

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Carlos Gustavo Bonanni

**USO COMBINADO DAS TÉCNICAS DOE E
SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO EM UM
PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG
PULSADO**

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. Sebastião Carlos da Costa, Dr.

Itajubá, 08 de Junho de 2005

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

B640u

Bonanni, Carlos Gustavo

Uso combinado das técnicas DOE e Simulação Monte Carlo em um processo de soldagem MIG/MAG pulsado / por Carlos Gustavo Bonanni.

-- Itajubá (MG) : [s.n.], 2005.

104 p. : il.

Orientador : Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá – IEPG

1. Projeto de experimento. 2. MIG/MAG pulsado. 3. Simulação de Monte Carlo. I. Costa, Sebastião Carlos da, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

CDU 621.791(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Carlos Gustavo Bonanni

**USO COMBINADO DAS TÉCNICAS DOE E
SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO EM UM
PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG
PULSADO**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 08 de Junho de 2005, conferindo ao autor o título de *Mestre em Engenharia de Produção*

Banca Examinadora:

Prof. Wanderley Xavier Pereira, Dr.

Prof. José Leonardo Noronha, Dr.

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

Itajubá, 08 de Junho de 2005

Dedicatória

Este trabalho é dedicado a todas as pessoas que de forma direta ou indireta proporcionaram sua realização. Dedico especialmente à minha esposa Cristina, que vêm me apoiando e incentivando não somente neste trabalho, mas em toda minha formação acadêmica. Ao meu filho Tiago que sempre me traz alegria e incentivo para seguir em frente.

Não poderia deixar de agradecer profundamente a participação de meus pais, Mário e Lourdes, em todos os momentos de minha vida. Mesmo não estando presentes em parte de minha formação, foram exemplos a seguir, e me proporcionaram meios de educação e desenvolvimento tanto pessoal quanto profissional.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ter sido concluído sem a ajuda e colaboração de várias pessoas, que de alguma forma me proporcionaram meios de concluí-lo com sucesso. Algumas pessoas que não poderia deixar de citar em agradecimento a tudo que me ajudaram:

Minha Esposa, Cristina P. Bonanni;

Meu filho, Tiago P. Bonanni;

Meus irmãos, Luzia e Francisco;

Meu orientador, Sebastião Carlos da Costa ;

Aos colegas de Pós- Graduação e aos meus amigos;

A estas pessoas e a tantas outras meu profundo agradecimento por estarem ao meu lado nesta etapa que acaba de ser cumprida.

Não poderia deixar de citar e mostrar meu enorme apreço pela CAPES por proporcionar aos pesquisadores brasileiros meios de transformarem suas idéias em grandes trabalhos científicos.

SUMÁRIO

Dedicatória	iv
Agradecimentos	v
Sumário	vi
Resumo	viii
Abstract	ix
Lista de quadros	x
Lista de tabelas	xi
Lista de figuras	xii
Lista de símbolos e abreviaturas	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	4
1.2. Justificativa da Escolha do Tema	4
1.3. Contribuições	5
1.4. Estrutura do Trabalho	5
2. PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG	7
2.1. Variáveis Envolvidas no Processo	9
2.2. Tipos de Transferência	12
2.3. Processo de Soldagem MIG/MAG Pulsado	14
2.3.1. Parâmetros do Modo Pulsado	16
2.4. Gases de Proteção e suas Características Físicas	20
2.4.1. Gases Inertes	20
2.4.2. Adição de Oxigênio e CO ₂ ao Argônio e Hélio	22
2.4.3. Dióxido de Carbono – CO ₂	23
2.4.4. Gás de Proteção e Mistura de Gases para Aço Carbono	26
3. FERRAMENTAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO	28
3.1. Projeto e Análise de Experimento	28
3.1.1. A Técnica de Projeto de Experimentos	30
3.1.2. Qual é a Utilidade do Planejamento Experimental	31
3.1.3. Vantagens do Uso do DOE	32
3.1.4. Tipos de Planejamento Experimental	33
3.1.4.1. Planejamento Fatorial 2 ^k	34
3.1.4.2. Planejamento Fatorial Fracionário	34
3.1.4.3. Estudo dos Efeitos Principais e Interações	35
3.2. Simulação de Monte Carlo	35
3.2.1. Definição	35
3.2.2. Tipos de Simulação	36
3.2.3. A Técnica de Simulação de Monte Carlo	37
3.2.4. Vantagens e Desvantagens	38
3.2.5. Passos para Aplicação do Método	39
3.2.6. Definição da Distribuição de Incertezas das Variáveis do Modelo	40
3.3. DOE x Simulação de Monte Carlo	42
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	44
4.1. Formulação do que será Investigado	44
4.1.1. Formulação do Problema	44
4.1.2. Fatores de Controle e seus Níveis	45
4.1.3. Parâmetros Operacionais	46

4.1.4.	Banco de Ensaaios	47
4.1.5.	Respostas do Experimento	47
4.2.	Construção do Modelo	49
4.2.1.	Matriz Experimental e Seqüência dos Ensaaios	50
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1.	Resultados Encontrados a partir do DOE	53
5.2.	Análise da Penetração	57
5.2.1.	Influência dos Fatores sobre a Penetração do Cordão de Solda	57
5.3.	Análise da Diluição	60
5.3.1.	Influência dos Fatores sobre a Diluição do Cordão de Solda	61
5.4.	Análise do Índice de Convexidade	63
5.4.1.	Influência dos Fatores sobre o Índice de Convexidade do Cordão de Solda	63
5.5.	Análise do Índice de Respingos	65
5.5.1.	Influência dos Fatores sobre o Índice de Respingos do Cordão de Solda	66
5.6.	Condição Geral para Melhoria da Qualidade do Cordão de Solda	68
5.7.	Simulação e Inclusão da Variabilidade na Condição Encontrada	70
5.7.1.	Criação do Modelo de Simulação	70
5.8.	Avaliação Aproximada dos Custos do Processo	76
5.8.1.	Análise de Sensibilidade	80
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS	84
6.1.	Conclusões Gerais	84
6.2.	Propostas para Trabalhos Futuros	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

RESUMO

A utilização do DOE embora gerando resultados positivos, muitas vezes gera variâncias de resultados nem sempre previstos. Desta forma a previsibilidade destas variações seria de fundamental importância no sentido de gerar resultados práticos mais efetivos. Um caminho para isto pode ser através da associação de metodologias estatísticas que permitam congregiar análises e gerar também nos resultados uma previsão da variabilidade encontrada nos processos. Em função destes aspectos este trabalho tem como objetivo fazer uma análise, através do uso do DOE juntamente com a Simulação de Monte Carlo, destas metodologias aplicadas em um estudo de caso real na área de soldagem MIG/MAG pulsada. O estudo é focado na influência sofrida na diluição, penetração, convexidade do cordão de solda e formação de respingos gerados pelo ajuste dos parâmetros de pulso, como corrente de pico, corrente de base, ciclo ativo e velocidade de alimentação do arame. Com isso, pretende-se encontrar configurações que garantam um intervalo de ocorrência de resultados próximos do ótimo para os aspectos geométricos da soldagem MIG/MAG Pulsado. Também será abordado no presente trabalho uma aproximação dos custos sofridos pelo processo estudado, do mesmo modo, inserindo a variabilidade nas respostas encontradas através da Simulação de Monte Carlo. Para tal será utilizada uma atmosfera protetora de Argônio Puro comparativamente com Argônio + 25% CO₂.

ABSTRACT

The DOE utilization, although with several positive results, sometimes the results variances are not always predicted. Therefore, to predict these variations would be extremely important in order to produce more effective practical results. An alternative to achieve this is to associate statistical methodologies, which allows a simultaneous analysis and also considering the process variability inherent to the process. Due to this, this paper aims to analyze , using the DOE together with the Monte Carlo Simulation applied on a real case study on the pulsed GMAW welding. The study is focused on the influence on the dilution, penetration, welding bead convexity and welding splatters caused by the pulse parameters adjusting, like peak current, base current, duty cycle and wire feeding speed. With that, the aim is to determine the configurations to ensure that the occurrence interval for the results are close to the best regarding the geometrical aspects of the pulsed GMAW welding. This paper will also consider the costs variation on the studied process, again considering the variability on the found responses thru Monte Carlo Simulation. For that, is was used a protective atmosphere of pure Argon compared with Argon +25% CO₂.

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1	Vantagens e desvantagens da simulação de Monte Carlo
Quadro 3.2	Tipos de distribuição de probabilidade

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Níveis dos fatores
Tabela 4.2	Parâmetros operacionais
Tabela 4.3	Matriz Experimental
Tabela 5.1	Dados obtidos do ensaio – Argônio puro
Tabela 5.2	Dados obtidos do ensaio – Mistura C25
Tabela 5.3	Resultado dos parâmetros geométricos – Argônio puro
Tabela 5.4	Resultado dos parâmetros geométricos – Mistura C25
Tabela 5.5	Respostas do experimento – Argônio puro
Tabela 5.6	Respostas do experimento – Mistura C25
Tabela 5.7	Efeitos Estimados e Coeficientes para Penetração
Tabela 5.8	Efeitos Estimados e Coeficientes para Diluição
Tabela 5.9	Efeitos Estimados e Coeficientes para Índice de Convexidade
Tabela 5.10	Efeitos Estimados e Coeficientes para Índice de Respingos
Tabela 5.11	Parâmetros para escolha da melhor condição de soldagem
Tabela 5.12	Modelo para Simulação - penetração
Tabela 5.13	Ensaio para validação da SMC - penetração
Tabela 5.14	Modelo para Simulação - diluição
Tabela 5.15	Ensaio para validação da SMC – diluição
Tabela 5.16	Modelo para Simulação – índice de convexidade
Tabela 5.17	Ensaio para validação da SMC – índice de convexidade
Tabela 5.18	Modelo para Simulação – índice de respingo
Tabela 5.19	Ensaio para validação da SMC – índice de respingo
Tabela 5.20	Equações para determinação do custo
Tabela 5.21	Nomenclatura e valores adotados para equações de custo
Tabela 5.22	Planilha de custos
Tabela 5.23	Condições de ensaio para diferentes vazões

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Arco pulsado
Figura 2.2	Representação da área da seção transversal do cordão de solda
Figura 2.3	Perfil do cordão de solda com diferentes gases de proteção
Figura 2.4	Perfil do cordão de solda
Figura 4.1	Banco de ensaio
Figura 4.2	Esquema da área da seção transversal do cordão de solda
Figura 4.3	CP polido
Figura 4.4	CP atacado – Argônio
Figura 4.5	CP atacado – Mistura C25
Figura 5.1	Efeitos Principais – Argônio puro
Figura 5.2	Efeitos Principais – Mistura C25
Figura 5.3	Efeito das interações – Argônio puro
Figura 5.4	Efeito das interações – Mistura C25
Figura 5.5	Efeitos Principais – Argônio puro
Figura 5.6	Efeitos Principais – Mistura C25
Figura 5.7	Efeito das interações – Argônio puro
Figura 5.8	Efeito das interações – Mistura C25
Figura 5.9	Efeitos Principais – Argônio puro
Figura 5.10	Efeitos Principais – Mistura C25
Figura 5.11	Efeito das interações – Argônio puro
Figura 5.12	Efeito das interações – Mistura C25
Figura 5.13	Efeitos Principais – Argônio puro
Figura 5.14	Efeitos Principais – Mistura C25
Figura 5.15	Efeito das interações – Argônio puro
Figura 5.16	Efeito das interações – Mistura C25
Figura 5.17	Otimização da resposta – Argônio puro
Figura 5.18	Otimização da resposta – Mistura C25
Figura 5.19	SMC da penetração – Argônio
Figura 5.20	SMC da penetração – Mistura C25
Figura 5.21	Probabilidade de ocorrência - penetração
Figura 5.22	SMC da diluição – Argônio puro

Figura 5.23	SMC da diluição – Mistura C25
Figura 5.24	SMC Índice de convexidade – Argônio puro
Figura 5.25	SMC Índice de convexidade – Mistura C25
Figura 5.26	SMC do Índice de respingo – Argônio puro
Figura 5.27	SMC do Índice de respingo – Mistura C25
Figura 5.28	SMC do custo – Argônio puro
Figura 5.29	SMC do custo – Mistura C25
Figura 5.30	Análise de sensibilidade – Argônio puro
Figura 5.31	Análise de sensibilidade – Mistura C25
Figura 5.32	Penetração com diferentes vazões – Argônio puro
Figura 5.33	Penetração com diferentes vazões – Mistura C25
Figura 5.34	Diluição com diferentes vazões – Argônio puro
Figura 5.35	Diluição com diferentes vazões – Mistura C25
Figura 5.36	IC com diferentes vazões – Argônio puro
Figura 5.37	IC com diferentes vazões – Mistura C25
Figura 5.38	Iresp com diferentes vazões – Argônio puro
Figura 5.39	Iresp com diferentes vazões – Mistura C25
Figura 5.40	Taxa deposição com diferentes vazões – Argônio puro
Figura 5.41	Taxa deposição com diferentes vazões – Mistura C25

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

b	Largura do cordão de solda
CA	Ciclo ativo
D	Diluição
DOE	Projeto e Análise de Experimentos
I _b	Corrente de base
IC	Índice de convexidade
I _p	Corrente de pico
I _{resp}	Índice de respingos
K	Número de fatores
l	Comprimento do arame fornecido
m _{cp}	Massa medida dos corpos de prova
m _f	Massa do corpo de prova após soldagem
Mistura C25	75% de Argônio com 25% de CO ₂
mt	Quantidade de material de adição teórica fornecida durante a soldagem
m Φ	Massa inicial do corpo de prova
p	Penetração
r	Reforço do cordão de solda
RDR	Rendimento de deposição real
SMC	Simulação de Monte Carlo
S _p	Área de penetração do cordão de solda
S _r	Área de reforço do cordão de solda
t _b	Tempo de permanência da corrente na base
TD	Taxa de deposição
TF	Taxa de fusão
t _p	Tempo de permanência da corrente no pico
t _{solda}	Tempo de soldagem
V	Tensão de soldagem
V _a	Velocidade de avanço
Φ	Diâmetro do arame

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nos dias atuais é amplamente sabido que a escolha e a configuração correta das variáveis do processo produtivo proporcionam uma produção industrial mais econômica, com maior qualidade e rapidez. 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. Segundo CAMPOS (1996) o gerenciamento está deixando de ser político para se tornar científico e a sobrevivência das organizações somente estará assegurada quando as metas impostas pelo mercado puderem ser atingidas e isso somente poderá ser feito mediante métodos e conhecimento.

Embora se tenha na literatura uma vasta gama de informações sobre ferramentas que proporcionam melhorias significativas em processos e produtos, quer seja melhorando aspectos de qualidade, produtividade ou mesmo custos, estas muitas vezes chegam a modelos e resultados que não levam em consideração o fato de haver sempre uma variabilidade embutida nestes resultados e que afetam de uma forma ou de outra o desempenho da ferramenta em utilização. Desta forma a adição desta variabilidade na confecção de modelos torna-se de grande importância para se conhecer melhor o comportamento de um processo e assim tomar decisões mais embasadas e confiáveis, o que proporciona uma maior chance de sucesso na implementação das melhorias.

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 nas respostas escolhidas, abrangendo tanto uma análise de produtividade, qualidade, custos, etc.; 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 incontrolláveis.

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 à otimização de processos tem sido largamente discutidas na literatura nos mais diversos campos da engenharia, como por exemplo, na usinagem, materiais, soldagem entre outros.

Dentro do ambiente da manufatura, a soldagem tem uma importância fundamental, principalmente quando se procura atender aos requisitos de produtividade, aliando qualidade com menores custos de produção, o que justifica a escolha de um processo de soldagem para o estudo das ferramentas de otimização citadas acima. Wainer (1992) cita dois pontos principais que devem ser tomados com maior atenção ao se analisar os processos de soldagem:

- Os processos de soldagem baseiam-se em dados empíricos e são dependentes de um grande número de parâmetros, o que dificulta sua formulação matemática;
- São dependentes quase que totalmente da habilidade e conhecimento do homem sobre o processo e suas análises são extremamente difíceis, tornando difícil o controle do processo.

Há um interesse em avaliar tais fatores, cujo conhecimento seria de grande importância e utilidade para o aprimoramento do processo de soldagem, tanto em aspectos produtivos quanto pelo lado da redução do custo do processo.

Dentre os processos de soldagem, o processo MIG/MAG 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 dos parâmetros de pulso estabelecidos 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 (t_b), faz com que suas regulagens possam assumir inúmeras

alternativas. A utilização dos parâmetros de pulso influencia na geometria do cordão de solda, quer seja na largura, penetração, reforço, diluição e índice de convexidade, adquirindo diferentes formatos, adequados ou não. Além destes fatores, o tipo de gás de proteção, a velocidade de soldagem, a velocidade de alimentação do arame, a polaridade, a tensão de soldagem entre outros parâmetros também influenciam na qualidade final da solda e, conseqüentemente, no seu custo final, devido não somente ao preço do gás utilizado e também pelo fato de que em alguns casos pode haver a necessidade de retrabalho da peça devido ao grau de respingos gerados pela solda.

Com isso, este trabalho se propõe a estudar a utilização de duas ferramentas de otimização de processos e produtos, uma em complemento a outra, em que se possa extrair dos resultados gerados a variação existente no processo, gerando assim um resultado otimizado com seu respectivo intervalo de operação na prática, tentando desta forma informar a variabilidade natural encontrada em processos. Para tal, serão empregadas as técnicas de Análise e Projeto de Experimentos (DOE) e em complemento a esta será utilizada a Simulação de Monte Carlo (SMC), para que se possa analisar o comportamento das configurações que geraram melhores resultados, podendo-se então obter um intervalo com as distribuições de probabilidades para cada resposta em estudo, aplicado a um processo de soldagem MIG/MAG pulsado, analisando a influência dos parâmetros de pulso e de dois diferentes gases de proteção, Argônio puro e a mistura de 75% de Argônio com 25% de CO₂ (Mistura C25), no comportamento geométrico e produtivo da soldagem e na qualidade do cordão de solda.

Para concretizar a proposição deste trabalho inicialmente foi realizado um estudo DOE (Planejamento Fatorial Fracionado 2 Níveis) para se encontrar a significância dos fatores de pulso do processo MIG/MAG, possibilitando gerar uma sentença matemática a partir destes fatores e expressar a melhor resposta para cada fator, maximizando a diluição e penetração do cordão, minimizando o índice de respingos gerados e procurando condições que propiciem convexidade do cordão (IC) em torno de 30%. Tendo o conhecimento das equações de otimização, partiu-se para a criação do modelo matemático para que fosse realizada então a simulação de Monte Carlo, a qual foi feita com o auxílio de um software específico, inserindo assim a variabilidade do processo e até mesmo do próprio resultado encontrado com o DOE. A partir das equações de cada fator foi gerado a partir do software Crystal Ball um modelo representativo de cada resposta em questão, sendo neste inserido o erro experimental fornecido pela análise DOE. Com a simulação do modelo (10.000 rodadas) houve a determinação da distribuição de probabilidades do processo, indicando o intervalo de ocorrência dos resultados.

Posteriormente foi realizado um ensaio comprobatório para certificar que o modelo e a distribuição de probabilidades fornecem informações confiáveis e assim validar o estudo.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo fazer uma associação de metodologias estatísticas que permitam congregiar análises e gerar também nos resultados uma previsão da variabilidade encontrada nos processos. Em função destes aspectos, será feita uma análise através do uso do DOE juntamente com a simulação de Monte Carlo para determinar a variabilidade de um processo de soldagem MIG/MAG pulsado quando este utiliza uma atmosfera protetora de Argônio Puro comparativamente com Argônio + 25% CO₂. Com isso, pretende-se também determinar a influência dos parâmetros de pulso do processo de soldagem MIG/MAG pulsado sobre os aspectos geométricos e de qualidade do cordão de solda, bem como sua variabilidade, descritos através da diluição (D), penetração (p), índice de convexidade do cordão de solda (IC) e índice de respingos (Iresp) gerados pelo ajuste dos referidos parâmetros de pulso, que são corrente de pico (Ip), corrente de base (Ib), ciclo ativo (CA) e velocidade de alimentação do arame (Va). Pode-se citar também como objetivo secundário, o cálculo aproximado dos custos de soldagem gerados pelos dois tipos de gases de proteção, novamente inserindo a variabilidade na resposta encontrada.

1.2 Limitações

Deve-se citar que este trabalho se ateve a analisar alguns dos vários fatores que apresentam influência na qualidade e geometria do cordão de solda, visto que seria necessário um número muito grande de ensaios, limitando-se, portanto, aos fatores que possivelmente trazem mais impacto nas respostas escolhidas para análise.

Com relação ao aspecto econômico, apenas se considerou os gases e o arame como fatores mais impactantes no custo, sem contudo considerar o aspecto significativo da mão-de-obra.

Além disso, deve-se mencionar que muito embora se fez uma comparação entre os gases Argônio e a mistura C25 apenas como tendências de comportamento face a adição de CO₂ ao Argônio, é importante reconhecer que o Argônio puro normalmente não é utilizado para soldagens de aços carbono.

1.3 Contribuições

O que se espera para este trabalho é poder conciliar o uso de duas técnicas (DOE e Simulação de Monte Carlo) já bastante difundidas no meio científico, buscando extrair informações importantes para um melhor conhecimento de processos, que não seria tão simples de obter com o uso isolado destas ferramentas, como é o mais comum de se encontrar na literatura. Com isso espera-se obter informações, através de dados coletados em ensaios planejados a partir do DOE, dos fatores que mais causam impacto no desempenho de um determinado processo e inserir nestas informações, com o uso da simulação, a variabilidade da resposta encontrada anteriormente, o que traz maior confiabilidade para a análise feita e, por conseguinte decisões mais eficientes podem ser tomadas. Caso esta combinação entre as metodologias se mostre eficaz, esta forma de análise pode ser estendida para diversas outras situações, tanto em soldagem quanto em outras áreas relacionadas.

Outra contribuição esperada do trabalho é a de poder traçar um comparativo de qual modalidade de proteção afeta mais ou menos o comportamento da qualidade e geometria do cordão de solda e também sobre o custo de soldagem, proporcionando um maior domínio do processo MIG/MAG pulsado, de forma que informações importantes serão geradas sobre o comportamento do processo quando este é realizado com diferentes proporções dos gases da atmosfera de proteção, informações estas difíceis de encontrar referências em periódicos e outras publicações científicas. Com isso, pretende-se encontrar configurações que garantam um intervalo de ocorrência de resultados próximos do ótimo para os aspectos geométricos da soldagem MIG/MAG Pulsado. Para tal será utilizada uma atmosfera protetora de Argônio Puro comparativamente com Argônio + 25% CO₂.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho será estruturado em 6 capítulos, que abordam os seguintes assuntos:

1. Capítulo 1 – Introdução: aborda a relevância do tema escolhido, bem como o objetivo pretendido, as contribuições e justificativa pela escolha do tema. Por fim apresenta a estrutura do trabalho.
2. Capítulo 2 – Apresenta de forma resumida as características do processo de soldagem MIG/MAG pulsado, características tais como parâmetros do modo pulsado e a importância do tipo de gás de proteção empregado na soldagem.

