulsado, quando ajustada em valores muito altos, produziu um fenômeno conhecido como *Conicidade da ponta do eletrodo*, o qual funde as bordas deste, tornando a obtenção da condição UGPP muito difícil de ser alcançada. Porém, o aumento da corrente de pico, dentro de certos limites, ampliou a região de frequência onde obtém-se UGPP para várias faixas de corrente de base e promoveu também, um aumento na taxa de fusão do eletrodo, por aumentar a corrente média e reduzir, simultaneamente, o tamanho das gotas metálicas. Quanto à corrente de base, seu aumento promoveu redução da região ótima de frequência para todos os níveis de corrente de pico estudadas pois, semelhantemente à corrente de pico, seu aumento também acarretou o aparecimento da conicidade na ponta do eletrodo. O aumento do Ciclo Ativo acarretou aumento na região UGPP devido à redução no tamanho das gotas. Assim como ocorreu com as correntes de pico e de base, o aumento do Ciclo Ativo acarretou o aparecimento de conicidade na ponta do eletrodo.

Randhawa *et al* (1998) estudou a influência dos parâmetros de pulso sobre a diluição e as características geométricas do cordão de solda, em soldagem MIG pulsada na posição vertical. Para isto, foram resumidos os parâmetros de pulso em um fator denominado fator ϕ , obtido pela seguinte relação: $\phi = (I_b/I_p) \cdot f \cdot t_b$. Os resultados mostram que o aumento de ϕ reduziu de maneira significativa, a altura do reforço de cordão e em menor intensidade, a largura deste. Isto ocorreu devido à redução significativa da taxa de deposição e ao aumento na extensão da área de reforço na raiz do cordão, aumento esse proveniente da elevação na

temperatura das gotas. A largura do cordão foi pouco influenciada, sofrendo redução ao se reduzir o valor de ϕ . Para um dado ϕ , o aumento da corrente média acarretou aumento significativo na altura do reforço, decorrente do aumento na taxa de deposição. Quanto à diluição do cordão, constatou-se que, para uma dada corrente média, o aumento de ϕ promoveu aumento significativo neste fator. Isto ocorreu, principalmente, devido ao aumento na temperatura das gotas metálicas.

Rajasekaran (1999) analisou a influencia dos parâmetro de soldagem no processo MIG pulsado sobre a qualidade do cordão de solda, representada pela ondulação da superfície do cordão e pela diluição, através da utilização de um diagrama não dimensional, representando vários aspectos do cordão. Percebeu-se que a ondulação registrada foi menor que aquela oriunda do modo convencional, fenômeno esse explicado pela maior uniformidade no comprimento do arco e maior de controle sobre o destacamento das gotas. Ainda, uma grande variação na tensão de pico e no tempo de pico causaram grande variação na ondulação do cordão. Quanto à diluição, sua previsão pôde ser feita através do comportamento da corrente média e da velocidade de soldagem, as quais não influenciaram significativamente essa resposta.

Percebe-se assim, a constante preocupação por parte das pessoas envolvidas num maior conhecimento do assunto. Neste contexto, ferramentas estatísticas vêm sendo utilizadas na tentativa de elucidar certas particularidades de processos, de modo a propiciar sua melhor utilização em função da manipulação das variáveis envolvidas. Dentre estas ferramentas, o Planejamento de Experimentos tem se destacado, em muito, das demais, por permitir redução substancial de tempo e dinheiro, fatores decisivos em época de acirrada competição.

Este trabalho pretende, então, dar sua parcela de contribuição na melhoria e otimização do processo MIG pulsado de soldagem, utilizando assim, a técnica de Projeto e Análise de Experimentos a qual será apresentada no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 3

PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS

3.1. Introdução

No ambiente industrial, em especial no desenvolvimento de novos produtos e processos, é necessária em determinadas ocasiões, a obtenção de informações a respeito do comportamento de um determinado fenômeno de forma empírica. Devido a isso, a importância de se fazer uso de métodos científicos se tornou imprescindível. Assim, muitas vezes torna-se necessário planejar detalhadamente a realização de um determinado experimento de forma a obter um maior número de informações a seu respeito. Além de minimizar custos operacionais, tal atitude dará a garantia de que os resultados obtidos conterão dados relevantes para a solução a ser almejada. Desta maneira, podem ser desenvolvidos produtos com melhores características, ocorrer redução tanto do tempo de desenvolvimento quanto da sensibilidade desses produtos frente às variações de condições ambientais, além de aumentar a produtividade de processos. Tendo isto em vista, o Projeto e Análise de Experimentos vem como resposta à esse tipo de situação, propondo uma técnica que visa particularmente dois grandes objetivos: a maior precisão estatística na análise das questões abordadas com menor custo operacional possível.

Esta técnica surgiu por volta da década de 30, com os trabalhos pioneiros de Fischer, além das contribuições significativas de Bose, Box, Yates, Kempthorne, Cochran (Montgomery, 1984) e Gosset (Neto *et al*, 1995), mais conhecido pelo pseudônimo de Student. Durante muitos anos, foram encontradas várias restrições quanto à sua aplicação nas empresas, onde buscava-se resultados imediatos e o mercado consumidor não se mostrava tão exigente quanto nos dias atuais. Devido à esse quadro, o Projeto e Análise de Experimentos sofria fortes restrições quanto à sua aplicabilidade, por necessitar de tempo e recursos para sua realização. Com o decorrer do tempo, as alterações no comportamento do mercado consumidor, acirrando a competitividade entre as organizações, aumentando o desenvolvimento tecnológico e introduzindo novas abordagens referentes ao conceito de qualidade, despertaram novamente o interesse em sua utilização.

Um dos motivos cruciais para o seu ressurgimento foi o sucesso alcançado por algumas empresas japonesas na década de 80, as quais não apenas se tornaram competitivas em escala mundial como também passaram a estabelecer novos padrões de competitividade

através da implantação das idéias de melhoramento da qualidade, propostas principalmente pelo professor Genichi Taguchi (Hamada & Nelder, 1997).

3.2. Princípios básicos do Projeto e Análise de Experimentos

Três princípios básicos regem o Projeto e Análise de Experimentos: a blocagem, a replicação e a aleatorização. Os mesmos são interdependentes e a utilização de cada um deles vai depender exclusivamente da característica do experimento.

A blocagem, também conhecida como agrupamento planejado, consiste em subdividir todo o espaço experimental em *blocos*, ou seja, agrupamentos de dados, com a finalidade de eliminar fontes de variabilidade. Considera-se essas fontes de variabilidade como fatores incontroláveis, os quais podem interferir significativamente no resultado do experimento. Cada bloco consiste de unidades semelhantes, relativamente homogêneas, onde o erro experimental é esperado ser menor do que obtido em todo o espaço amostral. No Projeto e Análise de Experimentos costuma-se utilizar a uniformidade dentro desses blocos de forma a minimizar o efeito dos fatores incontroláveis e enfatizar o efeito dos fatores em estudo. Segundo Juran (1993), os projetos que utilizam essa uniformidade dentro dos blocos denominam-se Planejamentos *com Blocagem* e o processo é denominado de *Agrupamento Planejado*.

A replicação, ou replicagem, é a repetição de uma observação ou medição de forma a aumentar sua precisão. Ela proporciona uma oportunidade para que sejam eliminados os efeitos de fatores incontroláveis ou até mesmo daqueles desconhecidos pelo experimentador e, assim como a aleatorização, atuar como ferramenta diminuidora de tendências. Possui duas propriedades importantes: A primeira é permitir obter uma estimativa do erro experimental. Esta estimativa torna-se uma medida para determinar se as diferenças observadas nos resultados são estatisticamente significantes. A segunda é que se a média amostral é utilizada para se estimar os efeitos dos fatores no experimento, então a replicação permite obter uma estimativa mais precisa destes efeitos.

Entende-se por aleatorização como a atribuição de amostras à diferentes combinações de tratamentos de maneira puramente casual. Tal atribuição tem por finalidade, assim como a duplicação, atenuar ou mesmo eliminar os efeitos das variáveis incontroláveis, aprimorando também a validade das alternativas da variância nos erros experimentais e tornando possível a aplicação de testes estatísticos de significância. Além disso, possibilita a construção de intervalos de confiança, pois os métodos estatísticos requerem que as observações sejam variáveis aleatórias independentemente distribuídas. Geralmente a aleatorização torna esta

suposição válida. Em suma, pode-se dizer que este princípio nada mais é do que adotar uma postura de não privilegiar, dando a mesma oportunidade a todos os elementos de um determinado conjunto de serem igualmente escolhidos.

3.3. Etapas do Projeto e Análise de Experimentos

A essência de um bom planejamento fundamenta-se essencialmente na capacidade de se projetar um experimento de maneira que ele forneça o tipo de informação desejado. Para isto, é necessário que se tenha uma idéia clara do objetivo do estudo e saber qual a melhor maneira de se coletar os dados, além do modo como estes serão avaliados.

Para que um Projeto de Experimentos seja bem sucedido, Montgomery (1984) recomenda que as seguintes etapas sejam adotadas:

3.3.1. Conhecimento e exposição do problema

Apesar de parecer um tanto óbvia, a prática mostra que não é tão trivial perceber e, até mesmo, desenvolver uma idéia clara do problema. Segundo Barton (1997), as metas de cada investigação científica, as quais tem por finalidade a aquisição de um maior conhecimentos a respeito das características e comportamentos de produtos e processos, devem estar bem definidas. Caten (1996) sugere que sejam identificados todos os parâmetros do processo que afetam as variáveis de resposta. Tendo-se conhecimento destas necessidades, será mais fácil ser conduzido à um melhor entendimento de sua solução final.

3.3.2. Escolha dos fatores e níveis

Deve-se atentar para que sejam devidamente selecionados os fatores a serem estudados bem como seus níveis. Juran (1993) define *fator* como "*uma das variáveis controladas ou não que exercem influencia sobre uma resposta que está sendo estudada no experimento*" e *nível* como "*valores, quantitativos ou qualitativos, do fator examinado no experimento*". Estes níveis podem ser especificados ou selecionados, aleatoriamente, no conjunto de todos os possíveis níveis de fatores. O número de níveis deve ser escolhido considerando-se o provável efeito do fator controlável sobre as variáveis de resposta, podendo ser linear, ao menos dois níveis, quadrático, ao menos três níveis ou de ordem superior.

Caten (1996) aborda a necessidade de identificar todos os diversos tipos de fatores existentes, ou seja, fatores principais, secundários, constantes e de ruído. Deve-se atentar também para a existência ou não de interações entre os fatores controláveis.

3.3.3. Seleção da(s) resposta(s)

Ao se escolher uma determinada variável de resposta, deve-se ter convicção de que ela forneça a informação necessária para a solução do problema, ou seja, que ela quantifique objetivamente as características de qualidade, as quais podem ser aspectos vagos e subjetivos. A maneira como essa resposta será medida, bem como a sua precisão também deve ser analisada.

Caten (1996) relata que uma variável de resposta deve ser contínua, capturar a quantidade ou a qualidade de interesse para o estudo experimental, estar em unidades apropriadas, ser obtida por ensaios não destrutivos, não estar próxima dos limites naturais, ter variância constante sobre toda a amplitude da experimentação, ser fácil de medir e ter uma relação direta com o objetivo do experimento. A avaliação da importância relativa de cada uma das variáveis de resposta deve ser corretamente identificada.

3.3.4. Escolha do Projeto de Experimentos

Esta é uma das etapas mais importantes do processo experimental. A escolha de um determinado tipo de projeto pode ser decisiva no sucesso ou fracasso de um experimento, devendo-se escolher aquele mais adequado à resolução do problema. Deve-se também, determinar o desvio em relação à resposta analisada, bem como a magnitude do risco à que se dispõe a tolerar. Assim, um determinado número de replicações deve ser estabelecido. Uma outra atitude nesta fase é determinar a ordem na qual os resultados serão coletados bem como o método de aleatorização empregado. É de fundamental importância buscar um equilíbrio entre a precisão estatística desejada e os custos do projeto, tendo-se em mente o objetivo da experimentação ao se selecionar um projeto. Em determinados experimentos já se conhece desde o início que alguns fatores produzem diferentes respostas. Por isso, torna-se interessante a identificação dos fatores causadores destas diferenças, bem como estimar a magnitude das mudanças nestas respostas. Em outras situações, pode-se estar interessado em verificar a uniformidade do processo, alterando-se algumas condições.

3.3.5. Realização do experimento

Nesta etapa os dados devem ser coletados. Deve-se monitorar cuidadosamente o avanço do experimento, com o intuito de garantir que seus procedimentos estejam de acordo com o planejado, dando atenção particular à aleatorização, à precisão das medições e à manutenção, tão uniforme quanto possível, do ambiente experimental.

3.3.6. Análise dos resultados

Métodos estatísticos baseados em algoritmos são muito empregados para análise dos resultados. Pode-se ainda contar com o valioso auxílio de programas computacionais quando a quantidade e complexidade de cálculos for considerável. Nachtsheim (1987) faz uma análise das vantagens e desvantagens de softwares comerciais utilizados pelo Projeto e Análise de Experimentos: Design-Ease, Jass, Cade, Statgraphics, Xstat, Echip, Coed and RSM, RS/Discover, Aced, Simplex-V e Ultramax. Atualmente, existem versões mais atualizadas destes programas bem como outros excelentes, tais como o Statistica, SPSS E Minitab. Essas técnicas computacionais são, hoje em dia, muito utilizadas na fase de análise dos resultados. Neste trabalho, utiliza-se o Statgraphics para planejar e executar o experimento.

3.3.7. Conclusões e recomendações

Uma vez realizada a análise, deve-se tirar conclusões ou fazer inferências a respeito dos resultados. As inferências estatísticas devem ser fisicamente interpretadas e o significado prático desses descobrimentos avaliado.

As três primeiras etapas são consideradas por Coleman & Montgomery (1993) como atividades de uma fase chamada de Planejamento do pré-experimento, os quais acreditam ser a fase mais importante para a obtenção de uma solução bem sucedida dos problemas abordados.

3.4. Classificação dos Projetos de Experimento

O plano formal utilizado para a condução do experimento é denominado de *Projeto ou Delineamento de Experimentos*, o qual inclui a escolha de respostas, fatores, níveis e blocos. Tais projetos apresentam determinadas relações racionais com os propósitos, necessidades e limitações físicas dos experimentos. Além disso, eles também oferecem certas vantagens em relação à economia de tempo despendida na experimentação, além de fornecer estimativas diretas dos efeitos experimentais e estimativas válidas de variância. Sendo assim, existe um tipo específico de projeto para cada tipo de experimento. Juran (1993) classifica um Projeto de Experimento através:

- Do número de fatores experimentais a serem investigados como, por exemplo, delineamento unifatorial *versus* delineamento multifatorial;
- Da estrutura do delineamento, como, por exemplo, delineamento com blocagem de experimento fatorial, aninhado ou de superfície de resposta;

- Do tipo de informações às quais o experimento é destinado fornecer como, por exemplo, estimativas dos efeitos, estimativas das variâncias ou mapeamento empírico.

Juran (1993) ainda relata que alguns dos delineamentos mais conhecidos são os fatoriais completos, fatoriais com blocagem, fatoriais fracionários, superfície de resposta e delineamento de mistura. Dentre estes, optou-se neste trabalho pelo estudo dos planejamentos fatoriais completos.

3.5. O Planejamento Fatorial

Um dos problemas mais comuns que um experimentador pode enfrentar é a determinação da influência de uma ou mais variáveis sobre determinadas respostas de interesse. No jargão estatístico, pode-se dizer que se está interessado em descobrir como uma determinada resposta é influenciada pelo efeito dos fatores estudados. A **Figura 3.1** mostra uma situação geral, onde um certo número de fatores, atuando num sistema, produz determinadas respostas.

Neto (1995) compara esse sistema com uma função que atua sobre as variáveis de entrada ou fatores, produzindo como saída, as respostas necessárias. O objetivo seria então, descobrir essa função, ou pelo menos, obter uma aproximação satisfatória desta.

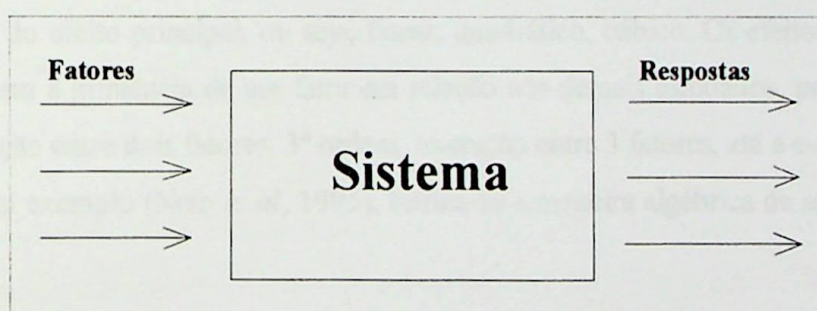


Figura 3.1. Sistema considerado como função.

Neste contexto, os planejamentos fatoriais têm sido amplamente utilizados na realização de experimentos envolvendo diversos fatores controláveis, onde seus efeitos sobre as respostas possam ser avaliados em conjunto, características essas bastante familiares nos ambientes de engenharia e manufatura.

Juran (1993), através de uma situação hipotética, demonstra um caso onde deseja-se investigar o efeito de dois fatores, o nível de corrente e a força aplicada, sobre a resistência mecânica em cápsulas de silício. No passado, uma abordagem experimental bastante utilizada era a de *um-fator-de-cada-vez*. Essa estratégia experimental estudava primeiramente, o efeito da variação nos níveis de amperagem à uma força constante e depois o efeito da aplicação de

diferentes níveis de força à um nível constante de amperagem. Desta maneira, os dois fatores variavam, cada um de uma vez, com todos os outros fatores mantidos o mais constante possível. O que se desconhecia naquele tempo é que as variáveis, na maioria das vezes, influenciam-se mutuamente, ou seja, interagem-se, e o valor ideal para uma delas pode depender do valor da(s) outra(s). Este fenômeno é conhecido como *efeito de interação entre fatores*, o qual está presente na maioria dos experimentos. Assim, o efeito de um fator está condicionado ao nível escolhido dos demais. Desta forma, a resistência da cápsula, medida em diferentes níveis de corrente pode ser diferente quando um nível diferente de força é escolhido. Da mesma forma, qualquer relação observada de resistência com nível de força pode ser bem diferente em outros níveis de amperagem.

3.5.1 Efeitos principais e de interação

No Projeto e Análise de Experimentos, convencionou-se classificar os efeitos dos fatores dentro das seguintes categorias: efeitos principais e de interação. Os efeitos principais, ou de 1ª ordem, onde um fator interage com ele próprio, são funções da resposta média nos vários níveis do fator considerado. Quando um fator apresenta dois níveis, o efeito principal estimado é a diferença entre as respostas médias nos dois níveis, isto é, as médias calculadas em todos os níveis dos outros fatores. No caso de mais de dois níveis, existem vários outros componentes do efeito principal, ou seja, linear, quadrático, cúbico. Os efeitos de interação, os quais medem a influência de um fator em relação aos demais estudados, podem ser de 2ª ordem, interação entre dois fatores, 3ª ordem, interação entre 3 fatores, até a e-nésima ordem. Através de um exemplo (Neto *et al*, 1995), retrata-se a maneira algébrica de se calcular estes efeitos.

ENSAIO	TEMPERATURA	CATALISADOR	RENDIMENTO	MÉDIA
1	40	A	57 - 61	59
2	60	A	92 - 88	90
3	40	B	55 - 53	54
4	60	B	66 - 70	68

Tabela 3.1 Efeito da temperatura e do catalisador no rendimento de uma reação.

Considere-se, de acordo com a **Tabela 3.1**, a necessidade de se determinar o rendimento de uma determinada reação química como função dos fatores temperatura e catalisador. São adotados os níveis de 40°C e 60°C para o fator temperatura e supõe-se que

existam dois tipos de catalisadores: A e B. A execução do experimento consiste em se realizar ensaios, registrando as respostas observadas, em todas as possíveis combinações destes níveis. O efeito principal da temperatura é, por definição, a média dos efeitos da temperatura nos dois níveis do catalisador. Utilizando-se a letra **T** para representar este efeito, sendo \bar{y}_i a resposta média observada no i -ésimo ensaio, obtém-se a **Equação 3.1**.

$$\begin{aligned} T &= (1/2) \{(\bar{y}_2 - \bar{y}_1) + (\bar{y}_4 - \bar{y}_3)\} & (3.1) \\ &= (1/2) \{(90 - 59) + (68 - 54)\} \\ &= (1/2) (31 + 14) \\ &= 22,5. \end{aligned}$$

A **Equação 3.1** também pode ser reescrita como a diferença entre duas médias, expressa pela **Equação 3.2**.

$$T = (1/2) (\bar{y}_2 + \bar{y}_4) - (1/2) (\bar{y}_1 + \bar{y}_3) \quad (3.2)$$

Este valor mostra que o rendimento da reação sobe, em média, 22,5%, quando a temperatura passa de seu nível inferior, 40°C, para seu nível superior, 60°C. No entanto, é necessário cautela com esta interpretação, pois a temperatura e o catalisador normalmente interagem entre si. A existência dessa interação torna incorreta a análise isolada do efeito de um único fator.

Analogamente ao caso da temperatura, o efeito principal do catalisador é a média dos efeitos do catalisador nos dois níveis da temperatura. Utilizando a letra **C** para representar esse efeito, obtém-se a **Equação 3.3**.

$$\begin{aligned} C &= (1/2) (\bar{y}_3 + \bar{y}_4) - (1/2) (\bar{y}_1 + \bar{y}_2) & (3.3) \\ &= -13,5. \end{aligned}$$

Nota-se que o efeito é negativo. Isto significa que, com a troca o catalisador A pelo B o rendimento da reação cai 13,5% em média.

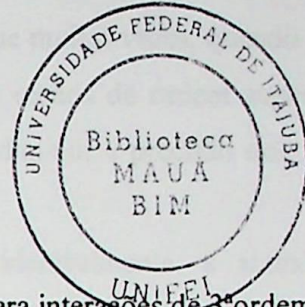
Para caracterizar o efeito de interação entre **T** e **C**, percebe-se que ao substituir o catalisador A pelo B, o efeito da temperatura cai de +31(90 - 59) para +14 (68 - 54). Na ausência de interação, esses valores deveriam ser idênticos, a menos de um erro experimental. Por isso, faz sentido tomar a diferença entre eles, multiplicado por 1/2, média da média, como

uma medida de interação entre os fatores T e C. Dessa forma, pode-se expressar esse efeito pela **Equação 3.4**, onde:

$$T \times C = (1/2) (14 - 31) = -8,5. \quad (3.4)$$

Pode-se também escrever esse efeito de interação segundo a **Equação 3.5**.

$$\begin{aligned} TC &= (1/2) \{(\bar{y}_4 - \bar{y}_3) - (\bar{y}_2 - \bar{y}_1)\} \\ &= (1/2) (\bar{y}_1 + \bar{y}_4) - (1/2) (\bar{y}_2 + \bar{y}_3) \\ &= -8,5. \end{aligned} \quad (3.5)$$



Este procedimento de cálculo pode ser estendido para interações de 3ª ordem, com três fatores, 4ª ordem, quatro fatores, até a e-nésima ordem com n fatores. Apesar disso, para interações acima de 2ª ordem, é conveniente e usual a utilização de determinados algoritmos, tal como os algoritmos de Neto e Yates, os quais facilitam significativamente os cálculos dos efeitos, tanto principais quanto de interação.

3.6 O Planejamento Fatorial em dois Níveis

Na execução de um planejamento fatorial, necessita-se primeiramente determinar quais fatores serão analisados, bem como os níveis de cada um deles. Suponha-se um determinado experimento (Juran, 1993), consistindo de três fatores, F1, F2 e F3, com F1 possuindo três níveis, F2 quatro e F3 apenas dois níveis. Nesta condição, são obtidas $3 \times 4 \times 2 = 24$ combinações possíveis desses três fatores. Esse valor representa o número mínimo para se realizar um planejamento fatorial completo para esse experimento hipotético.

Dessa forma, para se estudar o efeito de um fator F qualquer sobre uma determinada resposta é necessário então, fazer variá-lo em cada um de seus níveis e observar o resultado dessa variação. Procedendo assim, percebe-se que o número de ensaios cresce à medida que mais fatores com quantidades maiores de níveis vão sendo acrescentados no experimento. Destarte, o planejamento fatorial em que todos os fatores são estudados em apenas dois níveis, número mínimo para se obter um planejamento fatorial, torna-se o mais simples de ser realizado e também o mais fácil de ser interpretado.

Esse tipo de planejamento com K fatores e dois níveis é designado de *Planejamento Fatorial em Dois Níveis* ou Planejamento Fatorial 2^K . De acordo com Bingham (1997), ele é muito popular na indústria devido à simplicidade, eficiência, facilidade de interpretação e

flexibilidade em experimentação seqüencial. Utilizando-se dele, podem ser avaliados, separadamente, os efeitos individuais dos efeitos de interação.

3.7. Estimativa do número de efeitos

Para se realizar um bom experimento num planejamento fatorial é imprescindível o conhecimento do número de estimativas, tanto dos efeitos principais quanto daqueles devido à interação entre os fatores. Essa necessidade vem do fato que muitas vezes, quando o número de fatores cresce demasiadamente, é de praxe truncar os efeitos de ordem superior como normalmente se faz com séries temporais, fato esse que diminui a precisão dos resultados porém facilita a análise dos dados.

Quando o número de fatores (K) cresce consideravelmente, a abundância de estimativas torna a interpretação muito difícil de ser realizada, pois os efeitos de interação de ordem superior à 2 são muito difíceis de serem interpretados. Pode-se calcular esses efeitos como:

Número de efeitos principais		K efeitos principais
Número de efeitos de 2ª ordem		$\{K(K-1)\}/2!$ interações
Número de efeitos de 3ª ordem		$\{K(K-1)(K-2)\}/3!$ interações
Número de efeitos de nª ordem		$\{K(K-1)(K-2)\dots(K-n+1)\}/n!$

A escolha em se truncar ou não os efeitos, bem como em qual ordem os mesmos devem ser truncados, depende em muito da experiência e bom senso, não havendo regras ou leis que determinem quando e onde isso deva acontecer.

3.8. Nomenclaturas utilizadas

Várias nomenclaturas são encontradas na literatura para expressar todas as combinações dos fatores. Suponha-se um planejamento fatorial de três fatores e dois níveis, cuja notação é apresentada na **Tabela 3.2**.

A notação geométrica ou convencional é a mais utilizada delas, aparecendo em quase todos os artigos e publicações. Por esse motivo optou-se em utilizá-la neste trabalho, até mesmo por facilidade de comparação de procedimentos. Nela, costuma-se representar os fatores com uma letra, um numeral ou através da abreviatura FAT n ($n=1,2,\dots,k$) e os níveis, inferior com o sinal (-) e superior com o sinal (+). Pode-se, ainda utilizar a notação alternativa, onde o sinal (-) é substituído por zero (0) e o sinal (+) por um (1).

A seqüência de combinações na notação geométrica esta disposta segundo a ordem padrão ou ordem de Yates, estruturada da seguinte maneira:

Na coluna referente ao primeiro fator, adota-se que os tratamentos de ordem impar sejam representados pelo seu nível inferior e os de ordem par pelo seu nível superior, ou seja, a cada 2^0 tratamentos o nível inverte, começando pelo nível inferior.

Na coluna referente ao segundo fator adota-se que os dois primeiros tratamentos sejam realizados no seu nível inferior, seguidos de dois tratamentos realizados no nível superior e assim sucessivamente, até que o número total de tratamentos seja atingido. Resumindo, a cada 2^1 tratamentos, o sinal inverte, começando também pelo nível inferior.

Na coluna referente ao terceiro fator adota-se que os quatro primeiros tratamentos sejam realizados no seu nível inferior, seguidos de quatro tratamentos no nível superior, até a totalidade de tratamentos. Em suma, a cada 2^2 tratamentos inverte-se o sinal.

Notação	Geométrica			Alternativa			Japonesa			Clássica		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	-	-	-	0	0	0	1	1	1		l	
2	+	-	-	1	0	0	2	1	1		a	
3	-	+	-	0	1	0	1	2	1		b	
4	+	+	-	1	1	0	2	2	1		ab	
5	-	-	+	0	0	1	1	1	2		c	
6	+	-	+	1	0	1	2	1	2		ac	
7	-	+	+	0	1	1	1	2	2		bc	
8	+	+	+	1	1	1	2	2	2		abc	

Tabela 3.2. Notações para planejamento fatorial de três fatores e dois níveis (Juran, 1993).

Extrapolando para um experimento com K fatores, a coluna referente à este adotará que os 2^{K-1} primeiros tratamentos sejam realizados no seu nível inferior, seguido de 2^{K-1} tratamentos no nível superior, até se atingir o total de tratamentos.

Seguindo a tradição japonesa, estabelecida por Taguchi, costuma-se representar o nível inferior por (1) e o superior por (2). Já a convenção clássica designa os dois níveis de cada fator rotulados com uma letra, através da presença ou ausência de sua letra minúscula correspondente. O valor (1) representa o tratamento com todos os fatores no seu nível inferior baixo. Em cada um dos tratamentos restantes, os níveis superiores de cada fator são denotados pela letra correspondente e o nível inferior pela ausência desta. Assim, na notação ab os fatores A e B estão representados nos seus níveis superiores e o fator C no seu nível inferior.

3.9. Algoritmos para cálculo dos efeitos

Pode-se determinar os efeitos através do método algébrico da diferença na resposta média entre dois níveis. O inconveniente é que a quantidade de cálculos envolvidos vai ficando muito extenso à medida que o número de fatores aumenta. Por essa razão, foram desenvolvidos determinados algoritmos, os quais facilitam em muito a determinação dos efeitos, bem como ajudam a reduzir os erros de cálculos. Utilizou-se neste trabalho, um software comercial para manipulação dos dados. Além disso, fez-se uso também dos algoritmos de Neto e Yates, não só para validar os dados obtidos com o software como também para demonstrar a metodologia de cálculos utilizadas por esses programas computacionais. Demonstra-se, a seguir, a metodologia de cálculo de resultados através da utilização dos algoritmos de Neto *et al* (1995) e Yates (Juran, 1993).

3.9.1. Algoritmo adotado por Neto

Dando prosseguimento ao exemplo do item 3.5, onde deseja-se determinar o rendimento de uma reação química utilizando como fatores a temperatura, com seus níveis mínimo, 40°C, e máximo, 60°C, e os catalisadores A, considerado por conveniência como mínimo e B como máximo, demonstra-se então, a metodologia de cálculos utilizada pelo algoritmo adotado por Neto, acrescentando um terceiro fator, a concentração de um certo reagente, estudado nos níveis 1,0M, mínimo e 1,5M, máximo, segundo a **Tabela 3.3**.

Percebe-se que o ensaio foi realizado em duplicata, produzindo assim, 16 ensaios totais, ou seja, 2 blocos de 8 combinações, com a finalidade de estabelecer o erro experimental. As duas colunas da esquerda mostram a seqüência na qual os dados são ensaiados, demonstrando o princípio da aleatorização. Essa ordem é normalmente estabelecida através de sorteios. A terceira coluna mostra a ordem padrão ou de Yates a qual define a combinação dos fatores.

Rescreve-se, então, a matriz de planejamento utilizando-se dos sinais algébricos (-) para indicar o nível inferior do fator e (+) para o nível superior, conforme observado na **Tabela 3.4**.

OE1	OE2	OP	T	C	R	Rendimento	Média
7	8	1	40	A	1.0	56-52	54,0
2	6	2	60	A	1.0	85-88	86,5
4	4	3	40	B	1.0	49-47	48,0
1	2	4	60	B	1.0	64-62	63,0
5	1	5	40	A	1.5	65-61	63,0
8	5	6	60	A	1.5	92-95	93,5
3	3	7	40	B	1.5	57-60	58,5
6	7	8	60	B	1.5	70-74	72,0

Tabela 3.3. Matriz de planejamento.

T	C	R	=	T	C	R
40	A	1,0		-	-	-
60	A	1,0		+	-	-
40	B	1,0		-	+	-
60	B	1,0		+	+	-
40	A	1,5		-	-	+
60	A	1,5		+	-	+
40	B	1,5		-	+	+
60	B	1,5		+	+	+

Tabela 3.4. Matriz de planejamento utilizando os sinais algébricos.

Acrescentando-se mais cinco colunas, uma à esquerda somente com sinais positivos, conhecida como coluna das médias dos efeitos e mais quatro, referentes às interações entre os fatores, obtém-se a **Tabela 3.5**, conhecida como *Matriz dos Coeficientes de Contrastes*.

Média	T	C	R	TC	TR	CR	TCR
+	-	-	-	+	+	+	-
+	+	-	-	-	-	+	+
+	-	+	-	-	+	-	+
+	+	+	-	+	-	-	-
+	-	-	+	+	-	-	+
+	+	-	+	-	+	-	-
+	-	+	+	-	-	+	-
+	+	+	+	+	+	+	+

Tabela 3.5. Matriz dos coeficientes de contrastes.

Essa matriz tem a característica de ser quadrada, com ordem $2^K \times 2^K$, onde o número de sinais negativos em cada coluna é igual ao número de sinais positivos. Os sinais referentes às colunas das interações são os produtos dos respectivos sinais dos efeitos. Assim, os sinais da coluna TC são o produto dos sinais da coluna T pela coluna C, elemento à elemento.

Após elaborada a matriz dos coeficientes de contrastes, adiciona-se a unidade à cada elemento desta. Assim, a matriz assume a forma representada na **Tabela 3.6**, passando a ser designada de *Matriz unitária dos coeficientes de contrastes*.

Média	T	C	R	TC	TR	CR	TCR
+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Tabela 3.6. Matriz unitária dos coeficientes de contrastes.

Calcula-se então, os efeitos na forma de uma equação matricial, onde cada um deles é obtido, a menos de um divisor, pelo produto escalar de seu vetor na matriz unitária de coeficientes de contrastes pelo vetor das respostas. Esse divisor tem o valor 2^{K-1} para o cálculo dos efeitos e 2^K para o cálculo da média. Assim, o efeito de C é calculado por:

$$C = \{1/(2^2)\} * [-1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1] * \begin{array}{c} 54,0 \\ 86,5 \\ 48,0 \\ 63,0 \\ 63,0 \\ 93,5 \\ 58,5 \\ 72,0 \end{array} =$$

$$= (1/4) \{(-1*54,0) + (-1*86,5) + (1*48,0) + (1*63,0) + (-1*63,0) + (-1*93,5) + (1*58,5) + (1*72,0)\}$$

C= -13,88, ou seja, ao substituir o catalisador A pelo catalisador B, o rendimento da reação cai em 13,88%.

Onde:

$$X_c = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad e \quad Y = \begin{pmatrix} 54,0 \\ 86,5 \\ 48,0 \\ 63,0 \\ 63,0 \\ 93,5 \\ 58,5 \\ 72,0 \end{pmatrix}$$

X_c = Vetor coluna referente ao efeito do catalisador.

Y = Vetor coluna referente às respostas.

K = Número de fatores.

Divisor - Efeito = $1/(2^{K-1}) = 1/4$.

Desta maneira, pode-se representar o cálculo do efeito do catalisador pela seguinte equação matricial:

$$C = (1/2^{K-1}) \cdot X_c^T \cdot Y,$$

Onde X_c^T é o vetor linha obtido pela transposição do vetor coluna X_c .

Representando-se a matriz unitária dos coeficientes de contrastes por X , obtém-se o produto $X_c^T \cdot Y$, através da Tabela 3.7.

$X^T \cdot Y =$	X^T								*	Y	$=$	$X^T \cdot Y$
	1	1	1	1	1	1	1	1				
	1	1	1	1	1	1	1	1	54,0		538,5	
	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	86,5		91,5	
	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	48,0		-55,5	
	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	63,0		35,5	
	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	63,0		-34,5	
	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	93,5		-3,5	
	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	58,5		3,5	
	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	72,0		0,5	

Tabela 3.7. Matriz $X^T \cdot Y$.

Obtida a matriz $X_c^T \cdot Y$, calcula-se, então, a média e os efeitos dos fatores como:

- Cálculo da média:

$$\text{Média} = X^t \cdot Y / 2^K = 538,5/8$$

$$\text{Média} = 67,31.$$

- Cálculo do efeito da temperatura T:
 $Efeito\ T = X^t * Y / 2^{K-1} = 91,5/4$
 $Efeito\ T = 22,88.$
- Cálculo do efeito do catalisador C:
 $Efeito\ C = -55,5/4 = -13,88.$
- Cálculo do efeito da concentração R:
 $Efeito\ R = 35,5/4 = 8,88.$
- Cálculo do efeito de interação TC:
 $Efeito\ TC = -34,5/4 = -8,63.$
- Cálculo do efeito de interação TR:
 $Efeito\ TR = -3,5/4 = -0,88.$
- Cálculo do efeito de interação CR:
 $Efeito\ CR = 3,5/4 = 0,88.$
- Cálculo do efeito de interação TCR:
 $Efeito\ TCR = 0,5/4 = 0,13.$

Efeitos		Valor
Média		67,31
T		22,88
C		-13,88
R		8,88
TC	=	-8,63
TR		-0,88
RC		0,88
TCR		0,13

Tabela 3.8. Vetor dos efeitos dos fatores e interações.

Assim, o vetor dos efeitos fica definido segundo a **Tabela 3.8**. Efetua-se desta forma, os cálculos dos efeitos utilizando o algoritmo adotado por Neto. A seguir, utiliza-se o algoritmo de Yates para comparação de resultados.

3.9.2. Algoritmo proposto por Yates

O algoritmo proposto por Yates (Juran, 1993) é um dos mais conhecidos e utilizados nas aplicações dos Projetos e Análises de Experimentos. São mostrados, a seguir, os passos necessários para sua realização, segundo descrição apresentada na **Tabela 3.9**.

Um fatorial de dois níveis com r réplicas contém $N=r \cdot 2^K$ realizações do experimento. A tabela de algoritmos associados de Yates apresentará $K+1$ colunas, além daquelas referentes às combinações dos fatores, isto é, as 2^K combinações de tratamentos na ordem padrão.

Na coluna 1 são introduzidos os resultados observados no caso de ensaios sem repetição, ou a média dos resultados para cada combinação de tratamento.

Calcula-se então, a metade superior da coluna 2, ou seja, seus quatro primeiros valores através das somas dos pares consecutivos dos valores da coluna 1, isto é, o primeiro mais o segundo valor, o terceiro mais o quarto e assim sucessivamente. A metade inferior é resultante das diferenças entre os mesmos pares consecutivos de valores, isto é, o segundo menos o primeiro valor, o quarto menos o terceiro e assim sucessivamente. Assim, o primeiro elemento da coluna três é obtido da soma do primeiro e segundo elementos da coluna dois e o quinto elemento é obtido da diferença entre o segundo e o primeiro elemento.

Obtém-se as demais colunas da mesma maneira, através das somas e diferenças dos pares na coluna precedente da forma descrita no passo 3.

As entradas da última coluna (coluna $K+1$) são denominadas $g(T)$, $g(A)$, $g(B)$, $g(AB)$, etc. As letras entre parênteses correspondem ao sinal (+) na notação geométrica. O primeiro valor $g(T)$ é dividido por N de maneira a fornecer a média geral. As estimativas dos efeitos, tanto principais quanto de interações são obtidas dividindo-se cada $g(\dots)$ por $N/2$. Para ilustrar, o cálculo da média, nesse caso, será $M = 538,5/16 = 67,3$ e o da interação $TC = -34,5/8 = -8,6$.

A	B	C	1	2	3	4	Efeitos estimados
-	-	-	54,0	140,5	251,5	538,5=g(T)	M=67,31
+	-	-	86,5	111,0	287,0	91,5=g(A)	T=22,88
-	+	-	48,0	156,5	47,5	-55,5=g(B)	C=-13,88
+	+	-	63,0	130,5	44,0	-34,5=g(AB)	TC=-8,63
-	-	+	63,0	32,5	-29,5	35,5=g(C)	R=8,88
+	-	+	93,5	15,0	-26,0	-3,5=g(AC)	TR=-0,88
-	+	+	58,5	30,5	-17,5	3,5=g(BC)	CR=0,88
+	+	+	72,0	13,5	-17,0	0,5=g(ABC)	TCR=0,13

Tabela 3.9. Cálculo dos efeitos dos fatores segundo Yates.

Observa-se que os valores obtidos para o efeito dos fatores coincidem para os dois métodos o que demonstra que, apesar da diferença na metodologia de cálculos, os resultados são praticamente os mesmos para ambos.

3.10. Estimativa do erro experimental

Existem diversas técnicas estatísticas para se determinar o erro experimental. Para experimentos que utilizam a replicagem, normalmente por possuírem pequenos números de fatores ou mesmo facilidade em se coletar os dados, existem técnicas específicas para o cálculo desses erros. Outros experimentos, talvez por possuírem um grande número de fatores ou até por outros motivos, tais como financeiro ou o técnico, que impeçam ou dificultem uma repetição, não utilizam a técnica da replicagem. Para estes casos, outras técnicas podem ser úteis para o cálculo do erro experimental, como por exemplo, desconsiderar efeitos de interação de ordem superior, utilizando-se assim, essas interações não consideradas no cálculo desse erro. Um dos métodos mais utilizados para o cálculo do erro experimental quando se trabalha com experimentos replicados é o método da variância, o qual será abordado a seguir.

3.11. O método da variância

Neste método, como cada um dos ensaios é realizado apenas duas vezes, $N_i=2$, fornecendo uma estimativa da variância com apenas um grau de liberdade, $v_i=N_i-1$, para cada combinação de fatores, a estimativa conjunta do exemplo tomado será $1*8 = 8$ graus de liberdade. Assim, tomando a média ponderada de todas as estimativas, utilizando como pesos os respectivos graus de liberdade, pode-se então, calcular o erro experimental. Utilizando a estimativa da variância observada em todos os ensaios, tem-se que:

$$S^2 = \{ \{ 1 * [(56-54)^2 + (52-54)^2] \} + \{ 1 * [(85-86,5)^2 + (88-86,5)^2] \} + \{ 1 * [(49-48)^2 + (47-48)^2] \} + \dots + \{ 1 * [(70-72)^2 + (74-72)^2] \} \} / 8$$

$$S^2 = (1*8 + 1*4.5 + 1*2 + 1*2 + 1*8 + 1*4.5 + 1*4.5 + 1*8) / 8$$

$$S^2 = 5,19.$$

Pode-se, também, calcular a variância da seguinte forma:

$$S^2 = \sum (d_i^2) / 2 * n,$$

Onde:

d_i : Diferença entre 2 observações correspondentes ao i -ésimo ensaio.

N: Número total de repetições do experimento.

Assim, tem-se:

$$S^2 = \{[(56-52)^2] + [(85-88)^2] + [(49-47)^2] + [(64-62)^2] + [(65-61)^2] + [(92-95)^2] + [(57-60)^2] + [(70-74)^2]\} / (2 \cdot 8)$$

$$S^2 = (16+9+4+4+16+9+9+16)/16$$

$$S^2 = 5,19.$$

Este valor é denominado de variância de uma observação individual. Como essa variância individual é estimada em 5,19, então a variância da média de duas observações será $(5,19)/2$.

Desta forma, a estimativa do erro padrão de um efeito será:

$$S(\text{efeito}) = \{(2^K) \cdot [(a_i)^2] \cdot [(S^2)/2]\}^{1/2}$$

$$S(\text{efeito}) = [8 \cdot (1/16) \cdot (5,2/2)]^{1/2}$$

$$S(\text{efeito}) = (1,3)^{1/2}$$

$$S(\text{efeito}) = 1,14.$$

A estimativa do erro padrão da média, é, então, calculada, como:

$$S(\text{média}) = S(\text{efeito})/2$$

$$S(\text{média}) = (1,14)/2$$

$$S(\text{média}) = 0,57.$$

3.12. Teste de significância dos efeitos

Os testes de significância são utilizados no Planejamento de Experimentos com a finalidade de se distinguir efeitos significativos dos não significativos, ou seja, o que deve ou não ser considerado como influente sobre as respostas analisadas. Diversos métodos são conhecidos, porém um dos mais utilizados são os gráficos normais e o testes t , baseados na *Distribuição de Student*.

Nos gráficos normais ou em forma de sino, ao se calcular a função acumulada, obtém-se uma curva em forma de S (sigmóide). Altera-se, então a escala do eixo das ordenadas com o intuito de transformar essa curva numa reta. Assim, os pontos que pertencerem à esta reta são considerados ruídos e os demais, fatores significativos.

No teste t , conhecendo o número total de graus de liberdade e adotando um determinado nível de significância, calcula-se um intervalo de confiança com o intuito de

analisar quais efeitos são significativos. O teste *t* é normalmente utilizado em boa parte dos experimentos pela facilidade na análise dos dados, o que nem sempre ocorre com a utilização dos gráficos normais.

3.13. O teste *t*

O teste *t* é bastante simples de ser utilizado. Após a realização do cálculo do erro experimental, pode-se utilizá-lo para verificar quais efeitos são ou não significativos. A distribuição de Student é definida pela seguinte expressão:

$$t(n-1) = (X_m - \mu) / [s/(n^{1/2})],$$

onde:

$t(n-1)$: Distribuição *t* com *N*-1 graus de liberdade.

(X_m, s) : Estimativas amostrais da média populacional μ e da variância populacional μ :
Média populacional.

$\sigma^{1/2}$: obtidos em amostras aleatórias de *N* elementos cada uma.

n: Número de elementos da amostra.

No caso do Planejamento de Experimentos, costuma-se fazer a seguinte analogia: Utilizar *N* como o número de repetições realizadas no experimento, o número de graus de liberdade (*v*) como o resultado do somatório do número de graus de liberdade da variância de cada experimento e o denominador da expressão como o erro padrão dos efeitos. Deve-se frisar que quanto mais afastado um efeito estiver do valor zero mais significativo ele será. Assim, para um efeito igual a zero, os resultados não sofrerão influência quando ocorrer alteração nos níveis dos fatores.

Para se determinar quais efeitos são significativos é necessário determinar um intervalo de confiança de modo a separar ruídos de efeitos significativos.

Para isto, é necessário primeiramente adotar um nível de confiança. Feito isso, procura-se numa tabela de distribuição *t* o valor correspondente à *N* graus de liberdade. Obtido esse valor, multiplica-se este pelo erro experimental dos efeitos. Desta forma, são considerados significativos todos os valores dos efeitos que, em valores absolutos, forem superiores à este produto. Retornando mais uma vez ao exemplo estudado e adotando um nível de confiança de 95%, conclui-se que o valor de *t* para 8 graus de liberdade é igual à 2,306. Multiplicando este valor pelo erro experimental, que será 1.14, obtém-se: $0+2.306*1.14 = 3.23$. Os efeitos que forem superiores, em valor absoluto, à esse valor são considerados como significativos, ou seja:

SIGNIF > | 3,23 |

Assim, no exemplo estudado, são considerados significativos os efeitos T, C, R e TC, sendo os demais considerados como ruídos.

3.14. Aplicações da técnica Projeto e Análise de Experimentos em soldagem.

Atualmente são observadas diversas aplicações do projeto e análise de experimentos nos mais diversos segmentos da manufatura com o intuito de otimizar produtos e processos. Rowlands *et al* (2000) informam que o Projeto e análise de Experimentos pode ser utilizado nas mais diversas áreas da manufatura como indústrias plásticas, automotivas, metalúrgicas, de processos, eletrônicos e semi condutores e indústrias de serviços.

Konda *et al* (1999) mostram uma aplicação do Projeto e Análise de Experimentos na fabricação de ligas cobre-berílio. Chowdhury & Gijo (2000) e Joseph (2000) retratam aplicações na fabricação de placas de circuito impresso. Buncick *et al* (2000) relatam a caracterização de um processo de deposição por plasma utilizando o Planejamento de Experimentos. Heaney & Lidy (2000) obtiveram melhorias consideráveis em processos de obtenção de polímeros de poliuretano.

Percebe-se, dessa forma, a diversidade de utilização desta ferramenta na otimização de processos produtivos em todas as áreas industriais. Dentre essas áreas, aquela referente aos processos de soldagem também tem sido alvo de constantes estudos, tanto por parte de engenheiros como também de pesquisadores.

MC Connell & MC Pherson (1997) analisaram a influência do ângulo da tocha, tipo de arame, progressão, preparação da junta, velocidade de soldagem, tensão, corrente e tipo de gás de proteção, no processo com eletrodo tubular, sobre a relação: (Comprimento de cordão defeituoso/Comprimento total do cordão). Concluiu-se que a progressão, seguida da tensão, foi o fator mais influente no experimento. Definiu-se, assim, uma combinação ótima de fatores de forma a reduzir o nível de defeitos do cordão de solda.

Antony (2000), através de um estudo de caso, estudou, no processo de soldagem à laser, utilizando um Planejamento fatorial fracionado em dois níveis, a influência da velocidade de soldagem, dos ângulos de incidência e reflexão, da energia do laser e do foco da lente sobre a resistência à fadiga nas soldas de válvulas direcionais controladas por solenóide. Obteve-se, assim aumento acima de 50% na vida útil desses componentes, reduziu-

se a variabilidade do processo em 65% e os custos em 20%. A capacidade operacional aumentou de 0,4 para 2.

Os autor *du Pin e Neto* (1998), utilizando-se de um planejamento fatorial completo em dois níveis, estudaram os efeitos dos parâmetros de pulso sobre a geometria do cordão de solda, em soldagem de chapa fina de aço inox AISI 304 pelo processo TIG pulsado. Foram analisadas as influências da corrente média, do ciclo ativo, da frequência e da velocidade de soldagem sobre as características geométricas dos cordões de solda, representadas pelas larguras da face e da raiz do cordão, pelas sobreposições da face e da raiz e pelo afastamento entre os pontos de solda. Concluiu-se que a utilização da corrente média se mostrou mais interessante que o uso da corrente de pico no experimento, devido à uma maior facilidade quanto ao ajuste dos parâmetros. A corrente de pico exerceu uma influência mais acentuada do que o ciclo ativo sobre a largura da poça de fusão quando a corrente média se mantém constante. A variação da corrente média e, conseqüentemente, da corrente de pico, não interferiu na distancia entre pontos. Além disso, a variação do tempo de pico ou do tempo de base, mantendo-se constante a frequência, não interferiu no afastamento entre pontos.

Baseando-se nas consideráveis melhorias obtidas com o emprego do Projeto e Análise de Experimentos na otimização dos processos de soldagem, optou-se em utilizar essa técnica na soldagem MIG pulsada com o intuito de desvendar certas particularidades, no que se refere a análise da influência dos parâmetros de pulso sobre a qualidade e produtividade dos cordões de solda, cujo desenvolvimento experimental se encontra descrito no **Capítulo 4**.

CAPÍTULO 4

MONTAGEM EXPERIMENTAL

4.1. Introdução

Neste capítulo são abordadas as informações pertinentes ao planejamento e preparação do experimento, onde define-se o modo de medição das respostas, a definição das grandezas consideradas fixas, os níveis adotados para cada fator e os equipamentos envolvidos.

Como relatado em capítulos anteriores, este trabalho tem como finalidade analisar os efeitos dos parâmetros de pulso, representados pela corrente de pico, corrente de base e ciclo ativo, além da velocidade de alimentação do arame, sobre a qualidade e produtividade do cordão de solda em um tipo de transferência tipicamente por spray. Para a concretização do trabalho, utilizou-se o laboratório de soldas (LSO) da Escola Federal de Engenharia de Itajubá-EFEI, contando, ainda, com o apoio dos laboratórios de Metrologia Dimensional e Metalografia, utilizados nas leituras das respostas obtidas.

Para a realização do experimento, optou-se em adotar a estrutura proposta por Schneider & Flesh (1982), abrangendo as seguintes etapas:

- Planejamento.
- Preparação.
- Execução.
- Processamento, análise e documentação.

As duas primeiras etapas são desenvolvidas neste capítulo, ficando o estudo das duas últimas reservado para o capítulo seguinte.

4.2. Planejamento

Nesta etapa, a preocupação principal se fundamenta na formulação do problema, nas definições operacionais, além da definição dos equipamentos utilizados no ensaio.

4.2.1. Formulação do problema

A preocupação preliminar na realização de um experimento, baseia-se na formulação do problema a ser analisado. Neste estudo, o problema foi formulado visando obter uma boa condição de soldagem, tanto em termos de qualidade como de produtividade, mediante

análise da influência dos parâmetros de pulso mais adequados para este propósito, em um tipo de transferência tipicamente por *spray* num processo de soldagem MIG pulsado. Isso foi obtido mediante a adoção do planejamento de experimentos para planejar os ensaios e analisar o problema.

4.2.2. Definições operacionais

Diversas definições fizeram-se necessárias para a realização do experimento, de forma a dar respaldo científico e assegurar a validação dos resultados obtidos.

a. Definição dos fatores e respostas

Conforme descrito no Capítulo 2, vários são os fatores que influenciam o processo de soldagem MIG pulsado. Para efeito de análise, os fatores adotados para este trabalho foram os parâmetro de pulso, ou seja, corrente de pico (I_p), corrente de base (I_b), tempo de pico (t_p) e tempo de base (t_b). Ainda, os tempos de pico e de base foram analisados em termos do Ciclo Ativo (CA), determinado através da **Equação 2.3**. Acrescentou-se ainda à esse estudo, a velocidade de alimentação do arame, por apresentar resultados consideráveis durante os ensaios preliminares e ser considerada na literatura como um dos parâmetros mais influentes sobre a geometria do cordão de solda. É importante mencionar que houve a preocupação de se definir o nível mínimo da corrente de pico acima do valor limite de transição globular/*spray*, de modo a garantir que a transferência ocorresse de forma predominantemente por *spray*.

As respostas estabelecidas para o projeto foram a qualidade do cordão, expressa em termos da penetração, diluição e índice de convexidade do cordão e a produtividade, que por sua vez passou a ser avaliada pelo índice de respingos gerados, em um tipo de soldagem com característica de transferência puramente por *spray*. Estabeleceu-se este conjunto de respostas em virtude de sua importância no contexto fabril. Vislumbra-se com isto estender a utilização do modo pulsado com transferência por *spray* para chapas com espessuras mais reduzidas, fornecendo pequenas quantidades de energia para a peça, de forma a evitar a ocorrência de deformações no metal de base.

Considerou-se para efeitos deste trabalho, que uma soldagem adequada é aquela em que obtém-se a maximização da penetração e da diluição associado a uma minimização do índice de convexidade e da perda de material depositado por respingos.

b. Definição dos parâmetros operacionais

Para a definição dos parâmetros operacionais a serem utilizados no trabalho, utilizou-se experiências prévias descritas na literatura. Excetuando-se os parâmetros de pulso e a velocidade de alimentação do arame, todas as demais grandezas foram consideradas fixas e seus valores adotados mediante referência na literatura, através de trabalhos pertinentes à área e ainda, através da execução de ensaios preliminares, conforme descreve-se a seguir.

Na literatura, observa-se que, segundo a publicação *Welding Technology Data* (1983), na soldagem do aço inoxidável, utilizando-se chapas com espessura de 4,7 mm e operando com correntes máximas de pico e de base de 370 A e 270 A respectivamente, utiliza-se um recuo de bico de contato de 5mm, com comprimento de arame de 20 mm, soldando-se com transferência por *spray* e vazão de gás de proteção, Ar+1% de O₂, entre 15 e 20 l/min. A *Welding Technology Data* (1984) informa que a extensão do eletrodo adequada para a soldagem de aços carbono se situa entre 13 e 25 mm na transferência por *spray*.

Os dados contidos na publicação *Welding Technology Data* (1982) informam que o diâmetro do eletrodo de 1,2 mm é o mais utilizado, sendo adequado para correntes situadas entre 100 e 400 A. Com este diâmetro, na soldagem de chapas de aço temperado de 6,4 mm de espessura, é usual a utilização de correntes de soldagem entre 250 e 400 A, velocidade de soldagem de 38 cm/min, comprimento do arame (*stick-out*) em torno de 22 mm e velocidade de alimentação do arame de 5,2 m/min.

Em um trabalho publicado por Nixon & Norrish (1992) na soldagem de aços carbono, com eletrodo ER70S-6 de diâmetro de 1,2 mm, diâmetro esse normalmente empregado, utilizou-se corrente de pico $I_p = 350$ A e tempo de pico, $t_p = 3,5$ ms gerando resultados bastante positivos no que se refere às características geométricas dos cordões.

Subramanian (1998), através de um Planejamento Fatorial em Três Níveis, analisou a influência das correntes de pico e de base, do ciclo ativo e da frequência de pulso sobre a velocidade de alimentação do arame, onde obteve para essa resposta, valores ótimos para a velocidade variando entre 3,302 e 10,566 m/min. Os níveis dos fatores se encontram na

Tabela 4.1.

Fatores	Unidade	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Corrente de pico	(A)	250	325	400
Corrente de base	(A)	50	100	150
Ciclo ativo	(%)	10	25	40
Frequência de pulso	(Hz)	50	225	400

Tabela 4.1. Níveis dos parâmetros de pulso. Fonte:Subramaniam (1998).

Quanto ao gás de proteção, diversos autores, entre eles, Lowery (1977), Stenbacka & Persson (1989), Wainer (1992), Dillenbeck & Castagno (1987) e Davies (1996) relatam as vantagens em se utilizar misturas de gases na soldagem de chapas de aço carbono quando comparados com a utilização de argônio puro. Entretanto, optou-se pela utilização do argônio puro na realização do experimento, objetivando determinar um padrão comparativo para trabalhos futuros.

Em experiências realizadas por Dutra (1996), algumas possíveis combinações de parâmetros operacionais, obtidas experimentalmente para o eletrodo ER70S-6 de 1,2 mm, utilizando-se Ar+5% CO₂, baseadas na capacidade e limitação da fonte de soldagem INVERSAL 450 (mesmo equipamento utilizado para o presente trabalho), podem ser descritas na **Tabela 4.2**.

Im	Ip	Ib	tp	tb	va
(A)	(A)	(A)	(ms)	(ms)	(m/min)
140	300	66	4	8.7	3.5
150	300	74	4	7.9	4.1
160	300	81	4	7.1	4.0
170	300	90	4	6.5	4.2
180	300	98	4	5.9	4.9
190	300	108	4	5.4	5.1

Tabela 4.2. Dados de ajustes no modo pulsado. Fonte: Dutra (1996)

Determinaram-se, baseado nas referências acima, valores para os parâmetros mantidos constantes durante o experimento, bem como para a determinação preliminar dos níveis dos fatores a serem analisados.