3. Capítulo 3 – Neste capítulo são abordadas as ferramentas estudadas no trabalho, ou seja, as Técnicas de Projeto e Análise de Experimentos e a Simulação de Monte Carlo.
4. Capítulo 4 – É descrita a montagem experimental do trabalho, citando o banco de ensaios utilizado e seus equipamentos, assim como os níveis usados para o experimento.
5. Capítulo 5 – É nesta fase que se apresenta as análises e resultados encontrados no trabalho, ou seja, o modo de se trabalhar com cada um dos gases para que se alcance melhores resultados, de acordo com o projeto experimental escolhido. Outro ponto analisado é a variabilidade encontrada nas respostas obtidas pelo DOE, através da simulação de Monte Carlo, fazendo-se também uma pequena análise dos custos gerados para realização da solda com os dois tipos de proteção gasosa.
6. Capítulo 6 – Aborda as conclusões do trabalho realizado e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG

Na década de 1950, a equipe de pesquisadores da empresa Airco (hoje BOC Gases), desenvolveu um novo processo de soldagem que iria revolucionar a produtividade de produtos soldados, (SULLIVAN, 1998). A inovação por eles desenvolvida é o processo que hoje é conhecido como MIG/MAG (Metal Inert Gás), ou GMAW (Gás Metal Arc Welding).

O desenvolvimento do processo MIG/MAG deve ser creditado a três pesquisadores, Muller, Gibson e Anderson. A idéia foi iniciada pela criticidade de soldagem por transferência de metal devido a fatores como polaridade, velocidade de alimentação do eletrodo e corrente. O único processo que surgira durante a Segunda Guerra Mundial foi o processo TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), o qual era usado em metais que sofriam oxidação quando fundido, como o alumínio e magnésio, e sendo assim, necessitavam de uma atmosfera com um gás inerte para proteção contra a oxidação em aplicações de soldagem.

O processo MIG/MAG foi desenvolvido em parte para conseguir uma combinação entre o tipo de arco e baixo índice de respingos do processo TIG com a facilidade de operação do processo SMAW (eletrodos revestidos), que foi o precursor do processo MIG/MAG. O novo método de soldagem envolveria a substituição do eletrodo de tungstênio por uma alimentação contínua de eletrodo, com o emprego de um gás inerte, formando o arco e produzindo a poça de metal fundido e evitando a formação de escória. De acordo com Phillips (1968), no início de sua aplicação, o processo MIG/MAG era usado com correntes de alta densidade e eletrodos com pequeno diâmetro, na faixa de 0,8 a 1,2 mm.

O processo de soldagem MIG/MAG é um processo semi-automático ao arco elétrico no qual um consumível é alimentado de forma contínua, utilizando-se de um gás de proteção que desempenha funções importantes, tais como estabilidade e direcionamento do arco e proteção da poça de fusão da atmosfera. O consumível é utilizado na forma de arame sólido ou tubular, que entrará em fusão pela energia transferida do bico de contato para a peça a ser soldada, sendo que algumas variáveis influenciam bastante o processo MIG/MAG, tendo-se que selecioná-los adequadamente para cada tipo de aplicação. Estas variáveis são definidas pela *AWS D1.1, Structural Welding Code - Steel* como variáveis essenciais, tais como voltagem, amperagem, tipo de eletrodo e gás de proteção, entre outros, (ZAWODNY, 2001).

O equipamento de soldagem faz a regulação automática das características elétricas do arco e da taxa de deposição do material e o único controle manual que é necessário ser feito pelo soldador em um equipamento semi-automático é o da posição da pistola e da velocidade de soldagem. O comprimento do arco e o nível da corrente são mantidos automaticamente.

O processo MIG utiliza gases inertes para soldagem, ou seja, que não reagem com a poça de fusão, exemplo Argônio e Hélio. São utilizados para a soldagem de aços ligados e de outros metais que são altamente reativos com a atmosfera tal como o alumínio e o cobre. Os aços inoxidáveis também são soldados por este processo. Pode-se ainda utilizar misturas entre estes gases com pequenas adições de gases ativos.

Em geral o processo MIG/MAG é aplicado para a soldagem em todas as posições em uma grande gama de espessuras, não sendo impedido de ser usado também na soldagem de chapas grossas como as de 40 mm de espessura.

O processo MIG/MAG vem sofrendo algumas variações ao longo do tempo, entre as quais, a utilização de gases ativos para proteção do arco, particularmente o CO₂ para soldagem de alguns metais ferrosos, (SAUNDERS, 1997). Com o passar do tempo, novos desenvolvimentos foram feitos, introduzindo o modo de transferência metálica por curto-circuito, que permite a soldagem em todas as posições, devido principalmente a pouca variação de calor do processo. Outra inovação que pode ser citada é o processo MIG/MAG com modo de corrente pulsada, que promove uma transferência por spray bastante uniforme a um nível menor de corrente, o que possibilita uma manutenção da temperatura em níveis mais baixos proporcionando a soldagem de chapas mais finas.

O processo MIG/MAG pode ser melhor descrito através dos cinco tipos de transferências metálicas que o caracterizam, sendo que os mais tradicionais são o modo de transferência por curto-circuito, transferência globular e transferência por spray. Os outros dois modos de transferência foram desenvolvidos mais recentemente e que utilizam maiores níveis de energia, são eles o modo pulsado e o modo de transferência por tensão superficial, sendo estes dois mais caros em relação aos demais e sua utilização deve ser viável e justificada. A força de estrangulamento é a responsável pelo desprendimento de metal fundido do eletrodo e de impelir este material através do arco para o metal base. Segundo Wainer (1976), argônio puro o argônio com adição de 5% de oxigênio causam este efeito de estrangulamento da extremidade saliente do arame, limitando a dimensão das gotículas fundidas que se transferem durante a solda. O uso de CO₂ ou argônio com 25% de CO₂ ocasionam transferência por glóbulos ou por curto-circuito. Em atmosferas com CO₂ puro ou

hélio aparece uma força dominante chamada de jato catódico que se opõe ao desligamento das gotas fazendo-as crescer em dimensões até duas ou três vezes o diâmetro do arame, (JONSSON et al, 1995).

O processo apresenta algumas vantagens e desvantagens em relação aos outros processos, como é mostrado na Tabela 2.1:

<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Processo altamente produtivo – taxa de deposição de 7 a 9 kg/h; - Redutor de custos quando substitui o processo de eletrodos revestidos; - Baixo custo de treinamento; - Processo adaptável – soldagem em todas as posições; - Processo ecologicamente correto – Não agride o ambiente; - Processo de alta qualidade de soldagem; - Ampla área de aplicação e facilidade de utilização; 	<ul style="list-style-type: none"> - Soldagem somente em ambiente fechado (exceto com arame tubular sem proteção gasosa); - Em geral não é recomendado para passes de raiz (exceto o processo por transferência por tensão superficial); - Não é economicamente viável para soldagem de manutenção em alguns casos; - Não há consumíveis para todos os materiais; - Maior número de variáveis influentes no processo, exigindo maior controle;

Tabela 2.1 – Vantagens e Desvantagens do Processo MIG/MAG

2.1 Variáveis Envolvidas no Processo

Várias são as variáveis envolvidas no processo MIG/MAG e que devem ser consideradas no processo. As mesmas podem ser distribuídas em três fatores, que são a seleção do equipamento, o modo de transferência metálica (tipo de gás de proteção) e seleção do eletrodo.

O equipamento de soldagem precisa ser capaz de atender a vários tipos de aplicação, ou seja, deve apresentar grande flexibilidade na configuração dos parâmetros (amplitude de voltagem de saída e para abertura do arco, características estáticas e dinâmicas, velocidade de alimentação do arame, etc.) para que atenda de forma satisfatória o tipo de soldagem e eletrodo especificados para o processo. Também deve ser levado em consideração os acessórios necessários para o modo de transferência selecionado, bem como algum outro que seja necessário.

Quando se pensa na compra de um novo equipamento, algumas considerações devem ser tomadas para que se obtenha uma maior versatilidade do mesmo. No caso de um equipamento ser comprado para um único propósito ou um alto volume de produção podem ser baseadas somente nos requisitos desta aplicação em particular, mas no caso de múltiplas aplicações, estas precisam ser conhecidas no momento da aquisição para que se consiga o equipamento mais flexível possível. Padronizar certos componentes e complementar os equipamentos já existentes promoverá alta eficiência na operação.

Outras variáveis importantes são as características do modo de transferência metálica, que são bastante importantes quando se pretende analisar uma aplicação de um determinado processo de soldagem. Tais características como o perfil do cordão da solda, reforço, índice de respingos, etc., devem ser levadas em consideração quando se seleciona um processo para que se use uma transferência metálica de acordo com o que se planeja. Dentro deste aspecto está o controle do processo, que pode ser feito, a partir do perfil de cordão de solda desejado, através do gás de proteção selecionado para o processo. A própria seleção do gás de proteção é uma importante variável para assegurar uma boa fusão do material e promover o resultado esperado da soldagem especificada anteriormente. Características e influências causadas pelo tipo de proteção gasosa no aspecto do cordão de solda serão abordados adiante.

A aparência da soldagem, embora não seja um fator técnico, pode ser considerada como variável do processo. Uma soldagem com aspecto liso, sem grande índice de respingos, torna o produto final de maior qualidade. Os modos de transferência que conseguem uma melhor aparência da soldagem, tanto com baixo índice de respingos quanto por ser uma soldagem mais suave, são os modos por spray e o modo por curto-circuito.

O terceiro aspecto que deve ser considerado é o que se refere à escolha do eletrodo a ser empregado na soldagem. Essa seleção do eletrodo deve ser baseada principalmente nas propriedades mecânicas e características físicas do metal de base. Posteriormente, deve ser considerado o equipamento disponível, taxa de deposição, etc.

Tendo analisado e selecionado corretamente estas variáveis do processo de soldagem que venham a satisfazer as especificações requeridas para a qualidade e perfil do cordão de solda, é necessário estabelecer outras variáveis das condições de operação da solda. Estas condições podem ser descritas como a taxa de deposição do metal fundido, a velocidade do arame de alimentação, a voltagem e corrente empregada para a soldagem e a extensão do arame.

A taxa de deposição é definida como a quantia de metal fundido depositado por unidade de tempo. Isso é necessário para que se possa estabelecer uma relação apropriada

entre a taxa de deposição e a velocidade de alimentação do arame. Essa relação é de grande importância principalmente em processos que tenham soldagem semi-automática, onde a qualidade da solda depende da capacidade de movimentação do soldador. Saunders (1997), relata alguns fatores que afetam a boa relação entre essas duas variáveis do processo:

- Tamanho da solda;
- Geometria da junta a ser soldada;
- Número de passes de solda;
- Limitação física para o soldador quando utiliza equipamento semi-automático.

Feita essa seleção da taxa de deposição, parte-se para a escolha da velocidade de alimentação do arame e corrente de soldagem que seja capaz de fornecer a taxa de deposição especificada anteriormente. Na prática, a medição da taxa de deposição é conseguida mais precisamente calculando-se em relação à velocidade de alimentação do arame, ao invés de ser feito em relação ao valor da corrente.

A velocidade de soldagem influencia a energia de soldagem, ou seja, a quantidade de calor cedida à peça; quanto maior a velocidade, menor a quantidade de calor cedida por unidade de área. A partir do controle da velocidade de soldagem, pode-se controlar a penetração e o tamanho do cordão, sendo que velocidades excessivas provocam menor penetração e menor largura do cordão. A velocidade de soldagem deve ser selecionada em conjunto com a corrente para proporcionar a penetração desejada, (NILO JR, 2003).

Por fim, é necessário fazer a seleção da voltagem empregada durante o processo de soldagem, que juntamente com as variáveis anteriormente escolhidas, eletrodo, corrente e velocidade de alimentação do arame, façam com que o arco mantenha sua estabilidade, trazendo também como consequência, a minimização do índice de respingos.

A voltagem é vista como sendo um dos fatores mais influentes no resultado final do 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, (NILO JR, 2003). Por fim Wainer et all (1992) sustentam que a potência do arco, dada pelo produto entre sua tensão e corrente, é responsável pela largura do cordão de solda.

De acordo com Nilo Jr (2003), a corrente de soldagem tem influência na taxa de deposição, no modo de transferência metálica e nas características geométricas do cordão de solda. Desta forma sua correta escolha é dependente da espessura da peça a ser soldada, do diâmetro do arame, sendo que uma corrente de baixa intensidade pode proporcionar um arco elétrico instável.

2.2 Tipos de Transferência

Quando o processo MIG/MAG foi criado na década de 1940, a sua principal aplicação foi para a soldagem de chapas de espessura mediana, entre 5,0 e 12,0 mm em ligas especiais, aços inoxidáveis e alumínio. Após alguns anos do desenvolvimento das primeiras fontes MIG/MAG houve uma grande melhoria no projeto, aprimorando e introduzindo-se novos acessórios às fontes, o que permitiu a aplicação do processo para soldagem de chapas finas, abaixo de 3,0 mm, até então somente possível com os processos TIG e Eletrodos Revestidos. A partir de então, o processo MIG/MAG ganhou cada vez mais espaço na aplicação industrial até os dias de hoje.

Este crescimento do processo MIG/MAG foi possível graças ao desenvolvimento e aprimoramento das fontes de soldagem, o que na prática possibilitou o surgimento de diversos modos de transferências metálicas, as quais podem ser definidas como as diferentes formas que o metal de adição é fundido e depositado no metal de base, a partir da combinação básica de corrente e tensão utilizadas.

O modo de transferência metálica acarreta efeitos importantes nas características da solda e afetam a habilidade de soldagem em varias posições, o grau de penetração da solda e a estabilidade do arco, bem como o índice de respingos, (SUBRAMANIAN et al, 1998). As características da transferência metálica são dependentes da composição química do material, da tipo de gás de proteção utilizado, bem como dos parâmetros elétricos.

Alguns autores como Choi et al (1998), Kim & Eagar (1993), Vaidya (2002), Weber (1992) e Zhang & Li (2001) citam os modos de Transferência por Curto-Circuito, Transferência Globular, Transferência por Tensão Superficial, Transferência por Arco Spray e Transferência por Arco Pulsado.

Transferência por Curto-Circuito – No modo de transferência por curto-circuito, a passagem de todo metal é feita quando o eletrodo está em contato com a poça do metal fundido. Neste modo de transferência a fonte controla a relação entre o estabelecimento

do arco e do curto-circuito do eletrodo. Desde que o calor introduzido no processo seja baixo, a penetração da solda não tem a característica se der profunda, contudo esta torna possível que a soldagem seja feita em todas as posições. Este tipo de transferência se torna instável devido à extinção e ignição do arco repetidamente. Da mesma maneira que nos outros modos de transferência do processo MIG/MAG, o modo curto-circuito sofre a influência de vários parâmetros da soldagem, como voltagem, velocidade de alimentação do eletrodo, a composição do gás de proteção e corrente.

Transferência Globular – No modo de transferência globular, a passagem do metal é feita em um baixo nível de energia o que gera uma transferência em forma de glóbulos irregulares, resultando em uma considerável quantidade de respingos. Esta quantidade de respingos pode ser minimizada usando-se CO₂ como gás de proteção, sendo que o arco gerado por este gás é geralmente instável. O resultado deste modo é que a aparência da superfície soldada se torna áspera em comparação ao modo de transferência por spray. Neste modo de transferência em que a energia do arco é direcionada diretamente para baixo, o perfil da solda apresenta uma boa penetração. Uma certa estabilidade do arco pode ser conseguida utilizando CO₂ como proteção do arco a partir de um alto nível de corrente.

Transferência por Tensão Superficial – Este modo de transferência é bastante parecido com o modo por curto-circuito, sendo que neste caso de transferência a corrente de curto-circuito é controlada. Existem duas diferenças principais entre os dois modos de transferência, a corrente de soldagem é baseada nos requerimentos instantâneos do arco. A alimentação do eletrodo e a corrente são independentes um do outro, e a corrente é sempre controlada baseada em que porção o ciclo de curto-circuito está sendo empregado. Antes do material fundido ser separado do eletrodo, a corrente é reduzida para minimizar a quantidade de respingos. Alto nível de corrente é necessário para fazer uma reignição do arco, estabelecer o comprimento do arco e promover uma boa fusão. Durante o restante do ciclo, a corrente é reduzida assegurando um nível ótimo do controle do calor introduzido no processo de soldagem.

Transferência por Arco Spray - A transferência por Spray por ter altos valores de tensão utilizados a partir dos valores pré-ajustados para uma transferência por curto-circuito, o arco voltaico ganha um formato de leque e o material é transferido por meio

de gotículas de diâmetro muito menor que o diâmetro do arame. O arco é bastante suave e estável, resultando em um nível bastante baixo de respingos durante a soldagem, o que confere alto grau de qualidade visual ao cordão de solda. Devido à energia do arco ser dispersa em forma de cone, o modo de transferência por spray confere uma penetração relativamente baixa, menor que a conseguida com o modo de transferência globular. O modo por spray é estabelecido a um nível mínimo de corrente para qualquer diâmetro de eletrodo usado no processo, sendo que este nível de corrente geralmente é denominado de “corrente de transição”. Esta transferência não é aplicada em soldagem fora de posição (verticais ascendentes e descendentes e sobre-cabeça).

Transferência por Arco Pulsado – O modo de transferência por arco pulsado é uma variação da transferência por arco spray, onde a corrente é alternada entre um valor de pico e outro valor de base em um período de tempo determinado, formando ciclos e proporcionando um nível menor de calor transferido para a peça. O modo pulsado de transferência obtém uma melhor estabilidade do arco quando utilizado maiores velocidades de alimentação do arame. Atualmente o arco pulsado é o que possui maior aceitação nos novos projetos de soldagem de chapas finas. Este modo de transferência permite ótimas taxas de deposição em todas as posições, principalmente nas posições verticais e horizontais, por transferir um arco com as características de deposição de um Spray. A corrente é a característica que é modificada ao longo do tempo. No arco pulsado há dois patamares de corrente: uma corrente de fusão do material, chamada de Corrente de Pico, e uma outra de manutenção da poça de fusão, chamada Corrente de Base. As duas divisões das correntes são dependentes uma da outra quando na regulagem, em geral uma é porcentagem da outra. Um outro controle percentual que é feito para o arco pulsado é o controle da representação percentual de cada corrente por unidade de tempo, ou seja, em um segundo, qual a porcentagem de tempo que a fonte vai permanecer em cada uma das correntes de pico e de base. A frequência determinará quanto tudo isso irá se repetir. Quanto maior o número de repetições, maior será o calor imposto à poça de fusão e conseqüentemente a taxa de deposição do material.

2.3 Processo de Soldagem MIG/MAG Pulsado

As aplicações do processo MIG/MAG 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. A transferência metálica por spray, por ser estável, oferece grandes vantagens como já mencionado anteriormente, entretanto esta só é possível com altos níveis de corrente, sendo que com o processo MIG/MAG convencional, esse tipo de transferência não pode ser regulada independente da quantidade de calor transferida para a solda. Então, desenvolveu-se uma fonte de soldagem que gera ondas intermitentes, ou pulsos, de corrente elevada, possibilitando da mesma forma o tipo de transferência por spray, ao passo que menor quantidade de calor é transferida para peça, diminuindo assim deformações e possibilitando a soldagem de chapas mais finas, (COLLARD, 1988). Sendo assim, a corrente pulsada deve antecipar picos de corrente para transferência de material fundido antes que o mesmo curto-circuite a peça. Com isso, são necessários elevados níveis de corrente de pulso para a total formação e expulsão da gota de material fundido, sendo que a corrente de pulso deve ser ajustada em um nível tal que se atinja uma corrente média dentro de um intervalo desejável para a soldagem. De acordo com Essers & Gompel (1984), a corrente média no modo pulsado tem como característica principal um baixo nível de intensidade, tanto quanto as que são conseguidas no modo de transferência globular.

Essa tecnologia do processo MIG pulsado foi lançada comercialmente por volta de 1970 com um controle limitado. Avanços tecnológicos conseguidos nas fontes de soldagem tem conseguido boas melhorias no desempenho dos equipamentos utilizados na soldagem MIG/MAG e assim possibilitando seu uso em áreas que antes eram impraticáveis, por permitir melhor controle dos parâmetros envolvidos no processo. O desenvolvimento do modo pulsado do processo MIG/MAG foi uma grande evolução no processo. A primeira geração de equipamentos adotava um sistema de frequência fixa dos picos de corrente, sendo bastante comum encontrar ainda hoje em uso nas indústrias. Já na segunda geração de equipamentos, houve a introdução de um sistema de frequência variada, partindo-se do uso de dados coletados do processo para melhor ajustar os parâmetros envolvidos no processo de soldagem. Com novos desenvolvimentos na área, consegue-se um maior aprimoramento das fontes de soldagem e chega-se à terceira geração de equipamentos, que conseguem fazer um monitoramento contínuo dos parâmetros do processo, mantendo este em pleno controle através das condições de soldagem.

Segundo Weber (1982), o controle mais aprimorado dos parâmetros do processo juntamente com o baixo índice de respingos conseguido e a boa estabilidade do arco são fatores que contribuem para o bom desempenho do modo pulsado quando utilizado na soldagem de chapas mais finas ou componentes que requerem maior precisão. Outra vantagem que se pode citar é a possibilidade de uso de eletrodos com diâmetros maiores que

1,6 mm, o que proporciona taxas maiores de deposição de material, gerando maior eficiência do processo. Como não poderia deixar de ser, o modo pulsado traz consigo algumas desvantagens, como por exemplo, o maior número de parâmetros a serem controlados durante a soldagem em relação ao processo MIG/MAG convencional. Estes parâmetros adicionais, chamados de parâmetros de pulso, devem ser analisados em conjunto com os já existentes do modo convencional, sendo que estes parâmetros de pulso são a corrente de pico e corrente de base, tempo de pico e tempo de base, frequência de pulso e ciclo ativo.

2.3.1 Parâmetros do modo pulsado

A forma de onda da corrente do processo MIG/MAG pulsado pode ser descrita através de alguns parâmetros, com característica periódica, em que há um valor máximo de corrente, chamado corrente de pico (I_p), um valor mínimo de corrente, denominado corrente de base (I_b), pelo tempo de permanência da corrente em cada um dos pontos, de pico e base, denominados respectivamente de tempo de pico (t_p) e tempo de base (t_b). Destes parâmetros básicos pode-se gerar alguns parâmetros, como a frequência de pulso (f), corrente média (I_m) e ciclo ativo (CA), também conhecido como “Duty Cycle”. Estas variáveis precisam ser consideradas juntamente com os outros parâmetros do processo MIG/MAG convencional, como o comprimento do arco voltaico, velocidade de alimentação do arame, gás de proteção e sua composição e diâmetro do eletrodo.