Os parâmetros mantidos constantes durante o experimento assumem então, os seguintes valores:

- Tipo de eletrodo: ER 70S-6 (C-0.1% e Mn-1.6%).
- Diâmetro do eletrodo: 1,2 mm.
- Tipo de gás: Argônio puro.
- Vazão de gás: 15 L/min.
- Velocidade de soldagem: 40 cm/min.
- Distância tocha-peça: 17,5 mm.
- Recuo do bico de contato: 5 mm
- Espessura do metal base: 6 mm.

Como material de base para este estudo, utilizou-se o aço ABNT 1045, cuja composição química é mostrada na **Tabela 4.3**. Os corpos de prova foram preparados nas dimensões de 120x40x6 mm. Vale ressaltar que este material foi escolhido com o intuito de permitir analisar, em trabalhos futuros, a influência metalúrgica dos parâmetros utilizados no presente trabalho sobre o material a ser soldado.

C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	Cr (%)	S (%)	Nb (%)
0,46	0,78	0,20	0.026	0.020	0.014	0.003

Tabela 4.3: Composição química (%) do aço ABNT 1045.

Para a determinação dos níveis máximo e mínimo dos fatores, adotou-se, baseado nas referências acima, valores iniciais para os níveis superiores e inferiores para que, através de ensaios preliminares, fossem determinados os valores definitivos desses níveis.

c. Determinação dos níveis máximos

1° ensaio: Foram fixados, preliminarmente, os seguintes parâmetros: Corrente de pico $I_p=350$ A, Corrente de base $I_b=100$ A, tempo de pico $t_p=4$ ms, tempo de base $t_b=1,3$ ms, Ciclo Ativo $CA=75\%$, velocidade de soldagem $v_s=30$ cm/min, velocidade de alimentação do arame $v_a=4$ m/min. Tais parâmetros geraram a colagem do arame no bico de contato, inviabilizando a realização da soldagem.

2° ensaio: A fim de solucionar o problema foram alterados os seguintes parâmetros: t_b de 1,3 para 4 ms, $CA=50\%$, v_a de 4 para 6m/min, v_s de 30 para 40 cm/min. Os demais parâmetros mantiveram-se constantes. Neste caso o cordão apresentou um bom aspecto porém o comprimento do arco foi considerado muito longo.

3° ensaio: Alterando I_p de 350 para 300 A e mantendo as demais condições do teste anterior. Tais condições geraram um cordão com bom aspecto, porém inferior ao 2° ensaio.

4° ensaio: Modificando I_p para 350 A e I_b de 100 para 70 A. O resultado gerado foi um cordão com bom aspecto.

5° ensaio: Alterando t_b de 4 para 2,7 ms ($CA=60\%$) e I_b de 70 A para 100 A. Tal situação acarretou um comprimento exagerado de arco.

6° ensaio: Alterando t_b de 2,7 para 4 ms ($CA=50\%$), mantendo as demais condições. Resultado: Cordões com excelente aspecto e bom comprimento de arco.

Baseado nestes testes preliminares, a condição final máxima adotada para os parâmetros de pulso foi:

$$I_p=350 \text{ A}, I_b=100 \text{ A}, t_p=4\text{ms}, t_b=4\text{ms} (\text{CA}=50\%).$$

Percebe-se que o tempo de pico foi mantido constante em 4ms, referenciado de Dutra (1996), durante todo o teste. Somente o tempo de base foi variável, sendo o ciclo ativo (CA) resultante dessa variação.

d. Determinação dos níveis mínimos

1º ensaio: Foram fixados preliminarmente as seguintes condições: corrente de pico $I_p=280 \text{ A}$, corrente de base $I_b=70 \text{ A}$, tempo de pico $t_p=4 \text{ ms}$, tempo de base $t_b=4\text{ms}$, Ciclo Ativo $\text{CA}=50\%$, velocidade de soldagem $v_s=40 \text{ cm/min}$, velocidade de alimentação do arame $v_a=6 \text{ m/min}$. Realizou-se a solda nesta situação obtendo-se assim, o seguinte diagnóstico: Solda com excesso de reforço.

2º ensaio: A fim de solucionar o problema, alterou-se t_b para $9,3 \text{ ms}$ ($\text{CA}=30\%$), mantendo-se as demais condições. Resultado: Não houve fusão do arame.

3º ensaio: Alterou-se novamente t_b para $7,43 \text{ ms}$, ($\text{CA}=35\%$) mantendo-se as demais condições. Resultado: Não houve fusão do arame.

4º ensaio: aumentando CA de 35% para 40% mantendo-se as demais condições. Resultado: Continua não havendo fusão do arame.

5º ensaio: Modificando a distancia tocha-peça de 13 mm para 17 mm , mantendo um recuo entre o bico de contato e a tocha de 5mm e as demais mantidas constantes. Resultado: Cordão com excelente aspecto, porém com excesso de reforço - condição final.

6º ensaio: Refazendo a condição máxima, onde $I_p=350 \text{ A}$, $I_b=100 \text{ A}$, $t_p=4\text{ms}$ e $t_b=4\text{ms}$ ($\text{CA}=50\%$), com a distancia tocha-peça de 17 mm . Resultado: Cordão com excelente aspecto.

Assim, a condição final mínima para os parâmetros de pulso adotada foi:

$$I_p=280 \text{ A}, I_b=70 \text{ A}, t_p=4\text{ms}, t_b=6\text{ms}(\text{CA}=40\%).$$

Optou-se ainda em analisar um quarto fator além do ciclo ativo e das correntes de pico e de base. A velocidade de alimentação do arame, por ser citada na literatura, Subramanian *et al* (1998), Rajasekaran (1999) e Quites e Dutra (1979), como um parâmetro bastante influente na geometria do cordão de solda, passou então a ser considerada na análise como um quarto fator. Realizaram-se mais quatro testes com a finalidade de definir-se os níveis desse fator. Como um dos valores já havia sido fixado nos ensaios anteriores, ou seja, $v_a=6 \text{ m/min}$,

realizaram-se 2 ensaios em ambas as condições, máxima e mínima, para os valores de $v_a=5$ m/min e $v_a=7$ m/min. Considerando todas as análises anteriores adotou-se as condições finais mostradas na **Tabela 4.4**.

Fatores	Unidade	Nível superior	Nível inferior
I_p	A	350	280
I_b	A	100	70
CA	%	50	40
v_a	M/min.	6	5

Tabela 4.4. Níveis operacionais dos fatores.

f. Montagem experimental

O banco de ensaios constituiu-se basicamente de uma fonte de soldagem transistorizada inversora digitalizada, com imposição de corrente no modo pulsado, a qual possibilitou flexibilidade no ajuste dos parâmetros, associada a um sistema guia com velocidade controlada, permitindo o deslocamento da tocha durante a realização das soldagens. Foi utilizado um tacômetro associado ao sistema de alimentação do arame para se avaliar o comprimento de arame consumido em cada cordão e, desta forma, avaliar a quantidade de respingos gerada durante execução de cada passe.

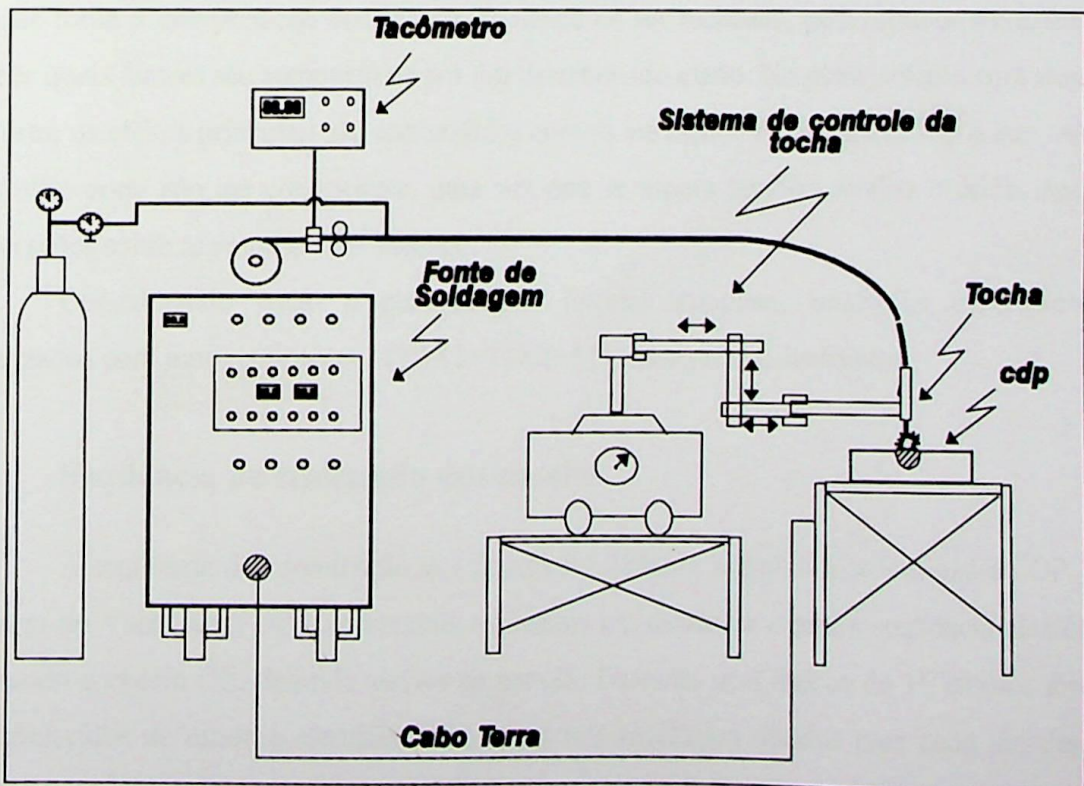


Figura 4.1- Esquema da montagem experimental.

A **Figura 4.1** mostra o esquema da montagem experimental. O modo de operação da fonte com imposição de corrente permite a regulação da velocidade de alimentação do arame durante a soldagem, sendo a tensão variável durante o processo.

4.2.3. Determinação da seqüência de realização dos ensaios

a. Definição do método de coleta e análise dos dados

Para coleta e análise dos dados utilizou-se o Planejamento Fatorial Completo em Dois Níveis, com blocagem, replicação e aleatorização. Isso foi obtido através da utilização do software Statgraphics. Para o teste de significância foi utilizado o Teste t de Student. Vale também lembrar que o Planejamento Fatorial Fracionado também poderia ter sido utilizado no ensaio, o que reduziria o número de ensaios. Porém, a opção em se adotar o fatorial completo foi proveniente da facilidade em se coletar os dados, fato esse, decorrente da informatização do laboratório e da versatilidade da fonte de soldagem, além de uma maior precisão dos resultados obtidos quanto comparado com o fatorial fracionado, além de uma maior quantidade de informações extraídas do processo. Isso é relevante devido a um significativo desconhecimento da influência das variáveis sobre as respostas do sistema. Além disso tal sistemática elimina a presença de fatores confundidos presentes no planejamento fracionado, o que torna a interpretação dos resultados difícil de ser realizada, pois torna-se complicado saber quais fatores são responsáveis por um determinado efeito. No planejamento com quatro fatores, os efeitos principais são confundidos com as interações de terceira ordem o que, neste trabalho pode não ser conveniente, uma vez que se espera também avaliar o efeito dessas interações sobre as respostas do sistema.

Considerando então o planejamento fatorial completo, sendo os experimentos realizados com uma replicagem, $(2^4) \times 2 = 16 \times 2 = 32$ ensaios foram realizados.

b. Seqüência de realização dos ensaios

A seqüência de combinação dos fatores foi definida segundo a ordem padrão OP, ou ordem de Yates, com os experimentos realizados em duplicata e numa seqüência aleatória, segundo a ordem OE, definida através de sorteio. Destarte, dois blocos de 16 ensaios foram estabelecidos de modo a identificar diferenças nos resultados obtidos para cada um desses blocos, julgando assim se essa diferença é ou não estaticamente significativa. Portanto, neste

trabalho, um bloco se refere à uma repetição completa. A **Tabela 4.5** mostra o planejamento experimental idealizado.

OE1	OE2	OP	Ip	Ib	CA	va
-----	-----	-----	A	A	%	m/min
5	8	1	280	70	40	5
12	3	2	350	70	40	5
1	9	3	280	100	40	5
4	15	4	350	100	40	5
9	13	5	280	70	50	5
6	2	6	350	70	50	5
15	12	7	280	100	50	5
3	7	8	350	100	50	5
2	5	9	280	70	40	6
10	11	10	350	70	40	6
8	1	11	280	100	40	6
14	6	12	350	100	40	6
11	4	13	280	70	50	6
7	10	14	350	70	50	6
16	14	15	280	100	50	6
13	16	16	350	100	50	6

Tabela 4.5. Planejamento experimental.

c. Preparação dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios, os corpos de prova foram cortados, esmerilhados e identificados através de dois algarismos, onde o primeiro deles se refere à ordem experimental, 1ª ou 2ª, e o segundo à ordem na qual os ensaios foram realizados. Assim, o corpo de prova 24, de acordo com a **Tabela 4.5**, relaciona-se à 2ª ordem experimental, 4º ensaio e 13º ordem padrão OP.

Realizados os ensaios, os corpos de prova foram seccionados, polidos e atacados quimicamente para que as leituras pudessem ser realizadas. A seguir, com o auxílio de um projetor de perfis e de um planímetro, registrou-se as áreas de penetração (S_p) e de reforço (S_r), bem como a penetração do cordão (p), sua largura (b) e reforço (r), conforme esquema mostrado na **Figura 4.2**.

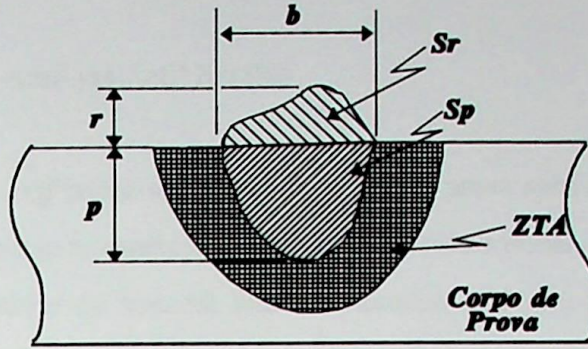


Figura 4.2 - Representação da área da seção transversal do cordão de solda.

d. Determinação das respostas

De posse dos resultados dos parâmetros acima descritos determinou-se alguns índices derivativos os quais foram utilizados na análise do processo.

Quanto ao quesito qualidade, optou-se por avaliá-lo sob a forma das características geométricas do cordão, representadas pela penetração (p), pela diluição (D) e pelo índice de convexidade(IC) do cordão de solda.

A diluição do cordão de solda é um índice importante no sentido de estabelecer uma relação percentual da área penetrada do cordão sendo a mesma definida pela **Equação 4.1**.

$$D = (Sp / (Sp + Sr)) * 100 (\%) \quad (4.1)$$

O índice de convexidade foi definido segundo a **Equação 4.2**.

$$IC = (r/b) * 100 (\%) \quad (4.2)$$

onde:

r= reforço do cordão de solda (mm).

b= Largura do cordão de solda (mm).

Como orientação, procurou-se estabelecer padrões de qualidade aceitáveis onde índices de convexidade próximos de 30% são considerados adequados (Silva, 2000). Um IC superior a 30% gera excessivo reforço com pequena penetração.

Com relação a produtividade, optou-se por utilizar como indicador o índice de respingos (IR) gerados durante o processo, definido pela relação entre a quantidade de material efetivamente depositada comparativamente e a quantidade de material fornecida, determinada pela **Equação 4.3**.

$$IR=[1 - (mf- m\phi)/mt]*100 (\%) \quad (4.3)$$

Nesta equação, mf refere-se à massa do corpo de prova após a soldagem, eliminado qualquer traço de respingo remanescente; $m\phi$ refere-se à massa inicial do corpo de prova e mt diz respeito a quantidade de material fornecida durante soldagem através do sistema de alimentação do arame. Esta massa fornecida foi determinada com o auxílio de um tacômetro, o qual permitiu avaliar o comprimento de arame consumido em um determinado tempo de soldagem. De posse deste resultado é possível, através da densidade do material e do diâmetro do arame, determinar a massa total fornecida considerando-se, para isto, a **Equação 4.4**.

$$mt= \text{Densidade} * \text{Volume} \quad (4.4)$$

Onde:

Volume = $[(\pi * \phi^2)/4] * l$, com $\phi = 1,2$ mm (diâmetro do eletrodo) e l como sendo o comprimento do arame. O valor da densidade do material utilizado foi de $7,692 \text{ Kg/cm}^3$, valor esse obtido pela pesagem de 1 m de arame consumível.

Vale ressaltar que a diferença entre a massa depositada e a massa consumida é decorrente da quantidade de respingos apresentada para uma determinada combinação de fatores.

No capítulo seguinte são apresentados os resultados obtidos bem como as suas correspondentes análises.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para os ensaios realizados, conforme sequenciamento de testes descritos no capítulo anterior. Inicialmente apresentou-se os resultados das medições diretas para determinação dos índices de respingos e posteriormente os resultados derivados da geometria do cordão de solda. Em função destes valores, determinou-se alguns índices os quais serviram de base para as análises dos resultados.

Como descrito anteriormente, foram analisadas quatro respostas, sendo os experimentos delineados de acordo com o planejamento fatorial completo em dois níveis, com uma única repetição, resultando em 32 experimentos apresentados na ordem padrão (OP), com os parâmetros corrente de pico e corrente de base, ciclo ativo e velocidade de alimentação do arame variados aleatoriamente conforme estabelecido na **Tabela 4.5**.

Apresentados os resultados, os mesmos foram processados e analisados separadamente através da utilização de um *software* comercial (Statgraphics), sendo estabelecidos a significância dos efeitos, a influência desses efeitos sobre a superfície de resposta e a melhor combinação dos mesmos no sentido de melhorar a qualidade e produtividade dos cordões de solda, analisando para isto a penetração, a diluição, o índice de convexidade e finalmente, o índice de respingos gerados durante o processo de soldagem. Além disso, mediante utilização de planilhas no Microsoft Excel, **Anexo 1**, foram obtidos os valores dos efeitos e suas interações para as metodologias de Neto e Yates, onde confrontaram-se os resultados obtidos com aqueles gerados pelo Statgraphics.

5.1. Resultados obtidos dos ensaios

A **Tabela 5.1** mostra os dados coletados para os corpos de prova antes e após a soldagem, sendo o índice 1 representativo da primeira seqüência de experimentos e o índice 2 indicativo da replicagem.

Os símbolos $m\phi$ e mf referem-se às massas inicial e final dos corpos de prova, medidas antes e após a realização das soldas, através de uma balança de precisão. A variável l refere-se ao comprimento do arame, medido através de um tacômetro digital acoplado na fonte de soldagem. Através da diferença das médias das massas finais e iniciais, obteve-se a massa medida nos corpos de prova (mcp), a qual foi utilizada no cálculo do índice de respingos.

Utilizou-se o comprimento do arame para o cálculo da massa de arame teórica fornecida (mt) durante a soldagem, sendo esta calculada pela **Equação 4.4**.

OP	m ϕ 1	m ϕ 2	m ϕ 1	m ϕ 2	l1	l2	mcp1	mcp2	mt1	mt2
----	g	g	g	g	m	m	g	g	g	g
1	331,9	308,5	343,1	320,3	1,34	1,45	11,2	11,8	11,65	12,61
2	312,2	302,9	324,7	315,7	1,44	1,50	12,5	12,8	12,52	13,05
3	290,4	276,9	300,2	287,8	1,15	1,30	9,8	10,9	10,00	11,30
4	304,6	396,0	314,7	409,6	1,18	1,57	10,1	13,6	10,26	13,66
5	304,5	406,5	316,4	417,3	1,40	1,26	11,9	10,8	12,17	10,96
6	330,0	264,3	342,0	275,7	1,39	1,32	12,0	11,4	12,09	11,48
7	338,2	390,5	349,3	405,3	1,30	1,71	11,1	14,8	11,31	14,87
8	293,5	274,4	302,5	286,1	1,04	1,36	9,0	11,7	9,05	11,83
9	299,8	326,9	312,5	341,0	1,50	1,67	12,7	14,1	13,05	14,52
10	357,9	412,5	371,8	430,2	1,65	2,07	13,9	17,7	14,35	18,00
11	288,3	302,2	302,1	315,5	1,65	1,57	13,8	13,3	14,35	13,65
12	368,6	278,3	383,2	291,5	1,70	1,57	14,6	13,2	14,79	13,65
13	271,4	325,5	284,4	339,8	1,55	1,70	13,0	14,3	13,48	14,79
14	281,0	254,0	294,2	267,6	1,55	1,57	13,2	13,6	13,48	13,65
15	400,4	403,8	414,7	419,0	1,71	1,81	14,3	15,2	14,87	15,74
16	325,1	377,2	338,3	391,4	1,53	1,64	13,1	14,2	13,30	14,26

Tabela 5.1. Dados obtidos do ensaio.

Após a realização das soldagens, seccionamento e polimento dos corpos de provas, obteve-se, através de um projetor de perfil, as leituras das grandezas utilizadas na determinação das características geométricas do cordão, conforme metodologia descrita no Capítulo 4, com os resultados apresentados na **Tabela 5.2**, sendo o índice b a largura, p a penetração, r o reforço, S_p a área de penetração e S_r a área de reforço do cordão de solda.

De posse dos resultados mostrados nas **Tabelas 5.1 e 5.2**, obteve-se a leitura das respostas, representadas pela penetração (p), diluição (D), índice de convexidade (IC) e índice de respingos (IR), segundo a **Tabela 5.3**, as quais permitiram analisar a qualidade e produtividade dos cordões. Além disso, determinou-se para cada seqüência do experimento (OP), o valor da corrente média utilizada, calculada conforme **Equação 2.1**.

OP	b1	b2	p1	p2	r1	r2	Sp1	Sp2	Sr1	Sr2
----	mm	mm	mm	Mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²
1	7,45	7,85	1,55	1,40	2,80	2,90	5,4	4,9	1,55	1,59
2	6,20	6,90	1,70	1,55	3,00	2,80	4,8	5,0	1,38	1,44
3	7,20	6,70	1,70	1,60	2,80	2,70	5,6	5,7	1,54	1,49
4	7,05	5,45	1,80	1,70	3,10	3,20	4,3	4,0	1,48	1,41
5	7,45	7,00	1,70	2,20	2,80	3,20	6,9	6,7	1,62	1,66
6	6,50	5,50	1,65	1,75	3,45	3,95	3,3	3,4	1,72	1,78
7	7,90	8,30	1,65	1,60	2,85	2,90	5,0	5,5	1,58	1,54
8	7,85	8,35	1,75	2,00	3,00	2,80	5,3	6,8	1,65	1,69
9	6,40	6,90	0,80	1,00	3,70	3,70	2,4	2,4	1,82	1,83
10	7,65	8,45	2,10	2,10	3,15	3,10	6,7	7,0	1,85	1,74
11	7,05	7,30	1,10	1,05	3,35	3,60	2,9	6,6	1,81	1,82
12	8,75	8,35	1,60	2,15	3,20	2,95	7,8	7,5	1,93	1,92
13	8,45	7,65	1,80	2,00	3,10	3,20	6,9	7,4	1,84	1,82
14	9,45	8,00	1,80	2,15	3,05	3,25	6,4	6,5	1,95	1,76
15	8,90	7,80	2,00	1,90	2,95	3,10	8,4	8,0	1,80	1,66
16	8,75	7,35	2,40	2,25	3,05	3,40	7,5	6,4	1,90	1,58

Tabela 5.2. Resultados obtidos para os parâmetros geométricos dos cordões de solda.

OP	Ip	Ib	CA	va	p1	p2	D1	D2	IC1	IC2	IR1	IR2	Im
-	A	A	%	m/min	mm	mm	%	%	%	%	%	%	A
1	280	70	40	5	1,55	1,40	25,73	23,56	37,58	36,94	4,1	6,9	154
2	350	70	40	5	1,70	1,55	25,81	25,77	48,39	40,58	0,2	1,9	182
3	280	100	40	5	1,70	1,60	26,67	27,78	38,89	40,30	2,1	3,7	172
4	350	100	40	5	1,80	1,70	21,45	22,23	43,97	58,72	1,6	0,4	200
5	280	70	50	5	1,70	2,20	29,72	28,76	37,58	45,71	2,3	1,5	175
6	350	70	50	5	1,65	1,75	15,93	15,84	53,08	71,82	0,7	0,7	210
7	280	100	50	5	1,65	1,60	24,10	26,21	36,08	34,94	1,9	0,5	190
8	350	100	50	5	1,75	2,00	24,31	28,75	38,22	33,53	0,5	1,1	225
9	280	70	40	6	0,80	1,00	11,55	11,41	57,81	53,62	2,7	3	154
10	350	70	40	6	2,10	2,10	26,25	28,54	41,18	36,69	3,2	1,7	182
11	280	100	40	6	1,10	1,05	13,82	26,43	47,23	49,32	4	2,7	172
12	350	100	40	6	1,60	2,15	28,78	28,09	36,57	35,33	1,3	3,4	200
13	280	70	50	6	1,80	2,00	27,33	28,96	36,69	41,83	3,7	3,4	170
14	350	70	50	6	1,80	2,15	24,62	26,79	32,28	40,63	2,1	0,4	210
15	280	100	50	6	2,00	1,90	31,66	32,52	33,15	39,74	4	3,6	185
16	350	100	50	6	2,40	2,25	28,30	28,83	34,86	46,26	1,6	0,5	225

Tabela 5.3. Sequenciamento e resultados derivados dos experimentos.

Sob o ponto de vista de análise dos resultados, o critério qualidade do cordão de solda foi avaliado separadamente, através de análises das respostas penetração, diluição e índice de convexidade do cordão. Já a produtividade da solda foi analisada sob o ponto de vista de formação de respingos. Mediante as leituras obtidas, processou-se os dados, utilizando um software comercial (Statgraphics) onde, através da análise fatorial completa, determinou-se os efeitos dos fatores e suas interações, bem como o erro do experimento. As respostas obtidas estão contidas na **Tabela 5.4**, considerando-se para isto interações de até 3ª ordem.

Fatores	Penetração (mm)	Diluição (%)	IC (%)	IR (%)
Média	1,74 ±0,03	24,89 ±0,47	42,49 ±1,01	2,23 ±0,18
Ip	0,34 ±0,06	0,26 ±0,93	1,54 ±2,03	-1,80 ±0,35
Ib	0,06 ±0,06	2,71 ±0,93	-4,08 ±2,03	-0,35 ±0,35
CA	0,36 ±0,06	3,05 ±0,93	-2,92 ±2,03	-0,90 ±0,35
va	0,06 ±0,06	0,70 ±0,93	-2,07 ±2,03	0,70 ±0,35
Ip*Ib	0,04 ±0,06	-0,06 ±0,93	-0,57 ±2,03	0,28 ±0,35
Ip*CA	-0,23 ±0,06	-4,74 ±0,93	4,08 ±2,03	0,14 ±0,35
Ip*va	0,28 ±0,06	4,31 ±0,93	-8,49 ±2,03	0,19 ±0,35
Ib*CA	0,00 ±0,06	0,63 ±0,93	-3,77 ±2,03	0,21 ±0,35
Ib*va	0,03 ±0,06	1,41 ±0,93	1,80 ±2,03	0,46 ±0,35
CA*va	0,19 ±0,06	3,72 ±0,93	-3,62 ±2,03	0,56 ±0,35
Ip*Ib*CA	0,16 ±0,06	3,47 ±0,93	-2,81 ±2,03	-0,20 ±0,35
Ip*Ib*va	-0,07 ±0,06	-2,11 ±0,93	3,41 ±2,03	-0,55 ±0,35
Ip*CA*va	-0,16 ±0,06	-2,81 ±0,93	3,53 ±2,03	-1,05 ±0,35
Ib*CA*va	0,11 ±0,06	-1,35 ±0,93	6,70 ±2,03	-0,30 ±0,35

Tabela 5.4. Efeitos principais, de interação e erro experimental das respostas.

5.2. Análise da penetração do cordão de solda

A penetração do cordão de solda é uma propriedade de fundamental importância na análise da influência dos parâmetros de pulso na qualidade da solda, especialmente pela sua direta correlação com os tipos de transferências presentes. No caso deste trabalho, onde optou-se pela análise da influência dos parâmetros de pulso em um mecanismo de transferência tipicamente por *spray*, tanto a penetração máxima passa a ser de fundamental importância no sentido de se trabalhar chapas mais espessas, quanto a penetração mínima importante no sentido de estender a utilização deste tipo de transferência para aplicações em chapas mais finas. Para isto é fundamental estabelecer o efeito das variáveis de pulso sobre a penetração da solda, bem

como seu nível de significância estatística, sendo a distribuição de Student um meio efetivo de estimar estes efeitos.