Estes parâmetros têm efeitos distintos na característica do arco e na deposição do metal fundido para a formação do cordão de solda. De acordo com Collard (1988), a corrente de base é a variável menos crítica dos parâmetros de pulso, apesar de ter várias funções-chaves no processo, além de manter o arco entre os pulsos. O controle da poça de fusão e do cordão de solda pode ser feito apropriadamente com a manutenção de uma corrente de base adequada, e para se minimizar a quantidade de calor adicionado ao processo, a corrente de base é configurada para seu valor mínimo, resultando em um cordão de solda com maior qualidade e menor índice de respingos.

O parâmetro corrente de pico deve ser mantido em um nível que assegure uma transferência metálica por spray, sendo que uma certa quantidade de energia é necessária em cada pulso para que a gota de material fundido se desprenda, sendo que esta é influenciada pelo preaquecimento do arame durante a porção de tempo em que a onda permanece na corrente de base. Níveis mais elevados de corrente de pico resultam em grandes forças axiais

devido ao campo magnético gerado pela corrente através do eletrodo. Um pulso alto e estreito tende a produzir um arco mais apertado do que um pulso amplo e baixo, além de oferecer algumas vantagens em juntas estreitas. Correntes de pico extremamente altas, acima de 600A, não são aplicáveis devido principalmente a limitações das fontes de soldagem, (COLLARD, 1988).

Quando todas as variáveis do processo estão fixadas em um valor, a corrente será função da velocidade de alimentação do arame também no modo pulsado, como acontece com o modo convencional do processo MIG/MAG. A corrente média também varia conforme a velocidade de alimentação quando o restante dos parâmetros estiver constante e pode ser estabelecida com a mesma relação usada para o modo convencional do processo. Quando a corrente de pico, corrente de base e a duração do pulso são fixados, a corrente média irá variar diretamente em função da frequência, sendo que esta relação foi considerada para os maiores desenvolvimentos do processo MIG/MAG pulsado.

O advento de fontes de soldagem com frequência variável simplificaram de maneira significativa o modo pulsado do processo MIG/MAG, pois conseguiu reduzir o número de variáveis que o operador precisa analisar para seu processo. Fixando-se em níveis aceitáveis a corrente de pico, corrente de base e os tempos de duração dessas correntes para uma determinada condição, mudanças na velocidade de alimentação do arame podem ser acompanhadas por variação na frequência, assumindo que o gás de proteção, voltagem, diâmetro do eletrodo sejam constantes. Desde que a frequência seja função da corrente média, esta pode ser pré-selecionada para uma determinada situação de soldagem, sendo que ocorrendo alguma modificação nas condições iniciais, haverá a necessidade de variar a corrente média, a fim de que se possa manter a estabilidade das condições de soldagem.

Os controladores de Arco Pulsado constituem um dispositivo eletrônico bastante utilizado nas fontes. Estes circuitos controlam a frequência e a grandeza da corrente contínua a fim de obter duas faixas de correntes, chamadas corrente de pico (I_p) e corrente de base (I_b), como mostra a Figura 2.1.

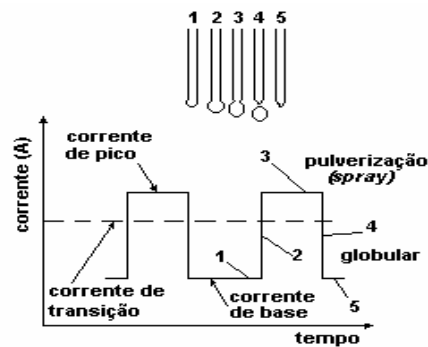


Figura 2.1 – Arco pulsado.

Na prática, a corrente de pico é responsável pela fusão do material, enquanto a corrente de base é responsável pela manutenção da temperatura da poça de fusão.

Esta variação de valores de correntes ao longo do tempo propicia condições de *aumento de produtividade para a soldagem de peças de espessuras finas*, pois durante os pulsos de alta corrente obtém-se o modo de transferência por *spray* enquanto se mantém um nível de corrente média abaixo da corrente normal de transição, provocando baixos níveis de calor, fato este que reduz de maneira significativa a ocorrência de distorções e amplia a faixa de utilização do processo, como relatam Graig (1987), Collard (1988), Kim & Eagar (1993), Davies (1996), Weber (1982) e Dutra (1996).

Outra vantagem em se pulsar a corrente é a possibilidade de utilização de diâmetros maiores que 1,6 mm, o que provoca maiores taxas de deposição, garantida ainda pela menor perda ocasionada por respingos. Segundo Weber (1982) a utilização de eletrodos maiores minimiza problemas relacionados à alimentação do arame.

Além destes dois novos parâmetros acrescentados ao processo MIG/MAG, o arco pulsado tem como parâmetros de pulso os tempos destas correntes, denominados tempo de pico (t_p) e tempo de base (t_b). Além destes, alguns parâmetros derivados também se mostram fundamentais no controle do processo, como é o caso do ciclo ativo (CA). O ciclo ativo (CA) estabelece a relação entre o tempo de deposição t_p e o tempo total de soldagem sendo definido pela seguinte relação, (KIM & EAGAR, 1993):

$$CA = [t_p / (t_p + t_b)] \times 100(\%) \quad (2.1)$$

Os parâmetros de pulso bem como a atmosfera gasosa influenciam na geometria do cordão de solda, determinando sua largura, penetração, reforço ou diluição (Figura 2.2). Por outro lado, a definição deste perfil geométrico tem grande interesse industrial, já que

determinadas aplicações exigem utilizações de alguns perfis específicos. A dificuldade reside, neste caso, em como determinar os parâmetros mais adequados para determinada aplicação ou determinado perfil.

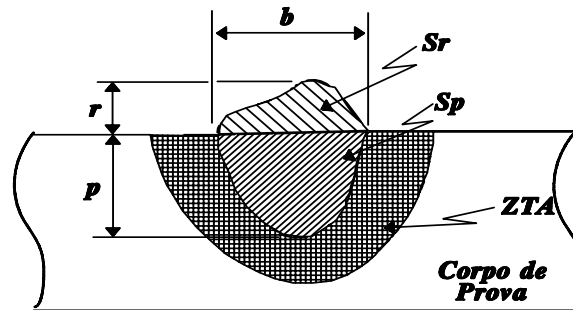


Figura 2.2 – Representação da área da seção transversal do cordão de solda

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 sobre o aspecto geométrico do cordão, caracterizado pela penetração (p), pela relação entre reforço e largura do cordão definida como índice de convexidade (IC) e pela diluição (D) 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 .

$$D = (S_p / (S_p + S_r)) * 100 (\%) \quad (2.2)$$

Além destas respostas, a formação de respingos caracterizada pelo Índice de Respingos (I_{resp}) também será analisada, visto que, para a mistura de gases utilizados, esta formação de respingos é mencionada como um fator influente tanto na qualidade quanto na produtividade final da solda.

Como orientação para este trabalho, procurou-se estabelecer padrões de qualidade aceitáveis para os parâmetros. Com relação à penetração e diluição do cordão adota-se como fator de orientação que a maximização destas respostas sempre são positivas do ponto de vista da resistência final da solda. Com relação ao índice de convexidade considera-se que valores em torno de 30% são considerados adequados, (SILVA, 2000). Um IC superior a 30% gera excessivo reforço com pequena penetração. Com relação ao índice de respingos é sempre desejável a sua minimização independente de quaisquer circunstâncias.

2.4 Gases de Proteção e suas Características Físicas

Vários metais têm uma forte tendência de combinar com o oxigênio, formando óxidos, reagindo com o carbono, formando monóxido de carbono. Os produtos dessa reação são fontes de deficiências na solda, podendo-se citar os defeitos de fusão, devido aos óxidos e perda de resistência, devido à porosidade. Por este motivo, a indústria de gases de proteção vem fazendo grandes progressos no desenvolvimento de seus gases no decorrer destes últimos 50 anos, conseguindo obter grandes contribuições para a soldagem tanto na produção quanto na purificação de diferentes gases e misturas, sendo que este estudo continua sendo feito para se estudar novos gases e seus efeitos sobre o cordão de solda, (MOYER, 2002).

Como na soldagem a transferência de material é feita por gotas fundidas do material do eletrodo, a função principal do gás de proteção é fazer uma barreira de isolamento do material fundido contra o contato com a atmosfera carregada de oxigênio, visto que o critério principal na seleção do gás de proteção para determinada aplicação é a qualidade da junta a ser soldada. O gás de proteção também terá efeito sobre os aspectos da soldagem e conseqüentemente no resultado do cordão de solda que são as características do arco, o modo de transferência do metal, penetração e perfil da solda, velocidade de soldagem e ação de limpeza da solda.

2.4.1 Gases Inertes

Na soldagem MIG/MAG os dois gases inertes usados para fazer a proteção do arco são o argônio e hélio, gases estes que são usados puros ou em misturas com outro gás para a soldagem de metais não ferrosos e aços de baixa liga. As diferenças básicas entre estes dois gases de proteção são a densidade e a condutividade térmica e a característica do arco, (MOYER, 2002). Segundo Suban & Tusek (2001), a densidade do gás de proteção tem uma grande influência na eficiência do arco em proteger a gota de deposição contra a oxidação devido ao ar atmosférico, sendo que a densidade relativa do gás de proteção em relação ao ar é de importância primária.

Argônio e Dióxido de Carbono são gases de grande densidade e promovem uma proteção bastante eficiente. O hidrogênio e hélio são 10 a 20 vezes menos densos que o

argônio e promovem uma turbulência no fluxo do gás de proteção. A densidade do argônio é aproximadamente 1,40 vezes maior que a do ar, enquanto que a densidade do hélio é aproximadamente 0,14 vezes a do ar, portanto mais leve. Quanto mais pesado o gás de proteção, mais efetivo é na proteção do arco em qualquer taxa de fluxo de gás. Segundo Saunders (1997), o gás hélio necessita de duas ou três vezes mais fluxo de gás do que o argônio para promover a mesma proteção.

O gás hélio possui uma grande condutividade térmica em relação ao argônio e produz um arco em que a energia é mais uniformemente dispersa, e segundo os autores Suban & Tusek (2001) e Dillenbeck & Castagno (1987), a adição de certa quantidade de hélio no gás de proteção aumenta a condutividade térmica e a energia de ionização. Esse aumento da voltagem do arco produz grande energia no arco e contribui para o fluxo do gás, resultando em uma penetração mais profunda. Quando se utiliza argônio, o arco caracteriza-se por uma grande energia interna. Essa diferença afeta fortemente o perfil do cordão de solda. O arco gerado pelo gás hélio produz um cordão profundo, largo e parabólico, enquanto que o argônio gera um arco que produz um cordão caracterizado por ser profundo, porém afunilando-se a medida que se caminha para a sua extremidade inferior, como pode ser visto na Figura 2.3:

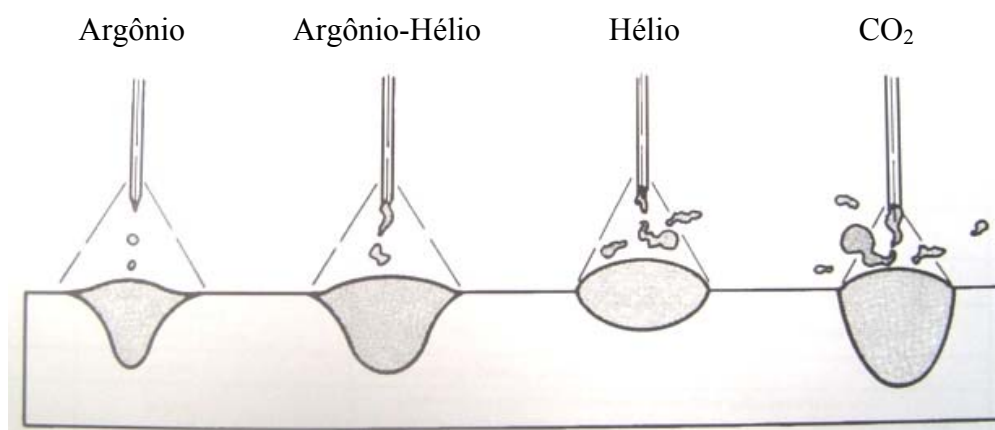


Figura 2.3 – Perfil do cordão de solda com diferentes gases de proteção

Fonte – MIG/MAG Welding Guide

Em qualquer velocidade de alimentação do arame, a voltagem do arco produzido pelo argônio será notoriamente menor do que a do arco produzido pelo hélio, tendo como resultado um arco mais estável com a utilização do argônio. O arco do argônio produz um modo de transferência metálica tipo spray, sendo que a proteção com hélio produz uma transferência metálica com gotas largas do material fundido. Sendo assim, o arco quando se utiliza o gás

hélio produz grande quantidade de respingos e um perfil de aparência mais fraca, comparando-se com a produzida pela proteção feita com argônio, (SUBAN & TUSEK, 2002).

As propriedades elétricas do arco, principalmente ignição e estabilidade, são fortemente afetadas pelo processo de dissociação e ionização na atmosfera gasosa. Novamente de acordo com Suban & Tusek (2001), essa influência depende do conjunto gás de proteção-eletrodo utilizado na soldagem. O argônio forma um arco leve e estável, enquanto que o hélio (alto potencial de ionização) forma um arco pouco estável e de difícil ignição. Na soldagem com atmosfera de gás protetora, o arco elétrico é dividido em três componentes: plasma, catodo e anodo. Moyer (2002) cita que a adição de um oxidante é necessária para estabilizar o catodo, caso contrário ocorre a formação de respingos e um aspecto irregular do cordão de solda. Também cita que a utilização de CO_2 juntamente com argônio traz algumas vantagens como a melhoria do aspecto da geometria do cordão de solda em relação à mistura de argônio com oxigênio, fato explicado pelo aumento ou redução da fluidez da poça de solda e também da tensão superficial e pela presença de óxidos no material fundido, quando se utiliza CO_2 ou O_2 . Outro aspecto mencionado do CO_2 em relação ao oxigênio é que na utilização do dióxido de carbono ocorre menos oxidação, bem como menor índice de respingos, refletindo diretamente na aparência da solda. Outra vantagem do uso do CO_2 é uma maior penetração encontrada quando de sua utilização, sendo que este é o fator principal do grande nível de energia e da alta voltagem quando se utiliza este gás na mistura.

Outra importante característica física dos gases de proteção é a condutividade elétrica, que depende do tipo de gás de proteção usado e da temperatura do arco.

2.4.2 Adição de Oxigênio e CO_2 ao Argônio e Hélio

A indústria de gases para soldagem produz uma grande quantidade de combinações de misturas comerciais com argônio, oxigênio e CO_2 , buscando atender vários aspectos do cordão de solda, como por exemplo, a redução do índice de respingos e a possibilidade de soldagem de peças finas.

Argônio puro, e até certo ponto, o gás hélio, produzem excelentes resultados na soldagem de metais não ferrosos. Contudo, estes gases de proteção em sua forma pura não produzem satisfatoriamente as características operacionais na soldagem de materiais ferrosos,

com o arco tendendo a ser irregular. Adições ao argônio de 1% a 5% de oxigênio ou de 3% a 25% de CO₂ produzem melhorias significativas na qualidade e produtividade do cordão de solda, (MOYER, 2002). Suban & Tusek (2001) relatam que adição de oxigênio reduz a tensão superficial e permite uma ionização mais fácil da mistura de gás. Outro ponto mostrado pelos autores é que quando se adiciona CO₂ consegue-se maior dureza do cordão, bem como maior penetração da solda e também uma melhor ação de limpeza.

Saunders (1997) relata que uma quantia ótima de oxigênio ou CO₂ a ser adicionada a um gás inerte é função da condição da superfície do metal base, da geometria da junta, posição da solda ou técnica e da composição do metal base. A adição de CO₂ ao argônio tende a aumentar o cordão de solda produzindo um perfil de cordão chamado de pêra, como mostra Figura 2.4.

Rathwell (2001) relata que se utilizando da mistura de 75% de argônio e 25% de CO₂ em conjunto com o arame ER70S-6 consegue-se não somente uma boa resistência da solda em estruturas estáticas, mas também consegue-se bons resultados em estruturas dinamicamente carregadas, devido ao fato desta mistura de gás juntamente com o arame em questão obter excelente característica física da junta soldada.

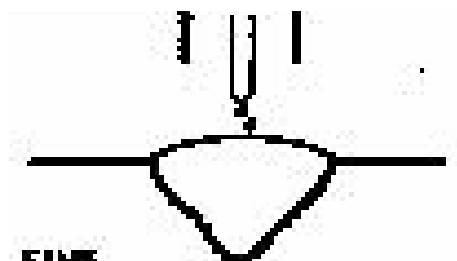


Figura 2.4 – Perfil do cordão de solda

2.4.3 Dióxido de Carbono – CO₂

Dióxido de Carbono é um gás reativo amplamente usado em sua forma pura para soldagem de carbono e aço baixa liga. O CO₂ é o único gás reativo utilizado puro como proteção no processo MIG/MAG.

O que encoraja seu uso pela indústria é o fato de ser um gás que proporciona boa velocidade de soldagem, boa penetração, boa resistência e um custo baixo em relação aos gases inertes, porém, o cordão de solda tem um aspecto mais grosseiro, visualmente não atrativo, devido principalmente ao alto índice de respingos, fator este que pode ser fonte de problemas quando se necessita de um bom aspecto final da peça a ser soldada. Quando o cordão precisa ser não somente resistente, mas também de bom aspecto visual, é recomendado usar o CO₂ como gás de proteção adicionado ao argônio na proporção de 75% de argônio e 25% CO₂, (RATHWELL, 2001).

Quando se utiliza o CO₂ como gás de proteção, a transferência metálica é pelo modo curto-circuito ou pelo modo globular. O modo de transferência por spray é uma característica do argônio como gás de proteção e que o CO₂ não possui. O modo de transferência globular produz um arco que gera grande quantidade de respingos, o que requer condições de soldagem com baixa voltagem para que se consiga um arco que minimize a quantidade excessiva de respingos.

Segundo Linnert (1965) e Saunders (1997), comparando-se o perfil do cordão de solda quando se utiliza argônio puro, com aquele que usa CO₂ puro como gás de proteção, percebe-se que ambos produzem na solda uma boa penetração, embora obtenha uma superfície um pouco mais áspera com CO₂ comparada com a do argônio. Outro ponto importante é que quando se utiliza o CO₂ puro a área penetrada é maior do que a conseguida pelo argônio puro, contudo, quando se utiliza uma mistura dos dois gases, consegue-se um aspecto misto entre os dois perfis dos gases puros. Comparado com o argônio, o gás hélio provoca uma melhor penetração na solda e maior velocidade de soldagem, o que necessita de um arco com alto nível de energia. Todavia, o processo quando se usa o hélio como gás de proteção é mais sensível à variação do comprimento do arco.

Na Tabelas 2.2 e 2.3 encontra-se um resumo dos gases e misturas encontrados para o processo MIG/MAG, assim como seleção do gás de proteção para o processo MIG/MAG com modo de transferência por spray.

Gás de Proteção	Comportamento Químico	Aplicação
Argônio	Inerte	Todos metais, exceto aços
Hélio	Inerte	Alumínio, Magnésio, ligas de cobre para maior adição de calor e minimizar porosidade
Ar + 20-80% He	Inerte	Alumínio, Magnésio, ligas de cobre para grande adição de calor e minimizar porosidade (melhor do que arco 100% He)
Nitrogênio		Maior adição de calor no Cobre
Ar + 25-30% N ₂		Maior adição de calor no Cobre (melhor que arco 100% Nitrogênio)
Ar + 1-2% O ₂	Levemente Oxidante	Aço Liga e algumas Ligas de Cobre
Ar + 3-5% O ₂	Oxidante	Carbono e Aço baixa liga
CO ₂	Oxidante	Carbono e Aço baixa liga
Ar + 20-50% CO ₂	Oxidante	Aços, principalmente modo curto-circuito
Ar + 10% CO ₂ + 5% O ₂	Oxidante	Aços
CO ₂ + 20% O ₂	Oxidante	Aços
90% He + 7,5% Ar + 2,5% CO ₂	Levemente Oxidante	Aços, para boa resistência a corrosão – modo curto-circuito
60-70% He + 25-35%Ar + 4-5%Ar + 1-2% O ₂	Oxidante	Aço baixa liga – modo curto-circuito

Tabela 2.2 – Gases de Proteção e Misturas para o Processo MIG/MAG

Fonte: MIG / MAG Welding Guide

Metal	Gás de Proteção	Vantagem
Alumínio	Argônio	0 a 25 mm: melhor transferência metálica e boa estabilidade do arco; pouco índice de respingo.
	35% Ar + 65% He	25 a 76 mm: maior nível de calor do que somente com argônio.
	25% Ar + 75% He	Acima de 76 mm: mais alto nível de calor; minimiza porosidade.
Magnésio	Argônio	Excelente ação de limpeza.
Aço Carbono	Ar + 1-5% O ₂	Melhoria na estabilidade do arco, bom contorno do cordão, permite maior velocidade do que com argônio puro.
	Ar + 3-10% CO ₂	Boa forma do cordão, minimiza respingos.
Aço Baixa Liga	Ar + 2% O ₂	Promove boa dureza.
Aço	Ar + 1% O ₂	Melhoria da estabilidade do arco, boa forma do cordão.
	Ar + 2% O ₂	Promove melhor estabilidade do arco e maior velocidade de soldagem em relação à 1% O ₂ .
Titânio	Argônio	Boa estabilidade do arco, mínimo de contaminação da solda.

Tabela 2.3 – Seleção de Gases do Processo MIG/MAG com modo de Transferencia por Spray

Fonte: MIG / MAG Welding Guide

2.4.4 Gás de Proteção e Mistura de Gases para Aço Carbono

Como já mencionado, o argônio é um gás inerte, e por isso, geralmente não pode ser usado em sua forma pura como gás de proteção no processo MIG/MAG quando se solda carbono ou aços de baixa liga. O oxigênio ou CO₂ são adicionados para que se consiga uma melhor estabilidade do arco. Sem esta adição de oxigênio ou CO₂ o arco se tornará irregular.

Já com o CO₂, que é um gás reativo, pode-ser ser feita a soldagem de aço carbono e aços de baixa liga. Já utilizando-se deste gás em sua forma pura para se fazer a proteção do arco no processo MIG/MAG, o modo de transferência metálica deve ser do tipo curto-circuito. De acordo com Saunders (1997), pode-se citar algumas características deste gás, tais como:

- Melhor penetração;
- Baixo custo;
- Alto nível de respingo;

- Não recomendado para modo de transferência por spray;
- Capacidade de soldagem em todas as posições.

De forma a se conseguir um misto das características de cada gás em separado, faz-se a proteção do arco com uma mistura destes, geralmente argônio com 20-50% de CO₂ na soldagem de aço carbono e de aços de baixa liga no modo de transferência por curto-circuito. Também se pode encontrar algumas características desta mistura de gases, listadas abaixo por Saunders (1997):

- Boa aparência do cordão de solda;
- Menor penetração comparado com CO₂ puro;
- Poça do metal fundido com menor temperatura
- Para transferência por spray mínimo de 80% de argônio com 20% de CO₂;
- Possibilidade de soldagem em todas as posições.