5.2.1. Efeitos das variáveis sobre a penetração da Solda

Para se determinar a significância dos efeitos das variáveis na superfície de resposta é necessário determinar o intervalo de confiança. No caso da análise da penetração da solda, tem-se, considerando interações de 3ª ordem, a presença de 16 graus de liberdade. Adotando um nível de 95% de significância, com $t = 2,12043$, obtém-se então, a seguinte região de aceitação:

$$(t_{95\%, 16}) * (\pm 0,05694) \Rightarrow (2,12043) * (\pm 0,05694) = \pm 0,12074.$$

Dessa forma, passam a ser considerados significativos os efeitos e interações cujos valores absolutos sejam superiores à esse valor.

Dos resultados da **Tabela 5.4** verifica-se que os efeitos I_p , CA e as interações I_p*CA , I_p*va , $CA*va$, I_p*I_b*CA e $I_p*CA*va$ foram considerados significativos. Destes resultados o ciclo ativo (CA) foi o efeito mais significativo, seguido da corrente de pico (I_p) e das interações I_p*va , I_p*CA , $CA*va$, $I_p*CA*va$ e I_p*I_b*CA sucessivamente.

Observa-se, ainda, que a penetração média dos experimentos se situa próxima de 1,8 mm. As combinações que promoveram maior penetração no cordão de solda foram aquelas referentes às ordens padrão OP16 e OP10 da **Tabela 5.3**, cujas combinações de níveis e valores são as seguintes:

OP 16 - Níveis $I_p(+)$ $I_b(+)$ $CA(+)$ $va(+)$ - Penetração média de 2,33 mm.

OP 10 - Níveis $I_p(+)$ $I_b(-)$ $CA(-)$ $va(+)$ - Penetração média de 2,10 mm.

5.2.2. Influência dos fatores sobre a penetração da Solda

A **Figura 5.1** mostra os efeitos principais das variáveis em estudo, relativas a penetração da solda resultante e obtidos através do *software Statgraphics*. Observa-se que para todos os fatores, a passagem do nível mínimo (-) para o nível máximo (+) resulta em aumento da penetração do cordão. Percebe-se ainda que a corrente de pico (I_p) e o ciclo ativo (CA) apresentam os resultados mais significativos, representados por uma maior inclinação da reta em relação a horizontal.

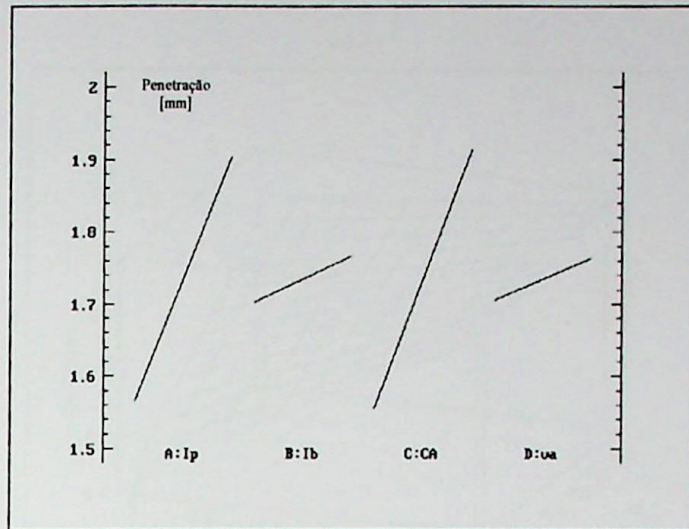


Fig. 5.1. Influência dos fatores sobre a penetração.

5.2.3. Influência da interação dos fatores sobre a penetração da Solda

Como pode ser visto na **Figura 5.1** o efeito isolado da corrente de pico e do ciclo ativo promovem um aumento na penetração do cordão. Contudo, a interação entre ambos, **Figura 5.2**, mostra que há um substancial aumento relativo da penetração, maior inclinação da reta, quando o ciclo ativo é mantido em seu nível mínimo, reta (-) e a corrente de pico (I_p) passa de 270 A, nível (-), para 350 A, nível (+).

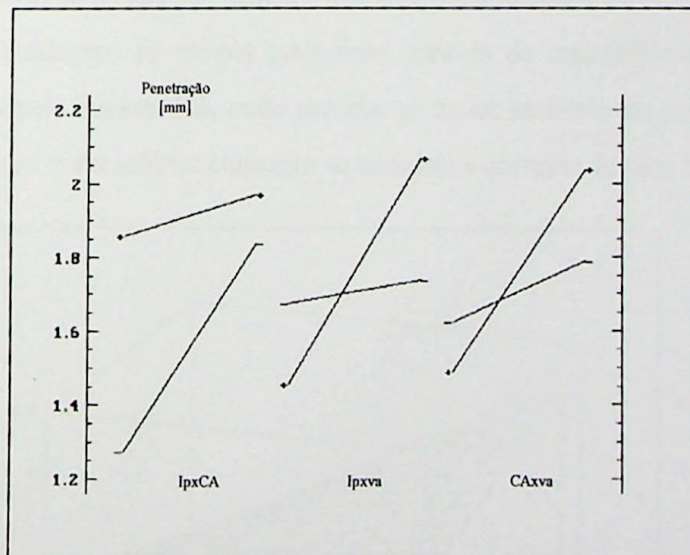


Figura 5.2 Interações entre $I_p \times CA$, $I_p \times va$ e $CA \times va$ sobre a penetração.

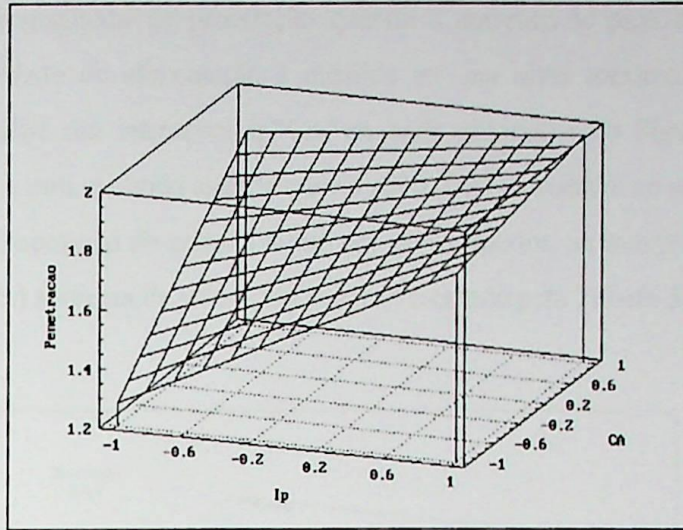


Figura 5.3 Efeito da interação entre I_p *CA sobre a penetração.

Neste caso, nota-se também que embora a penetração máxima continue sendo inferior aquela onde o ciclo ativo é máximo, há de se destacar que existe uma substancial redução no valor da corrente média (I_m) imposta à soldagem em questão, onde no primeiro caso I_m foi de 182 A (I_{p+} e $CA-$) e no segundo caso a corrente média foi de 225 A (I_{p+} e $CA+$). Isto é significativo para a soldagem, visto ser possível obter penetrações relativamente grandes sem necessariamente impor grande quantidade de calor à peça que se está soldando, gerando em consequência menores deformações, aliando maiores possibilidades de estender a utilização do processo para soldagens de chapas mais finas, através de transferência por *spray*. Tal análise é reforçada pela **Figura 5.3**, onde percebe-se maior aumento de penetração quando CA mantém-se no seu nível inferior enquanto se aumenta a corrente de pico I_p .

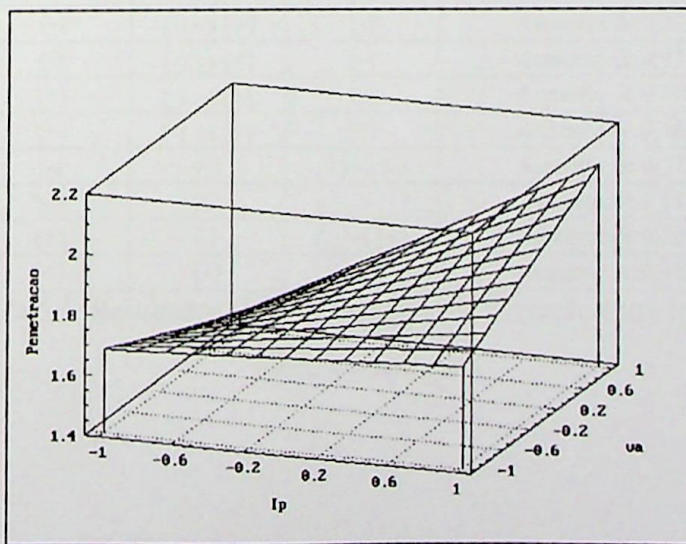


Figura 5.4 Efeito da interação entre I_p * v_a sobre a penetração.

Na análise da interação entre as variáveis I_p*va , representadas pelas Figuras 5.2 e 5.4, nota-se um maior resultado de penetração quando a corrente de pico aumenta de valor enquanto a velocidade de alimentação é mantida em seu nível máximo. Tal condição é reforçada pela análise das interações $I_p*CA*va$, onde observa-se da Figura 5.5 que uma maior penetração, 1 mm, é obtida quando o ciclo ativo (CA) se mantém no seu nível inferior e a velocidade de alimentação do arame (va) no seu nível superior, ao mesmo tempo em que a corrente de pico (I_p) aumenta de valor, fato esse representado pela Tabela 5.5.

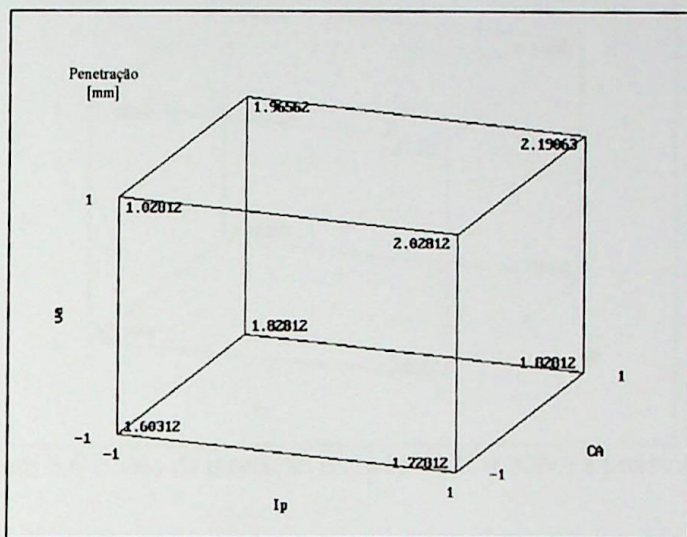


Figura 5.5 Efeito da interação entre $I_p*CA*va$ sobre a penetração.

I_p	CA	va	Penetração (mm)
(-) → (+)	(-)	(-)	Aumento de 0,125
(-) → (+)	(-)	(+)	Aumento de 1,0
(-) → (+)	(+)	(-)	Nem aumento nem redução
(-) → (+)	(+)	(+)	Aumento de 0,225
(-)	(-) → (+)	(-)	Aumento de 0,225
(-)	(-) → (+)	(+)	Aumento de 0,938
(+)	(-) → (+)	(-)	Aumento de 0,100
(+)	(-) → (+)	(+)	Aumento de 0,163
(-)	(-)	(+) → (-)	Aumento de 0,575
(-)	(+)	(-) → (+)	Aumento de 0,138
(+)	(-)	(-) → (+)	Aumento de 0,300
(+)	(+)	(-) → (+)	Aumento de 0,363

Tabela.5.5. Resultados obtidos do gráfico de interação entre $I_p*CA*va$ sobre a penetração.

A condição da corrente de base (Ib) que resulta num melhor resultado para a penetração pode ser obtida pela combinação que gera a segunda maior penetração do experimento, OP 10, ou seja, 2,1 mm, onde Ip(+), Ib(-), CA(-) va(+). Tal nível é reforçado pela análise da interação significativa Ip*Ib*CA, **Figura 5.6** onde, para CA mantida constante em seu nível inferior (-) e aumentando-se Ip, obtém-se para Ib(-) aumento de 0,675 mm, fato esse melhor observado pela **Tabela 5.6**.

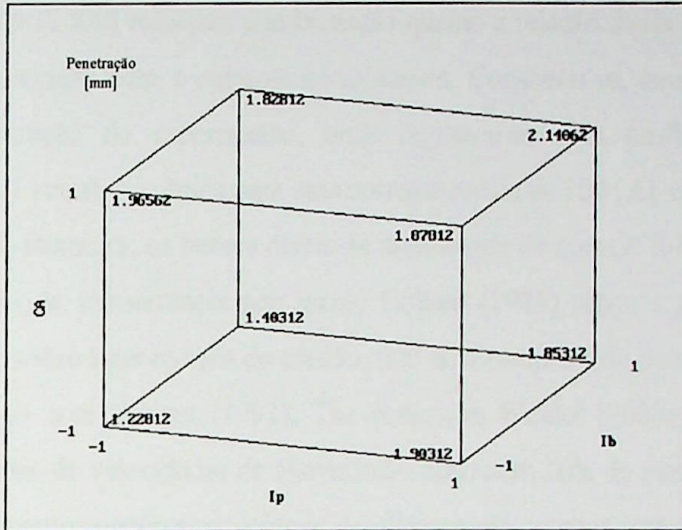


Figura 5.6 Efeito da interação entre Ip*Ib*CA sobre a penetração.

Ip	Ib	CA	Penetração (mm)
(-) → (+)	(-)	(-)	Aumento de 0,675
(+) → (-)	(-)	(+)	Aumento de 0,088
(-) → (+)	(+)	(-)	Aumento de 0,450
(-) → (+)	(+)	(+)	Aumento de 0,313
(-)	(-) → (+)	(-)	Aumento de 0,175
(-)	(+) → (-)	(+)	Aumento de 0,138
(+)	(+) → (-)	(-)	Aumento de 0,050
(+)	(-) → (+)	(+)	Aumento de 0,263
(-)	(-)	(-) → (+)	Aumento de 0,738
(-)	(+)	(-) → (+)	Aumento de 0,425
(+)	(-)	(+) → (-)	Aumento de 0,025
(+)	(+)	(-) → (+)	Aumento de 0,288

Tabela 5.6. Resultados obtidos do gráfico de interação entre Ip*Ib*CA sobre a penetração.

Dessa forma, a combinação que, apesar de não fornecer a maior penetração, é a que permite obter o maior ganho relativo à penetração, conforme análise anterior é aquela onde se tem:

OP 10 - Ip(+), Ib(-), CA(-), va(+) Penetração média = 2,1 [mm] Im=182 [A]

A condição de máxima penetração é aquela onde os fatores assumem os seguintes níveis:

OP 16 - Ip(+) **Ib(+)** **CA(+)** **va(+)** Penetração média = 2,33 [mm] $I_m = 225$ [A]

5.2.4. Comparação dos resultados com a literatura

O experimento realizado mostrou a relação direta entre o aumento da corrente de soldagem e a penetração do cordão de solda. Diversos autores (Phillips (1968), Trevisan *et al* (1998), Kim & Eagar (1993) e Wahab & Painter (1997)) e a publicação The American Welder (2000) reforçam a informação quanto a relação direta entre o conseqüente aumento da penetração com a corrente de soldagem. Constatou-se, também que o máximo ganho de penetração do experimento, onde registrou-se uma profundidade média de penetração de 2,1 [mm], foi obtida para uma corrente média de 182 [A], comprovando, ante o embasamento da literatura, os baixos níveis de intensidade de energia fornecidos ao metal de base para o tipo de transferência por *spray*. Collard (1988) relata a pouca influencia da corrente de base sobre a penetração do cordão, fato esse comprovado pelos testes realizados.

De acordo com Wainer (1992), The American Welder (2000) e Lambert (1989), baixas intensidades de velocidades de alimentação acarretam falta de penetração no metal de base, ou seja, quanto menor a velocidade de alimentação, menor será a penetração. Neste experimento, onde trabalha-se com velocidades de alimentação assumindo os valores de 5 e 6 m/min, constatou-se, através da análise estatística, a pouca influência desse fator sobre a penetração. Percebe-se ainda que as condições de máxima penetração são obtidas para a condição de maior velocidade de alimentação do arame, ou seja, 6 m/min. Isto reforça o que foi pronunciado pela literatura.

5.3. Análise da diluição do cordão de solda

A diluição é outro fator importante no controle de qualidade de uma soldagem, expressando a porcentagem do metal de depósito, ou seja, a porcentagem do metal do eletrodo que participa da zona fundida. Através da relação entre a área penetrada e a área de reforço é possível estabelecer uma correlação entre as variáveis do processo no sentido de melhor controlar as propriedades da solda resultante.

5.3.1. Efeitos das variáveis sobre a diluição da Solda

Considerando a mesma forma de análise do caso anterior e adotando um nível de 95% de significância, com $t = 2,12043$, tem-se, então, para os resultados obtidos, conforme **Tabela**

5.3, a seguinte região de aceitação:

$$(t_{95\%,16}) * (+/- 0,930745) \Rightarrow (2,12043) * (+/- 0,930745) = +/- 1,9735.$$

Dessa forma, de acordo com a **Tabela 5.4**, os efeitos Ib e CA e as interações Ip*CA, Ip*va, CA*va, Ip*Ib*CA, Ip*Ib*va e Ip*CA.va foram considerados significativos. As interações mais significativas em ordem decrescente foram Ip*CA, Ip*va, CA*va, Ip*Ib*CA, CA, Ip*CA*va, Ib e Ip*Ib*va.

Observando os resultados apresentados na **Tabela 5.3**, nota-se que a diluição média se situou próxima de 25%, ou seja, a área de penetração corresponde a cerca de 25% da área total do cordão contra 75% de área de reforço. Dentro das condições idealizadas no experimento, observou-se que a máxima diluição média, 32,09%, foi obtida no experimento OP 15 onde os valores das variáveis assumem os seguintes níveis:

Ip(-) Ib(+) CA(+) va(+).

5.3.2. Influência dos fatores sobre a diluição da Solda

O ciclo ativo CA apresentou-se como o fator principal mais influente sobre a resposta em questão tanto no se refere ao seu efeito isolado, **Figura 5.7**, quanto na interação com os demais fatores, **Figura 5.8**, seguido da corrente de base (Ib). A corrente de pico e a velocidade de alimentação não exerceram influência sobre a resposta estudada.

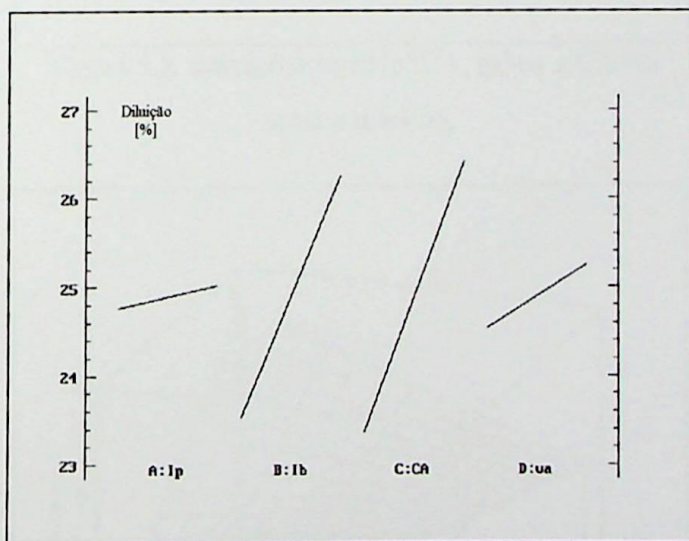


Figura 5.7. Influência dos fatores sobre a diluição.

5.3.3. Influência da interação dos fatores sobre a diluição da Solda

Quanto às interações de 2ª ordem, **Figura 5.8**, percebe-se a ocorrência de interações, negativa entre a corrente de pico e o ciclo ativo, **Figura 5.9**, e positiva entre o ciclo ativo e a velocidade de alimentação, **Figura 5.10**.

O máximo aumento da diluição, 14,315%, conforme **Figura 5.11** e **Tabela 5.7**, ocorreu na interação entre $I_p \cdot CA \cdot v_a$ quando aumentou-se o ciclo ativo CA, enquanto manteve-se a corrente de pico no seu nível inferior $I_p (-)$ e a velocidade de alimentação no seu nível superior $v_a (+)$, combinação esta coincidente com a condição de máxima diluição, a qual definiu a condição da corrente de base como máxima, ou seja, $I_b (+)$.

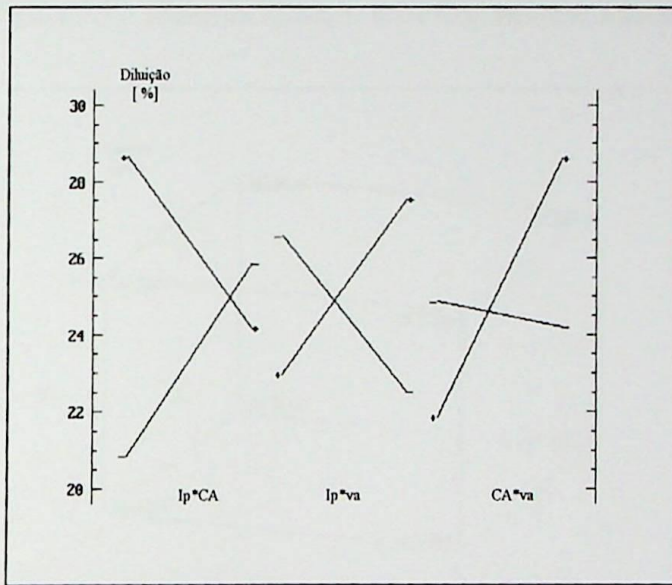


Figura 5.8. Interações entre $I_p \cdot CA$, $I_p \cdot v_a$ e $CA \cdot v_a$ sobre a diluição.

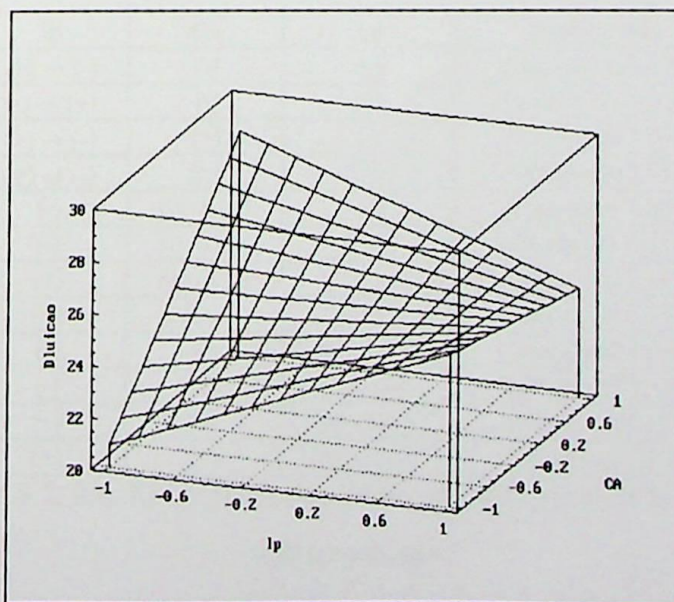


Figura 5.9. Efeito da interação entre $I_p \cdot CA$ sobre a diluição.

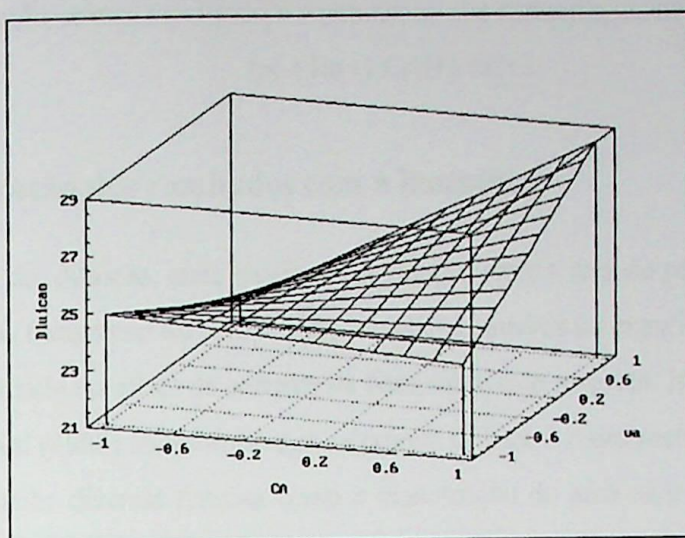


Figura 5.10. Efeito da interação entre CA*va sobre a diluição.

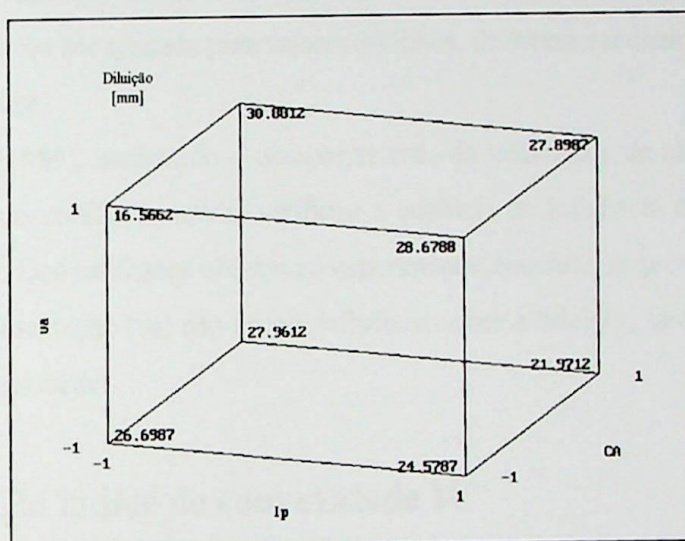


Figura 5.11. Efeito da interação entre Ip*CA*va sobre a diluição.

Ip	CA	va	Diluição (%)
(+) → (-)	(-)	(-)	Aumento de 2,120
(-) → (+)	(-)	(+)	Aumento de 12,113
(+) → (-)	(+)	(-)	Aumento de 5,990
(+) → (-)	(+)	(+)	Aumento de 2,983
(-)	(-) → (+)	(-)	Aumento de 1,263
(-)	(-) → (+)	(+)	Aumento de 14,315
(+)	(+) → (-)	(-)	Aumento de 2,608
(+)	(+) → (-)	(+)	Aumento de 0,780
(-)	(-)	(-) → (+)	Aumento de 4,100
(-)	(+)	(-) → (+)	Aumento de 2,920
(+)	(-)	(-) → (+)	Aumento de 4,100
(+)	(+)	(-) → (+)	Aumento de 5,928

Tabela.5.7. Resultados obtidos do gráfico de interação entre Ip*CA*va sobre a diluição.



Considerando-se essa condições, a combinação que apresenta maior diluição é:

Ip(-) Ib(+) CA(+) va(+).

5.3.4. Comparação dos resultados com a literatura

No caso da diluição, onde avalia-se a relação entre a área de penetração (S_p) e a área total de seção transversal do cordão (S_t), percebe-se, através do experimento realizado, a significativa influência do efeito da corrente de base sobre essa resposta. Isso contraria o que foi dito por Collard (1988) ao informar que a corrente de base é o parâmetro de pulso menos crítico, embora tenha diversas funções como a manutenção do arco elétrico. A experiência também demonstrou que o aumento da corrente de base aumenta consideravelmente a diluição, o que contraria novamente a posição de Collard (1988), o qual informa que a corrente de base deve ser ajustada para valores mínimos, de forma a reduzir a energia liberada para o metal de base.

Lambert (1989), analisando o comportamento da velocidade de alimentação sobre a área de reforço do cordão de solda, verificou a ausência de influência deste fator sobre a resposta avaliada. Dos resultados obtidos no experimento, concluiu-se que o efeito isolado da velocidade de alimentação (v_a) não exerce influência sobre a diluição, fato esse concordante com o exposto pelo autor.

5.4. Análise do índice de convexidade IC

O índice de convexidade, expresso pela relação entre o reforço pela largura do cordão, é considerado como um parâmetro bastante significativo quando pretende-se avaliar a qualidade dos cordões de solda. Conforme mencionado no Capítulo 4, a literatura recomenda, como orientação, estabelecer padrões de qualidade aceitáveis onde índices de convexidade próximos de 30% são considerados adequados (Silva *et al*, 2000). Um IC superior a 30% gera excessivo reforço com pequena penetração conforme mostrado na **Figura 5.12**.

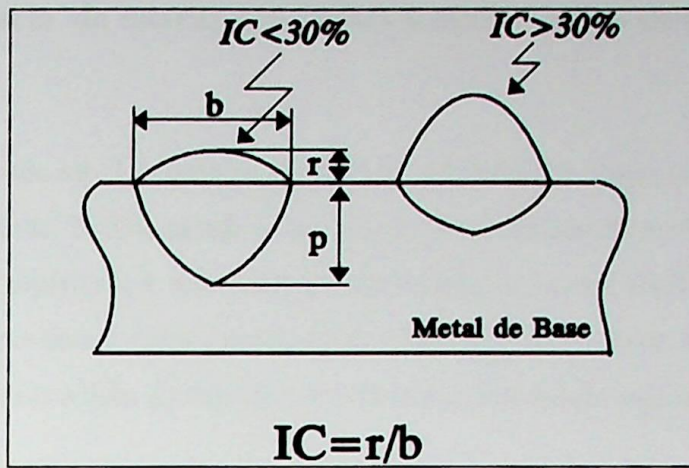


Figura 5.12- Representação da área da seção transversal do cordão de solda.

5.4.1. Efeitos das variáveis sobre o índice de convexidade da Solda

Considerando os resultados obtidos e adotando um nível de 95% de significância, com $t = 2,12043$, tem-se, então para o índice de convexidade, a seguinte região de aceitação:

$$(t_{95\%, 16}) * (+/- 2,02637) \Rightarrow (2,12043) * (+/- 2,02637) = +/- 4,2967$$

Dessa forma, de acordo com a Tabela 5.4, os efeitos $I_p * v_a$, e $I_b * CA * v_a$ foram considerados significativos, sendo a primeira interação mais significativa que a segunda. Comparou-se então este parâmetro com a seguinte região indicada por Silva *et al* (2000), onde, *Indicação: IC ≤ 30%*.

Percebe-se que nenhum dos valores obtidos se enquadrou dentro dessa região proposta por Silva *et al* (2000), ou seja, todos eles apresentaram $IC > 30\%$. O valor que mais se aproximou dessa região foi aquele referente à OP 7 da Tabela 5.3, obtendo-se o valor de 35,51% para a seguinte combinação: $I_p(-)$, $I_b(+)$, $CA(+)$ e $v_a(-)$. Sendo assim, torna-se necessário reduzir esse índice para valores aceitáveis, verificando quais variáveis produzem essa redução. Para se enquadrar dentro dos padrões de aceitação torna-se necessário reduzir esse índice em, pelo menos, 5,51 %.

5.4.2. Influência dos fatores sobre índice de convexidade da Solda

Nenhum dos efeitos principais mostrou-se significativo. A corrente de base teve seu efeito muito próximo do limite de significância, o que pode induzir à dúvidas quanto à significância ou não desse fator, uma vez que diversos fatores podem ter influenciado na resposta obtida, tal como leitura imprecisa, erro de calibração do instrumento, entre outros.

5.4.3. Influência da interação dos fatores sobre o índice de convexidade da Solda

Como pode ser observado na **Figura 5.13** e **Tabela 5.8**, obtém-se maior redução do índice de convexidade, 16,5%, quando se aumenta a corrente de base Ib, mantendo o ciclo ativo CA no seu nível superior e a velocidade de alimentação va no seu nível inferior. Assim, a condição que proporcionou maior redução de IC é aquela onde se obteve: Ib(+) CA(+) va(-). Percebe-se que essa condição de redução coincide com a combinação representada na OP 7 da **Tabela 5.3**.

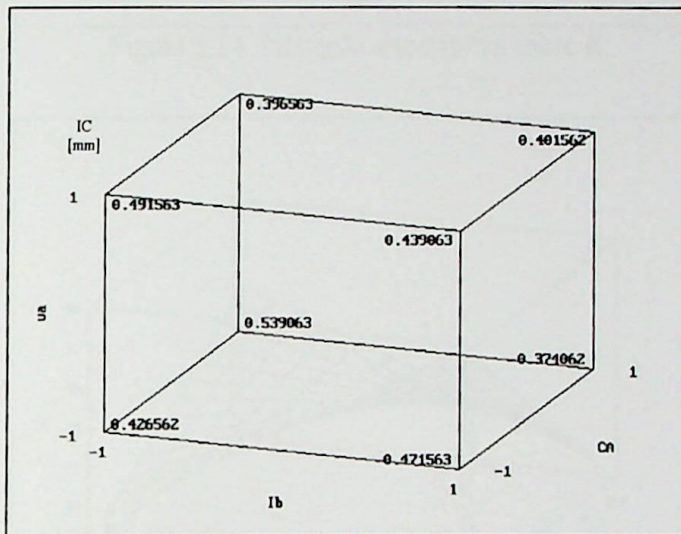


Figura 5.13. Efeito da interação entre Ib*CA*va sobre IC.

Ib	CA	va	IC (%)
(+) → (-)	(-)	(-)	Redução de 0,045001 – 4,50%
(-) → (+)	(-)	(+)	Redução de 0,052500 – 5,25%
(-) → (+)	(+)	(-)	Redução de 0,165001 – 16,50%
(+) → (-)	(+)	(+)	Redução de 0,004999 – 0,50%
(-)	(+) → (-)	(-)	Redução de 0,112501 - 11,25%
(-)	(-) → (+)	(+)	Redução de 0,095000 - 9,50%
(+)	(-) → (+)	(-)	Redução de 0,097501 - 9,75%
(+)	(-) → (+)	(+)	Redução de 0,037501 - 3,75%
(-)	(-)	(+) → (-)	Redução de 0,065001 - 6,50%
(-)	(+)	(-) → (+)	Redução de 0,142500 - 14,25%
(+)	(-)	(-) → (+)	Redução de 0,032500 - 3,25%
(+)	(+)	(+) → (-)	Redução de 0,027500 - 2,75%

Tabela.5.8. Resultados obtido do gráfico de interação entre Ib*CA*va sobre IC.

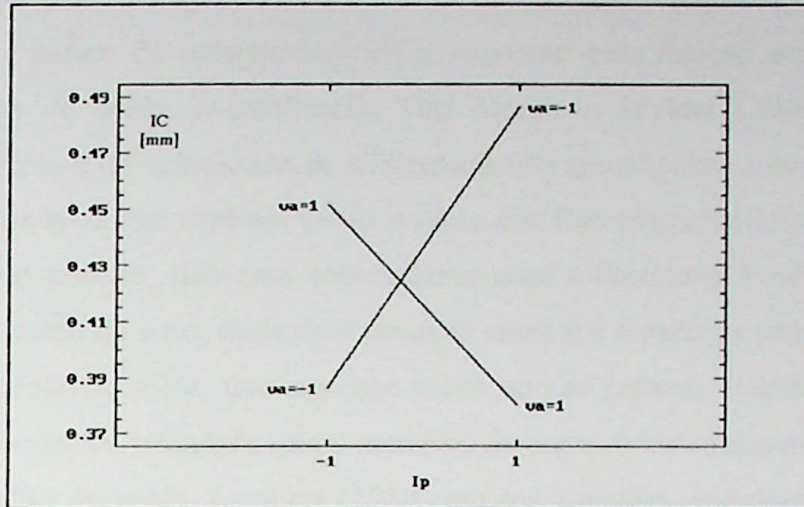


Figura 5.14. Interação entre I_p * v_a sobre IC.

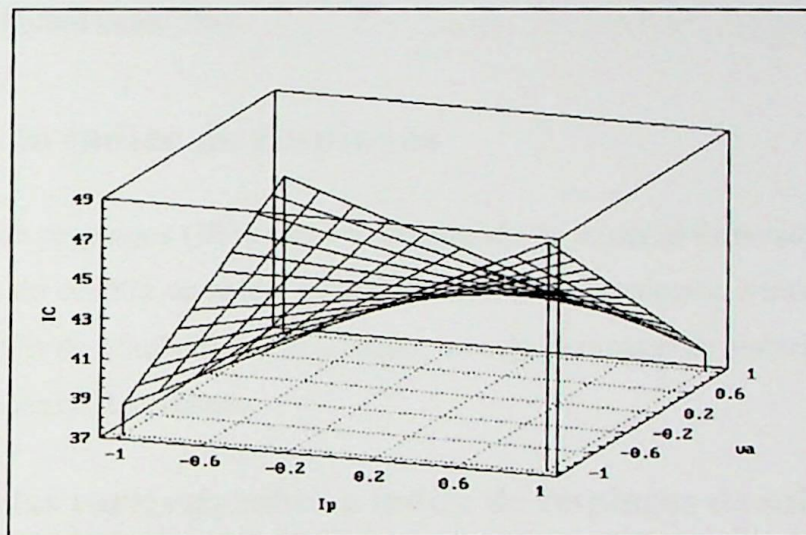


Figura 5.15. Efeito da interação entre I_p * v_a sobre IC.

Quanto à condição da corrente de pico, observa-se, segundo a **Figura 5.14** que, com a velocidade de alimentação mantida fixa no seu nível inferior, reta (-), reduzindo a corrente de pico, reduz-se, também, o índice de convexidade, situação que também condiz com a combinação representada pela linha 7 da **Tabela 5.3**, onde deduz-se que esse parâmetro deva permanecer no seu nível inferior. essa situação é melhor visualizada com a **Figura 5.15**. Dessa forma, a combinação de parâmetros que fornece um menor índice de convexidade e maior possibilidade de redução do mesmo é:

$I_p(-)$ $I_b(+)$ $CA(+)$ $v_a(-)$.

5.4.4. Comparação dos resultados com a literatura

Quanto ao índice de convexidade (IC), expresso pela relação entre o reforço pela largura do cordão de solda, a publicação *The American Welder* (2000) relata a pouca influência da corrente e da velocidade de alimentação do arame sobre a largura do cordão. O experimento demonstrou que nenhum efeito isolado dos fatores teve influência sobre o índice de convexidade do cordão, fato esse concordante com a literatura. Porém Wainer (1992) sustenta que a potência do arco, dada pelo produto entre sua tensão e corrente, é responsável pela largura do cordão de solda, fato esse não verificado na prática. Wahab & Painter (1997) reforçam essa informação, relatando que o aumento da corrente de soldagem acarreta redução na largura do cordão de solda. Lambert (1989) em seu trabalho, concluiu que a largura da poça aumenta com o aumento da velocidade de alimentação do arame, porém, o reforço não sofre influência alguma desse fator.

5.5. Análise do índice de respingos

O índice de respingos (IR) reflete a quantidade de material fornecida ao metal de base que não participa do cordão de solda, perdida na forma de respingos. Através desse índice dá para se ter uma idéia da eficiência de deposição, ou seja, o quanto de material do eletrodo que se converte em material depositado.

5.5.1. Efeitos das variáveis sobre o índice de respingos da solda

Adotando um nível de 95% de significância, com $t = 2,12043$, referente a 16 graus de liberdade, tem-se, então, a seguinte região de aceitação:

$$(t_{95\%, 16}) * (\pm 2,02637) \Rightarrow (2,12043) * (\pm 0,350) = \pm 0,742$$

De acordo com a **Tabela 5.4**, os efeitos I_p , CA e I_p*CA foram considerados significativos, sendo a corrente de pico (I_p) o fator mais significativo, seguido da interação entre I_p*CA e do ciclo ativo (CA).

Comparou-se os resultados obtidos com a seguinte região de indicação proposta por Silva *et al* (2000), onde **Indicação: IR $\leq 20\%$** . Percebe-se que todos os valores obtidos se situaram dentro dessa região, ou seja, todos eles apresentam $IR \leq 20\%$.

O índice de respingos obtido no experimento, máximo de 5,5% se apresentou bastante abaixo dos 20% proposto por Silva *et al* (2000), como era de se esperar, uma vez que a literatura enfatiza a alta produtividade do processo. Este fato reflete a não necessidade de

ajuste dos parâmetros de forma a otimizar essa resposta.

5.5.2. Influência dos fatores sobre o índice de respingos

Quanto a influência dos efeitos principais, a corrente de pico I_p se mostrou como o principal fator responsável pela redução do índice de respingos, seguida do Ciclo Ativo CA, onde o aumento de ambos fatores promoveu redução desse índice.

As combinações que promoveram menores índices de respingos foram aquelas referentes às ordens padrão 6 e 8 da **Tabela 5.3**, onde se tem :

OP 6 - $I_p(+)$ $I_b(-)$ CA(+) va(-) \Rightarrow IR=0,7%.

OP8 - $I_p(+)$ $I_b(+)$ CA(+) va(-) \Rightarrow IR=0,8%.

Em ambas as combinações houve variação somente da corrente de base. Percebe-se que essa variação pouco afeta a resposta em questão, demonstrando a pouca influência deste fator sobre a produtividade do processo.

O efeito da velocidade de alimentação mostrou-se muito próximo do valor limite de significância. Similarmente ao efeito da corrente de base sobre o índice de convexidade, este fato acarreta dúvidas quanto à significância ou não desse efeito.

5.5.3. Influência da interação dos fatores sobre o índice de respingos

O aumento da corrente de pico se mostrou como o maior responsável pela redução do índice de respingos, tanto no que se refere ao seu efeito isolado como também na interação com o ciclo ativo e a velocidade de alimentação, conforme observa-se nas **Figuras 5.16 e 5.17**. A **Tabela 5.9** mostra claramente que da interação entre $I_p*CA*va$ percebe-se uma maior redução do índice de respingos no experimento com o aumento da corrente de pico associado a manutenção do Ciclo Ativo e a velocidade de alimentação em seus níveis inferiores.

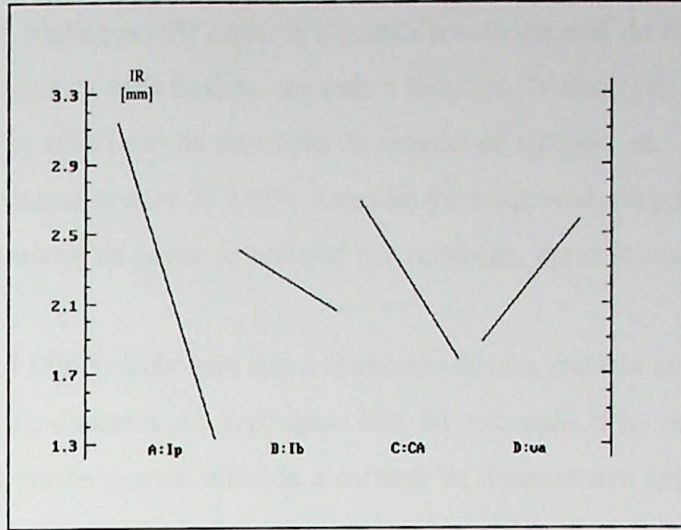


Figura 5.16. Influência dos fatores sobre IR.

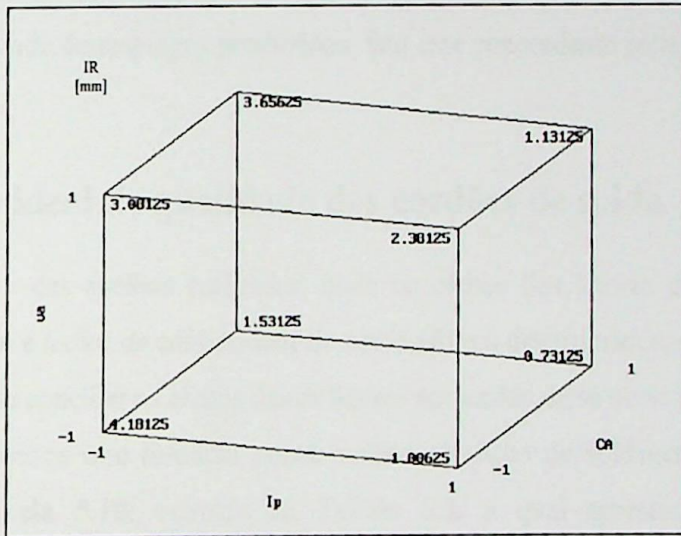


Figura 5.17. Efeito da interação entre $Ip*CA*va$ sobre IR.

Ip	CA	va	IR(%)
(-) → (+)	(-)	(-)	Redução de 3,18
(-) → (+)	(-)	(+)	Redução de 0,7
(-) → (+)	(+)	(-)	Redução de 0,8
(-) → (+)	(+)	(+)	Redução de 2,53
(-)	(-) → (+)	(-)	Redução de 2,65
(-)	(+) → (-)	(+)	Redução de 0,58
(+)	(-) → (+)	(-)	Redução de 0,28
(+)	(-) → (+)	(+)	Redução de 1,25
(-)	(-)	(+) → (-)	Redução de 1,1
(-)	(+)	(+) → (-)	Redução de 2,13
(+)	(-)	(+) → (-)	Redução de 1,38
(+)	(+)	(+) → (-)	Redução de 0,4

Tabela.5.9. Resultados obtido do gráfico de interação entre $Ip*CA*va$ sobre IR.

5.5.4. Comparação dos resultados com a literatura

O índice de respingos (IR) expressa a quantidade de material do eletrodo, cedido à peça, que não participa da zona fundida. Segundo a literatura (Wainer (1992), Lyttle (1983), Corrêa *et al* (1999)), altas taxas de deposição de material do eletrodo são observadas neste processo, as quais situam-se entre 92 à 98%. Esse fato foi comprovado na prática, onde foram observados baixos níveis de perda de material por respingos, aproximadamente 2,2 % em média.

Corrêa *et al* (1999) informam que trabalhando-se com maiores níveis de corrente, obtém-se maiores rendimentos de deposição. Isto foi reforçado pelo experimento onde obteve-se menores perdas quando utilizada a corrente de destacamento (pico) no seu nível superior.

Subramanian *et al* (1998) relatam que o aumento da corrente de base promove a redução na intensidade de respingos produzidos, fato esse concordante com os resultados do experimento.

5.6. Condição ideal de qualidade dos cordões de solda

Em função das análises realizadas, onde os efeitos dos fatores de pulso sobre a penetração, diluição e índice de convexidade do cordão foram determinados, é de se pressupor que seja interessante conciliar os efeitos destes fatores no sentido de se obter uma combinação desejável de parâmetros que resultem numa melhor condição de soldagem. Desta forma, elaborou-se a **Tabela 5.10**, extraída da **Tabela 5.3**, a qual apresenta as condições consideradas ideais para cada item analisado de maneira individual. A **Tabela 5.11** apresenta as macrografias dos respectivos corpos de prova, referentes á condições ideais de cada resposta.

Resposta	OP	Combinação	p1	p2	D1	D2	IC1	IC2	IR1	IR2	Im
	-	-	mm	mm	%	%	%	%	%	%	A
Penetração	10	Ip(+)/Ib(-)/CA(-)/va(+)	2.10	2.10	26,2	28,5	41,1	36,6	3,2	1,7	182
Diluição	15	Ip(-)/Ib(+)/CA(+)/va(+)	2.00	1.90	31,6	32,5	33,1	39,7	4	3,6	185
IC	7	Ip(-)/Ib(+)/CA(+)/va(-)	1.65	1.60	24,1	26,2	36,0	34,9	1,9	0,5	190

Tabela 5.10. Condições adotadas para a determinação da combinação operacional ideal.

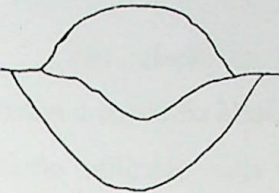
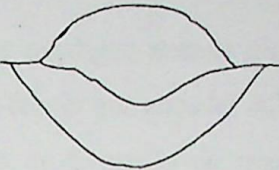
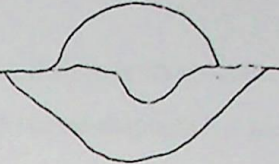
Penetração (OP 10)	Diluição (OP 15)	Índice de Convexidade (OP 7)
Ip(+) Ib(+) CA(+) va(+)	Ip(-) Ib(+) CA(+) va(+)	Ip(-) Ib (+) CA(+) va(-)
		

Tabela 5.11. Macrografias obtidas do experimento.

Considerando-se estes três resultados observa-se, segundo a **Tabela 5.10**, que provavelmente a melhor combinação de parâmetros de pulso seja aquela na qual a diluição foi maximizada (OP 15).

Nesta condição, a penetração média é de 1,95 [mm], valor esse bem próximo daquele obtido para a condição de máxima penetração, OP 10, onde $p=2,1$ [mm]. Percebe-se que a corrente média se manteve no mesmo nível para ambas as situações ($I_m=185[A]$ para a condição de máxima diluição e $I_m=182[A]$ para a condição de máxima penetração).

Comparando-se a condição de máxima diluição (OP 15) com aquela de menor índice de convexidade (OP 7), percebe-se que o índice de convexidade médio obtido nas duas combinações, 36,40% (para a condição de máxima diluição), e 35,45% (condição de menor IC) possuem valores bastantes próximos um do outro.

Com relação a condição de mínimo índice de convexidade (OP 7), observa-se que os valores referentes à penetração e diluição se mostraram bastante inferiores àqueles obtidos para as condições ideais de máxima penetração (OP 10) e máxima diluição (OP 15). Tal condição pode também ser visualizada facilmente pela observação comparativa das macrografias mostradas na **Tabela 5.11**.

Considerando-se estes aspectos, pode-se pressupor que a melhor condição de soldagem seja aquela onde a diluição foi maximizada, nas condições de corrente de pico em seu nível inferior, e corrente de base, ciclo ativo e velocidade de alimentação em seu níveis superiores, ou seja, $I_p(-)I_b(+)$ $CA(+)$ $va(+)$. Essa combinação além de maximizar a diluição, mantém a penetração próxima do seu máximo valor e o índice de convexidade próximo dos

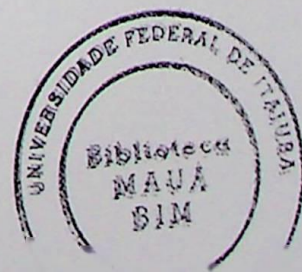
30%, valor esse indicado por Silva *et al* (2000), além de manter um valor relativamente baixo de corrente média ($I_m=185$ [A]).

5.7. Considerações finais

Com relação ao índice de respingos nota-se que os resultados praticamente não afetaram a condição ideal. Um dos fatores que pode ter influenciado nessa resposta e o gás de proteção utilizado, cuja tendência de formação de respingos é reconhecidamente baixa. Apesar de não ser, segundo a literatura, o gás mais adequado para soldar esse tipo de metal de base, este trabalho permitiu referenciar trabalhos futuros quanto ao comportamento da formação de respingos, quando utilizado outros gases de proteção, em especial, argônio com adições de CO_2 . Dillenbeck & Castagno (1987) mostram que o argônio, devido ao seu baixo potencial de ionização, por liberar elétrons muito facilmente, oferece algumas desvantagens quando são utilizadas chapas de aço, por reduzir a tensão, criando, desta maneira, baixa energia no arco e, portanto, menores níveis de penetração e aparecimento de mordeduras, o que talvez justifique a baixa penetração obtida no experimento.

De interessante também no estudo realizado foi o resultado obtido para a penetração onde maiores incrementos de penetração são obtidos quando se aumenta a corrente de pico mantendo-se a corrente de base, ciclo ativo e velocidade de alimentação do arame em seus níveis inferiores. Tal condição permite aumentos substanciais de penetração mantendo-se níveis baixos de corrente média, 182 A, podendo-se neste caso vislumbrar sua utilização para soldagem de chapas mais finas garantindo-se que o modo de transferência de material de adição ainda se processe por *spray*, sem a ocorrência de distorções no metal de base.

A corrente média, em todas as combinações do experimento se mostrou bastante abaixo do mínimo valor adotado para a corrente de pico utilizada no experimento, ou seja, 280 A, valor esse abaixo da corrente de transição globular/*spray* onde, segundo a literatura situa-se próxima de 240 A. O valor obtido no experimento variou entre 154 e 225 A. Para a condição considerada ideal, onde a diluição foi maximizada, a corrente média foi de 185[A], o que proporciona uma pequena quantidade de energia a ser transferida para o metal de base, fato esse que justifica o emprego dessa técnica na soldagem de chapas finas. Esse fato reforça o que foi registrado na literatura (Craig (1987), Dutra (1996), Kim & Eagar (1993), Lambert (1989), Weber (1982), Lyttle (1983), Davies (1996), Collard (1988) e Stenbacka & Persson (1989)). Segundo Nixon & Norrish (1992) o aumento na adição de CO_2 ao gás de proteção acarreta aumento na corrente média. Como, neste trabalho, optou-se em trabalhar com argônio



puro, sem adição de CO₂, houve o favorecimento de baixos níveis de corrente média, o que foi comprovado pelo experimento.

Embora Collard (1988) informe que a corrente de base é, provavelmente, o parâmetro de onda menos crítico entre os demais estudados, sua influência se mostrou bastante significativa no comportamento do índice de convexidade e na diluição do cordão de solda. Seu aumento tende a reduzir o índice de convexidade e aumentar a diluição.

A espessura do metal de base se mostrou demasiada quando comparada às profundidades de penetração obtidas no ensaio, alcançando-se penetração média de, aproximadamente, 1,75 mm para uma chapa de 6 mm de espessura. Espera-se que, na utilização de chapas mais finas, entre 2 e 3 mm, possa-se utilizar os mesmos níveis de parâmetros e obter cordões com o mesmo aspecto e níveis de penetração sem que, no entanto, ocorram distorções no metal de base.

Não foram constatados problemas relacionados à trincas, porosidades, descontinuidades ou mordeduras nos cordões.

Em nenhum momento ocorreu curto circuito entre o arame e o metal de base, fato esse que garante a transferência por *spray* durante todo o experimento.

A escolha do Planejamento Fatorial Completo em Dois Níveis possibilitou uma análise mais apurada do processo, onde obteve-se uma maior quantidade de informações à respeito da influência dos fatores e suas interações sobre a resposta. Além disso, esse método possibilitou, através do Statgraphics, analisar os efeitos das interações, de 2ª ordem através de gráficos de superfície, e 3ª ordem através de gráficos de representação cúbica. Caso fosse utilizado um Planejamento Fracionado essa análise não seria tão apurada devido à confusão entre os efeitos e a impossibilidade de obtenção de tais gráficos. Além disso, no Planejamento Fracionado, os efeitos principais se confundem com as interações de 3ª ordem, fato esse não conveniente neste trabalho, uma vez que essas interações apresentaram influência significativa sobre todas as respostas analisadas.

O erro experimental no caso da penetração, da diluição e do índice de convexidade se situou próximo dos 2%, valor esse oriundo da divisão do erro experimental médio pela resposta média obtida. Isto representa a pequena variação apresentada pelas respostas na duplicação do experimento para cada combinação de fatores, ou seja, para cada linha das **Tabela 5.3**.

O erro experimental do índice de respingos foi aproximadamente 7,8% do valor médio, ou seja, um valor significativamente maior do que aqueles obtidos para as demais respostas. Um dos fatores responsável por tal feito pode ser decorrente da leitura das

respostas, onde pesou-se todos os corpos antes e depois da realização dos cordões além dos cálculos realizados para se obter as respostas. Arredondamentos podem também ter contribuídos para aumentar esse erro.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões gerais

Mediante a análise dos resultados obtidos para a qualidade e produtividade do processo MIG pulsado de soldagem, obteve-se informações relevantes sobre o comportamento dos parâmetros de pulso nas características dos cordões de solda.

A diluição foi considerada como referência para a obtenção de uma condição ideal de geometria do cordão. Nesta situação, de máxima diluição, a penetração e o índice de convexidade se mantiveram bastantes próximos das condições ideais individuais, obtendo-se, ainda, uma corrente média de baixa intensidade (185[A]), numa transferência típica por *spray*, fato esse que permite a soldagem de chapas finas com pouco dispêndio de energia fornecida ao metal de base.

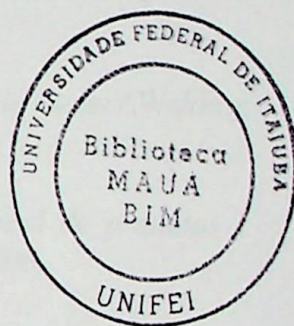
No que se refere a qualidade dos cordões, um fato bastante significativo neste trabalho foi a influência significativa da corrente de base sobre a diluição e o índice de convexidade do cordão, contrariando o que havia sido pronunciado na literatura, onde se enfocava a pouca influência desse parâmetro de pulso sobre as características geométricas dos cordões, a qual serviria apenas para manter a estabilidade do arco elétrico, devendo ser mantida em valores extremamente baixos (aproximadamente 25[A]).

6.2. Recomendações futuras

Conforme pôde-se observar, o processo MIG pulsado de soldagem é influenciado por um número substancial de variáveis, cada uma exercendo maior ou menor influência sobre um determinado comportamento do processo. Com isso, percebe-se que uma enorme quantidade de combinações de parâmetros pode ser obtida de modo a propiciar as mais diversas características operacionais possíveis. Dessa forma, de maneira a se conhecer mais profundamente os efeitos dos parâmetros de pulso sobre a qualidade do cordão de solda, algumas sugestões foram abordadas:

- Utilização de outros gases de proteção, incluindo argônio com percentuais de CO₂ e O₂, de forma a avaliar a penetração e a formação de respingos.

- Utilização de outros materiais como metal de base. Aço inoxidável, alumínio e aço carbono com baixo percentual de carbono são recomendados.
- Determinação de outra faixa de corrente de base (100-130A), a fim de melhorar os resultados obtidos para o índice de convexidade, ou seja, obter valores que se enquadrem dentro dos limites de aceitação propostos por Silva (2000).
- Utilização do Planejamento Fatorial Completo em Três Níveis, de forma a garantir uma análise mais apurada dos resultados e da Metodologia de Superfície de Respostas a fim de se determinar o ponto ótimo do experimento.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADOLFSSON, S.: *On-line quality monitoring in short-circuit Gas Metal Arc Welding*. Welding Journal, pp. 59s-73s, February, 1998.

ANTONY, J.: *Improving the manufacturing process quality and capability using experimental design: a case study*. International Journal of Production Research, vol. 38, nº12, pp. 2607-2618, 2000.

BARTON, R. R.: *Pre-experiment planning for designed experiments: graphical methods*. Journal of Quality Technology, vol.29, pp. 307-316,1997.

BINGHAM, T.C.: *An approach to developing multi-level fractional factorial designs*. Journal of Quality Technology, vol.29, pp. 370-380, 1997.

BUNCICK, M.C.; RALSTON, A. R. K.; DENTON, D. D.: *Characterization of a plasma sputter deposition process by fractional factorial design*. Quality Engineering, 12(3), pp. 371-385, 2000.