Ainda segundo Saunders (1997), misturas de 3-10% de CO₂ ou de 1-5 de O₂ são freqüentemente usadas para o modo de transferência metálica por spray. Entretanto para que isso ocorra é necessário uma porcentagem de argônio na mistura conjuntamente com um maior nível de voltagem para que o arco tenha um comprimento longo o bastante que suporte o modo de transferência por spray. Para este caso, tem-se as seguintes características:

- Boa aparência do cordão de solda;
- Minimiza o índice de respingos;
- Não há possibilidade de soldagem em todas as posições.

CAPÍTULO 3

FERRAMENTAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO

Visto que a intenção deste trabalho é a de se analisar a influência de diferentes gases de proteção no comportamento geométrico e produtivo da soldagem, na qualidade do cordão de solda e nos custos gerados com a utilização de cada gás utilizando-se o modo pulsado do processo MIG/MAG. Para satisfazer este objetivo torna-se necessário o emprego de técnicas que possibilitem fazer um estudo das melhores configurações do processo em questão e assim encontrar as respostas otimizadas e que gerem um desempenho satisfatório do processo de soldagem. Sendo assim, serão usadas para este fim as ferramentas de Projeto e Análise de Experimentos (DOE), que é uma técnica já bastante pesquisada e consolidada no meio acadêmico e que vem sendo empregada no meio industrial com resultados bastante interessantes. Por este motivo e também por não ser o objetivo principal deste trabalho fazer um estudo mais aprofundado desta ferramenta, a técnica de Projeto e Análise de Experimento terá uma abordagem mais generalizada de seus conceitos, tais como utilização e benefícios encontrados ao empregá-la no desenvolvimento e aprimoramento de produtos e processos. Outra ferramenta que será utilizada para dar suporte no tratamento e análise dos dados coletados será a Simulação de Monte Carlo, que a partir dela será encontrada a variabilidade das respostas apresentadas pelo DOE, através de uma distribuição de probabilidades.

3.1 Projeto e Análise de Experimentos

O Projeto de Experimentos teve sua aplicação aumentada nestes últimos 15 anos, tanto nas indústrias de manufatura quanto nas de serviços, na tentativa de melhorar a qualidade de seus produtos, processos e serviços. O uso de DOE não é uma técnica de análise recente para a indústria e engenheiros de manufatura no ambiente de trabalho atual. Esta técnica foi desenvolvida no início da década de 1920 por Sir Ronald Fisher na Rothamsted Agricultural Field Research Station, Londres. Após a Segunda Guerra Mundial, praticantes ingleses de DOE levaram a técnica para os Estados Unidos, onde a indústria química está entre as primeiras a aplicar os conceitos de Projeto de Experimentos (MONTGOMERY, 1992).

As técnicas de Projeto e Análise de Experimentos (DOE) podem ser vistas como estratégias de planejamento, condução, análise e interpretação de experimentos de forma que

importantes informações podem ser tiradas do processo de forma eficiente e econômica, tornando possível ao experimentador entender e atuar no processo com mais segurança e eficácia.

Um número de aplicações com grande sucesso de DOE para a melhoria do rendimento de um processo, redução da variabilidade do processo, tem sido noticiada por várias empresas nos últimos anos. Pesquisas têm mostrado que a aplicação das técnicas de DOE na engenharia de manufatura ou serviços é limitada, e onde aplicada, são freqüentemente utilizadas incorretamente, (ANTONY & KAYE, 1996). Segundo o autor, isto pode ser decorrência de uma falta de comunicação entre indústria e a universidade, dificuldade por parte dos engenheiros em formular e definir corretamente um problema, etc.

O Projeto de Experimento habilita o engenheiro, seja ele de manufatura ou serviço, a estudar os efeitos de variáveis que venham a afetar as respostas ou saídas de um certo processo. O método de Projeto de Experimentos tem um vasto potencial de aplicação nos estágios de projeto e desenvolvimento na engenharia. Nos dias atuais, de mercado mundial cada vez mais competitivo, essa é a estratégia de mercado utilizada para a administração e desenvolvimento de produtos e processos insensíveis a várias fontes de variação. As potenciais aplicações de Projeto de Experimentos em indústrias são:

- Redução do tempo de projeto e desenvolvimento de produto e processo;
- Estudo do comportamento de um processo sobre uma ampla gama de condições operacionais;
- Entender o processo em estudo e assim melhorar seu desempenho;
- Aumentar a produtividade do processo reduzindo retrabalho, perdas, etc;
- Melhorar o rendimento e estabilidade de um processo industrial em andamento;
- Fazer produtos insensíveis à variações ambientais, tais como umidade relativa, vibração, temperatura, etc;
- Estudar a relação entre as variáveis independentes do processo e sua saída ou resposta;

Os passos seguintes são bastante usados num experimento industrial:

- 1- Definição do objetivo do experimento;
- 2- Seleção da resposta ou saída do processo;
- 3- Seleção das variáveis do processo ou parâmetros, ruído e interações entre as variáveis de interesse do processo. (Ruídos são fatores que não podem ser controlados durante a atual condição de produção, mas tem forte influência na resposta. O propósito de um experimento é de reduzir o efeito desse indesejável ruído, determinando a melhor combinação dos níveis de cada fator. Por exemplo, em um processo de injeção em um molde, a umidade e temperatura ambiente são exemplo típicos de ruídos.)
- 4- Determinação dos níveis de cada fator;
- 5- Escolha de um projeto de experimento apropriado;
- 6- Planejamento do experimento;
- 7- Execução do experimento;
- 8- Análise dos dados colhidos no experimento e sua interpretação.

3.1.1 A Técnica de Projeto de Experimentos

O DOE é uma técnica de fácil implantação que permite realizar experiências através de algumas ferramentas e assim avaliar o efeito de muitas variáveis de forma simultânea. Ao se utilizar o DOE, as variáveis controladas (também conhecido como fatores de controle, ou parâmetros de controle) são modificadas sistemática e simultaneamente e os efeitos destas mudanças são medidos, modelados e computados.

Uma das formas de se utilizar o DOE é a partir do modelo proposto por Reaside (1993), que é um método de conduzir os experimentos em empresas e mostrado a seguir:

- **Formulação – Definir e selecionar o que será investigado**

É importante nessa etapa definir com clareza os objetivos do experimento, ou seja, o que se pretende analisar nos processos e produtos, focando o problema destes e obtendo as respostas apropriadas e que gerem dados confiáveis para o estudo. Deve ser feita a coleta de informações sobre o que se deseja estudar, listar e selecionar os fatores de controle e seus respectivos níveis, bem como as variáveis de resposta do experimento.

- **Construção do Modelo – Planejamento do Experimento**

Nesta etapa deve-se selecionar a matriz experimental, considerando os fatores e níveis escolhidos na etapa anterior. A matriz experimental pode ser feita com o uso de Softwares como o Minitab[®], que constrói a matriz a partir da entrada dos fatores e seus níveis, do experimento escolhido (Fatorial completo, ou fracionado, etc), da resolução e o número de repetições, gerando também uma seqüência aleatória para os experimentos. Montgomery (1991) afirma que se as etapas anteriores foram feitas corretamente, essa etapa será simples de ser realizada.

- **Testes – Realizar os Experimentos e Análise dos Resultados**

Nesta etapa são feitos os experimentos propriamente ditos e estes devem ser acompanhados por todos os membros da equipe ou responsável para garantir a execução do experimento conforme o planejado. Relatórios devem ser elaborados para ajudar na análise dos resultados. Após o experimento é feita a análise dos dados colhidos, em que o uso da estatística é bastante aplicado para descrever o comportamento dos fatores de controle, se houve interação entre eles e seus efeitos na resposta de saída. Como citado anteriormente, o uso de softwares como Minitab[®] ajuda bastante nesta fase. Feito isso, conclusões sobre o experimento podem ser retiradas e ações de melhorias podem ser tomadas no processo ou produto em estudo, aplicando a configuração dos fatores que trazem melhores respostas.

- **Implementação**

Tendo o experimento mostrado a configuração que traz melhores resultados ao processo ou produto, deve então fazer experimentos que confirmem esta melhora nos padrões de qualidade e rendimento e tendo um resultado positivo, plano de ações devem ser feitos para que estas melhorias sejam incorporadas definitivamente nos processos ou produtos, garantindo assim melhores resultados à eles, como era o objetivo inicial do experimento.

3.1.2 Qual é a Utilidade do Planejamento Experimental

O DOE permite realizar experiências através de ferramentas de fácil implantação e avaliar o efeito de muitas variáveis de forma simultânea. Ao usar DOE, as variáveis

controladas são modificadas sistemática e simultaneamente e os efeitos destas mudanças são medidos, modelados e mapeados.

O sistema constituído pelas variáveis de controle e as respostas são modelados através de equações estatísticas. A aplicação do DOE, junto com o conhecimento científico disponível e aplicável, dá ao usuário da ferramenta uma compreensão sem paralelo do processo. Não há outro enfoque que produza o mesmo nível de compreensão da forma que um processo trabalha. Esta informação é produzida com o menor número de experiências e em um tempo curto.

3.1.3 Vantagens do Uso do DOE

A resposta à pergunta: “por que devo usar DOE?” É: para ser COMPETITIVO. Hoje a taxa de mudanças incrementa de forma constante, enquanto a rivalidade na distribuição do mercado e a pressão pelo aumento de lucro se intensificam na economia globalizada. Existe uma exigência cada vez maior para fazer produtos de alta qualidade e desenvolver os processos para a sua comercialização a velocidades ainda maiores que antes.

Nestes momentos de desafios, a experimentação usando DOE dá uma clara vantagem competitiva. De acordo com o que é encontrado na literatura, o uso do DOE permite:

- Melhorar as características dos produtos: o DOE permite aos engenheiros compreender quais são as variáveis que influenciam a qualidade dos produtos e desta forma mudar ou controlar estas variáveis;
- Diminuir o tempo necessário para o desenvolvimento de um produto novo: a experimentação clássica de uma variável por vez pode durar indefinidamente. Com DOE os engenheiros sabem exatamente o que fazer para atingir as respostas que estão procurando;
- Maximizar a produtividade do processo: DOE mostra aos pesquisadores como trabalha o processo, de forma que eles podem incrementar a produtividade, se for possível;
- Minimizar a sensibilidade dos produtos às variações nas condições do processo: com DOE podemos mapear a relação entre variáveis e respostas de forma que os pesquisadores podem conhecer quais são as variações nas variáveis de controle que tem pouco ou nenhum efeito na resposta. As áreas onde o efeito na resposta é pequeno ou nulo ao mudar as variáveis de controle,

são denominadas: “áreas planas”. Se trabalharmos com o processo nestas áreas planas, mantemos a qualidade dos produtos e minimizamos a sensibilidade do mesmo;

- Explorar determinadas regiões de interesse para estimar parâmetros de modelos teóricos e para testar o ajuste destes modelos;
- Realizar estudos em plantas pilotos, antes de começar a produção na planta;
- Realizar uma sintonia fina de novos processos ou processos em lançamento, incluindo aqui tanto processos produtivos como métodos analíticos;
- Maximizar o quociente benefício/custo dos ensaios: o DOE produz a máxima quantidade de informação por ensaio. Usando DOE o pesquisador pode planejar e orçar os gastos de forma que o quociente benefício/custo pode ser determinado com antecedência.
- Explorar modelos teóricos muito complexos: os resultados do modelo de um processo complexo podem ser amostrados segundo um plano experimental para visualizar as relações entre as variáveis e para realizar estudos de sensibilidade.

3.1.4 Tipos de Planejamento Experimental

O tipo de planejamento experimental a ser usado dependerá do objetivo que se deseja atingir com a experimentação. Os experimentadores podem estar interessados em avaliar os efeitos devido a interação no nível de um ou mais fatores ou na otimização das respostas. Sendo assim, Juran (1993) classifica um Projeto de Experimento através do número de fatores experimentais a serem investigados, da estrutura do delineamento (com blocagem de experimento fatorial, aninhado ou de superfície de resposta) e do tipo de informações às quais o experimento é destinado a fornecer, como por exemplo, estimativas dos efeitos, das variâncias ou mapeamento empírico. Alguns dos delineamentos mais conhecidos são os fatoriais completos, fatoriais fracionários, fatoriais com blocagem, superfície de resposta e delineamento de mistura. Os dois primeiros tipos serão mostrados a seguir.

3.1.4.1 Planejamento Fatorial 2^K

Para executar um planejamento fatorial precisa-se em primeiro lugar especificar os níveis em que cada fator será estudado. Um planejamento fatorial requer a execução de experimentos para todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores. Cada um desses experimentos, em que o sistema é submetido a um conjunto de níveis definido, é um ensaio experimental. Em geral, se houver n_1 níveis do fator 1, n_2 do fator 2, ..., e n_k do fator k, o planejamento será um fatorial $n_1 \times n_2 \times \dots \times n_k$. Segundo Neto *et al* (1995) este é o número mínimo para se ter um planejamento fatorial completo, pois o experimentados pode querer repetir ensaios para ter uma estimativa do erro experimental. Ainda segundo Neto *et al* (1995), para se estudar o efeito de qualquer fator sobre a resposta é preciso fazê-lo variar e observar o resultado dessa variação e isso implica na realização de ensaios em pelo menos dois níveis desse fator. Um planejamento fatorial em que todas as variáveis são estudadas em apenas dois níveis é, portanto, o mais simples de todos. Por haver k fatores, isto é, k variáveis controladas pelo experimentador, o planejamento de dois níveis irá requerer a realização de $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^K$ ensaios diferentes, sendo por isso chamado de *planejamento fatorial 2^K* .

3.1.4.2 Planejamento Fatorial Fracionário

Quando se aplicam réplicas no projeto, o número de ensaios aumenta bastante, e dependendo do caso torna o experimento de alto custo ou até mesmo inviável de se fazer um fatorial completo. Para casos como este o indicado é a realização do planejamento fatorial fracionário, cuja diferença está na redução do número de ensaios e conseqüentemente na redução do grau de liberdade no experimento. A redução do grau de liberdade está relacionado com a estimativa do erro experimental, que no planejamento fatorial com vários fatores, as estimativas das interações com mais de dois fatores são consideradas como desprezíveis e confundem-se com um erro.

Conforme o objetivo do projeto esta redução de ensaios, permitirá a identificação dos fatores principais em detrimento da identificação de algumas interações ou de todas. Quando as interações estão associadas entre os fatores ou entre si, dá-se o nome de confundimento.

Em função destas associações os experimentos fracionários são classificados pela sua resolução. A resolução é definida pela identidade da associação, por exemplo, quando se tem um experimento onde exista associação entre efeitos principais e efeitos de interação 4 a 4 a resolução é de quinta ordem (V), de mesma maneira neste caso teremos associação entre efeitos de interação 2 a 2 e 3 a 3. neste caso não estarão presentes associações entre efeitos de

duplas interações entre si ou mesmo entre duplas interações e os efeitos principais. Analogamente, em experimentos de resolução IV existirá associação entre os efeitos principais e os efeitos das interações 3 a 3.

3.1.4.3 Estudo dos Efeitos Principais e Interações

Convenciona-se classificar os efeitos dos fatores como efeitos principais e de interação. Os efeitos principais ou de 1ª ordem, é aquele em que o fator interage como ele mesmo. Quando um fator apresenta dois níveis o efeito principal estimado é a diferença entre as respostas médias nos dois níveis. Os efeitos de interação, os quais medem a influência de um fator em relação aos demais, podem ser de 2ª ordem, interação entre dois fatores, 3ª ordem, até a e-nésima ordem.

3.2 Simulação de Monte Carlo

3.2.1 Definição

A Simulação de Monte Carlo surgiu em meados de 1944, durante a Segunda Guerra Mundial, por haver a necessidade de se criar um método para resolver problemas que envolviam integrais múltiplas. Seus idealizadores, Von Neumann e Ulam criaram um dos métodos utilizados na resolução de problemas que envolvem dados probabilísticos ou estocásticos através da geração de seqüências de números aleatórios.

De maneira geral, a definição dada para a simulação é a de um modelo empregado para estudar o desempenho de um sistema por meio da formulação de um modelo matemático, o qual deve reproduzir de maneira mais fiel possível as características do sistema original, de maneira que ao se fazer análise dos resultados possa-se obter informações de como cada fator influencia o desempenho do sistema, (EHRLICH 1985). Segundo o mesmo autor, através da simulação não é possível obter, de imediato, resultados otimizados do objeto em estudo; contudo, é através de simulações do modelo em diferentes condições que se pode escolher a que traz melhores resultados, ou seja, os mais aceitáveis. Por outro lado, Gavira (2003) diz que o principal objetivo de um estudo de simulação é conhecer o comportamento de um sistema e avaliar várias estratégias para sua operação.

Ao se buscar na literatura uma definição para a Simulação de Monte Carlo, encontra-se algumas variações de como esta é exposta, dependendo de cada autor e de qual objetivo está buscando. Sendo assim, aqui é exposto algumas destas definições.

De acordo com Naylor (1971), a Simulação de Monte Carlo é uma técnica para se buscar a solução de problemas de ordem probabilística ou estocástica, sendo utilizado em dois tipos gerais de problemas, os quais são:

- Aquele em que o processo seja estocástico, neste caso faz-se a simulação para se encontrar a distribuição de probabilidades, seja esta conhecida ou empírica;

- Problemas matemáticos determinísticos em que não haja uma solução simplificada quando resolvidos por métodos determinísticos. Nestes casos, busca-se soluções aproximadas simulando um processo estocástico que satisfaça os requisitos para a solução de um processo determinístico.

Contudo, Nater (1995) afirma que a Simulação de Monte Carlo consiste em uma técnica que determina a possível distribuição dos resultados de um processo, a partir de valores selecionados randomicamente das variáveis de entrada. Geralmente as variáveis de entrada representam as variáveis de decisão ou opções que os gerentes têm a mão para verificar determinado resultado.

De outro ponto de vista, para Machline *et al.* (1970) e Scollnik (1996), esta técnica de simulação é um método abrangente, onde as formas de investigação estão baseadas no uso de números randômicos e estatísticos de probabilidade, tendo aplicações em diferentes ramos da ciência. Para que esteja presente em um estudo, é necessário apenas que este faça uso de números aleatórios na verificação do problema.

De acordo com Evans & Olson (1998), a simulação de Monte Carlo é basicamente um experimento amostral cuja proposta é estimar a distribuição de uma variável de saída que depende de diversas variáveis probabilísticas de entrada.

3.2.2 Tipos de Simulação

De forma geral, a simulação pode ser classificada como sendo determinística ou estocástica, estática ou dinâmica e discreta ou contínua, Saliby (1989). Contudo, na literatura, encontra-se alguns autores, como Pereira (2000) e Harrel et al (2000), que se utilizam desta classificação também para o sistema e modelo a serem simulados. Sendo assim, segue abaixo o que se encontra na literatura sobre estas classificações:

- Determinística ou estocástico

Depende da natureza dos dados de entrada do processo e da saída em vários estágios do sistema. Aqueles modelos que não apresentam variáveis aleatórias são classificados como sendo determinísticos. Por outro lado, um modelo de simulação estocástico contém uma ou mais variáveis aleatórias como entrada do sistema, resultando assim, em saída aleatória.

- Estático ou dinâmico

Modelo de simulação estático é aquele em que o tempo não é um fator importante na análise do sistema, representado-o em um ponto particular no tempo. Já os modelos dinâmicos trazem o tempo como um fator importante, mudando o sistema ao longo do tempo.

- Discreto ou contínuo

Um sistema é dito discreto quando as variáveis envolvidas na simulação assumem valores finitos e infinitos. O caso de sistema contínuo se emprega quando as variáveis contidas na simulação mudam constantemente com o decorrer do tempo.

3.2.3 A Técnica de Simulação de Monte Carlo

A técnica de simulação de Monte Carlo por ser uma ferramenta bastante versátil e apresentar certa facilidade de utilização, pode ser empregada em vários campos de pesquisa, tais como manufatura, sistemas computacionais, negócios, etc.

A técnica de Simulação de Monte Carlo consiste em calcular o valor esperado e a dispersão (desvio padrão) de uma variável considerando o intervalo de variação e a distribuição de probabilidades de um dado conjunto de parâmetros que se deseja estudar.

O método gera de forma contínua e aleatória números a fim de simular vários cenários possíveis. Cada geração de novos valores corresponde a um evento ou cenário provável de ocorrer, que é inserido na distribuição de probabilidade. A disposição desses eventos em uma distribuição possibilita a avaliação da probabilidade de ocorrência de cada evento, através de medidas de estatística descritiva, como a média, o desvio padrão e frequência de ocorrência de cada cenário. Cada geração da série de números aleatórios significa um cenário possível de ocorrer.

Correia Neto *et al.* (2002) afirmam que esse processo de geração de dados é repetido quantas vezes forem necessárias. Quanto maior for o número de iterações, mais a distribuição de frequência dos resultados deve aproximar-se de uma distribuição normal. A essa

distribuição pode-se aplicar a medida de concentração estatística média e a medida de dispersão desvio padrão.

Após a caracterização de cada variável do problema, inicia-se uma geração de números aleatórios, respeitando a faixa adotada para cada variável independente. Faz-se interessante ressaltar que essa geração pode ser efetuada através de tabelas de números aleatórios ou mais comumente através de geração computacional. Os recursos computacionais disponíveis atualmente permitem que esse método seja facilmente utilizado e seus resultados sejam apresentados de várias formas, inclusive graficamente.

Cada geração dessa série de números significa um cenário possível de ocorrer. Esse evento tem então uma probabilidade diferente de zero de acontecer e gera uma saída que deve ser guardada em uma lista para posterior análise. A geração de um novo cenário é feita, seguindo o mesmo processo de aleatoriedade. Os seus resultados são guardados novamente. Esse processo de geração de dados de entrada e registro dos resultados é repetido tantas vezes quanto for necessário. A determinação da quantidade de iterações vai depender de vários fatores. Um deles é o poder de processamento utilizado. Se o processamento de muitas iterações for possível, tanto será melhor, já que os resultados serão mais representativos.

Quanto maior o número de iterações, mais essa distribuição deve se aproximar de uma distribuição de probabilidade normal. A partir desta distribuição, pode-se aplicar a medida de concentração estatística média e a medida de dispersão desvio padrão.