CAMPOS, V.F.: *TQC no estilo japonês*. Belo Horizonte, MG. Escola de engenharia da UFMG, 1992

CAMPOS, V.F. : *Gerenciamento pelas diretrizes*. Belo Horizonte, MG. Escola de engenharia da UFMG, 1996.

CASTNER, H.R. & SINGH, R.: *Pulsed vs. Steady current GMAW: which is louder?*. Welding Journal, pp. 47-51, november, 1997.

CATEN, C. S. & RIBEIRO, J. L. D.: *Etapas na otimização experimental de produtos e processos: Discussão e estudo de caso*. Revista Produção, vol.6, nº1, jul-1996.

CHOWDHURY, K. K. & GIJO, E. V.: *Quality improvement through design of experiments: A case study*. Quality Engineering, 12(3), pp. 407-416, 2000.

COLEMAN, D.E. & MONTGOMERY, D.C.: *A systematic approach to planning for a Designed Industrial Experiment*. Technometrics, Vol.35, pp 1-27, 1993.

COLLARD, J. F.: *Adaptive pulsed GMAW control: The digipulse system*. Welding Journal, pp. 35-38, November, 1988.

CORRÊA, C. A.; BRAGA, E. M.; TREVISAN, R. E.: *Influência dos parâmetros da soldagem MIG pulsado e convencional nas características econômicas de revestimento*. Soldagem e Inspeção, ano 6, nº 4, 1999.

CRAIG, E.: *A unique mode of GMAW transfer*. Welding Journal, pp. 51-56, September, 1987.

DAVIES, A.C.: *The science and practice of welding: The practice of welding*. Cambridge University Press, Tenth edition, 1996.

- DILLENBECK, V. R. & CASTAGNO, L.: *The effects of various shielding gases and associated mixtures in GMA welding of mild steel*. Welding Journal, pp.45-49, September, 1987.
- DU PIN, J. C.; NETO, A.: *Efeito dos parâmetros de pulso sobre a geometria do cordão de solda em soldagem de chapa fina de aço inox AISI 304 pelo processo TIG pulsado*. Soldagem e Inspeção, ano 4, nº6, pp. 9-16,1998.
- DUTRA, J.C: *Manual da fonte de soldagem Inversal 450*. LMC - Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.
- ESSERS,W.G. & VAN GOMPEL, R.M.: *Arc control with pulsed GMAW welding*. Welding Journal, pp.26-32, June,1984.
- GRAIG, E.: *A unique mode of GMAW transfer*. Welding Journal, pp. 51-56, September, 1987.
- HAMADA, M. & NELDER, J.A.: *Generalized linear models for quality-improvement experiments*. Journal of Quality Technology, vol.29, pp. 292-304, 1997.
- HEANEY, M. D. & LIDY, A.: *Analysis of a difficult factorial designed experiment from polyurethane product research*. Quality Engineering, 12(3), pp. 425-438, 2000.
- JOSEPH, R.: *Experimental sequence: A decision strategy*. Quality Engineering, 12(3), pp. 387-393, 2000.
- JURAN, J.M.: *Juran - Controle da qualidade - Handbook - Métodos especiais de apoio à qualidade*. São Paulo: Editora McGRAW-HILL, Ltda, volume VII, 1993.
- KACKER, R.N.: *Off-line quality control, Parameter design, and the Taguchi method*. Journal of Quality Technology, vol.17, pp. 176-209,1985.
- KIM, Y. S.; EAGAR, T. W.: *Metal transfer in pulsed current Gas Metal Arc Welding*. Welding Journal, pp. 279-287, July, 1993.
- KONDA, R.; RAJURKAR, K. P.; GUHA, A.: *Design of Experiments to study and optimize process performance*. International Journal of Quality & Reliability Management, vol. 16, nº1, pp. 56-71, 1999.
- LAMBERT, J.A.: *Assessment of the Pulsed GMA technique for tube attachment welding*. Welding Journal, pp. 35-43, February,1989.
- LOWERY, J.: *Gases de proteção para soldagem ao arco*. Soldas e Eletrodos, pp.9-17, dezembro, 1977.
- LYTTLE, K.A.: *GMAW- A versatile process on the move*. Welding Journal, pp.15-23, March, 1983.
- LUNANI, M.; NAIR, V. N.; WASSERMAN, G. S.: *Graphical methods for robust design with dynamic characteristics*. Journal of Quality Technology, vol.29, pp.327-338,1997.

- McCONNELL, I & McPERSSON, N.A.: *The application of statistical process design to a FCAW process*. Welding Journal, October, pp. 412s-416s, 1997.
- MONTGOMERY, D.C.: *Design and analysis of experiments*. New York : Georgia Institute of Technology, 1984.
- MOORE, K. L.; NAIDU, R.Y.; TYLER, J.: *Gas Metal Arc Welding control: Part I – Modeling and analysis. Nonlinear analysis, theory, methods & applications*. vol.30, nº5, pp. 3101-3111, 1997.
- NACHTSHEIM, C.J.: *Tools for computer aided design of experiments*. Journal of Quality Technology, vol.19, pp.132-136, 1987.
- NAIR, V.N.: *Taguchi's Parameter Design: A panel discussion*. Technometrics, volume 34, pp.127-161, 1992.
- NETO, B.B.; SCARMÍNIO, I.S.; BRUNS, R.E.: *Planejamento e otimização de experimentos*. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas, 1995.
- NIXON, J.H.; NORRISH, J.: *Determination of pulsed MIG process parameters*. Synergic MIG Supplement, Welding & Metal Fabrication, 1992.
- PEREIRA, W. A.; FERRARESI, V.A.: *Estudo dos parâmetros que influenciam a instabilidade do cordão em soldagem MIG pulsada automatizada*. Soldagem e Inspeção, ano 6, nº8, 1999.
- PHILLIPS, A.L.: *Welding Handbook*, section 2, fifth edition, 1968.
- POON, G.K.K. *Optimization of eletronic manufacturing process*. ASQC's 50 th Annual Quality Congress, Chicago, pp. 443-449, 1996.
- QUITES, A. M.; DUTRA, J. C. : *Influência do arco voltaico sobre o consumo do eletrodo e geometria da solda*. Soldas e eletrodos, abril, 1979.
- RAJASEKARAN, S.: *Weld bead characteristics in pulsed GMA welding of Al-Mg alloys*. Welding Journal, pp.397-407, December, 1999.
- RANDHAWA, I. S.; GHOSH, P. K.; GUPTA, S. R.: *Geometrical characteristics of pulsed current positional GMA weld*. ISIJ international, vol. 38, nº 3, pp. 276-284, 1998.
- ROSS, P.J.: *Aplicações das técnicas Taguchi na engenharia da qualidade*. São Paulo: Editora McGRAW-HILL, Ltda, 1991.
- ROWLANDS, W.; ANTONY, J.; KNOWLES, G.: *An application of experimental design for process optimisation*. The TQM Magazine, vol. 12, Issue 2, pp. 1-6, 2000.
- SCHNEIDER, C.A.; FLESH, C. A.: *Técnica de pesquisa experimental*. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, 1982.

SCOTTI, A.; DUTRA, J. C.: Uma contribuição ao estudo da soldagem vertical ascendente empregando o processo MIG/MAG pulsado. XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – Brasília, Dezembro, 1993.

SILVA, C.S.; FERRARESI, V.A.; SCOTTI, A.: *A quality and cost approach for welding process selection*. Journal of the Brazilian Mechanical Sciences, vol. XXII, nº3, pp. 389-398, 2000.

STENBACKA, N. & PERSSON, K.A.: *Shielding gases for gas metal arc welding*. Welding Journal, pp. 41-47, November, 1989.

SUBRAMANIAM, S.; WHITE, D. R.; JONES, J. E.; LYONS, D. W.: *Droplet transfer in pulsed Gas Metal Arc Welding of aluminum*. Welding Journal, pp. 459-465, November, 1998.

SULLIVAN, D. - *The gas metal arc welding process celebrates a 50 Th anniversary*. Welding Journal, pp. 53-54, September, 1998.

THE AMERICAN WELDER: *Variables of Gas Metal Arc Welding*. Excepted from ANSI/AWS C 5.6-94r, Recommended practices for Gas Metal Arc Welding, 2000.

TREVISAN, R.E.; REIS, R.A.; CORRÊA, C.A.: *Influência dos tempos da onda pulsada sobre a geometria do cordão utilizando o processo TIG*. V EM-NNE 98

WAHAB, M. A. & PAINTER, M. J.: *Numerical models of gas metal arc welds using experimentally determined weld pool shapes as the representation of the welding heat source*. Int. J. Pres. Ves. & piping, pp. 153-159, 1997.

WAINER, E.: *Soldagem - Processos e metalurgia*. São Paulo. Ed. Edgard Blucher, Ltda, 1992.

WEBER, J.: *Pulsed GMAW a plus for Midwestern metalworker*. Welding Journal, pp. 51-52, November, 1982.

WELDING TECHNOLOGY DATA: *Metal Inert Gas (MIG) arc welding – Part 4*. Welding and Metal Fabrication, may, 1982.

WELDING TECHNOLOGY DATA: *Metal Inert Gas (MIG) arc welding – Part 7*. Welding and Metal Fabrication, december, 1983.

WELDING TECHNOLOGY DATA: *Metal Inert Gas (MIG) arc welding – Part 8*. Welding and Metal Fabrication, march, 1984.

ZHU, P.; RADOS, M.; SIMPSON, S.W.: *Theoretical predictions of the start-up phase in GMAW welding*. Welding Journal, pp. 269-274, July, 1997.

Anexos

Algoritmos de Yates e New

Anexo A

Algoritmos de Yates e Neto

Metodologia de Neto para o cálculo dos fatores (penetração)

MEDIA	1	2	3	4	12	13	14	23	24	34	123	124	134	234	1234	Média	p1	p2
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1,475	1,55	1,40
1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1,625	1,70	1,55
1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1,650	1,70	1,60
1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1,750	1,80	1,70
1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1,950	1,70	2,20
1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1,700	1,65	1,75
1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1,625	1,65	1,60
1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1,875	1,75	2,00
1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,900	0,80	1,00
1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	2,100	2,10	2,10
1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	1,075	1,10	1,05
1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1,875	1,60	2,15
1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1,900	1,80	2,00
1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1,975	1,80	2,15
1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1,950	2,00	1,90
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2,325	2,40	2,25

Cálculo dos Efeitos segundo Neto

MD=	1,734									0,044						CA*va	0,194
Ip	0,338									-0,225						Ip*Ib*CA	0,156
Ib	0,063									0,275						Ip*Ib*va	-0,069
CA	0,356									0,000						Ip*CA*va	-0,163
va	0,056									0,025						Ib*CA*va	0,113

Metodologia de Yates para o cálculo dos fatores (penetração)

	1	2	3	4	Col.1	Col.2	Col.3	Col.4	Col.5	Efeitos	Fatores
	-1	-1	-1	-1	1,475	3,100	6,500	13,650	27,750	1,734	M
	1	-1	-1	-1	1,625	3,4	7,15	14,100	2,700	0,338	Ip
	-1	1	-1	-1	1,650	3,65	5,95	0,250	0,500	0,063	Ib
	1	1	-1	-1	1,750	3,5	8,150	2,450	0,350	0,044	Ip*Ib
	-1	-1	1	-1	1,950	3	0,250	0,150	2,850	0,356	CA
	1	-1	1	-1	1,700	2,95	0	0,350	-1,800	-0,225	Ip*CA
	-1	1	1	-1	1,625	3,875	2	0,450	0,000	0,000	Ib*CA
	1	1	1	-1	1,875	4,275	0,450	-0,100	1,250	0,156	Ip*Ib*CA
	-1	-1	-1	1	0,900	0,150	0,300	0,650	0,450	0,056	va
	1	-1	-1	1	2,100	0,1	-0,15	2,200	2,200	0,275	Ip*va
	-1	1	-1	1	1,075	-0,25	-0,05	-0,250	0,200	0,025	Ib*va
	1	1	-1	1	1,875	0,25	0,400	-1,550	-0,550	-0,069	Ip*Ib*va
	-1	-1	1	1	1,900	1,2	-0,050	-0,450	1,550	0,194	CA*va
	1	-1	1	1	1,975	0,8	0,5	0,450	-1,300	-0,163	Ip*CA*va
	-1	1	1	1	1,950	0,075	-0,4	0,550	0,900	0,113	Ib*CA*va
	1	1	1	1	2,325	0,375	0,300	0,700	0,150	0,019	Ip*Ib*CA*va

Metodologia de Neto para o cálculo dos fatores (índice de convexidade)

MEDIA	1	2	3	4	12	13	14	23	24	34	123	124	134	234	1234	Média	IC1	IC2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37,260	37,58	36,94
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	44,485	48,39	40,58
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	39,595	38,89	40,30
1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	51,345	43,97	58,72
1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	41,645	37,58	45,71
1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	62,450	53,08	71,82
1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	35,510	36,08	34,94
1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	35,875	38,22	33,53
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	55,715	57,81	53,62
1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	38,935	41,18	36,69
1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	48,275	47,23	49,32
1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	35,950	36,57	35,33
1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	39,260	36,69	41,83
1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	36,455	32,28	40,63
1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	36,445	33,15	39,74
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	40,560	34,86	46,26

Cálculo dos Efeitos segundo Neto

MD=	42,485	Ip*Ib	-0,567	CA*va	-3,619
Ip	1,544	Ip*CA	4,076	Ip*Ib*CA	-2,813
Ib	-4,081	Ip*va	-8,493	Ip*Ib*va	3,411
CA	-2,920	Ib*CA	-3,774	Ip*CA*va	3,528
va	-2,071	Ib*va	1,798	Ib*CA*va	6,703

Metodologia de Yates para o cálculo dos fatores (índice de convexidade)

1	2	3	4	Col.1	Col.2	Col.3	Col.4	Col.5	Efeitos	Fatores
-1	-1	-1	-1	37,260	81,745	172,685	348,165	679,760	42,485	M
1	-1	-1	-1	44,485	90,94	175,48	331,595	12,350	1,544	Ip
-1	1	-1	-1	39,595	104,095	178,875	40,145	-32,650	-4,081	Ib
1	1	-1	-1	51,345	71,385	152,720	-27,795	-4,540	-0,567	Ip*Ib
-1	-1	1	-1	41,645	94,65	18,975	-23,515	-23,360	-2,920	CA
1	-1	1	1	62,450	84,225	21,17	-9,135	32,610	4,076	Ip*CA
-1	1	1	-1	35,510	75,715	-29,105	-15,915	-30,190	-3,774	Ib*CA
1	1	1	-1	35,875	77,005	1,310	11,375	-22,500	-2,813	Ip*Ib*CA
-1	-1	-1	1	55,715	7,225	9,195	2,795	-16,570	-2,071	va
1	-1	-1	1	38,935	11,75	-32,71	-26,155	-67,940	-8,493	Ip*va
-1	1	-1	1	48,275	20,805	-10,425	2,195	14,380	1,798	Ib*va
1	1	-1	1	35,950	0,365	1,290	30,415	27,290	3,411	Ip*Ib*va
-1	-1	1	1	39,260	-16,78	4,525	-41,905	-28,950	-3,619	CA*va
1	-1	1	1	36,455	-12,325	-20,44	11,715	28,220	3,528	Ip*CA*va
-1	1	1	1	36,445	-2,805	4,455	-24,965	53,620	6,703	Ib*CA*va
1	1	1	1	40,560	4,115	6,920	2,465	27,430	3,429	Ip*Ib*CA*va

Metodologia de Neto para o cálculo dos fatores (índice de respingos)

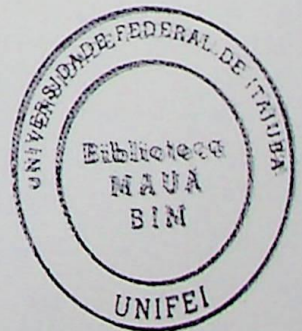
MEDIA	1	2	3	4	12	13	14	23	24	34	123	124	134	234	1234	Média	IR1	IR2
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	5,50	4,10	6,90
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1,05	0,20	1,90
1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	2,90	2,10	3,70
1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1,00	1,60	0,40
1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1,90	2,30	1,50
1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	0,70	0,70	0,70
1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1,20	1,90	0,50
1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,80	0,50	1,10
1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	2,85	2,70	3,00
1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	2,45	3,20	1,70
1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	3,35	4,00	2,70
1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	2,35	1,30	3,40
1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	3,55	3,70	3,40
1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1,25	2,10	0,40
1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	3,80	4,00	3,60
1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1,05	1,60	0,50

Cálculo dos Efeitos segundo Neto

MD=	2,231	Ip*Ib	0,288	CA*va	0,563
Ip	-1,800	Ip*CA	0,138	Ip*Ib*CA	-0,200
Ib	-0,350	Ip*va	0,188	Ip*Ib*va	-0,550
CA	-0,900	Ib*CA	0,213	Ip*CA*va	-1,050
va	0,700	Ib*va	0,463	Ib*CA*va	-0,300

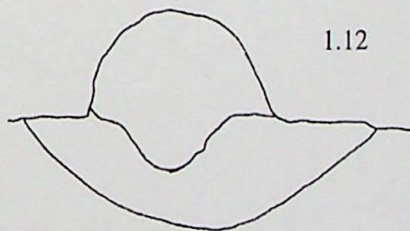
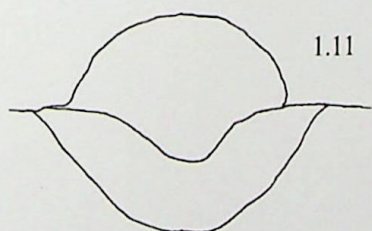
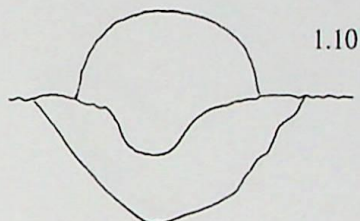
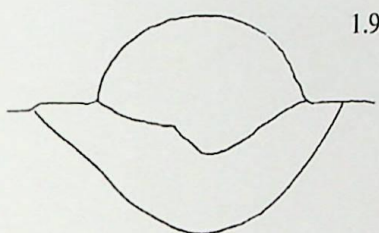
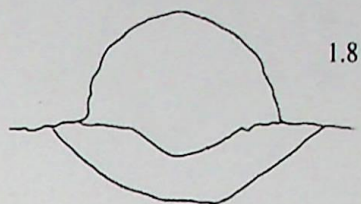
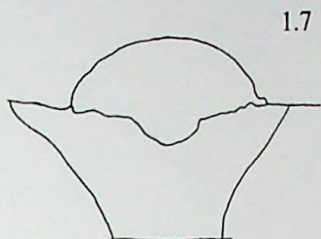
Metodologia de Yates para o cálculo dos fatores (índice de respingos)

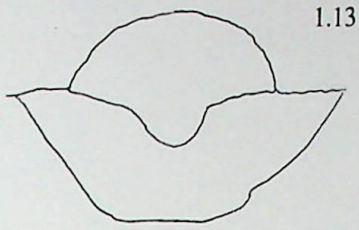
1	2	3	4	Col.1	Col.2	Col.3	Col.4	Col.5	Efeitos	Fatores
-1	-1	-1	-1	5,50	6,55	10,45	15,05	35,70	2,231	M
1	-1	-1	-1	1,05	3,90	4,60	20,65	-14,40	-1,800	Ip
-1	1	-1	-1	2,90	2,60	11,00	-7,95	-2,80	-0,350	Ib
1	1	-1	-1	1,00	2,00	9,65	-6,45	2,30	0,288	Ip*Ib
-1	-1	1	-1	1,90	5,30	-6,35	-3,25	-7,20	-0,900	CA
1	-1	1	-1	0,70	5,70	-1,60	0,45	1,10	0,138	Ip*CA
-1	1	1	-1	1,20	4,80	-1,40	3,35	1,70	0,213	Ib*CA
1	1	1	-1	0,80	4,85	-5,05	-1,05	-1,60	-0,200	Ip*Ib*CA
-1	-1	-1	1	2,85	-4,45	-2,65	-5,85	5,60	0,700	va
1	-1	-1	1	2,45	-1,90	-0,60	-1,35	1,50	0,188	Ip*va
-1	1	-1	1	3,35	-1,20	0,40	4,75	3,70	0,463	Ib*va
1	1	-1	1	2,35	-0,40	0,05	-3,65	-4,40	-0,550	Ip*Ib*va
-1	-1	1	1	3,55	-0,40	2,55	2,05	4,50	0,563	CA*va
1	-1	1	1	1,25	-1,00	0,80	-0,35	-8,40	-1,050	Ip*CA*va
-1	1	1	1	3,80	-2,30	-0,60	-1,75	-2,40	-0,300	Ib*CA*va
1	1	1	1	1,05	-2,75	-0,45	0,15	1,90	0,238	Ip*Ib*CA*va



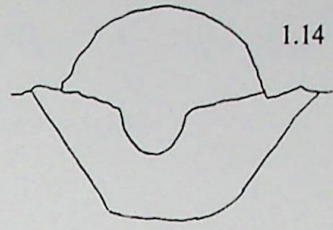
Anexo B

Macrografias

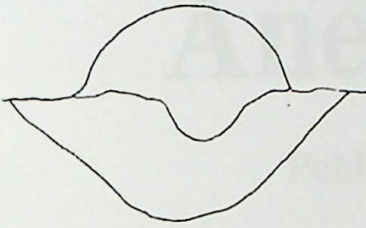




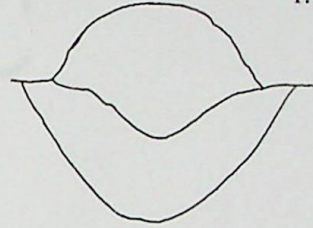
1.13



1.14



1.15



1.16

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PULSO NO PROCESSO MIGRADO E
EXPERIMENTAL DO TIG-DE WELDA
L. O. J. - Congresso Brasileiro de Soldagem

Luiz G. Ribeiro
Escola Politécnica de Engenharia de Minas - Universidade de Minas
E-mail: goul@fem.ene.ufmg.br
Sebastião C. da Costa
Escola Politécnica de Engenharia de Minas - Universidade de Minas
E-mail: scosta@fem.ene.ufmg.br

Anexo C

Publicações

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PULSO NO PROCESSO MIG SOBRE A
GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA
I COBEF – Congresso brasileiro de fabricação**

Luiz G. Ribeiro

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Departamento de Produção
E-Mail: pos7888gui@zipmail.com.br

Sebastião C. da Costa

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Departamento de Produção
E-Mail: costa@iem.efei.rmg.br

***Resumo.** Este trabalho tem por finalidade analisar a influência dos parâmetros de pulso, no processo MIG de soldagem, sobre a área de penetração e de reforço do cordão de solda (diluição). Para tal finalidade, utilizou-se o Projeto e Análise de Experimentos, em especial o Planejamento Fatorial Completo em Dois Níveis com replicagem e aleatorização, para planejar e analisar os dados, além do teste t para cálculo de significância dos efeitos.*

Palavras-chave: Projeto de experimentos, Planejamento fatorial, MIG pulsado.

1. Introdução

Dos processos de soldagem, o processo MIG tem se revelado, atualmente, como aquele de maior ascensão no ambiente industrial, decorrente de sua alta produtividade e excelente qualidade dos cordões de solda. Mais recentemente, o modo pulsado de soldagem aumentou, ainda mais, a faixa de utilização do processo, possibilitando a soldagem de chapas finas em todas as posições, através do modo de transferência por *spray*, onde cordões com aspecto mais homogêneo, arcos mais estáveis e pequena formação de respingos são obtidos. Contudo, o grande inconveniente em sua utilização reside na dificuldade em se determinar parâmetros operacionais adequados, devido à complexidade do processo, fato esse que tem feito com que sua adoção pelas empresas não seja ainda maior.

Neste contexto, ferramentas estatísticas vêm sendo utilizadas na tentativa de elucidar certas particularidades deste processo de modo a propiciar sua melhor utilização, em função da manipulação das variáveis envolvidas. Dentre estas ferramentas, o Planejamento de Experimentos tem se destacado, em muito, das demais, por permitir a redução substancial de tempo e dinheiro, fatores decisivos em época de acirrada competição.

Antony *et al.* (1999) citam como vantagens da utilização desta ferramenta: redução do tempo de desenvolvimento do produto, aumento da satisfação do cliente, redução da variabilidade excessiva de desempenho bem como dos custos de desenvolvimento dos produtos e processos, auxílio na determinação de grupos ótimos de fatores, bem como a influência destes sobre uma determinada resposta do sistema, visando, deste modo, melhorar o desempenho, o rendimento, a confiabilidade e a capacidade dos processos.

Para um melhor entendimento do processo MIG pulsado, decidiu-se neste trabalho estudar, o efeito dos parâmetros de pulso do processo MIG num tipo de transferência tipicamente por *spray* sobre as características geométricas do cordão, representadas pelas áreas de penetração,

Sp, e reforço, Sr, expressas pela diluição do cordão. Para isto foi utilizado como ferramenta o Projeto e Análise de Experimentos, em especial, o Planejamento Fatorial Completo em 2 Níveis.

2. O processo MIG pulsado

O modo pulsado é hoje, alvo de profundas investigações por parte da comunidade científica, devido as vantagens apresentadas em relação ao processo MIG convencional. Graig (1987), Collard (1988), Kim & Eagar (1993), Davies (1996), Weber (1982) e Dutra (1996) relatam que, através do fornecimento de um fluxo de corrente de alta intensidade, com ondas intermitentes, é possível obter a transferência por *spray* durante os pulsos de alta corrente enquanto se mantém um nível de corrente média abaixo da corrente normal de transição. Desta maneira é possível a obtenção de efeitos desejáveis do modo *spray* com baixos níveis de calor, característica normalmente associadas à transferência por curto-circuito, com baixa produção de respingos e maior estabilidade do arco, além de um controle preciso dos parâmetros operacionais.

Contudo, Davies (1992) e Dutra (1996) nos mostram que, apesar dos benefícios trazidos pela utilização do modo pulsado de transferência por *spray*, a complexa natureza deste processo e o alto grau de habilidade exigida, por parte dos soldadores, na correta seleção dos parâmetros operacionais, têm limitado, de maneira significativa, sua aceitação pelas indústrias de soldagem.

3. Os parâmetros de pulso

Com a introdução da corrente pulsada, novos parâmetros foram adicionados ao processo MIG convencional. Pode-se observar na “Fig. 1” que a corrente pulsada é uma onda periódica, onde uma corrente de base (I_b) se alterna com uma corrente de pico (I_p), com seus respectivos tempos de duração (t_b) e (t_p). Essas grandezas são denominadas de *parâmetros de pulso*. Pode-se, ainda, utilizar parâmetros que são derivados destes, como a corrente média (I_m), a frequência de pulso (f) e o ciclo ativo (DC).

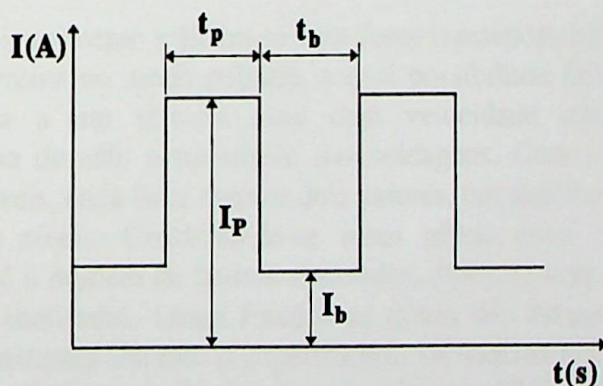


Figura 1 - Esquema de uma onda pulsada e seus componentes.

A corrente de pico deverá ser mantida acima da corrente de transição (I_t), de forma a manter uma transferência por *spray*. Uma certa quantidade de energia é necessária durante cada pulso de maneira a promover o destacamento da gota. Trevisan *et al.* (1998) informam que a corrente de pico tem por finalidade garantir a boa fusão e a penetração do cordão.

A corrente de base mantém o arco estável e permite que a área da solda fique mais fria. Nixon & Norrish (1992) informam que, considerações à respeito da instabilidade do arco requerem que a corrente de base seja sempre maior que 25(A). Collard (1988) nos fala que a corrente de base é, provavelmente, o parâmetro de onda menos crítico, embora tenha várias

funções além da manutenção do arco elétrico. Controle sobre a poça de solda e a forma da gota podem ser melhorados através de correntes de bases apropriadas. Subramaniam *et al.* (1998) relatam que, destacamentos de gotas no período de base são ótimos para a redução do calor de entrada e para a manutenção da estabilidade do arco, promovendo, assim, a redução de respingos.

A corrente média, dada pela "Eq. (1)", tem a característica, na transferência pulsada, de apresentar baixos níveis de intensidade. Devido à essa característica, esse processo pode ser utilizado na soldagem de chapas finas.

$$I_m = (I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b) / (t_p + t_b) \quad (1)$$

O ciclo ativo ou *Duty Cycle* pode ser definido pela "Eq. (3)", onde, percebe-se a relação entre o tempo de deposição e o tempo total de soldagem. Essa grandeza é normalmente utilizada em substituição aos tempos de pico e de base em alguns experimentos abordados na literatura, devido à menor variabilidade apresentada, o que permite uma maior facilidade quanto à regulação dos parâmetros.

$$DC = [t_p / (t_p + t_b)] \times 100(\%) \quad (2)$$

Desta maneira, optou-se, em nossa análise, pelo estudo da influência das correntes de pico e de base, do ciclo ativo, além do acréscimo da velocidade de alimentação v_a , por demonstrar efeitos significativos durante os ensaios preliminares, sobre a diluição (D) do cordão de solda, a qual foi definida como a relação entre a área de penetração, S_p , e a área total da seção transversal do cordão de solda, S_t , onde a área total é a área de penetração acrescida da área de reforço, S_r .

$$D = S_p / S_t = S_p / (S_p + S_r) \quad (3)$$

4. Procedimento Experimental

Para a realização do experimento utilizou-se uma fonte transistorizada inversora digitalizada, com imposição de corrente no modo pulsado, a qual possibilitou flexibilidade no ajuste dos parâmetros, associada a um sistema guia com velocidade controlada, permitindo o deslocamento da tocha durante a realização das soldagens. Com o Planejamento Fatorial Completo em Dois Níveis, cada fator assume dois valores, um superior e um inferior, os quais são denominados de níveis. Combinando-se esses níveis entre os fatores obtemos 2^n experimentos, onde n é o número de fatores analisados. Após definidos os fatores, bem como as respostas a serem analisadas, foram fixados os níveis dos fatores e o valor das demais variáveis mantidas constantes durante o experimento. Os valores adotados para os níveis se encontram na "Tabela 1". O tempo de pico foi mantido constante em 4 ms e o tempo de base oscilou entre os valores de 4 ms e 6 ms de acordo com o duty cycle utilizado.

Tabela 1 - Níveis inferiores e superiores dos fatores em estudo.

Fator	Unidade	Nível Inferior	Nível Superior
Corrente de pico, I_p	Amps	280	350
Corrente de base, I_b	Amps	70	100
Duty Cycle, DC	%	40	50
Vel.de alim., V_a	m/min	5	6

As demais variáveis do processo foram mantidas constantes e seus valores referenciados na literatura, sendo utilizado arame ER 70S-6 (C-0,1% Mn-1,6%) de diâmetro 1,2 mm e material de base de aço ABNT 1045, com dimensões de 120x40x6 mm. Como gás de proteção optou-se em utilizar Argônio puro com a finalidade de referenciar futuros trabalhos, com vazão de 15 l/min e velocidade de soldagem de 40 cm/min. A distância tocha-peça foi de 17.5 mm e o recuo do bico de contato foi de 5 mm.

A seqüência de combinação dos fatores foi definida segundo a ordem padrão OP descrita na "Tabela 2" sendo os experimentos realizados em duplicata e numa seqüência aleatória. A duplicação permite o cálculo do erro experimental, o qual será utilizado, também, no cálculo de significância dos efeitos. A aleatorização permite a aplicação de testes estatísticos de significância e a construção de intervalos de confiança.

Após realizados os ensaios, os corpos de prova foram seccionados e preparados para que as leituras pudessem ser realizadas. Com o auxílio de um projetor de perfis e de um planímetro, registrou-se as respectivas áreas de cada corpo de prova, conforme esquema mostrado na "Fig. 2". Os resultados obtidos estão contidos na "Tabela 3".

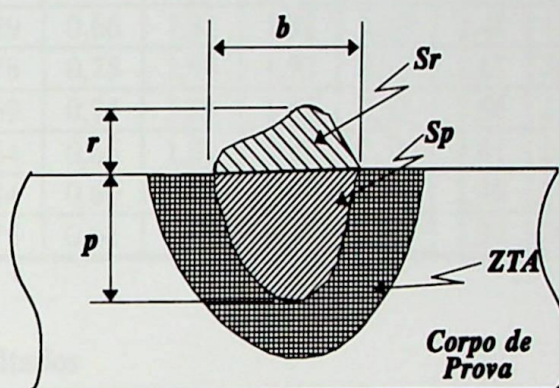


Figura 2 - Representação da área da seção transversal do cordão de solda.

Tabela 2 - Planejamento experimental.

OE1	OE2	OP	I_p	I_b	DC	va	Imédia
-----	-----	-----	Amps	Amps	%	m/min	Amps
5	8	1	280	70	40	5	154
12	3	2	350	70	40	5	182
1	9	3	280	100	40	5	172
4	15	4	350	100	40	5	200
9	13	5	280	70	50	5	140
6	2	6	350	70	50	5	168
15	12	7	280	100	50	5	152
3	7	8	350	100	50	5	180
2	5	9	280	70	40	6	154
10	11	10	350	70	40	6	182
8	1	11	280	100	40	6	172
14	6	12	350	100	40	6	200
11	4	13	280	70	50	6	140
7	10	14	350	70	50	6	168
16	14	15	280	100	50	6	152
13	16	16	350	100	50	6	180

Tabela 3 - Valores obtidos no experimento.

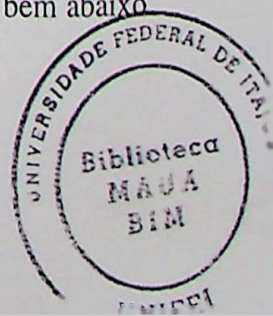
OE1	OE2	OP	Sp1	Sp2	Sr1	Sr2	St1	St2	D1	D2	MÉDIA
-----	-----	-----	mm ²	mm ²	Mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	%	%	%
5	8	1	0,54	0,49	1,55	1,59	2,09	2,08	25,73	23,56	24,64
12	3	2	0,48	0,50	1,38	1,44	1,86	1,94	25,81	25,77	25,79
1	9	3	0,56	0,57	1,54	1,49	2,10	2,06	26,67	27,78	27,22
4	15	4	0,43	0,40	1,48	1,41	1,91	1,81	21,45	22,23	21,84
9	13	5	0,69	0,67	1,62	1,66	2,31	2,33	29,72	28,76	29,24
6	2	6	0,33	0,34	1,72	1,78	2,05	2,12	15,93	15,84	15,88
15	12	7	0,50	0,55	1,58	1,54	2,08	2,09	24,10	26,21	25,15
3	7	8	0,53	0,60	1,60	1,69	2,18	2,37	24,31	28,75	26,53
2	5	9	0,24	0,24	1,82	1,82	2,05	2,06	11,55	11,41	11,48
10	11	10	0,67	0,70	1,85	1,74	2,52	2,44	26,25	28,54	27,40
8	1	11	0,29	0,66	1,81	1,82	2,10	2,48	13,82	26,43	20,13
14	6	12	0,78	0,75	1,93	1,92	2,71	2,67	28,78	28,09	28,44
11	4	13	0,69	0,74	1,83	1,82	2,53	2,56	27,33	28,96	28,14
7	10	14	0,64	0,65	1,95	1,76	2,59	2,41	24,62	26,79	25,70
16	14	15	0,84	0,80	1,80	1,66	2,64	2,46	31,66	32,52	32,09
13	16	16	0,75	0,64	1,90	1,58	2,65	2,22	28,30	28,83	28,57

5. Análise dos resultados

Para a análise dos resultados utilizou-se o algoritmo proposto por Neto *et al.* (1995). Esse método fornece os valores para os efeitos principais e de interação. Para o cálculo do erro experimental foi utilizado o método da variância. Esses valores são mostrados na "Tabela 4". Após calculado os efeitos principais e de interação, bem como o erro experimental, deve-se, então, realizar o teste de significância dos efeitos. Optando-se em analisar apenas interações de 1ª e 2ª ordens, ferramentas computacionais utilizadas definem 20 graus de liberdade para o experimento, onde o valor de t correspondente é $t = 2,08647$, para um nível de significância de 95%. Multiplicando esse valor pelo erro experimental dos efeitos, obtém-se, assim, o intervalo de confiança do experimento. Desta forma: $2,09 * (-1,271) > \text{SIGN.} > 2,09 * 1,271$

$$\text{SIGNIFICÂNCIA} > |2,652| \quad (4)$$

Para essa condição, foram considerados significativos os efeitos: DC, $I_p * DC$, $I_p * v_a$ e $DC * v_a$. De acordo com os resultados nota-se que a diluição média, segundo a "Tabela 4", se situou próxima dos 25%. O valor máximo de diluição, aproximadamente 32%, foi obtido para os valores de $I_p = 280A$, $I_b = 100A$, $DC = 50\%$ e $v_a = 6m/min$, resultando numa corrente média de 190 A e seu valor mínimo, aproximadamente 11,5%, foi obtido para os valores de $I_p = 280$, $I_b = 70$, $DC = 40\%$ e $v_a = 6m/min$, com corrente média de 154 A. Percebe-se que para esses dois extremos, a corrente de pico e a velocidade do arame permaneceram constantes enquanto o ciclo ativo e a corrente de base foram reduzidas com a redução da diluição. Esperava-se, ainda, obter máxima diluição para o máximo valor de corrente de pico, com $I_p = 350A$, fato esse não ocorrido. Nesses dois casos, a corrente média permaneceu num patamar bem abaixo



da corrente de pico, situação essa que justifica a utilização desse modo de transferência para soldagem de chapas finas.

Tabela 4 - Efeitos dos fatores principais e de interação.

Fatores	Efeitos
Média	24,901 ± 0,635
Ip	0,249 ± 1,271
Ib	2,688 ± 1,271
DC	3,025 ± 1,271
va	0,683 ± 1,271
Ip.Ib	-0,084 ± 1,271
Ip.DC	-4,763 ± 1,271
Ip.va	4,286 ± 1,271
Ib.DC	0,654 ± 1,271
Ib.va	1,436 ± 1,271
DC.va	3,742 ± 1,271
Ip.Ib.DC	3,496 ± 1,271
Ip.Ib.va	-2,090 ± 1,271
Ip.DC.va	-2,784 ± 1,271
Ib.DC.va	-1,375 ± 1,271
Ip.Ib.DC.va	-1,864 ± 1,271

Com relação ao efeito da corrente de base nota-se que o seu efeito se mostrou muito próximo do valor limite de significância. Isto pode induzir a dúvidas quanto à significância ou não desse efeito, devido ao fato de que a leitura de cada resposta foi obtida através da média de várias leituras. Uma interpretação errônea em apenas uma dessas leituras pode alterar tanto o valor dos efeitos quanto o valor do próprio intervalo de significância.

Utilizou-se um gráfico de probabilidade normal para análise dos resíduos. Percebe-se que esses resíduos se situam numa linha reta e centrados próximo de zero, ou seja, os resíduos estão de acordo com a linha normal, não necessitando, portanto de qualquer tipo de transformação. Essa análise indica, ainda, que não há problemas quanto à aleatoriedade dos dados.

Analisando-se os gráficos dos efeitos principais e de interação entre os fatores, obtidos mediante modelo computacional adequado, percebe-se que, pretendendo-se aumentar a diluição acima de 32,09% ou reduzi-la abaixo de 11,48% deve-se manter a velocidade de alimentação no seu nível superior, va(+) e a corrente de pico no seu nível inferior Ip(-) reduzindo a corrente de base e o ciclo ativo, simultaneamente ou não, para promover redução da diluição ou aumentando ambos, também simultaneamente ou não, a fim de promover aumento. O ciclo ativo se mostrou como o parâmetro mais influente tanto no que se refere ao seu efeito isolado quanto nas interações com a corrente de pico e velocidade de alimentação sendo, portanto o mais sensível à variação.

Considerando-se a amplitude de variação do comprimento do arco neste trabalho, em nenhum momento se percebeu curto-circuito entre a tocha de soldagem e o metal de base.

6. Conclusões

A utilização da técnica projeto e análise de experimentos se mostrou extremamente interessante no que se refere a análise dos parâmetros de pulso para o processo MIG. Tais análises dos efeitos permitem uma melhor compreensão de suas influências dentro de uma determinada resposta do sistema, sendo no caso a diluição. Nota-se que pelos resultados que é possível maximizar a diluição de um cordão de solda, trabalhando num modo de transferência tipicamente por spray, sem que necessariamente se despenda grande quantidade de energia para o material de base, possibilitando desta forma a soldagem de chapas de menores espessuras, fato esse comprovado pela reduzida corrente média obtida no experimento. Tal conhecimento da influência dos parâmetros permite um melhor controle da penetração do cordão, conseguindo assim uma ampliação do conhecimento que envolve o assunto e a extensão da faixa de aplicação do processo.

REFERÊNCIAS

- Antony, J., 1999, Reducing manufacturing process variability using experimental design technique: a case study, *Integrated Manufacturing system*. 10/3, pp. 162-169.
- Collard, J.F., 1988, Adaptive pulsed GMAW control: The Digipulse system, *Welding Journal*, november, pp. 35-38.
- Davies, A.C., 1996, *The science and practice of welding*. V.2. The practice of welding, Cambridge University Press, Tenth edition.
- Du Pin, J. C., Neto, A, 1998, Efeito dos parâmetros de pulso sobre a geometria do cordão de solda em soldagem de chapa fina de aço inox AISI 304 pelo processo TIG pulsado, *Revista Soldagem e Inspeção*, ano 4, nº6, pp. 9-16.
- Dutra, J.C., 1996, *Manual da fonte de soldagem Inversal 450*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Graig, E., 1987, A unique mode of GMAW transfer, *Welding Journal*, September, pp.51-56.
- Kim, S. & Eagar, W., 1993, Metal transfer in pulsed current gas metal arc welding, *Welding Journal*, July, pp.379-387.
- Lambert, J.A., 1989, Assessment of the pulsed GMA technique for tube attachment welding, *Welding Journal*, February, pp.35-43.
- Neto, B.B., Scarmínio, I.S., Bruns, R.E., 1995, *Planejamento e otimização de experimentos*. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas.
- Nixon, J.H. & Norrish, J., 1988, Determination of pulsed MIG process parameters, *Synergic MIG Supplement*. from *Welding & Metal Fabrication*, pp. 4-7.
- Subramaniam, S., White, D.R., Jones, J.E. & Lyons, D., 1998, Droplet transfer in pulsed

gas metal arc welding of aluminum, Welding Journal, November, pp. 458-464.

Weber, J., 1982, Pulsed GMAW a plus for Midwestern metalworker, Welding Journal, November, pp.51-52.

The influence of pulse parameters in the GMAW pulsed process on the geometry of the weld bead

Abstract. This paper has the aim to analyse the influence of pulse parameters on the dilution of weld bead. of the GMAW proces For this purpose the design of experiments technique was used with the application of the complete factorial design at two levels. All testes were replicated and randomized, and the t test was used to the analysis o f the significant effects influence.

Key- words: Design of experiments, Factorial planning, GMAW pulsed process.

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PULSO DE UM PROCESSO DE SOLDAGEM MIG ATRAVÉS DE ANÁLISE FATORIAL EM DOIS NÍVEIS

ENESEP 2001

Sebastião C. da Costa

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Departamento de Produção

E-Mail:costa@iem.cfei.rmg.br

Luiz G. Ribeiro

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Departamento de Produção

E-Mail:pos7888gui@zipmail.com.br

Abstract. This paper has the aim to analyse the influence of pulse parameters on the convexity index of the weld bead geometry generated by a pulsed GMAW process. For this purpose the design of experiments technique was used with the application of the complete factorial design at two levels. All testes were replicated and randomized, and the t test was used to the analysis of the significant effects influence.

Key- words: Design of experiments, Factorial design, pulsed GMAW process, welding quality.

I. Introdução

O caminho para uma produção industrial econômica com qualidade e rapidez é a escolha e a configuração correta das variáveis do processo produtivo. O conhecimento e o domínio desta ciência é uma ferramenta imprescindível para se desenvolver produtos que atendam as qualidades necessárias, a um custo mais baixo com processos cada vez mais dinâmicos.

A falta de planejamento muitas vezes é a causa do insucesso no estudo da influência de variáveis em uma investigação e, no entanto, raros são os pesquisadores que pensam em estatística antes de realizar seus experimentos. Normalmente, a metodologia corrente é analisar dados na expectativa de que se possa obter resultados satisfatórios com um bom grau de confiabilidade sem se preocupar com o processo utilizado na coleta dos mesmos. Entretanto, muitas vezes isto não ocorre em função do não planejamento adequado de sua realização.

Segundo Montgomery (1984), o planejamento experimental representa um conjunto de ensaios estabelecidos com critérios científicos e estatísticos, com o objetivo de determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo. A utilização desta técnica permite dentro de um processo determinar quais variáveis são mais influentes nos resultados; atribuir valores às variáveis influentes de modo a otimizar os resultados; atribuir valores às variáveis influentes de modo a minimizar a variabilidade dos resultados; atribuir valores às variáveis de modo a minimizar a influência de variáveis incontroláveis.

Antony (1999) cita como vantagens da utilização do projeto e análise de experimentos a obtenção de reduções de tempo e custo de desenvolvimento de produtos e processos, aumento da satisfação do cliente, auxílio na determinação de grupos ótimos de fatores, bem como a influência destes sobre uma determinada resposta do sistema, visando, deste modo, melhorar desempenho, rendimento, confiabilidade e capacidade dos processos. Muitas das vantagens relativas desta técnica aplicadas a otimização de processos tem sido largamente discutidas na literatura nos mais diversos campos da engenharia, como por exemplo, na usinagem, materiais, soldagem entre outros. De destaque vale mencionar os trabalhos de Gunaraj et. al. (2000) e Antony (2000).

Dentro do ambiente da manufatura, a soldagem vem adquirindo uma importância fundamental, principalmente quando se procura atender aos requisitos de produtividade, aliando qualidade com menores custos de produção. Neste sentido a otimização de procedimentos vem se tornando prática obrigatória nas instalações fabris em épocas de acirrada competição.

Dentre os processos de soldagem, o processo MIG tem se revelado como aquele de maior ascensão no ambiente industrial, decorrente de sua alta produtividade e excelente qualidade dos cordões de solda obtidos. Mais recentemente, o modo pulsado de soldagem aumentou, ainda mais, a faixa de utilização do processo, possibilitando a soldagem de chapas finas em todas as posições, através do modo de transferência por *spray*, onde cordões com aspecto mais homogêneos, arcos mais estáveis e pequena formação de respingos são obtidos. Contudo, Davies (1996) e Dutra (1996) mostram que, apesar dos benefícios trazidos pela utilização do modo pulsado, a complexa natureza deste e o alto grau de habilidade exigida, por parte dos soldadores, na correta seleção dos parâmetros operacionais, têm limitado, de maneira significativa, sua aceitação pelas indústrias de soldagem.

De fato a forma de regulagem das ondas de pulso estabelecidas pelos fatores corrente de pico, I_p , tempo de permanência da corrente no pico, t_p , corrente de base, I_b e tempo de permanência da corrente na base, faz com que suas regulagens possam assumir inúmeras alternativas. Como conseqüência, o cordão de solda adquire diferentes formatos, adequados ou não.

Em função do exposto e para uma melhor utilização do processo MIG pulsado, decidiu-se neste trabalho estudar, o efeito dos parâmetros de pulso num tipo de transferência tipicamente por *spray* sobre a convexidade do cordão de solda. Optou-se por esta resposta em função da mesma permitir um melhor controle da qualidade do cordão obtido. Como forma de análise utilizou-se a ferramenta o Projeto e Análise de Experimentos, em especial, o Planejamento Fatorial Completo em 2 Níveis.

II. A contextualização do processo de soldagem MIG pulsado

O modo pulsado é hoje, alvo de profundas investigações por parte da comunidade científica, devido as vantagens apresentadas por este em relação ao processo MIG convencional. Graig (1987), Collard (1988), Kim & Eagar (1993), Davies (1996), Weber (1982) e Dutra (1996) relatam que, através do fornecimento de um fluxo de corrente de alta intensidade, com ondas intermitentes, é possível obter a transferência por *spray* durante os pulsos de alta corrente enquanto se mantém um nível de corrente média abaixo da corrente normal de transição. Desta maneira é possível a obtenção dos efeitos desejáveis do modo *spray* com baixos níveis de calor, característica normalmente associadas à transferência por curto-circuito, obtendo, ainda, baixa produção de respingos e maior estabilidade do arco, além de um controle preciso dos parâmetros operacionais.

Com a introdução do modo pulsado, novos parâmetros foram adicionados ao processo MIG. Pode-se observar na **Figura 1** que a corrente pulsada é uma onda periódica, onde uma corrente de base (I_b) se alterna com uma corrente de pico (I_p), com seus respectivos tempos de duração (t_b) e (t_p). Essas grandezas são denominadas de *parâmetros de pulso*. Entre os parâmetros derivados do pulso destacam-se a corrente média (I_m) e o ciclo ativo (CA).

A corrente média, **Equação 1**, tem a característica, na transferência pulsada, de apresentar baixos níveis de intensidade sendo, desta forma, processo pode ser utilizado na soldagem de chapas finas.

$$I_m = (I_p * t_p + I_b * t_b) / (t_p + t_b) \quad (1)$$

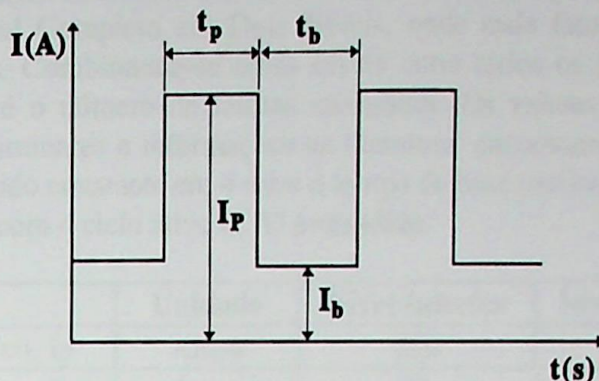


Figura 1 - Esquema de uma onda pulsada e seus componentes.

O ciclo ativo, definido pela **Equação (2)**, reflete a relação entre o tempo de deposição t_p e o tempo total de soldagem, sendo normalmente utilizado em substituição aos tempos de pico e de base em alguns experimentos abordados na literatura, devido à maior facilidade de regulagem dos parâmetros.

$$CA = [t_p / (t_p + t_b)] \times 100(\%) \quad (2)$$

A utilização dos parâmetros de pulso influenciam na geometria do cordão de solda, quer seja na largura, penetração, reforço ou diluição. Dentre estes resultados, a relação entre o reforço e a penetração do cordão definido como índice de convexidade (IC) permite estabelecer uma formação adequada da influência dos parâmetros.

Desta maneira, optou-se, neste trabalho, pelo estudo da influência das correntes de pico e de base, do ciclo ativo, e da velocidade de alimentação, por demonstrar efeitos significativos durante os ensaios preliminares, sobre o índice de convexidade (IC). Como orientação, procurou-se estabelecer padrões de qualidade aceitáveis onde índices de convexidade próximos de 30% são considerados adequados (Silva, 2000). Um IC superior a 30% gera excessivo reforço com pequena penetração conforme mostrado na **Figura 2**.

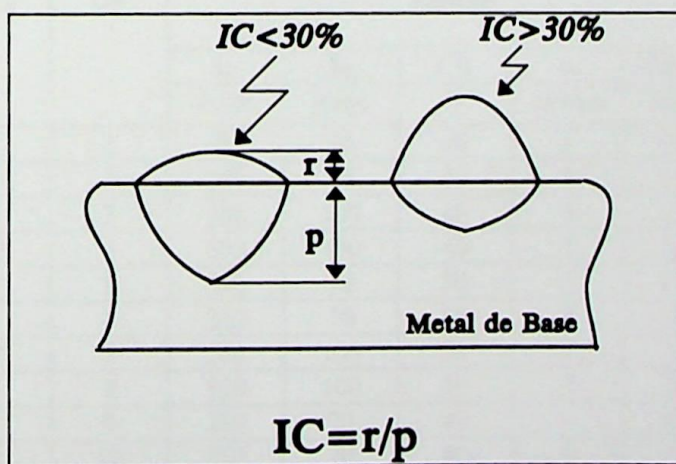


Figura 2 - Representação da área da seção transversal do cordão de solda.

III. Procedimento Experimental

Para a realização do experimento utilizou-se uma fonte transistorizada inversora digitalizada, com imposição de corrente no modo pulsado, a qual possibilitou flexibilidade no ajuste dos parâmetros, associada a um sistema guia com velocidade controlada,

permitindo o deslocamento da tocha durante a realização das soldagens. Utilizou-se, ainda, o Planejamento Fatorial Completo em Dois Níveis, onde cada fator assume um valor superior e um inferior. Combinando-se esses níveis entre todos os fatores obtém-se 2^n experimentos, onde n é o número de fatores analisados. Os valores assumidos para os níveis, após testes preliminares e informações na literatura, encontram-se na **Tabela 1**. O tempo de pico foi mantido constante em 4 ms e o tempo de base oscilou entre os valores de 4 ms e 6 ms de acordo com o ciclo ativo (CA) pretendido.

Fator	Unidade	Nível Inferior	Nível Superior
Corrente de pico, Ip	Amps	280	350
Corrente de base, Ib	Amps	70	100
Ciclo Ativo, CA	%	40	50
Vel.de alim., va	m/min	5	6

Tabela 1 - Níveis inferiores e superiores dos fatores em estudo.

A seqüência de combinação dos fatores foi definida segundo a ordem padrão OP descrita na **Tabela 2** sendo os experimentos realizados em duplicata e numa seqüência aleatória. A duplicação permite o cálculo do erro experimental e significância dos efeitos. A aleatorização permite a aplicação de testes estatísticos de significância e a construção de intervalos de confiança.

As demais variáveis do processo foram mantidas constantes, sendo as soldagens realizadas em CCEP, utilizando arame ER 70S-6 (C-0,1% Mn-1,6%) de diâmetro 1,2 mm e material de base de aço ABNT 1045, com dimensões de 120x40x6 mm. Como gás de proteção foi utilizado Argônio puro com vazão de 15 l/min e velocidade de soldagem de 40 cm/min. A distância tocha-peça foi de 17.5 mm e o recuo do bico de contato foi de 5 mm.

Após realizados os ensaios, os corpos de prova foram seccionados e preparados. Com o auxílio de um projetor de perfil, registrou-se as respectivas penetrações (p) e reforços (r) sendo o índice de convexidade determinado para cada corpo de prova conforme esquema mostrado na **Figura 2**. Os resultados obtidos estão contidos na **Tabela 2**.

OE1	OE2	OP	Ensaio					Resultados Obtidos	
			Ip	Ib	CA	va	Imédia	Ic1	Ic2
			Amps	Amps	%	m/min	Amps	%	%
5	8	1	280	70	40	5	154	37,58	36,94
12	3	2	350	70	40	5	182	48,39	40,58
1	9	3	280	100	40	5	172	38,89	40,30
4	15	4	350	100	40	5	200	43,97	58,72
9	13	5	280	70	50	5	140	37,58	45,71
6	2	6	350	70	50	5	168	53,08	71,82
15	12	7	280	100	50	5	152	36,08	34,94
3	7	8	350	100	50	5	180	38,22	33,53
2	5	9	280	70	40	6	154	57,81	53,62
10	11	10	350	70	40	6	182	41,18	36,69
8	1	11	280	100	40	6	172	47,23	49,32
14	6	12	350	100	40	6	200	36,57	35,33
11	4	13	280	70	50	6	140	36,69	41,83
7	10	14	350	70	50	6	168	32,28	40,63
16	14	15	280	100	50	6	152	33,15	39,74
13	16	16	350	100	50	6	180	34,86	46,26

Tabela 2: Matriz de experimentação e resultados obtidos.

IV. Análise dos resultados

Para a análise dos resultados utilizou-se um “software” comercial, considerando-se um nível de significância (α) igual a 5%, sendo portanto a confiabilidade dos resultados de 95%. A **Tabela 3** mostra os efeitos principais obtidos para o experimento considerando as interações de até 3ª ordem. Para o cálculo do erro experimental foi utilizado o método da variância onde o valor de t foi de 2.12043 (16 graus de liberdade). Assim a significância foi:

$$\text{Significância} > |2,12043 * 2,02637| = |4,297|$$

Tabela 3: Efeitos dos fatores e interações

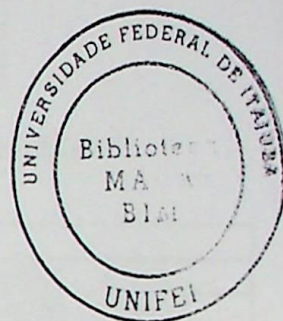
Fatores	Efeitos para IC	
Média	42,509	±1,012
Ip	1,544	±2,025
Ib	-4,069	±2,025
CA	-2,944	±2,025
va	-2,081	±2,025
Ip.Ib	-0,594	±2,025
Ip.CA	4,131	±2,025
Ip.va	-8,531	±2,025
Ib.CA	-3,806	±2,025
Ib.va	1,806	±2,025
CA.va	-3,669	±2,025
Ip.Ib.CA	-2,831	±2,025
Ip.Ib.va	3,406	±2,025
Ip.CA.va	3,581	±2,025
Ib.CA.va	6,694	±2,025
Significância		4,293

Tabela 3: Efeitos dos fatores e interações

Percebe-se da **Tabela 2** que os índices de convexidade obtidos se apresentaram com valores bem superiores a 30%, situação esta indesejável. Observando a **Tabela 3**, nota-se que nenhum parâmetro em particular se mostrou significativo. Entretanto, a corrente de base (Ib) se mostrou muito próxima do limite de significância, sendo que um aumento em seu valor conduz a uma diminuição da convexidade, fator este desejável na melhoria do processo. Considerando as interações, observa-se que os efeitos Ip.va, e Ib.CA.va. se mostraram significativos. As análises destas interações nos permitirá estabelecer as diretrizes para melhorar o índice de convexidade dos cordões obtidos.