3.2.4 Vantagens e desvantagens

Como toda ferramenta, a Simulação de Monte Carlo também apresenta suas vantagens e desvantagens de utilização. Gavira (2003) expõe alguns fatores que indicam seus pontos positivos e aqueles que tornam o método não tão vantajoso. Suas vantagens e desvantagens serão mostrados no Quadro 3.1:

Vantagem	Desvantagem
<ul style="list-style-type: none"> - Modelos realistas - Aplicação em problemas mal estruturados - Grande flexibilidade - Aquisição de visão sistêmica - Exploração de possibilidades - Visualização de planos 	<ul style="list-style-type: none"> - Treinamento especial - Resultados podem ser de difícil interpretação - Dificuldade de modelagem - Pode ser usada inapropriadamente - Modelagem e análise podem gerar alto custo - Resultados podem ser de difícil implementação

Quadro 3.1 - Vantagens e desvantagens da simulação de Monte Carlo

3.2.5 Passos para aplicação do método

Nos trabalhos científicos que se encontra o uso da simulação de Monte Carlo observa-se certa homogeneidade na seqüência da simulação, embora não haja nenhum formulário ou seqüência pré-estabelecida que se tenha que seguir para a correta utilização do método. Desta forma, as etapas encontradas nos diversos trabalhos para a realização são as seguintes:

- 1- Definição dos parâmetros ou variáveis de entrada que se relacionam fortemente com a saída do modelo;
- 2- Confecção de uma estatística descritiva das variáveis de entrada definidas anteriormente;
- 3- Montagem dos cenários, através da combinação aleatória das variáveis de entrada (representadas por distribuição de probabilidades);
- 4- Descrição das variáveis de saída como distribuição de probabilidade;
- 5- Interpretação dos dados obtidos.

De acordo com Saliby (1989), o método é iniciado com preparação do modelo, em que os objetivos do estudo de simulação são traçados. A partir disso, são definidos os principais parâmetros e a relação existente entre a variável dependente e as independentes. Como os dados coletados são, na maioria dos casos, estocásticos, a fase seguinte consiste em

determinar a distribuição de probabilidade que represente a incerteza dos valores. As distribuições de probabilidade das variáveis de entrada são utilizadas na fase seguinte para a geração de cenários e a própria simulação do sistema. A principal característica desta etapa é escolher um valor para as variáveis da distribuição representativa de cada variável de entrada e combiná-las, verificando o resultado assumido pela variável dependente. Finalmente, o conjunto de valores gerado para a variável dependente, devido a cada cenário simulado, é analisado e confrontado com o objetivo do estudo de simulação e, principalmente, vem a fornecer informação para uma tomada de decisão mais consciente.

3.2.6 Definição da distribuição de incertezas das variáveis do modelo

Uma das principais questões para se chegar a bons resultados em uma simulação é a obtenção de um modelo que consiga refletir as características do objeto de estudo de forma bem próxima ao real. Um fator que tem importância bastante significativa neste ponto é a incerteza das variáveis utilizada nos dados de entrada do modelo.

Segundo Molak (1997) neste ponto é importante definir o método que retrate as distribuições para as variáveis incertas dentro de um modelo. Vários tipos de distribuição podem ser usados. É recomendado que o método de modelagem siga orientação de alguém com experiência sobre as incertezas das variáveis de entrada. Finalmente, as distribuições podem ser determinadas através de dados disponíveis.

De acordo com Laubsch e Ulmer (2001), dentre as principais vantagens da aplicação do método de Monte Carlo está a possibilidade de que os dados de entrada sejam tratados, não de forma determinística, mas como uma distribuição de valores. Deste modo, a análise proporcionada pela simulação de Monte Carlo é mais rica em relação a algumas técnicas existentes, graças à montagem de cenários que são geradas em função dos valores que as variáveis de entrada podem assumir, respeitando a distribuição de probabilidade associada a cada variável.

Em trabalhos publicados encontra-se uma grande variedade de tipos diferentes de distribuições de probabilidade na modelagem da incerteza de variáveis. O Quadro 3.2, apresenta os tipos mais comuns de se encontrar em trabalhos científicos:

Normal	Normal(μ, σ^2)
Possibilidade de Aplicações	Representa quantidades, como por exemplo, medidas de erros, que são resultantes da soma de uma vasta quantidade de outros fatores (em virtude do teorema central do limite).
Média	μ
Variância	σ^2
Moda	μ
Uniforme	U(a,b)
Possibilidade de Aplicações	Usada como um primeiro modelo para uma quantidade que é sentida com o sendo aleatoriamente variando entre dois valores a e b , mas poucas informações são conhecidas. A distribuição U (0,1) é essencial para a geração de variáveis aleatórias em outras distribuições.
Média	$\frac{a + b}{2}$
Variância	$\frac{(b - a)^2}{12}$
Moda	Não existe um único valor
Exponencial	expo(β)
Possibilidade de Aplicações	Utilizada para representar tempos entre eventos independentes, como por exemplo, tempo de chegada de clientes em uma empresa prestadora de serviço, que ocorre a uma taxa constante.
Média	β
Variância	β^2
Moda	0
Weibull	Weibull(α, β)
Possibilidade de Aplicações	Largamente utilizadas em modelos de confiabilidade e tempo para completar algumas tarefas.
Média	$\frac{\beta}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)$
Variância	$\frac{\beta^2}{\alpha} \left\{ 2\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) - \frac{1}{\alpha} \left[\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) \right]^2 \right\}$
Moda	$\begin{cases} \beta \left(\frac{\alpha-1}{\alpha} \right)^{1/\alpha} & \text{se } \alpha \geq 1 \\ 0 & \text{se } \alpha < 1 \end{cases}$

Quadro 3.2 – Tipos de distribuição de probabilidade

A principal questão a ser discutida, nesta fase é a como determinar a distribuição dos dados de entrada, em uma análise que utilize a simulação de Monte Carlo.

A primeira abordagem, ou seja, a utilização de técnicas de inferências estatísticas, consiste em atribuir aos dados uma distribuição teórica, como Exponencial, Normal ou Poisson, e realizar os testes de hipóteses para determinar o quanto à distribuição se ajusta aos dados. Quando um valor aceitável para o parâmetro que verifica o ajuste da distribuição dos dados à curva selecionada é atingido, escolhe-se esta distribuição para gerar os valores

aleatórios para as variáveis de entrada. Uma segunda abordagem utiliza diretamente os dados para definir a distribuição empírica sem representá-los por formas teóricas de distribuição. Deste modo, durante a simulação, as variáveis são retiradas diretamente da distribuição empírica.

Quando há a possibilidade de escolha, é recomendável utilizar a primeira abordagem, por duas razões: quando se utiliza a distribuição empírica, esta é baseada em uma coleção finita de pontos, e pode ocorrer que diferentes observações conduzam a diferentes distribuições empíricas, ou seja, determinados valores que a variável aleatória pode assumir podem não ser considerados. Com a utilização da distribuição teórica, este erro é eliminado, pois estas distribuições são menos sensíveis a tais comportamentos das variáveis do sistema. Além disso, um dos objetivos da simulação é inferir sobre o comportamento do sistema, caso a variável de entrada assuma um determinado valor extremo, que pode não ser considerado por uma distribuição empírica, mas que pode ser facilmente determinado por uma distribuição teórica.

3.3 DOE x Simulação de Monte Carlo

O uso combinado destas duas técnicas ainda não se encontra muito difundido na literatura, visto que não é grande o número de trabalhos publicados que fazem o uso simultâneo do planejamento experimental com a simulação.

Alguns trabalhos podem ser citados como o de Cryer & Scherer (2003) em que estes fazem um DOE para encontrar os fatores que mais afetam um determinado processo e ao mesmo tempo, a partir da Simulação de Monte Carlo, fazem o mesmo estudo para comparar os resultados obtidos com as duas ferramentas. Por outro lado, Colombari (2004) faz todo um estudo através das técnicas de projeto de experimentos de um processo de soldagem, e por fim, propõe uma simulação dos dados obtidos para que se obtenha um incremento na resposta apresentada, que deixará de ser um valor específico para cada variável de entrada e será expressa por uma distribuição de probabilidades. É com este intuito que é proposto este trabalho, ou seja, obter informações através do DOE dos elementos que mais afetam o processo de soldagem MIG/MAG pulsado e a partir destes dados da análise criar um modelo para simulação e assim obter não somente um valor fixo para cada resposta e sim a variação que este pode apresentar, descrita pela distribuição de probabilidades de cada uma das respostas analisadas. Outro ponto importante que se pode chegar com este estudo é de proporcionar uma investigação se o DOE realizado trouxe respostas adequadas, visto que se

há grande variabilidade na resposta encontrada com a simulação. Nota-se que um projeto de experimentos mais refinado pode ser feito para obtenção de respostas mais precisas.

Desta forma pretende-se checar a viabilidade de junção destas duas técnicas bem como as vantagens e profundidade de informações geradas pelo uso combinado destas ferramentas já bastante consolidadas no meio científico.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Esta etapa do trabalho caracteriza-se pela formulação e planejamento dos ensaios experimentais segundo os objetivos propostos pelo estudo. Sendo assim, é nesta fase que se definem a grandezas que serão consideradas constantes, os respectivos níveis superior e inferior de cada fator do experimento e os equipamentos a serem utilizados tanto para os ensaios como aqueles empregados para a medição das respostas que se deseja obter, bem como a forma de medição destas respostas.

Tendo isto, os ensaios foram realizados no Laboratório de Soldagem (LSO) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), sendo que as medições do aspecto e geometria do cordão de solda, caracterizados pela penetração, reforço e largura do cordão de solda, áreas de reforço e de penetração, foram auferidas com o apoio do Laboratório de Metalografia e do Laboratório de Metrologia Dimensional.

Para dar seguimento ao estudo, parte-se para a etapa de formulação e planejamento do experimento segundo o modelo proposto por Reaside (1993) e mencionado anteriormente.

4.1 Formulação do que será investigado

Como proposto pelo modelo de Reaside, é importante nesta fase definir com clareza os objetivos do experimento, ou em outras palavras, o que se pretende analisar. Desta forma o que se obtém com o experimento são respostas apropriadas, e que por sua vez, geram dados confiáveis para o estudo.

4.1.1 Formulação do problema

O trabalho será focado no estudo da influência sofrida pelo processo de soldagem MIG/MAG pulsado nos aspectos de qualidade do cordão de solda e produtividade quando utilizada uma atmosfera protetora de Argônio Puro comparativamente com Argônio + 25% CO₂. A partir disso, será abordado a influência destes fatores no custo do processo, o que é feito a partir de uma análise de sensibilidade destes fatores e como estes podem trazer

variações para o custo, bem como observar se os fatores significativos para a qualidade do cordão de solda são os mesmo que geram maior variabilidade no custo do processo.

Com isso, pretende-se encontrar configurações que garantam um intervalo de ocorrência de resultados próximos do ótimo para os aspectos de qualidade, produtividade e custos do processo de soldagem em estudo através da utilização combinada das técnicas de projeto e análise de experimentos e Simulação de Monte Carlo.

4.1.2 Fatores de controle e seus níveis

Os fatores que podem afetar de alguma maneira o processo de soldagem MIG/MAG pulsado podem ser vários. Contudo, para se fazer a análise que este trabalho se propõe, os fatores que serão escolhidos para o estudo de sua influência serão aqueles relacionados com os parâmetros de pulso, ou seja, a corrente de pico (I_p), corrente de base (I_b), ciclo ativo (CA), esta uma relação entre o tempo de pico (t_p) e tempo de base (t_b) e por último a velocidade de alimentação do arame (V_a). Vale ressaltar que o tempo de pico será mantido constante em 4 ms e o tempo de base varia entre 4 ms e 6 ms de acordo com o ciclo ativo pretendido.

Para se estabelecer os níveis máximo e mínimo para o experimento, estes serão escolhidos segundo valores encontrados em literaturas pertinentes ao assunto. Ribeiro (2002) cita em seu trabalho valores máximos e mínimos para cada um destes parâmetros. O autor busca estes valores através de ensaios em que estabelece valores máximos e mínimos para cada um dos parâmetros e os testa em ensaio de soldagem, observando a soldabilidade e o aspecto do cordão de solda com cada uma das alternativas. Sendo assim, os valores encontrados e que serão utilizados no experimento são mostrados na tabela 4.1 abaixo:

Fator	Nível Inferior	Nível Superior
I_p (A)	280	350
I_b (A)	70	100
CA (%)	40	50
V_a (m/min)	5	6

Tabela 4.1 – Níveis dos Fatores

4.1.3 Parâmetros operacionais

De mesmo modo como foi feito com os níveis dos fatores, a configuração dos parâmetros operacionais serão relacionados com aqueles encontrados na literatura e que geram bons resultados. Vale ressaltar que estes parâmetros operacionais serão mantidos constantes durante o experimento para se analisar a influência dos dois tipos de gases de proteção na qualidade e produtividade do processo de soldagem MIG/MAG pulsado. Desta forma, estes valores são apresentados em forma de tabela com suas respectivas citações na literatura. Segue a Tabela 4.2:

Parâmetro Operacional	Valor	Citação / Autor
Tipo do Arame	ER 70S-6	Na soldagem com aços carbono Nixon & Norrish (1992) com ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro gerou resultados bastante positivos no que se refere à geometria do cordão de solda.
Diâmetro do Arame	1,2 mm	
Tipo de Gás	Argônio Puro / 75% Argônio + 25% CO ₂	Lowery (1977), Wainer (1992) relatam as vantagens de utilizar misturas de gases na soldagem de aço carbono quando comparado com argônio puro.
Vazão de Gás	15 l/min	Segundo publicação Welding Technology Data (1983) na soldagem de aços inoxidáveis usa-se vazão do gás de proteção entre 15 e 20 l/min e recuo de bico de contato de 5 mm.
Recuo do bico de contato	5 mm	
Distância Tocha-peça	17,5 mm	Na publicação Welding Technology Data (1984) cita que a extensão do eletrodo adequada para a soldagem de aços carbono situa entre 13 e 25 mm na transferência por spray.
Velocidade de Soldagem	40 cm/min	Na publicação Welding technology Data (1982) cita que soldagem de chapas de aço temperado de 6,4 mm de espessura é usual a velocidade de soldagem de 38 cm/min.
Espessura do metal base	6 mm	

Tabela 4.2 – Parâmetros operacionais

4.1.4 Banco de Ensaio

É constituído basicamente de uma fonte de soldagem transistorizada inversora com comando digital, imposição de corrente no modo pulsado, possibilitando maior flexibilidade no ajuste dos parâmetros associada a um sistema guia com velocidade controlada, o que permite o deslocamento da tocha durante a realização da solda. Como já mencionado, foi usado um tacômetro juntamente com o sistema de alimentação do arame para que se possa obter o comprimento do arame consumido durante cada soldagem, bem como um medidor de vazão do gás. Segue Figura 4.1 que ilustra a bancada de ensaio.

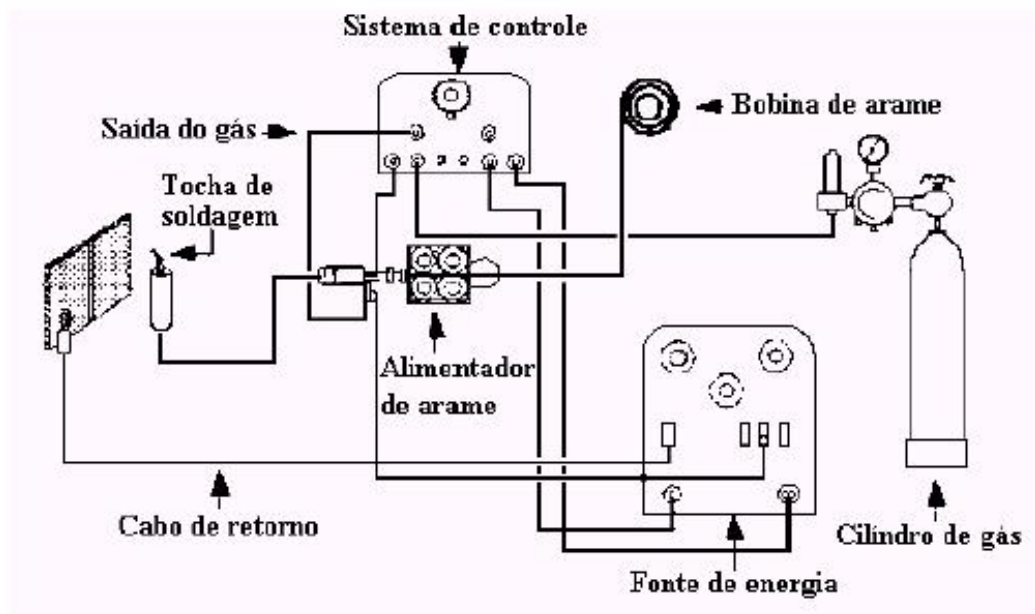


Figura 4.1 – Banco de ensaio

4.1.5 Respostas do experimento

As variáveis de resposta do experimento que serão analisadas e comparadas para cada um dos dois tipos de proteção gasosa são aquelas relacionadas com os aspectos de qualidade do cordão de solda e produtividade. A qualidade do cordão de solda será expressa pelas grandezas, penetração (p), diluição (D) e índice de convexidade (IC). A Figura 4.2 mostra o perfil do cordão de solda e os parâmetros que compõem as respostas analisadas.

A diluição do cordão de solda é um índice bastante importante para a análise da qualidade do cordão de solda, visto que é a partir desta que se tem a relação percentual entre as áreas penetrada e de reforço. A diluição é estabelecida segundo a equação 4.1:

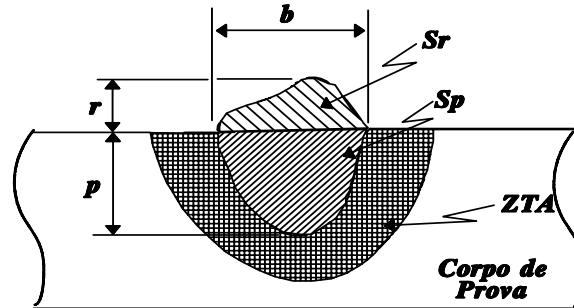


Figura 4.2 – Esquema da área da seção transversal do cordão de solda

$$D = (Sp / (Sp + Sr)) \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (4.1)$$

O índice de convexidade expressa a relação entre o reforço e a largura do cordão de solda. De acordo com Silva (2000), o índice de convexidade tem valores aceitáveis de qualidade quando seu valor fica próximo de 30%, visto que IC com valores acima deste nível gera excessivo reforço e baixa penetração. O IC é definido segundo a equação 4.2 abaixo:

$$IC = (r/b) \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (4.2)$$

onde:

r é o reforço do cordão de solda em (mm), e

b é a largura do cordão de solda em (mm).

Já a parte de produtividade será avaliada pelo índice de respingos (Iresp) gerado durante a soldagem com as diferentes atmosferas de proteção gasosa. Vale ressaltar que o tipo de soldagem empregado é de uma transferência metálica puramente por spray.

O índice de respingos pode ser definido pela relação existente entre a quantidade de matéria efetivamente depositada comparada com a quantidade de material fornecido durante a soldagem. Esta relação é expressa segundo a equação 4.3.

$$I_{resp} = [1 - (mf - m\Phi) / mt] \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (4.3)$$

onde:

m_f - refere-se à massa do corpo de prova após a soldagem, eliminando qualquer traço de respingo remanescente;

m_{Φ} - refere-se à massa inicial do corpo de prova;

m_t - refere-se a quantidade de material fornecida durante a soldagem através do sistema de alimentação do arame;

A massa m_t fornecida foi determinada com auxílio de um tacômetro, o qual permite avaliar o comprimento do arame consumido durante o tempo de soldagem. A partir destes dados foi calculado, através da densidade do material e do diâmetro do arame, a massa total fornecida, como pode ser visto pela equação 4.4.

$$m_t = \text{densidade material} * \text{volume arame} \quad (4.4)$$

onde:

$$\text{Volume} = [(\pi \cdot \Phi^2) / 4] \cdot l$$

$\Phi = 1,2 \text{ mm}$ (diâmetro do arame)

l - refere-se ao comprimento do arame fornecido durante a soldagem.

Densidade do Material = $7,692 \text{ g/cm}^3$.

4.2 Construção do modelo

Seguindo o modelo de Reaside, nesta etapa deve-se construir a matriz experimental, considerando os fatores e níveis escolhidos na etapa anterior. A matriz experimental será criada a partir do Software Minitab[®], que constrói a matriz através da entrada dos fatores e de seus níveis previamente escolhidos na fase anterior, do experimento escolhido, que neste caso será empregado Fatorial fracionado, de resolução IV e com duas repetições, gerando também uma seqüência aleatória para os experimentos. O trabalho será conduzido como um experimento fatorial fracionado por conter um número reduzido de experimentos, em vista que o estudo se propõe a obter um comparativo entre duas proteções gasosas, o que tornaria

grande a quantidade de ensaios. Sendo assim, o experimento conta com $(2^{k-1}) \times 2 = (2^3) \times 2 = 16$ ensaios para cada um dos dois tipos de proteção gasosa, gerando então 32 ensaios no total. De forma a considerar ou não um fator significativo será empregado o uso de p-value, que segundo Montgomery (2003), tem sido largamente utilizado na prática e que este é uma probabilidade de que a estatística de teste assuma um valor que é, no mínimo, tão extremo quanto o valor observado da estatística quando a hipótese nula (H_0) for verdadeira (usualmente considera-se um fator significativo quando a hipótese nula é rejeitada). O autor cita ainda que o p-value carrega muita informação sobre o peso da evidência contra H_0 , logo um tomador de decisão pode retirar uma conclusão com qualquer nível especificado de significância. Em muitas situações, uma estimativa de um parâmetro não fornece informação completa para tomada de decisão. Nestes casos, novamente segundo Montgomery (2003), é utilizada uma abordagem denominada de intervalo de confiança para expressar o grau de incerteza associado com a estimativa. A interpretação de um intervalo de confiança é que se um número infinito de amostras aleatórias for coletado e um intervalo com $100(1 - \alpha)\%$ de confiança for calculado a partir de cada amostra, então $100(1 - \alpha)\%$ desses intervalos conterão o valor verdadeiro. Para realização deste trabalho será utilizado $\alpha=5\%$ e conseqüentemente um intervalo de confiança de 95%. Desta forma, durante a análise os fatores que apresentarem um p-value $< 0,05$ serão considerados significativos.

4.2.1 Matriz experimental e seqüência dos ensaios

Dando continuidade ao modelo de Reaside, parte-se então para a criação da matriz experimental com a alimentação do Software Minitab[®] com os dados experimentais citados acima. Com isso, o software gera uma matriz DOE com uma seqüência padrão para os dados de entrada e também uma aleatória pela necessidade de análise estatística. Abaixo segue a matriz experimental com a ordem padrão, sendo que esta é utilizada para ambas as proteções gasosas, a fim de se obter um comparativo confiável, mudando apenas a ordem aleatória, segundo gerada pelo software.