Considerando o efeito significativo da interação Ib.CA.va observa-se da representação cúbica da interação mostrado na **Figura 3** que a maior redução do índice de convexidade (16,5%) ocorre quando se utiliza a corrente de base e ciclo ativo no seu nível superior e a velocidade de alimentação no seu nível inferior, fato esse melhor observado pela **Tabela 4**. Assim, a condição que proporciona maior redução de IC é: Ib(+) CA(+) va(-).

Quanto à condição da corrente de pico, observa-se de sua interação significativa com a velocidade de alimentação, **Figura 4**, que menores índices de convexidade podem ser obtidos nas suas condições extremas. Entretanto da análise da interação Ib.CA.va, observou-se que a utilização da velocidade de alimentação de arame em seu nível inferior gerava um menor índice de convexidade na solda. Desta forma, observando a **Figura 4** nota-se que com a utilização da velocidade de alimentação no nível inferior, o menor índice de convexidade é obtido com a corrente de pico no nível inferior.



Considerando todas as análises anteriores, conclui-se que a melhor combinação de parâmetros que fornece um menor índice de convexidade e maior possibilidade de redução deste é: $I_p(-)$ $I_b(+)$ $CA(+)$ $va(-)$. Tal hipótese coincide com o resultado constante da linha 7 da Tabela 2.

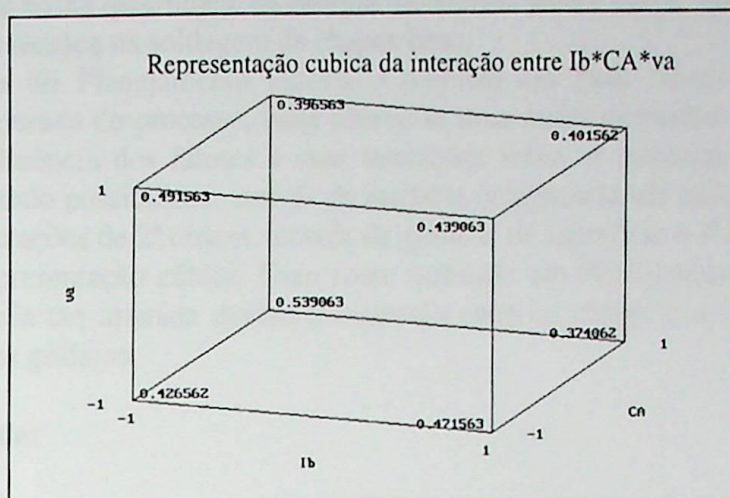


Figura 3. Interação entre $I_b*CA*va$ sobre o índice de convexidade.

I_b	CA	va	Resultado
Redução	(-)	(-)	Redução de (0,471563-0,426562) 0,045001 – 4,50%
Aumento	(-)	(+)	Redução de (0,491563-0,439062) 0,052500 – 5,25%
Aumento	(+)	(-)	Redução de (0,539063-0,374062)0,165001 –16,50%
Redução	(+)	(+)	Redução de (0,396563-0,401562)0,004999 – 0,50%
(-)	Redução	(-)	Redução de (0,539063-0,426562)0,112501 - 11,25%
(-)	Aumento	(+)	Redução de (0,491563-0,396563) 0,095000 - 9,50%
(+)	Aumento	(-)	Redução de (0,471563-0,374062) 0,097501 - 9,75%
(+)	Aumento	(+)	Redução de (0,439063-0,401562) 0,037501 - 3,75%
(-)	(-)	Redução	Redução de (0,491563-0,426562) 0,065001 - 6,50%
(-)	(+)	Aumento	Redução de (0,539063-0,396563) 0,142500 –14,25%
(+)	(-)	Aumento	Redução de (0,471563-0,439063) 0,032500 – 3,25%
(+)	(+)	Redução	Redução de (0,374062-0,401562) 0,027500 – 2,75%

Tabela 4. Resultados obtidos do gráfico de interação entre $I_b*CA*va$.

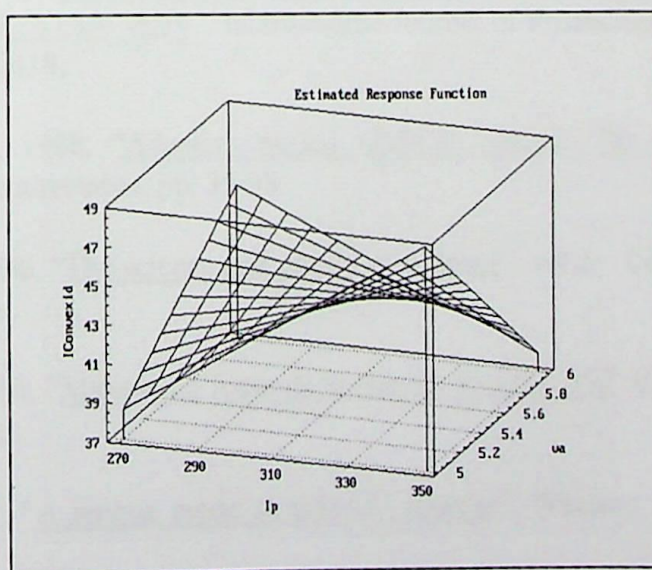


Figura 4: Interação entre I_p*va sobre o índice de convexidade.

Com relação a corrente média, observa-se que em todas as combinações do experimento a mesma se mostrou bastante abaixo da corrente de transição globular/spray, situada próxima de 240 Amps, e do mínimo valor adotado para a corrente de pico, ou seja, 280 Amps. Os valores obtidos no experimento variaram entre 140 e 200 A, proporcionando baixa quantidade de energia transferida para a chapa, justificando, assim, o emprego dessa técnica na soldagem de chapas finas.

A escolha do Planejamento Fatorial Completo em Dois Níveis possibilitou uma análise mais apurada do processo, onde obteve-se uma maior quantidade de informações à respeito da influência dos fatores e suas interações sobre as respostas analisadas. Além disso, esse método possibilitou, através de modelos computacionais adequados, analisar os efeitos das interações de 2ª ordem, através de gráficos de superfície e 3ª ordem, através de gráficos de representação cúbica. Caso fosse utilizado um Planejamento Fracionado essa análise não seria tão apurada devido à confusão entre os efeitos e a impossibilidade de obtenção de tais gráficos.

V. Conclusões

A utilização da técnica projeto e análise de experimentos se mostrou extremamente interessante no que se refere a análise dos parâmetros de pulso para o processo MIG. Tais análises dos efeitos permitem uma melhor compreensão de suas influências dentro de determinadas respostas do sistema. Nota-se pelos resultados que é possível melhorar as características do índice de convexidade do cordão trabalhando de forma adequada no controle dos parâmetros de pulso. Dentre estes parâmetros a corrente de base se mostrou de fundamental importância sendo que um aumento em seu valor resulta em soldas com menores índices de convexidade.

De forma geral o conhecimento da influência dos parâmetros permite um melhor controle das características do cordão, obtendo assim uma ampliação do conhecimento que envolve o assunto e a extensão da faixa de aplicação do processo.

VI. Referências

- ANTONY, J., 1999, "Reducing manufacturing process variability using experimental design technique: a case study", Integrated Manufacturing System. vol. 10/3, pp. 162-169.
- ANTONY, J., 2000, "Improving the manufacturing process quality and capability using experimental design: a case study". International Journal of Production Research, vol. 38, no. 12, pp. 2607 – 2618.
- COLLARD, J.F., 1988, "Adaptive pulsed GMAW control: The digipulse system", Welding Journal, november, pp. 35-38.
- DAVIES, A.C., 1996, "The science and practice of welding". vol.2, Cambridge University Press, Tenth edition.
- DUTRA, J.C., 1996, "Manual da fonte de soldagem Inversal 450". Universidade Federal de Santa Catarina.
- GRAIG, E., 1987, "A unique mode of GMAW transfer". Welding Journal, September, pp.51-56.

GUNARAJ, V. & MURUGAN,N., 2000, "Prediction and optimization of weld bead volume for the submerged arc process – Part 1", Welding Journal, pp. 286s – 294s.

KIM, S. & EAGAR, W., 1993, "Metal transfer in pulsed current gas metal arc welding". Welding Journal, July, pp.379-387.

MONTGOMERY, D.C, 1984, "Design and analisys of experiments". New York: Georgia institute of Technology,1984.

SILVA, C.R. et. al., 2000,"A quality and cost approach for welding process selection", Journal of the Braz. Soc. Mechanical Sciences, vol. XXII, no. 3, pp. 389-398.

WEBER, J., 1982, "Pulsed GMAW a plus for midwestern metalworker". Welding Journal, November, pp.51-52.

AVALIAÇÃO DO PROCESSO MIG PULSADO DE SOLDAGEM ATRAVÉS DO PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS

Jornada 2001 – FEG.

Autor: Luiz Guilherme Ribeiro

Orientador: Sebastião C. da Costa

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Departamento de Produção

E-Mail: guilherme@lcp.inpe.br

costa@iem.efei.br

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade analisar a influência dos parâmetros de pulso, no processo MIG (Metal Inert Gas) de soldagem, sobre a diluição do cordão de solda, representada pela relação entre sua área de penetração e área de reforço. Para a execução de tal tarefa, utilizou-se o Projeto e Análise de Experimentos, em especial o Planejamento Fatorial Completo em Dois Níveis com replicagem e aleatorização, para planejar e analisar os dados, além do teste t para cálculo de significância dos efeitos.

NOMENCLATURA

- CA – Ciclo Ativo[%]
- D – Diluição do cordão[%]
- f – Frequência de pulso[Hz]
- Ip – Corrente de pico[A]
- Ib – Corrente de base[A]
- Im – Corrente média[A]
- It – Corrente de transição[A]
- Sp – Área de penetração[mm²]
- Sr – Área de reforço[mm²]
- St – Área total do cordão[mm²]
- tp – Tempo de pico[ms]
- tb – Tempo de base[ms]
- va – Velocidade de alimentação do arame[m/min]

INTRODUÇÃO

O processo de soldagem MIG tem se revelado, atualmente, como aquele de maior ascensão e aceitação no ambiente fabril, aliando alta produtividade com ótimo aspecto dos cordões de solda. Mais recentemente, o modo pulsado de soldagem expandiu a faixa de utilização do processo, possibilitando a soldagem de chapas finas em todas as posições, através do modo de transferência por *spray*, onde cordões com aspecto mais homogêneo, arcos mais estáveis e pequena formação de respingos são obtidos. Contudo, o grande inconveniente em sua utilização reside na dificuldade em se determinar uma combinação de parâmetros operacionais adequados, devido à sua complexidade que envolve o processo, fato esse que tem feito com que sua adoção pelas empresas não seja ainda maior. Neste contexto, ferramentas estatísticas vêm sendo utilizadas na tentativa de elucidar suas particularidades, de modo a propiciar uma melhor utilização, em função da manipulação das variáveis envolvidas. Dentre estas ferramentas, o Planejamento de Experimentos tem se destacado, em muito, por propiciar redução substancial de tempo e dinheiro, fatores decisivos em época de acirrada competição.

Antony *et al.* (1999) citam como vantagens da utilização desta ferramenta: redução do tempo de desenvolvimento do produto, aumento da satisfação do cliente, redução da variabilidade excessiva de desempenho bem como dos custos de

desenvolvimento dos produtos e processos, auxílio na determinação de grupos ótimos de fatores, bem como a influência destes sobre uma determinada resposta do sistema, visando, deste modo, melhorar o desempenho, o rendimento, a confiabilidade e a capacidade dos processos.

Para um melhor entendimento do processo MIG pulsado, decidiu-se, neste trabalho, estudar o efeito dos parâmetros de pulso do processo num tipo de transferência tipicamente por *spray* sobre as características geométricas do cordão, representadas pelas áreas de penetração, Sp, e reforço, Sr, expressas pela diluição do cordão. Para isto foi utilizado como ferramenta o Projeto e Análise de Experimentos, em especial, o Planejamento Fatorial Completo em dois Níveis.

O PROCESSO MIG PULSADO

O modo pulsado é hoje, alvo de profundas investigações por parte da comunidade científica, devido às vantagens apresentadas em relação ao MIG convencional. Graig (1987), Collard (1988), Kim & Eagar (1993), Davies (1996), Weber (1982) e Dutra (1996) relatam que, através do fornecimento de um fluxo de corrente de alta intensidade, com ondas intermitentes, é possível obter a transferência por *spray* durante os pulsos de alta corrente enquanto se mantém um nível de corrente média abaixo da corrente normal de transição. Desta maneira é possível a obtenção de efeitos desejáveis do modo *spray* com baixos níveis de calor, característica normalmente associadas à transferência por curto-circuito, conciliando, ainda, baixa produção de respingos, maior estabilidade do arco e controle preciso dos parâmetros operacionais.

Contudo, Davies (1996) e Dutra (1996) mostram que, apesar dos benefícios trazidos pela utilização do modo pulsado com transferência por *spray*, sua complexa natureza e o alto grau de habilidade exigida, por parte dos soldadores, na correta seleção dos parâmetros operacionais, têm limitado, de maneira significativa, sua aceitação pelas principais indústrias de soldagem.

OS PARÂMETROS DE PULSO

Com a introdução da corrente pulsada, novos parâmetros foram adicionados ao processo MIG convencional. Pode-se observar na Figura 1 que a corrente pulsada é uma onda periódica, onde uma corrente de base (I_b) se alterna com uma corrente de pico (I_p), com seus respectivos tempos de duração (t_b) e (t_p). Essas grandezas são denominadas de *parâmetros de pulso*. Pode-se, ainda, utilizar parâmetros que são derivados destes, como a corrente média (I_m), a frequência de pulso (f) e o ciclo ativo (CA).

A corrente de pico deve ser mantida acima da corrente de transição (I_t), de forma a manter uma transferência por *spray*. Uma certa quantidade de energia é necessária durante cada pulso de maneira a promover o destacamento da gota. A corrente de pico tem por finalidade garantir a boa fusão e a penetração do cordão.

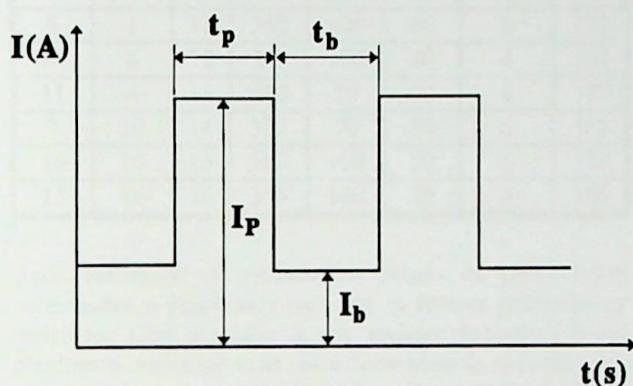


FIGURA 1 - Esquema de uma onda pulsada e seus componentes.

A corrente de base mantém o arco estável e permite que a área da solda fique mais fria. Nixon & Norrish (1988) informam que, considerações à respeito da instabilidade do arco requerem que a corrente de base seja sempre maior que 25(A). Collard (1988) informa que a corrente de base é, provavelmente, o parâmetro de onda menos crítico, embora tenha várias funções além da manutenção do arco elétrico. Controle sobre a poça de solda e a forma da gota podem ser melhorados através de correntes de bases apropriadas. Subramaniam *et al.* (1998) relatam que, destacamentos de gotas no período de base são ótimos para a redução do calor de entrada e para a manutenção da estabilidade do arco, promovendo, assim, a redução de respingos.

A corrente média, dada pela Equação 1, tem a característica, na transferência pulsada, de apresentar baixos níveis de intensidade. Devido à essa característica, esse processo pode ser utilizado na soldagem de chapas finas.

$$I_m = (I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b) / (t_p + t_b) \quad (1)$$

O Ciclo Ativo pode ser definido pela Equação 2, onde, percebe-se a relação entre o tempo de deposição e o tempo total de soldagem. Essa grandeza é normalmente utilizada em substituição aos tempos de pico e de base em alguns experimentos abordados na literatura, devido à menor variabilidade apresentada, o que permite uma maior facilidade quanto à regulagem dos parâmetros.

$$CA = [t_p / (t_p + t_b)] \times 100 \quad (2)$$

Desta maneira, optou-se, nesta análise, pelo estudo da influência das correntes de pico e de base, do ciclo ativo, além do acréscimo da velocidade de alimentação (v_a), por demonstrar efeitos significativos durante os ensaios preliminares, sobre a diluição (D), Equação 3, do cordão de solda, a qual foi definida como a relação entre a área de penetração (S_p) e a área total da seção transversal do cordão de solda (S_t) onde a área total é a área de penetração acrescida da área de reforço (S_r).

$$D = S_p / S_t = S_p / (S_p + S_r) \quad (3)$$

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização do experimento utilizou-se uma fonte transistorizada inversora digitalizada, com imposição de corrente no modo pulsado, a qual possibilitou flexibilidade no ajuste dos parâmetros, associada a um sistema guia com velocidade controlada, permitindo o deslocamento da tocha com velocidade constante durante a realização dos cordões. Com o Planejamento Fatorial Completo em Dois Níveis, cada fator assume dois valores, um superior e um inferior, os quais são denominados de níveis. Combinando-se esses níveis entre os fatores obtém-se 2^n experimentos, onde n é o número de fatores analisados. Após definidos os fatores, bem como as respostas a serem analisadas, foram fixados os níveis dos fatores e o valor das demais variáveis mantidas constantes durante o experimento. Os valores adotados para os níveis se encontram na Tabela 1. O tempo de pico foi mantido constante em 4 ms e o tempo de base oscilou entre os valores de 4 ms e 6 ms de acordo com o Ciclo Ativo utilizado.

TABELA 1 - Níveis inferiores e superiores dos fatores.

Fator	Unidade	Nível Inf.	Nível Sup.
Corrente de pico I_p	A	280	350
Corrente de base I_b	A	70	100
Ciclo Ativo CA	%	40	50
Vel. alimentação v_a	m/min	5	6

As demais variáveis do processo foram mantidas constantes e seus valores referenciados na literatura, sendo utilizado arame ER 70S-6 (C-0,1% e Mn-1,6%) de diâmetro 1,2 mm e material de base de aço ABNT 1045, com dimensões de 120x40x6 mm. Como gás de proteção optou-se em utilizar Argônio puro com a finalidade de referenciar futuros trabalhos, com vazão de 15 l/min e velocidade de soldagem de 40 cm/min. A distância tocha-peça foi de 17,5 mm e o recuo do bico de contato foi de 5 mm.

A seqüência de combinação dos fatores foi definida segundo a ordem padrão OP descrita na Tabela 2 sendo os experimentos realizados em duplicata e numa seqüência aleatória. A duplicação permite o cálculo do erro experimental, o qual será utilizado, também, no cálculo de significância dos efeitos. A

aleatorização permite a aplicação de testes estatísticos de significância e a construção de intervalos de confiança.

TABELA 2 - Planejamento experimental.

OE1	OE2	OP	Ip	Ib	CA	va	Im
-----	-----	----	A	A	%	m/min	A
5	8	1	280	70	40	5	154
12	3	2	350	70	40	5	182
1	9	3	280	100	40	5	172
4	15	4	350	100	40	5	200
9	13	5	280	70	50	5	140
6	2	6	350	70	50	5	168
15	12	7	280	100	50	5	152
3	7	8	350	100	50	5	180
2	5	9	280	70	40	6	154
10	11	10	350	70	40	6	182
8	1	11	280	100	40	6	172
14	6	12	350	100	40	6	200
11	4	13	280	70	50	6	140
7	10	14	350	70	50	6	168
16	14	15	280	100	50	6	152
13	16	16	350	100	50	6	180

Após realizados os ensaios, os corpos de prova foram seccionados e preparados para que as leituras pudessem ser realizadas. Com o auxílio de um projetor de perfis e de um planímetro, registrou-se as respectivas áreas de cada corpo de prova, conforme esquema mostrado na Figura 2. Os resultados obtidos estão contidos na Tabela 3.

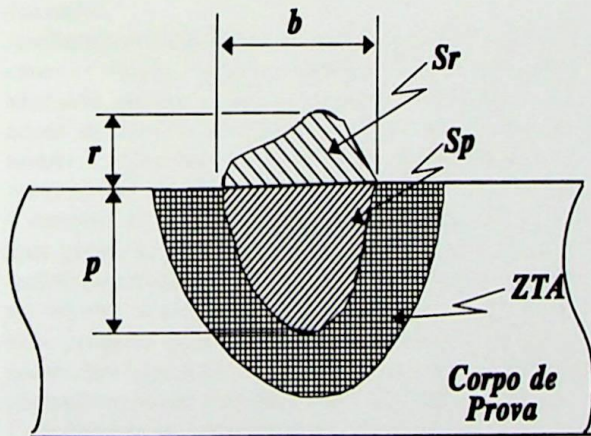


FIGURA 2 - Representação da área da seção transversal do cordão de solda.

TABELA 3 - Valores obtidos no experimento.

Sp1	Sp2	Sr1	Sr2	D1	D2	DM
mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	%	%	%
0,54	0,49	1,55	1,59	25,73	23,56	24,64
0,48	0,50	1,38	1,44	25,81	25,77	25,79
0,56	0,57	1,54	1,49	26,67	27,78	27,22
0,43	0,40	1,48	1,41	21,45	22,23	21,84
0,69	0,67	1,62	1,66	29,72	28,76	29,24
0,33	0,34	1,72	1,78	15,93	15,84	15,88
0,50	0,55	1,58	1,54	24,10	26,21	25,15
0,53	0,60	1,60	1,69	24,31	28,75	26,53
0,24	0,24	1,82	1,82	11,55	11,41	11,48
0,67	0,70	1,85	1,74	26,25	28,54	27,40
0,29	0,66	1,81	1,82	13,82	26,43	20,13
0,78	0,75	1,93	1,92	28,78	28,09	28,44
0,69	0,74	1,83	1,82	27,33	28,96	28,14
0,64	0,65	1,95	1,76	24,62	26,79	25,70
0,84	0,80	1,80	1,66	31,66	32,52	32,09
0,75	0,64	1,90	1,58	28,30	28,83	28,57

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a análise dos resultados utilizou-se o algoritmo proposto por Neto *et al.* (1995). Esse método fornece os valores para os efeitos principais e de interação. Para o cálculo do erro experimental foi utilizado o método da variância. Esses valores são mostrados na Tabela 4.

Após calculado os efeitos principais e de interação, bem como o erro experimental, deve-se, então, realizar o teste de significância dos efeitos. Optando-se em analisar apenas interações de 1ª e 2ª ordens, ferramentas computacionais utilizadas definem 20 graus de liberdade para o experimento, onde o valor de t correspondente é $t = 2,08647$, para um nível de significância de 95%. Multiplicando esse valor pelo erro experimental dos efeitos, obtém-se, assim, o intervalo de confiança do experimento, segundo Equação 4. Desta forma: $2,09 * (-1,271) > \text{SIGN.} > 2,09 * 1,271$

$$\text{SIGNIFICÂNCIA} > |2,652| \tag{4}$$

Para essa condição, foram considerados significativos os efeitos: CA, Ip*CA, Ip*va e CA*va.

De acordo com os resultados nota-se que a diluição média, segundo a Tabela 4, se situou próxima dos 25%. O valor máximo de diluição, aproximadamente 32%, foi obtido para os valores de Ip=280A, Ib=100A, CA=50% e va=6m/min, resultando numa corrente média de 190 (A) e seu valor mínimo, aproximadamente 11,5%, foi obtido para os valores de Ip=280, Ib=70, CA=40% e va= 6m/min, com corrente média de 154 (A). Percebe-se que para esses dois extremos, a corrente de pico e a velocidade do arame permaneceram constantes enquanto o ciclo ativo e a corrente de base foram reduzidas com a redução da diluição. Esperava-se, ainda, obter máxima diluição para o máximo valor de corrente de pico, com Ip=350 (A), fato esse não ocorrido. Nesses dois casos, a corrente média permaneceu num patamar bem abaixo da corrente de pico, situação essa que justifica a utilização desse modo de transferência para soldagem de chapas finas.

TABELA 4 - Efeitos dos fatores principais e de interação.

Fatores	Efeitos
Média	24,901 ± 0,635
Ip	0,249 ± 1,271
Ib	2,688 ± 1,271
CA	3,025 ± 1,271
va	0,683 ± 1,271
Ip.Ib	-0,084 ± 1,271
Ip.CA	-4,763 ± 1,271
Ip.va	4,286 ± 1,271
Ib.CA	0,654 ± 1,271
Ib.va	1,436 ± 1,271
CA.va	3,742 ± 1,271
Ip.Ib.CA	3,496 ± 1,271
Ip.Ib.va	-2,090 ± 1,271
Ip.CA.va	-2,784 ± 1,271
Ib.CA.va	-1,375 ± 1,271
Ip.Ib.CA.va	-1,864 ± 1,271

Com relação ao efeito da corrente de base nota-se que o seu efeito se mostrou muito próximo do valor limite de significância. Isto pode induzir a dúvidas quanto à significância ou não desse efeito, devido ao fato de que a leitura de cada resposta foi obtida através da média de várias leituras. Uma interpretação errônea em apenas uma dessas leituras pode alterar tanto o valor dos efeitos quanto o valor do próprio intervalo de significância.

Utilizou-se um gráfico de probabilidade normal para análise dos resíduos. Percebe-se que esses resíduos se situam numa linha reta e centrados próximo de zero, ou seja, os resíduos estão de acordo com a linha normal, não necessitando, portanto de qualquer tipo de transformação. Essa análise indica, ainda, que não há problemas quanto à aleatoriedade dos dados.

Analisando-se os gráficos dos efeitos principais e de interação entre os fatores, obtidos mediante modelo computacional adequado, percebe-se que, pretendendo-se aumentar a diluição acima de 32,09% ou reduzi-la abaixo de 11,48% deve-se manter a velocidade de alimentação no seu nível superior, $va(+)$ e a corrente de pico no seu nível inferior $Ip(-)$ reduzindo a corrente de base e o ciclo ativo, simultaneamente ou não, para promover redução da diluição ou aumentando ambos, também simultaneamente ou não, a fim de promover aumento na resposta. O ciclo ativo foi considerado como o parâmetro mais influente tanto no que se refere ao seu efeito isolado quanto nas interações com a corrente de pico e velocidade de alimentação sendo, portanto o mais sensível à variação.

Considerando-se a amplitude de variação do comprimento do arco neste trabalho, em nenhum momento se percebeu curto-circuito entre a tocha de soldagem e o metal de base.

CONCLUSÕES

A utilização da técnica projeto e análise de experimentos se mostrou extremamente interessante no que se refere a análise dos parâmetros de pulso para o processo MIG. Tais análises dos efeitos permitem uma melhor compreensão de suas influências dentro de uma determinada resposta do sistema, sendo no caso a diluição. Percebe-se, pelos resultados, que é possível otimizar a diluição de um cordão de solda,

trabalhando num modo de transferência tipicamente por *spray*, sem que necessariamente se despenda grande quantidade de energia para o material de base, possibilitando desta forma a soldagem de chapas de menores espessuras, fato esse comprovado pela reduzida corrente média obtida no experimento. Tal conhecimento da influência dos parâmetros permite um melhor controle da penetração do cordão, conseguindo assim uma ampliação dos conhecimentos que envolvem o assunto e a extensão da faixa de aplicação do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antony, J. Reducing manufacturing process variability using experimental design technique: a case study. *Integrated Manufacturing system*. 10/3, pp. 162-169, 1999.
- Collard, J.F. Adaptive pulsed GMAW control: The Digipulse system. *Welding Journal*, november, pp. 35-38, 1988.
- Davies, A.C. The science and practice of welding. V.2. The practice of welding. Cambridge University Press, Tenth edition. 1996.
- Du Pin, J. C., Neto, A. Efeito dos parâmetros de pulso sobre a geometria do cordão de solda em soldagem de chapa fina de aço inox AISI 304 pelo processo TIG pulsado. *Revista Soldagem e Inspeção*, ano 4, nº6, pp. 9-16, 1998.
- Dutra, J.C., Manual da fonte de soldagem Inversal 450. Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.
- Graig, E. A unique mode of GMAW transfer. *Welding Journal*, September, pp.51-56, 1987.
- Kim, S. & Eagar, W. Metal transfer in pulsed current gas metal arc welding. *Welding Journal*, July, pp.379-387, 1993.
- Lambert, J.A. Assessment of the pulsed GMA technique for tube attachment welding. *Welding Journal*, February, pp.35-43, 1998.
- Neto, B.B., Scarmínio, I.S., Bruns, R.E. Planejamento e otimização de experimentos. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas, 1995.
- Nixon, J.H. & Norrish, J. Determination of pulsed MIG process parameters. *Synergic MIG Supplement*. from *Welding & Metal Fabrication*, pp. 4-7, 1988.
- Subramaniam, S., White, D.R., Jones, J.E. & Lyons, D. Droplet transfer in pulsed gas metal arc welding of aluminum. *Welding Journal*, November, pp. 458-464, 1998.
- Weber, J. Pulsed GMAW a plus for Midwestern metalworker. *Welding Journal*, November, pp.51-52, 1982.