Ordem Padrão	Ip (A)	Ib (A)	CA (%)	Va (m/min)
1	280	70	40	5
2	350	70	40	6
3	280	100	40	6
4	350	100	40	5
5	280	70	50	6
6	350	70	50	5
7	280	100	50	5
8	350	100	50	6
9	280	70	40	5
10	350	70	40	6
11	280	100	40	6
12	350	100	40	5
13	280	70	50	6
14	350	70	50	5
15	280	100	50	5
16	350	100	50	6

Tabela 4.3 – Matriz Experimental

Para a realização dos ensaios, os corpos de prova (CP) foram devidamente preparados e identificados com a ordem de realização e com qual tipo de proteção gasosa se refere. Ainda anteriormente ao ensaio, os corpos de prova foram pesados para que se pudesse analisar o índice de respingos gerado em cada ensaio. Após a realização dos ensaios, os corpos de prova foram novamente pesados para obtenção da massa de material efetivamente depositado em relação ao material fornecido durante a soldagem. A partir disso, foram seccionados, polidos (exemplo Figura 4.3) e atacados quimicamente com nital 4% (exemplo Figura 4.4 e Figura 4.5) as duas seções transversais, para possibilitar a realização das leituras necessárias para obtenção das respostas desejadas e selecionadas previamente para análise do cordão de solda. Em seqüência, com o auxílio de um projetor de perfis, com um aumento de 10 vezes, e de um planímetro registra-se estas leituras, que são da área de penetração (S_p), área de reforço (S_r), penetração (p), largura (b) e reforço (r) do cordão de solda, conforme ilustrado na Figura 4.2. É a partir destas medições que se obtém as outras respostas que serão foco de análise do comparativo entre as duas proteções gasosas, como mostrado anteriormente com suas respectivas equações.

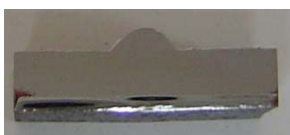


Figura 4.3 – CP polido



Figura 4.4 – CP atacado - Argônio



Figura 4.5 – CP atacado – Mistura C25

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dando seqüência ao modelo de experimentos proposto por Reaside, o próximo passo é a realização propriamente dita dos ensaios conforme planejado nas etapas anteriores.

Após o experimento é feita a análise dos dados colhidos, em que o uso da estatística é bastante aplicado para descrever o comportamento dos fatores de controle, se houve interação entre eles e seus efeitos na resposta de saída. Como citado anteriormente, será empregado o software comercial Minitab[®], que proverá grande apoio nesta fase. Feito isso, conclusões sobre o experimento podem ser retiradas e ações de melhorias podem ser tomadas no processo ou produto em estudo, aplicando a configuração dos fatores que trazem melhores respostas.

Com os experimentos concluídos, pode-se buscar quais fatores foram mais significativos para cada resposta estudada nos dois tipos de proteção gasosa, para daí buscar uma configuração otimizada do processo de soldagem MIG/MAG pulsado. Para tal, os dados são processados e analisados para se encontrar a influência de cada fator e suas possíveis interações de segunda ordem na qualidade e produtividade do cordão de solda gerado. Para melhor descrição da influência que cada fator produz em cada uma das respostas analisadas, esta será descrita através de equações matemáticas que mostram quantitativamente o valor que determinada resposta pode apresentar, sendo este o valor otimizado.

A partir deste ponto, em que é encontrado o valor otimizado, parte-se para o uso de outra ferramenta apresentada anteriormente, a Simulação de Monte Carlo, para se conhecer a variabilidade encontrada em cada uma das respostas através de sua distribuição de probabilidade e freqüência. Para se chegar a este resultado, cria-se um modelo para cada resposta a partir das equações de otimização encontradas com a análise DOE, possibilitando assim a realização da simulação e uma integração entre as duas ferramentas. Para efeito comprobatório do modelo de simulação, ensaios são conduzidos com a melhor configuração encontrada para cada uma das proteções gasosas e comparadas com o resultado do modelo simulado, o que traz maior facilidade para o comparativo entre as duas proteções gasosas em estudo.

Para o estudo de outro ponto abordado pelo trabalho, será também calculado o custo de processo apresentado por ambos os tipos de proteção gasosa. Para tal também será utilizado o método de Simulação de Monte Carlo, onde novamente a partir de um modelo construído para o custo do processo de soldagem é simulado, possibilitando também fazer

uma análise de sensibilidade dos fatores que mais afetam o custo do processo de soldagem MIG/MAG pulsado.

5.1 Resultados encontrados a partir do DOE

As Tabela 5.1 e 5.2, mostram os dados coletados antes e após cada ensaio de soldagem segundo planejamento DOE feito anteriormente, onde:

$m\Phi$ - é a massa inicial do corpo de prova antes da soldagem;

m_f - é a massa final do corpo de prova depois da soldagem;

l - é o comprimento do arame.

As massas inicial e final são utilizadas para o cálculo do índice de respingos e também para outras grandezas relacionadas com alguns fatores econômicos do processo de soldagem estudado, que serão analisadas com intuito puramente comparativo entre as duas proteções gasosas, não estando estas como respostas do projeto e análise de experimento, sendo que este estudo será feito juntamente com os cálculos de custo do processo. Estas referidas grandezas são o rendimento de deposição real (RDR), taxa de deposição (TD) e taxa de fusão (TF), que são descritas segundo as seguintes equações:

$$\text{RDR} = [(m_f - m\Phi) / m_t] \cdot 100 \quad (5.1)$$

$$\text{TD} = 3,6 \cdot (m_f - m\Phi) / (t_{\text{solda}} \cdot 60) \quad (5.2)$$

$$\text{TF} = 3,6 \cdot d \cdot l / t_{\text{solda}} \quad (5.3)$$

onde:

mt - é a massa de arame teórica fornecida durante a soldagem e mostrada no capítulo anterior;

tsolda - é o tempo de soldagem em minutos;

d – densidade linear do arame (g/m).

OP	mΦ	mf	mt	l	tsolda
	g	g	g	cm	min
1	331,9	343,1	11,65	134,0	0,27
2	357,9	371,8	14,35	165,0	0,28
3	288,3	302,01	14,35	165,0	0,28
4	396,0	409,6	13,66	157,0	0,31
5	271,4	284,4	13,48	155,0	0,26
6	330,0	342,0	12,09	139,0	0,28
7	338,2	349,3	11,31	130,0	0,26
8	325,1	338,3	13,30	153,0	0,25
9	308,5	320,3	12,61	145,0	0,29
10	412,5	430,2	18,00	207,0	0,35
11	302,2	315,5	13,65	157,0	0,26
12	304,6	314,7	10,26	118,0	0,24
13	325,5	339,8	14,79	170,0	0,28
14	264,3	275,7	11,48	132,0	0,26
15	390,5	405,3	14,87	171,0	0,34
16	377,2	391,4	14,26	164,0	0,27

Tabela 5.1 – Dados obtidos do ensaio – Argônio puro

OP	mΦ	mf	mt	l	tsolda
	g	g	g	cm	min
1	488,70	497,20	9,57	110,00	0,22
2	524,10	533,30	9,40	108,00	0,18
3	518,50	530,10	11,74	135,00	0,23
4	485,60	496,40	12,35	142,00	0,28
5	487,00	501,30	15,83	182,00	0,30
6	489,80	499,60	11,05	127,00	0,25
7	488,30	499,00	12,35	142,00	0,28
8	475,00	485,70	14,18	163,00	0,27
9	520,00	531,20	12,00	138,00	0,28
10	523,20	537,70	15,05	173,00	0,29
11	510,80	526,70	16,79	193,00	0,32
12	491,60	502,00	12,35	142,00	0,28
13	476,30	494,00	19,40	223,00	0,37
14	481,40	493,60	13,22	152,00	0,30
15	479,60	492,20	13,66	157,00	0,31
16	493,60	506,20	14,61	168,00	0,28

Tabela 5.2 – Dados obtidos do ensaio – Mistura C25

A Tabela 5.3 e 5.4 mostram os resultados obtidos para o reforço (r), largura (b), penetração (p), área de reforço (Sr) e área penetrada (Sp), de acordo com metodologia citada no capítulo anterior.

OP	r	b	p	Sp	Sr
	mm	mm	mm	mm ²	mm ²
1	2,80	7,45	1,55	5,40	15,50
2	3,15	7,65	2,10	6,70	18,50
3	3,35	7,05	1,10	2,90	18,10
4	3,20	5,45	1,80	4,00	14,10
5	3,10	8,45	1,80	6,90	18,40
6	3,45	6,50	1,65	3,30	17,20
7	2,85	7,90	1,65	5,00	15,80
8	3,05	8,75	2,40	7,50	19,00
9	2,90	7,85	1,40	4,90	15,90
10	3,10	8,45	2,10	7,00	17,40
11	3,60	7,30	1,05	6,60	18,20
12	3,10	7,05	1,70	4,30	14,80
13	3,20	7,65	2,00	7,40	18,20
14	3,95	5,50	1,75	3,40	17,80
15	2,90	8,30	1,60	5,50	15,40
16	3,40	7,35	2,25	6,40	15,80

Tabela 5.3 – Resultado dos parâmetros geométricos – Argônio puro

OP	r	b	p	Sp	Sr
	mm	mm	mm	mm ²	mm ²
1	2,46	9,35	1,54	7,49	14,44
2	2,71	10,90	1,66	10,67	18,31
3	3,20	7,43	2,24	8,56	16,46
4	2,35	9,08	0,90	4,49	13,30
5	2,61	9,85	2,61	12,40	16,68
6	2,23	8,95	1,23	7,31	13,55
7	1,88	8,80	1,15	9,28	10,38
8	2,60	11,08	1,05	7,73	17,00
9	2,55	9,30	1,85	10,04	14,78
10	2,74	10,58	2,03	11,31	19,01
11	3,05	9,05	2,08	10,25	16,81
12	1,48	11,33	0,58	4,50	9,63
13	2,81	10,00	2,03	9,95	18,26
14	2,35	10,33	1,30	5,73	16,21
15	2,10	11,40	0,88	7,10	13,44
16	2,73	12,43	0,85	7,58	19,53

Tabela 5.4 – Resultado dos parâmetros geométricos – Mistura C25

Finalmente, com todas as medições realizadas, pode-se então partir para o cálculo das respostas que se deseja analisar, o que será feito a partir das equações já mencionadas anteriormente. Novamente, estes resultados são apresentados abaixo, na forma da Tabela 5.5 e Tabela 5.6:

OP	p	D	IC	Iresp
	mm	%	%	%
1	1,55	25,73	37,58	4,10
2	2,10	26,25	41,18	3,20
3	1,10	13,82	47,23	4,00
4	1,80	22,23	58,72	0,40
5	1,80	27,33	36,69	3,70
6	1,65	15,93	53,08	0,70
7	1,65	24,10	36,08	1,90
8	2,40	28,30	34,86	1,60
9	1,40	23,56	36,94	6,90
10	2,10	28,54	36,69	1,70
11	1,05	26,43	49,32	2,70
12	1,70	21,45	43,97	1,60
13	2,00	28,96	41,83	3,40
14	1,75	15,84	71,82	0,70
15	1,60	26,21	34,94	0,50
16	2,25	28,83	46,26	0,50

Tabela 5.5 – Respostas do experimento – Argônio puro

OP	p	D	IC	Iresp
	mm	%	%	%
1	1,54	34,15	26,31	11,18
2	1,66	36,82	24,86	2,08
3	2,24	34,21	43,07	1,23
4	0,90	25,24	25,88	12,57
5	2,61	42,64	26,50	9,68
6	1,23	35,04	24,92	11,30
7	1,15	47,20	21,36	13,38
8	1,05	31,26	23,47	24,54
9	1,85	40,45	27,42	6,71
10	2,03	37,30	25,90	3,65
11	2,08	37,88	33,70	5,30
12	0,58	31,85	13,06	15,81
13	2,03	35,27	28,10	8,76
14	1,30	26,12	22,75	7,74
15	0,88	34,57	18,42	7,75
16	0,85	27,96	21,96	13,79

Tabela 5.6– Respostas do experimento – Mistura C25

Tendo em mãos todos estes dados dos experimentos, pode-se então partir para o tratamento estatístico destes com o apoio do software Minitab[®], o que possibilita a determinação dos fatores significativos sobre as respostas estudadas, ou seja, encontrar aqueles que trazem maior impacto sobre os aspectos de qualidade do cordão de solda e da produtividade do processo de soldagem para cada um dos dois tipos de proteção gasosa. Este é apresentado a seguir e será feito em separado para cada uma das respostas e para cada um dos gases, possibilitando assim, uma melhor visualização dos efeitos sobre cada uma das proteções. Como já mencionado, após a determinação de uma configuração que consiga apresentar resultados satisfatórios para a qualidade e produtividade do processo de soldagem MIG/MAG pulsado, este será simulado para que se insira a variabilidade nos resultados encontrados, para que assim possa se ter um maior conhecimento de como é o real comportamento de soldagem através da distribuição de probabilidade.

5.2 Análise da penetração

A penetração do cordão de solda é um ponto de grande importância e que deve ser analisado com bastante critério, pois é um parâmetro que traz significativo reflexo na qualidade do cordão de solda e por apresentar uma relação direta com o tipo de transferência metálica. Outro fator importante é o de se poder estabelecer valores máximos e mínimos para a penetração, em vista de se poder trabalhar com chapas de diferentes espessuras, em especial com chapas mais finas. Para tanto, é visto a importância de se conhecer além do valor “fixo” da penetração, a variabilidade que esta pode apresentar perante várias repetições de soldagem.

5.2.1 Influência dos fatores sobre a penetração do cordão de solda

Dos dados coletados durante os ensaios e apresentados nas tabelas acima para cada um dos gases, consegue-se gerar alguns resultados e gráficos no software Minitab[®], que expõem o grau de significância de cada fator sobre a penetração do cordão de solda.

Aqui, vale ressaltar uma limitação encontrada nas análises dos dados, que é decorrente do tipo de experimento escolhido, no caso um projeto experimental fracionário. Por este motivo, e por ser um planejamento de resolução IV, Montgomery (2003), cita que em planejamentos deste tipo nenhum efeito principal está associado com qualquer outro efeito principal ou com interações de segunda ordem, porém estas interações de segunda ordem

estão associadas entre si. Desta forma, sendo o experimento I=ABCD há o que se chama de confundimento entre interações de segunda ordem, sendo elas AB com CD, AC com BD e entre AD e BC. Desta forma, durante o processamento dos dados pelo software, este remove da análise da estimativa dos efeitos e seus respectivos coeficientes as interações CD, BD e BC, fazendo somente os cálculos para as outras três interações. Por outro lado, o software mostra graficamente os efeitos destas interações sobre as respostas, o que muitas vezes nota-se a existência destas interações que foram excluídas, mas não se tem quantitativamente o valor de sua significância na resposta.

Com esta limitação não se pode introduzir estas interações nas análises feitas para cada uma das respostas, o que pode ser conseguido com um planejamento fatorial completo. Mas cabe expor neste ponto que, o objetivo do trabalho não é o de explorar a fundo o processo de soldagem MIG/MAG pulsado, e sim usá-lo como meio de estudo para o uso combinado de ferramentas de otimização de processos.

Sendo assim, abaixo são expostos os resultados para cada um dos dois gases de proteção:

Termo	Argônio Puro			Mistura C25		
	Coefficiente	Erro	p-value	Coefficiente	Erro	p-value
Constante	1,7438	0,02073	0,000	1,4966	0,05582	0,000
Ip	0,2250	0,02073	0,000	-0,2966	0,05582	0,001
Ib	-0,0500	0,02073	0,042	-0,2847	0,05582	0,001
CA	0,1437	0,02073	0,000	-0,1134	0,05582	0,077
Va	0,1063	0,02073	0,001	0,3222	0,05582	0,000
Ip*Ib	0,1187	0,02073	0,000	-0,0703	0,05582	0,243
Ip*CA	-0,1000	0,02073	0,001	0,0209	0,05582	0,717
Ip*Va	0,1375	0,02073	0,000	-0,1247	0,05582	0,056

Tabela 5.7 - Efeitos Estimados e Coeficientes para Penetração

Fazendo o tratamento estatístico dos dados coletados em ensaio para o argônio puro e a mistura C25, pode-se notar, a partir do resultado mostrado pela Tabela 5.7, que todos os fatores são considerados significativos para a penetração quando se utiliza o argônio puro como proteção gasosa, bem como as interações Ip*Ib, Ip*CA e Ip*Va, determinados através de $p\text{-value} < 0,05$. A partir da mesma análise para o caso de se utilizar a mistura C25, os fatores que apresentam $p\text{-value} < 0,05$ são Ip, Ib, CA, Va e a interação Ip*Va. Aqui cabe ressaltar que mesmo o fator CA tendo seu p-value igual a 0,077, ou seja, maior do que estabelecido como significativo, este será tratado inicialmente como sendo influente no processo por estar com um valor muito próximo ao estipulado, o que denota uma certa

significância na resposta, cabendo maiores análises para constatar se este fator é realmente significativo.

Graficamente o que pode ser notado a partir da Figura 5.1 e 5.2, é que para o caso de utilização de argônio puro, os fatores Ip, CA e Va são bastantes significativos, mas que Ib não produz grande variação na penetração, como percebido pelo p-value = 0,042 obtido por este fator, bem próximo do valor limite de p-value < 0,05, para que este seja considerado significativo. Por outro lado, quando se faz o uso da mistura C25 observa-se que os fatores Ip, Ib e Va carregam bastante influência na penetração do cordão de solda, enquanto o fator CA tem uma inclinação mais amena, o que demonstra uma menor significância, como já indica seu p-value. Nesta primeira análise, todos os fatores com exceção de Va, devem ser trabalhados em seus níveis inferiores, para que assim gere uma maior penetração com a referida mistura.

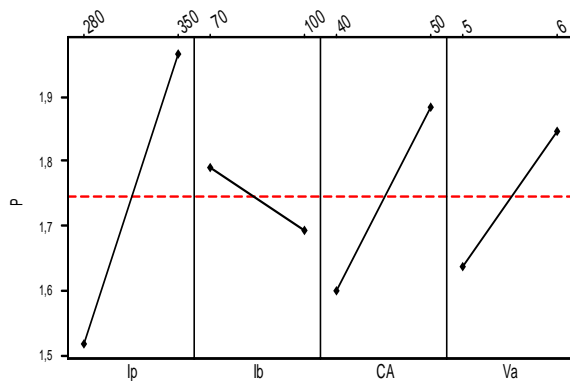


Figura 5.1 – Efeitos Principais – Argônio puro

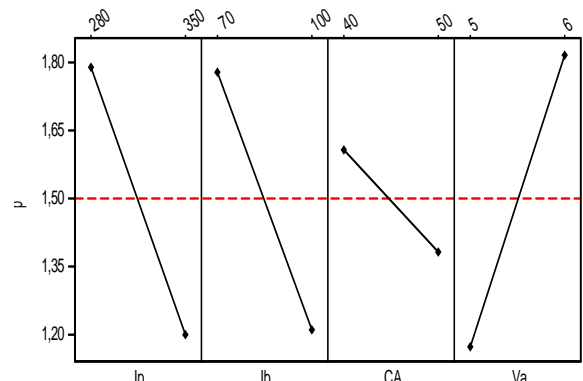


Figura 5.2 – Efeitos Principais – Mistura C25

Novamente em relação ao argônio puro é observado que os fatores Ip, CA e Va trazem grande influência na penetração do cordão de solda, notado pela inclinação das respectivas retas. Outro ponto que pode ser notado é que estes fatores produzem maior penetração estando em seus níveis superiores, sendo que Ib denota melhor resposta estando em seu nível inferior, embora não traga maiores variações por ser um fator com pouca significância.

Quando se analisa as interações significativas, foi encontrado, para o argônio puro, como sendo impactantes no aspecto do cordão de solda, pelo cálculo de p-value e respectivas estimativas de efeito na penetração, as interações entre Ip*Ib, Ip*CA e Ip*Va, como demonstra a inclinação entre as retas de cada fator na Figura 5.3 e também como já mencionado pelo p-value < 0,05. Contudo, graficamente a mesma Figura 5.3 mostra que

também há interação entre $I_b \cdot CA$, $I_b \cdot Va$, por indicação de cruzamento entre as retas. Mas como citado acima, estas interações são associadas às outras, o que não denota confiança no resultado, portanto, ficam fora das análises. Com a mesma análise para a mistura C25 e pelo que mostra a Figura 5.4, a única interação significativa para a penetração quando se utiliza esta mistura de gases é a $I_p \cdot Va$, a qual denota uma utilização de I_p em seu nível inferior e Va em seu nível superior. Por sua vez, para a penetração, a forma de se conseguir melhores resultados é com $I_p(-)$, $I_b(-)$, $CA(-)$, $Va(+)$. Considerando estes aspectos para o uso de argônio puro as três interações consideradas significantes indicam aumento da penetração quando os fatores, I_p , I_b , CA e Va são colocados em seus níveis superiores. Portanto, neste caso isolado da penetração, a configuração que traz maior profundidade é aquela utilizada com todos os fatores em seus níveis superiores, ou seja, $I_p(+)$, $I_b(+)$, $CA(+)$, $Va(+)$ para o argônio puro.

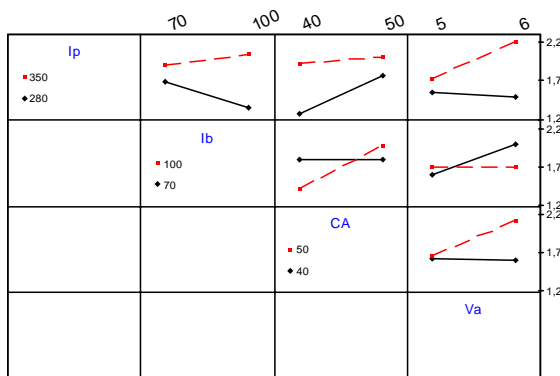


Figura 5.3 – Efeito das interações – Argônio puro

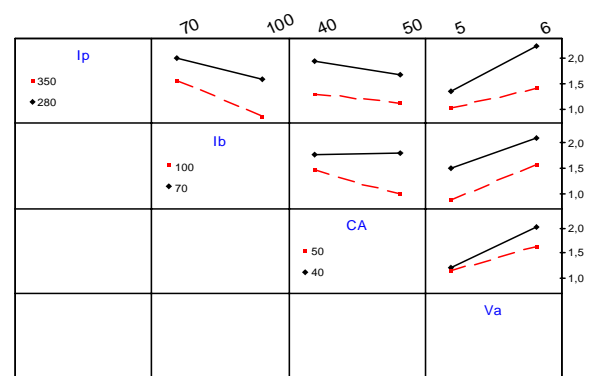


Figura 5.4 – Efeito das interações – Mistura C25

5.3 Análise da Diluição

A diluição também tem um grau de importância elevado no que diz respeito à qualidade do cordão de solda, pelo fato de expor, percentualmente, a quantidade de metal do arame que tem participação na zona fundida. É a partir desta relação, feita entre a área de reforço e a área penetrada, que se torna possível obter um bom aspecto do cordão de solda.

5.3.1 Influência dos fatores sobre a diluição do cordão de solda

Como feito anteriormente, os dados são trabalhados para se encontrar os fatores mais significativos para a diluição, desta forma tem-se os seguintes resultados para cada uma das duas proteções gasosas:

Termo	Argônio Puro			Mistura C25		
	Coefficiente	Erro	p-value	Coefficiente	Erro	p-value
Constante	23,969	0,8314	0,000	44,199	1,713	0,000
Ip	-0,548	0,8314	0,528	4,123	1,713	0,043
Ib	-0,048	0,8314	0,955	-0,277	1,713	0,876
CA	0,468	0,8314	0,589	0,246	1,713	0,890
Va	2,088	0,8314	0,036	-2,442	1,713	0,192
Ip*Ib	1,829	0,8314	0,059	-2,093	1,713	0,257
Ip*CA	-1,664	0,8314	0,080	2,937	1,713	0,125
Ip*Va	2,471	0,8314	0,018	-6,133	1,713	0,007

Tabela 5.8 - Efeitos Estimados e Coeficientes para Diluição

Desta maneira, a partir do cálculo da estimativa dos efeitos e seus respectivos coeficientes para a diluição no software Minitab®, tem-se o único fator considerado como significativo para a diluição, quando se usa argônio puro como gás protetor, é Va, sendo que e as interações entre Ip*Ib, Ip*CA e Ip*Va também são fatores que trazem impacto no grau de diluição do cordão de solda. Mais uma vez, encontra-se influências com valores pouco acima do p-value significativo, mas que serão novamente incorporados à análise por apresentarem valores bastantes próximos, denotando significância, a priori, importante. Estes são as interações entre Ip*Ib e Ip*CA. Analisando os dados para a mistura C25, o fator que apresenta maior significância para a diluição conforme o cálculo dos efeitos estimados e seus coeficientes é Ip, por ser o único a apresentar p-value < 0,05.

Graficamente o que pode ser notado é mostrado pela Figura 5.5 e 5.6:

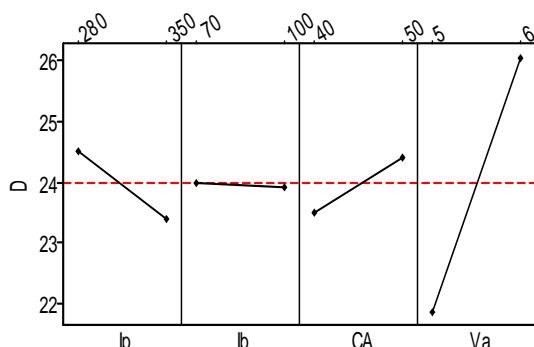


Figura 5.5 – Efeitos Principais – Argônio puro

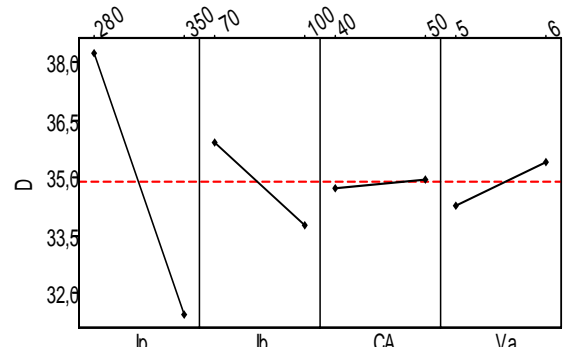


Figura 5.6 – Efeitos Principais – Mistura C25

Segundo a Figura 5.5 acima e confirmado pelo p-value, sendo os fatores analisados isoladamente, o que se tem é a grande influência de Va na resposta diluição, causando grande variação. Os outros três fatores, Ip, Ib e CA, não trazem grande variação na resposta, principalmente Ib, que tem sua reta praticamente na horizontal. Pela Figura 5.6, o que se tem para o caso de se usar a mistura de argônio com CO₂ é que apenas Ip tem significância para a diluição, sendo que os demais fatores realmente não apresentam variação significativa na resposta, sendo que o fator CA praticamente a deixa estável. Para a análise das interações, segue Figura 5.7 e 5.8:

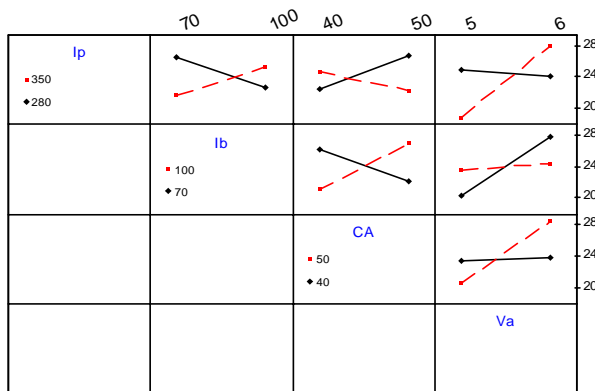


Figura 5.7 – Efeito das interações – Argônio puro

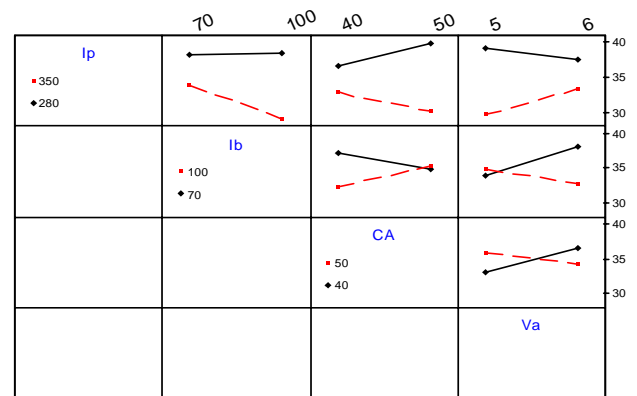


Figura 5.8 – Efeito das interações – Mistura C25

Analisando-se a proteção gasosa com argônio puro o que se tem é uma grande interação entre Ip e Ib, Ip e CA e também entre Ip e CA. A partir desta Figura 5.7 observa-se que as interações (Ip*Ib e Ip*CA) que apresentavam p-value um pouco acima do estipulado como sendo significativo, mostram grande interação entre elas, visto a inclinação entre as suas respectivas retas. Cabe citar que, as outras interações não analisadas, pelo fato de ocorrer associação entre as demais, também se apresentam graficamente como sendo significativas, igualmente pela inclinação de suas retas. Novamente o que se pode recomendar é que estas devem ser estudadas posteriormente em um planejamento fatorial completo, para verificar se são realmente significativas, pois em um planejamento fatorial fracionário, como este, não traz informações suficientes para confirmar se são ou não significantes na resposta diluição, e também nas demais respostas analisadas neste trabalho. Da Figura 5.6 observa-se que os níveis para cada um destes parâmetros, considerando-se a diluição, é Ip em seu nível inferior, embora haja uma divergência entre as interações em que está presente. Já para CA e Va os melhores resultados são conseguidos quando utilizados em seus níveis superiores. Portanto, analisando-se separadamente, para maximizar a diluição a melhor configuração dos fatores é Ip(-), Ib(+), CA(+), Va(+).

Como pode ser notado, não há interação significativa para a diluição quando se analisa os resultados da mistura C25, já prevista pelos valores de p-value maiores que 0,05. Portanto nesta análise não se considera estes efeitos, embora graficamente apresente algumas interações, porém associadas às demais, e portanto, nada se pode dizer delas com os dados coletados. Para o caso isolado da diluição utilizando a mistura C25, a melhor configuração é Ip(-), Ib(-), CA(+), Va(+).

5.4 Análise do Índice de Convexidade

A medida do índice de convexidade, que é uma relação entre reforço e largura do cordão de solda, provê informações importantes a respeito da qualidade da soldagem, pelo fato de ser através desta medida que se tem o conhecimento se a solda apresenta reforço excessivo ou não. Na literatura, e como já foi comentado em capítulo anterior, o IC deve estar próximo de 30% para que se tenha um cordão de solda adequado, sendo que acima deste valor ocorre um excessivo reforço aliado com uma pequena penetração. (SILVA *et al*, 2000).

5.4.1 Influência dos fatores sobre o índice de convexidade do cordão de solda

Como feito anteriormente, é feita a análise para cada fator do experimento, para verificar se estes se apresentam como significantes para a resposta índice de convexidade do cordão de solda, bem como se há interações entre eles.

Novamente, encontra-se a estimativa dos efeitos e seus respectivos coeficientes para o índice de convexidade do cordão e solda a partir do software Minitab[®], como visto na Tabela 5.9:

Termo	Argônio Puro			Mistura C25		
	Coefficiente	Erro	p-value	Coefficiente	Erro	p-value
Constante	44,199	1,713	0,000	25,480	1,032	0,000
Ip	4,123	1,713	0,043	-2,630	1,032	0,034
Ib	-0,277	1,713	0,876	-0,365	1,032	0,733
CA	0,246	1,713	0,890	-2,045	1,032	0,083
Va	-2,442	1,713	0,192	2,965	1,032	0,021
Ip*Ib	-2,093	1,713	0,257	-1,392	1,032	0,214
Ip*CA	2,937	1,713	0,125	2,470	1,032	0,044
Ip*Va	-6,133	1,713	0,007	-1,768	1,032	0,125

Tabela 5.9 - Efeitos Estimados e Coeficientes para Índice de Convexidade

O que se tem pelos cálculos mostrados na Tabela 5.9 é que apenas o fator I_p (p-value $< 0,05$) e a interação de I_p com V_a afetam de forma significativa o índice de convexidade da soldagem quando utilizado argônio puro. Para o caso da mistura C25 como proteção gasosa, o que se tem com o cálculo dos efeitos estimados e seus coeficientes é I_p , CA e V_a como fatores significativos para o IC do cordão de solda.

Nota-se também neste caso que CA apresenta um p-value um pouco acima de 0,05, mas como feito anteriormente, este será incluído na análise pela proximidade dos valores, denotando proporcionar efeitos sobre IC. A Figura 5.9 e 5.10 mostra graficamente os resultados obtidos do efeitos principais dos fatores estudados:

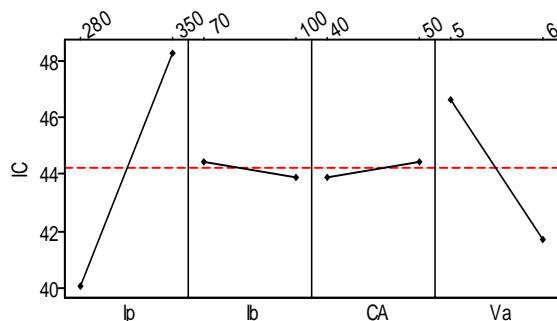


Figura 5.9 – Efeitos Principais – Argônio puro

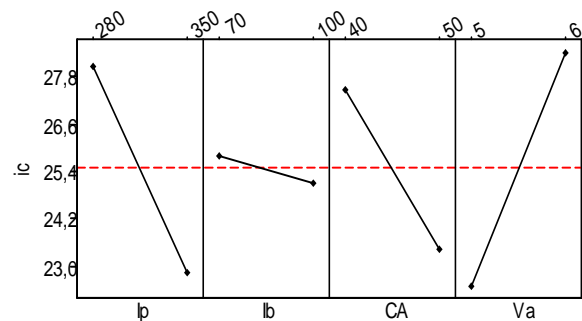


Figura 5.10 – Efeitos Principais – Mistura C25

Pela Figura 5.9 dos efeitos principais há a confirmação de I_p ser um fator significativo e também pode ser observado que V_a tem certo grau de significância para a resposta, o que pode ser explicado por haver a interação com I_p . De qualquer maneira, o que se aconselha é manter este fator em observação e propor maiores verificações com um experimento fatorial completo, que traria informações mais precisas sobre o impacto do fator no índice de convexidade. Entretanto, pela figura citada o que se tem é que I_p deve ser mantido em nível inferior, V_a a priori em seu nível superior e os fatores I_b e CA praticamente não trazem variação para IC, devido à pequena inclinação de suas retas. Contudo, para melhor escolha dos níveis de cada fator, não se pode deixar de analisar as interações apresentadas.

Graficamente o que se tem para a Mistura C25 é I_p e V_a apresentando grande influência na resposta e a confirmação de CA como sendo um fator que traz grande variação em IC dependendo de seu nível, portanto, este será incluído na análise. De acordo com a Figura 5.10 os fatores I_p , I_b (embora não significativo) e CA devem estar em seus níveis inferiores e o fator V_a em seu nível superior, para que assim se consiga um índice de convexidade próximo de 30%. Para a análise das interações é gerada a Figura 5.11 e 5.12:

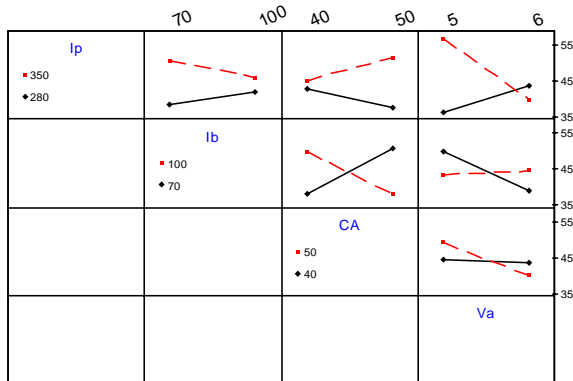


Figura 5.11 – Efeito das interações – Argônio puro

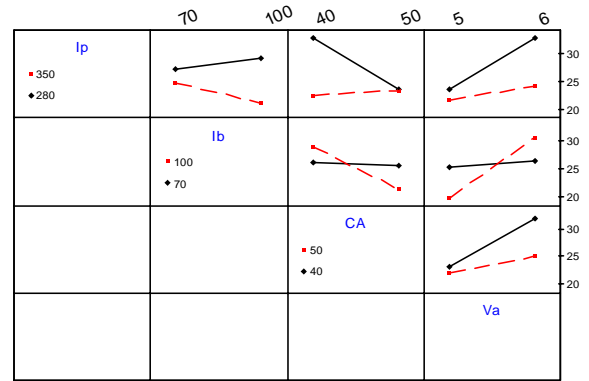


Figura 5.12 – Efeito das interações – Mistura C25

A Figura 5.11 vem reafirmar a interação existente entre Ip e Va, com suas retas apresentando grande inclinação entre si. Neste caso também há ocorrência de associação entre as interações, o que infelizmente nada se pode dizer delas e incluí-las na análise, como já mencionado anteriormente, cabendo desta forma maior análise com um projeto fatorial completo para confirmar ou não a ocorrência destas interações na resposta. Contudo, o que se tem desta análise e do resultado da interação de $Ip*Va$, é que estes fatores devem ser mantidos em seus níveis superiores para se conseguir um IC próximo de 30%. Com relação à Ib e CA, estes também serão mantidos em seus níveis superiores, conforme análise da Figura 5.11. Sendo assim a melhor configuração encontrada nesta análise, no que diz respeito ao índice de convexidade para o argônio puro é $Ip(+)$, $Ib(+)$, $CA(+)$, $Va(+)$.

Como pode ser visto pela Figura 5.12 a interação que traz variação no índice de convexidade é a $Ip*CA$, como percebido pela grande inclinação das retas. Para a escolha dos níveis de cada fator é considerado como melhor resultado para a resposta um valor próximo de 30%, para se evitar reforço excessivo. Deste modo, escolhe-se para Ip, Ib, CA e Va o nível inferior que pela análise gráfica das interações, também denota um IC por volta de 30%, como recomendado. Portanto a configuração que efetua um índice de convexidade próximo do recomendado, quando esta é analisada em separado para o caso de utilização da mistura C25 é $Ip(-)$, $Ib(-)$, $CA(-)$, $Va(-)$.

5.5 Análise do Índice de Respingos

A resposta índice de respingos identifica a quantidade de material que é fornecida ao metal base e que é perdida durante a soldagem, ou seja, não faz parte do cordão de solda, uma

vez que este material é lançado em forma de respingos. É a partir do cálculo deste índice que se obtém a eficiência de deposição do material fundido.

5.5.1 Influência dos fatores sobre o índice de respingos do cordão de solda

Igualmente como feito anteriormente, é analisado os efeitos dos fatores sobre a resposta em questão. Sendo assim, segue abaixo o resultado do cálculo dos efeitos principais e seus coeficientes para o índice de respingos.

Os dados coletados durante o ensaio geraram as seguintes estimativas dos efeitos dos parâmetros sobre o índice de respingos e descritos na Tabela 5.10:

Termo	Argônio Puro			Mistura C25		
	Coefficiente	Erro	p-value	Coefficiente	Erro	p-value
Constante	2,350	0,2537	0,000	9,717	0,9063	0,000
Ip	-1,050	0,2537	0,003	1,718	0,9063	0,095
Ib	-0,700	0,2537	0,025	2,079	0,9063	0,051
CA	-0,725	0,2537	0,021	2,401	0,9063	0,029
Va	0,250	0,2537	0,353	-1,088	0,9063	0,264
Ip*Ib	0,425	0,2537	0,132	3,163	0,9063	0,008
Ip*CA	0,300	0,2537	0,271	0,507	0,9063	0,591
Ip*Va	0,200	0,2537	0,453	0,668	0,9063	0,482

Tabela 5.10 - Efeitos Estimados e Coeficientes para Índice de Respingos

Como pode ser visto pelas linhas marcadas em negrito, os fatores significantes para a resposta geradas pelo uso do argônio puro é Ip, Ib e CA, estando Va e as interações com p-value maior que 0,05. Pelo mostrado na Tabela 5.10, os fatores que afetam de forma mais significativa a quantidade de respingos produzidos durante a soldagem com a mistura C25 é Ip, Ib e CA, juntamente com a interação entre Ip e Ib. Pelo gráfico dos efeitos principais, tem-se:

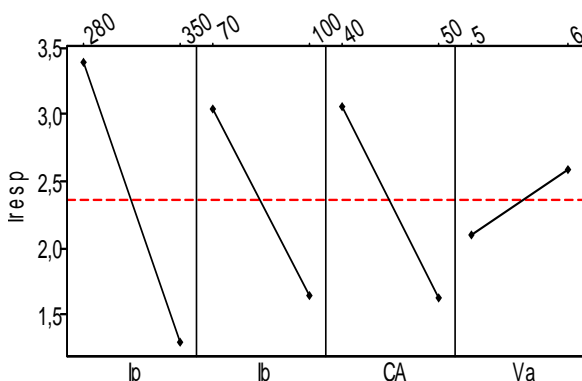


Figura 5.13 – Efeitos Principais – Argônio puro

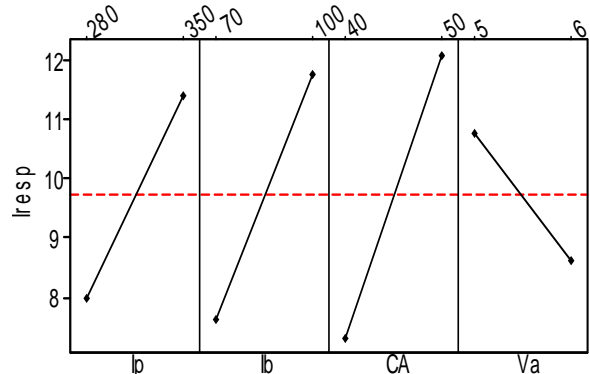


Figura 5.14 – Efeitos Principais – Mistura C25

A Figura 5.13 mostra que para se conseguir minimizar o índice de respingos durante a soldagem, deve-se usar I_p , I_b e CA em seus níveis superiores e V_a , que se mostra não significativo para esta resposta analisada isoladamente, deve ser usado em seu nível inferior.

Percebe-se pela Figura 5.14 que para se conseguir minimizar o índice de respingos e assim conseguir que maior quantidade de material seja efetivamente depositado no cordão de solda, aumentando por consequência a eficiência de deposição, deve-se utilizar os fatores I_p , I_b e CA em seus níveis inferiores e V_a , que aparentemente se mostra com certa significância graficamente, é indicado ser utilizado no nível superior. Mesmo não tendo interações significativas para o argônio puro, como mostrado pelo cálculo dos efeitos estimados e seus coeficientes, é apresentado graficamente o seu resultado pela Figura 5.15, bem como para a mistura C25 pela Figura 5.16, visto que para melhor escolha dos parâmetros, deve-se considerar a análise das interações.

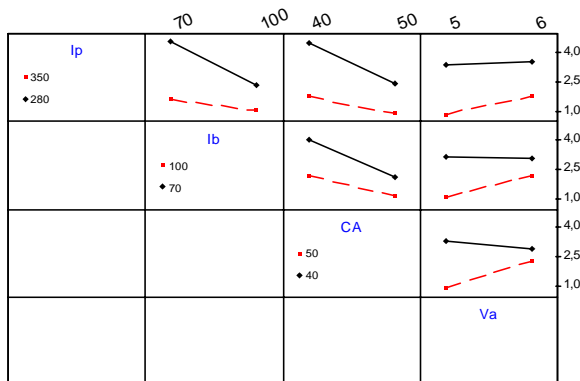


Figura 5.15 – Efeito das interações – Argônio puro

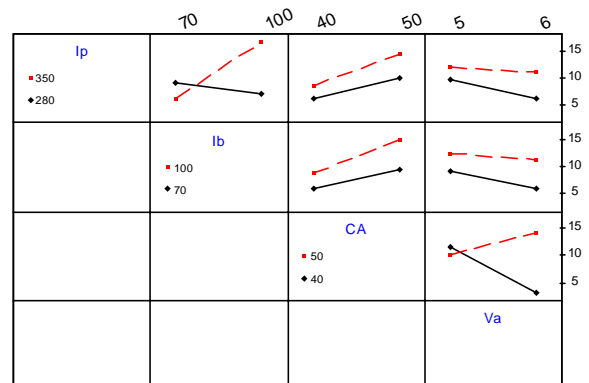


Figura 5.16 – Efeito das interações – Mistura C25

Graficamente o que se tem na Figura 5.15 é um comportamento bastante sutil dos fatores, com suas retas muito pouco inclinadas entre si, validando o resultado de p-value, ou seja, não há interação entre os fatores quando se analisa o índice de respingos com proteção gasosa de argônio puro. Portanto para este caso, tem-se $I_p(+)$, $I_b(+)$, $CA(+)$, $V_a(-)$.

Da Figura 5.16 acima nota-se a interação entre I_p e I_b , como já mencionado anteriormente. O que pode ser notado é que as outras interações tem comportamento bastante paralelo de suas retas, mostrando realmente existir pouca interação. A única que apresenta grande inclinação é a interação entre CA e V_a , mas como já discutido, nada se pode concluir com um fatorial fracionário. Desta forma o que se tem para melhorar o índice de respingos é a utilização de I_p , I_b , CA nos seus níveis inferiores e V_a , como anteriormente relatado durante a análise dos efeitos principais, em seu nível superior. Desta maneira, analisando-se o índice de

respingos separadamente e com uma atmosfera protetora com a mistura C25, os melhores resultados serão obtidos com Ip(-), Ib(-), CA(-), Va(+).

5.6 Condição geral para melhoria da qualidade do cordão de solda

Tendo todas estas análises realizadas, e as influências dos fatores significativos para cada resposta, pode-se partir para uma combinação dos fatores que venha indicar uma combinação que traga bons resultados para a qualidade do cordão de solda quando este é analisado em todos os quesitos, ou seja, deseja-se encontrar uma condição de soldagem em que os parâmetros de pulso estejam combinados de tal forma, que traga a maximização da penetração e da diluição do cordão de solda, bem como minimização do índice de respingos e valores próximos de 30% para o índice de convexidade, para que se chegue a um cordão de solda com melhor aspecto quanto a sua qualidade.

Esta condição dos fatores, em que se tenta buscar os melhores resultados para a soldagem, pode-se encontrar também a partir do software Minitab[®] através de uma função denominada de *response optimizer*. Este, a partir dos mesmos dados coletados em ensaio, e utilizados para se encontrar os efeitos dos parâmetros e suas interações, busca uma condição destes fatores analisados em que se tenha a maior “desejabilidade”. Esta desejabilidade pode ter valores de zero a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor é a condição encontrada, ou seja, ela satisfaz de forma a conseguir valores bem próximos do ótimo para cada resposta analisada no projeto experimental. Por outro lado, quanto mais distante de 1, a condição encontrada não apresenta bons resultados para algumas ou para todas as respostas analisadas, sendo esta condição então não adequada o suficiente para o projeto. Nestes casos aconselha-se rever o experimento e suas respostas, tendo que em alguns casos refinar ou até mesmo refazer o experimento, com a escolha de novos fatores ou níveis diferentes dos já escolhidos, para que desta forma possa se chegar a resultados satisfatórios.

A partir de toda a análise feita, partiu-se então para a obtenção da melhor condição de soldagem, isto é, daquela que forneça boa qualidade do cordão de solda para as condições estabelecidas na Tabela 5.11 para ambos os gases, gerando assim os resultados mostrados pela Figura 5.17 e 5.18:

Resposta	Objetivo	Mínimo	Alvo	Máximo	Peso	Importância
p (mm)	Maximizar	1	2	3	1	1
D (%)	Maximizar	20	30	40	1	1
IC (%)	Alvo	20	30	40	1	1
Iresp (%)	Minimizar	5	10	15	1	1

Tabela 5.11 – Parâmetros para escolha da melhor condição de soldagem

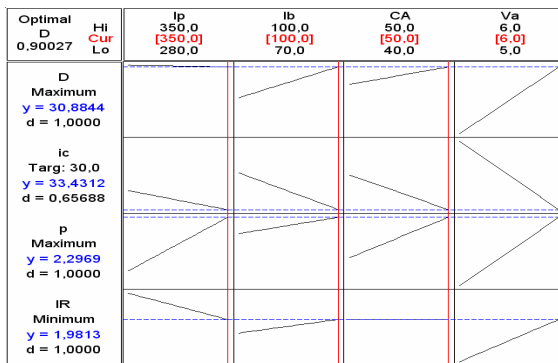


Figura 5.17 – Otimização da resposta – Argônio puro

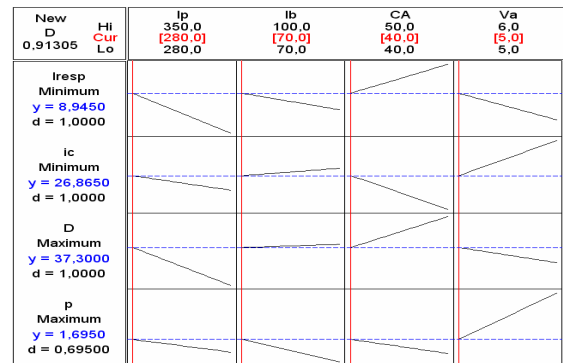


Figura 5.18 – Otimização da resposta – Mistura C25

A Figura 5.17, a partir do software Minitab[®], mostra que com o projeto experimental realizado, consegue-se uma desejabilidade geral $D = 0,90027$, ou seja, a condição de soldagem encontrada fornece resultados satisfatórios para as respostas analisadas.

A condição combinada dos fatores que geram bons resultados é quando se utiliza todos os parâmetros de pulso em seus níveis superiores, ou seja, $I_p = 350$ A, $I_b = 100$ A, $CA = 50\%$ e $V_a = 6$ m/min.

Outro resultado apresentado é a desejabilidade (d) referente a cada resposta, e o valor (y) que esta obtém com a condição apresentada como sendo a de melhores resultados. Como pode ser visto na Figura 5.17, todos os resultados, com exceção do índice de convexidade que obteve aproximadamente $d = 0,65$, apresentam $d = 1,0$. Este valor encontrado para o índice de convexidade era esperado para a utilização de argônio puro, que apresenta níveis altos de convexidade em relação a outros gases e misturas. Fato este que veio a diminuir a desejabilidade da condição encontrada, visto que para as demais respostas encontra-se valores bastante adequados.

Da mesma maneira, foi feito para a mistura C25 a escolha da melhor condição de soldagem. Desta forma, gerou-se a Figura 5.18 com os níveis de cada fator, o valor y das respostas analisadas e suas respectivas desejabilidades para a condição indicada.

A desejabilidade encontrada com a mistura C25, $D=0,91305$, mostra-se um pouco acima daquela encontrada com a utilização do argônio puro, o que indica uma melhor qualidade do cordão de solda. Neste caso, consegue-se $d=1$ para todas as respostas, exceto para a penetração que obteve $d=0,695$, o que também era esperado como mencionado em capítulos anteriores, em que a penetração, quando se usa a mistura, apresenta um aspecto mais achatado comparado com o argônio puro. Por outro lado consegue uma melhor relação entre área penetrada e área de reforço, implicando diretamente em uma melhor diluição do cordão de solda, e conseqüentemente um melhor aspecto do mesmo, comparado novamente com o argônio puro. Como pode ser visto, a condição que apresenta melhores resultados, a partir do experimento realizado é aquela com todos os parâmetros de pulso em seus níveis inferiores, o que neste caso apresenta nova vantagem com relação ao argônio puro, pelo fato de se conseguir realizar a soldagem com menores níveis de corrente, transferindo desta forma menor calor e possibilitando soldagens em chapas mais finas.

5.7 Simulação e Inclusão da Variabilidade na Condição Encontrada

O próximo passo deste trabalho foi inserir na condição encontrada para cada um dos gases, a variabilidade nos valores encontrados para cada uma das respostas analisadas no projeto de experimentos, que como visto determina um valor fixo.

Com a simulação de Monte Carlo, pretende-se então, obter uma distribuição de probabilidade dos possíveis valores de ocorrência, e por conseqüência, o comportamento de cada resposta quando em sua análise é considerado o erro experimental, informado pelo estudo anterior. Esta análise possibilita descobrir a probabilidade e freqüência de ocorrência de valores que se deseja obter. Em outras palavras, o que se consegue determinar com a simulação do processo, é a probabilidade de se conseguir ou não resultados adequados ao que se deseja, o que aumenta a confiabilidade dos resultados conseguidos com o projeto de experimentos feito anteriormente.

5.7.1 Criação do modelo de simulação

Para se fazer a Simulação de Monte Carlo (SMC), parte-se inicialmente da análise feita anteriormente com o projeto de experimentos. Com esta análise consegue-se caracterizar

cada resposta através de uma sentença matemática e seu respectivo erro experimental. É a partir desta sentença matemática que se obtém o modelo para simulação, o qual inserido o erro experimental, informa qual é a variabilidade encontrada em cada uma das respostas através da distribuição de probabilidades criada com a simulação do modelo, e não somente um valor fixo como é feito apenas com a análise do projeto de experimentos.

Para validação do modelo simulado, bem como da condição escolhida como sendo a que gera melhores resultados, optou-se por fazer alguns ensaios com a mesma condição simulada para checar se os valores obtidos se enquadram dentro da distribuição de probabilidades encontrada.

a. Penetração

Para realização da Simulação de Monte Carlo foi utilizado o software Crystal Ball, o qual é feito em planilha do Microsoft Excel e nele inserido os já citados modelos e seus respectivos erros experimentais, para cada uma das respostas.

Feita a análise DOE para se chegar a uma configuração otimizada do processo para a penetração com cada um dos dois tipos de proteção gasosa, encontra-se a sentença matemática dos fatores significativos e o erro experimental que levarão ao valor ótimo, ou seja, maximizado para a penetração. Essa equação é formada pelo fatores significativos, multiplicados por um coeficiente gerado pela análise DOE realizada pelo software Minitab[®], e que podem ser vistas pela Tabela 5.12 para cada um dos dois casos estudados.

Argônio puro	Condição ensaio	$I_p(+1), I_b(+1), CA(+1), Va(+1)$
	Equação (5.4)	$p = 1,744 + 0,225I_p + 0,050I_b + 0,144CA + 0,106Va + 0,119I_pI_b - 0,100I_pCA + 0,137I_pVa$
	Erro experimental	0,0207
Mistura C25	Condição ensaio	$I_p(-1), I_b(-1), CA(-1), Va(-1)$
	Equação (5.5)	$p = 1,496 - 0,296I_p - 0,284I_b - 0,113CA + 0,322Va - 0,124I_pVa$
	Erro experimental	0,0558

Tabela 5.12 – Modelo para Simulação - penetração

A partir do software Crystal Ball, faz-se a SMC gerando as seguintes distribuições de probabilidade, que podem ser vistas na figura 5.19 e 5.20:

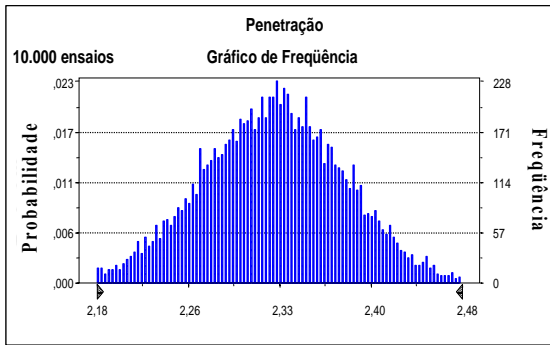


Figura 5.19 – SMC da penetração – Argônio puro

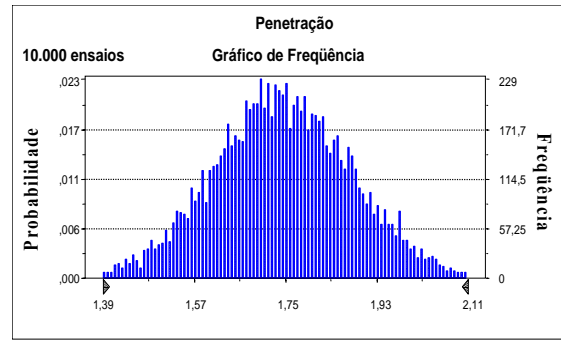


Figura 5.20 – SMC da penetração – Mistura C25

Da Figura 5.19, pode-se perceber mais claramente o que foi mencionado anteriormente com o exemplo de aplicação destas duas ferramentas utilizadas em conjunto. O que foi dito é que em um determinado projeto, por exemplo, deseja-se uma penetração especificada em $p=2,30 \pm 0,10$ mm, ou seja, a partir da distribuição de probabilidades encontrada tem-se a informação que aproximadamente 88% (correspondente à probabilidade de ocorrência de valores entre o intervalo de 2,20 mm a 2,40 mm de penetração indicados pela SMC) dos casos se obtém essa especificação (Figura 5.21), o que torna a aplicação da condição encontrada muito mais confiável. Ou em casos contrários, anular esta condição que pode apresentar grande probabilidade de estar fora do desejado, o que implicaria em novos estudos. Esta análise pode ser estendida para as outras respostas.

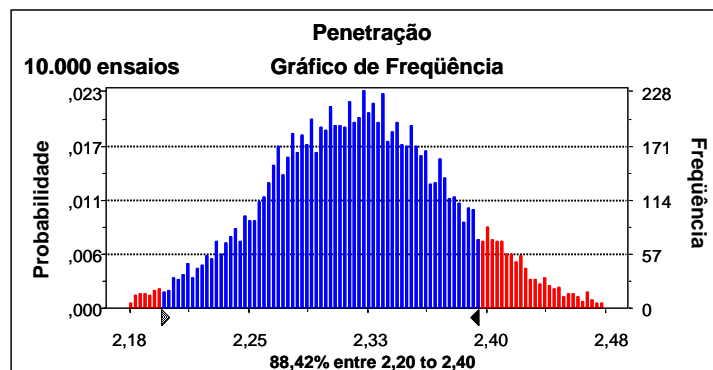


Figura 5.21 – Probabilidade de ocorrência - penetração

Os valores encontrados nos ensaios de validação foram os seguintes:

Ensaio	Penetração (mm)				
	1	2	3	4	5
Argônio puro	2,33	2,25	2,25	1,88	2,05
Mistura C25	1,68	1,78	1,93	1,85	1,95

Tabela 5.13 – Ensaios para validação da SMC - penetração

Para o caso da penetração, nota-se para os dois casos que os ensaios para validação do modelo estão praticamente todos dentro do esperado, sendo que dois valores para o argônio puro ficaram levemente fora da distribuição de probabilidades. Apesar do restante dos resultados apresentarem boa proximidade do valor nominal, este necessita de maiores estudos e principalmente maior número de ensaios para se tirar conclusões com maior confiança.

b. Diluição

De mesma maneira como feito anteriormente, fez-se a SMC para o caso da diluição a partir da sentença matemática extraída da análise DOE.

Argônio puro	Condição ensaio	$I_p(+1), I_b(+1), CA(+1), Va(+1)$
	Equação (5.6)	$D = 23,969 + 2,088Va + 1,829IpIb - 1,664IpCA + 2,4741IpVa$
	Erro experimental	0,8314
Mistura C25	Condição ensaio	$I_p(-1), I_b(-1), CA(-1), Va(-1)$
	Equação (5.7)	$D = 34,873 - 3,424Ip$
	Erro experimental	1,252

Tabela 5.14 – Modelo para Simulação - diluição

Dado o modelo mostrado na Tabela 5.14 e feita a SMC, tem-se a Figura 5.22 e 5.23 com as distribuições de probabilidades, respectivamente, argônio puro e mistura C25:

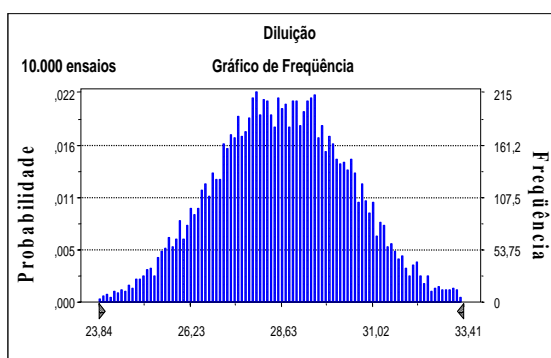


Figura 5.22 – SMC da diluição – Argônio puro

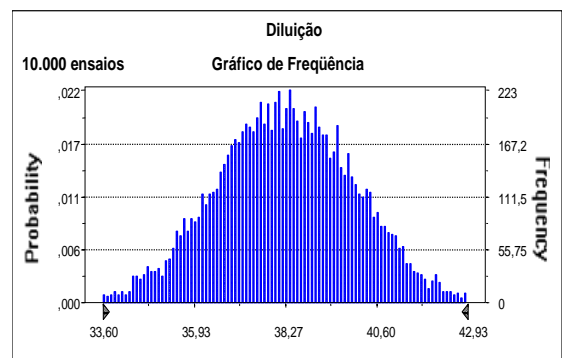


Figura 5.23 – SMC da diluição – Mistura C25

Ensaio	Diluição (%)				
	1	2	3	4	5
Argônio puro	28,01	27,13	25,28	27,47	26,50
Mistura C25	37,66	44,02	36,88	39,91	42,50

Tabela 5.15 – Ensaios para validação da SMC – diluição

Para o caso da diluição os ensaios comprovaram que o modelo criado está caracterizando de forma adequada a condição de soldagem escolhida, estando apenas um valor fora do esperado, para o caso onde se usa a mistura dos gases.

c. Índice de Convexidade

Considerando o mesmo procedimento adotado anteriormente, fez-se a SMC a partir do DOE realizado, possibilitando descobrir a variabilidade da resposta em questão, como mostrado pela Figura 5.24 e 5.25. Os dados para simulação encontram-se na Tabela 5.16.

Argônio puro	Condição ensaio	$I_p(+1), I_b(+1), CA(+1), Va(+1)$
	Equação (5.8)	$IC = 44,199 + 4,123I_p - 6,133I_b Va$
	Erro experimental	1,713
Mistura C25	Condição ensaio	$I_p(-1), I_b(-1), CA(-1), Va(-1)$
	Equação (5.9)	$IC = 25,48 - 2,630I_p - 2,045CA + 2,965Va + 2,470I_p CA$
	Erro experimental	1,032

Tabela 5.16 – Modelo para Simulação – índice de convexidade

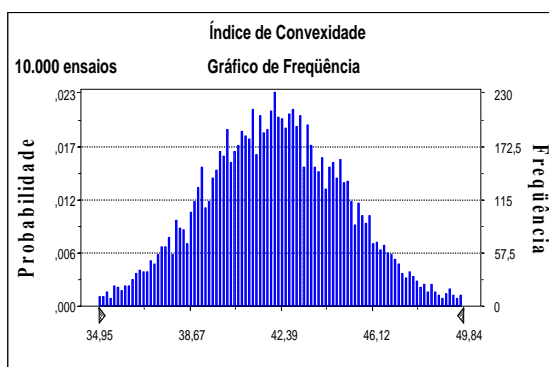


Figura 5.24 – SMC Í. convexidade – Argônio puro

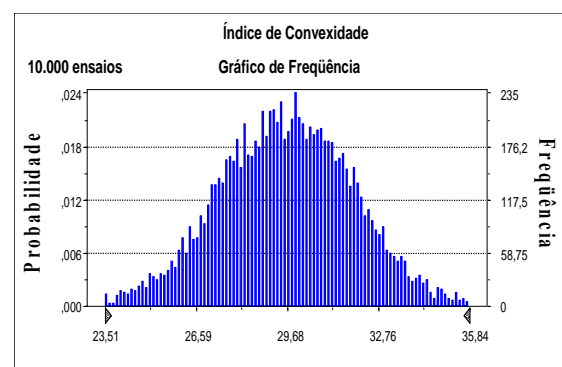


Figura 5.25 – SMC Í. convexidade – Mistura C25

A Tabela 5.17 apresenta os resultados dos ensaios para validação do modelo de simulação realizado para o índice de convexidade do cordão de solda.

Ensaio	Índice de Convexidade (%)				
	1	2	3	4	5
Argônio puro	39,47	31,28	35,91	29,11	40,12
Mistura C25	29,09	31,90	28,31	30,23	28,06

Tabela 5.17 – Ensaios para validação da SMC – índice de convexidade

O que pode ser visto pelas Figuras 5.24 e 5.25 é que as duas ferramentas trabalhando de forma combinada geram resultados bastante satisfatórios. No caso de se utilizar argônio puro, novamente houve dois casos que ficaram fora da variabilidade estimada pela SMC, o que denota que para esta proteção gasosa há necessidade de maiores análises quanto à condição utilizada, o que pode ser feito com um experimento fatorial completo, o que possibilita uma formulação matemática que represente de forma mais adequada o processo, bem como um valor do erro experimental mais adequado, o que influi diretamente no resultado da simulação.

Para o caso da mistura C25, esta apresentou em todos os ensaios comprobatórios resultados dentro do intervalo de variabilidade esperado, mostrando aparentemente que o modelo criado com a análise feita está representando bem o processo, e indicando ser a SMC uma ferramenta bastante interessante de ser usada juntamente com DOE para se prever o comportamento de novas condições para um processo.

d. Índice de Respingos

Os dados utilizados para a realização da SMC estão presentes na Tabela 5.18, bem como a variabilidade encontrada a partir desta simulação estão apresentadas na Figura 5.26 e 5.27.

Argônio puro	Condição ensaio	$I_p(+1), I_b(+1), CA(+1), Va(+1)$
	Equação (5.10)	$I_{resp} = 2,350 - 1,050I_p - 0,700I_b - 0,725CA$
	Erro experimental	0,2537
Mistura C25	Condição ensaio	$I_p(-1), I_b(-1), CA(-1), Va(-1)$
	Equação (5.11)	$I_{resp} = 9,717 + 1,718I_p + 2,079I_b + 2,401CA + 3,163I_pI_b$
	Erro experimental	0,9063

Tabela 5.18 – Modelo para Simulação – índice de respingo

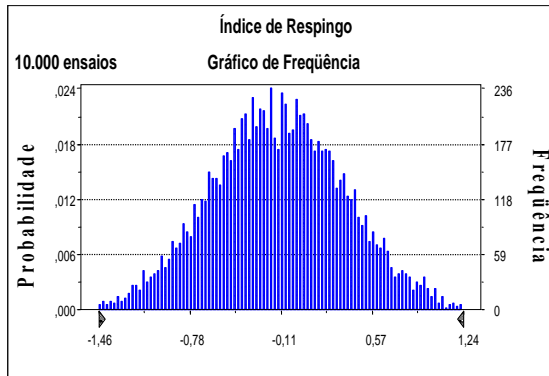


Figura 5.26 – SMC do Í. respingo – Argônio puro

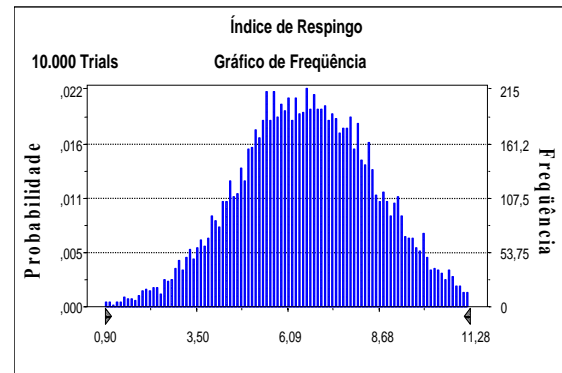


Figura 5.27 – SMC do Í. respingo – Mistura C25

A Tabela 5.19 apresenta os resultados dos ensaios para validação do modelo de simulação realizado para o índice de convexidade do cordão de solda.

Ensaio	Índice de Respingo (%)				
	1	2	3	4	5
Argônio puro	1,71	0,56	0,85	0,48	1,04
Mistura C25	9,66	9,37	9,17	8,25	8,02

Tabela 5.19 – Ensaios para validação da SMC – índice de respingo

Para a resposta analisada índice de respingos, mais uma vez quando se utiliza a proteção gasosa com argônio puro, há a existência de ponto fora do previsto pela SMC, neste caso o Figura 5.25 que demonstra a distribuição de probabilidade para este indica novamente a necessidade de se melhorar o experimento inicial para que se consiga criar modelos mais satisfatórios, em vista que este último gera cenários em que o índice de respingos se torna negativo, o que é uma situação impossível de ocorrer. Desta forma pode-se ainda melhorar de forma significativa os resultados apresentados.

Com relação à mistura C25, em mais esta resposta analisada apresenta resultados dentro do esperado, validando de forma completa a SMC.

5.8 Avaliação Aproximada dos Custos do Processo

Após a avaliação da parte da qualidade do cordão de solda, partiu-se agora para avaliar de forma sucinta os custos incorridos por metro de solda realizado para o processo de soldagem MIG/MAG pulsado. Este cálculo foi feito para cada uma das duas proteções gasosas utilizadas no trabalho, bem como um estudo de como este custo pode variar de acordo

com os fatores que o caracterizam. Isto será feito através da SMC, que por sua vez possibilitará a realização de uma análise de sensibilidade do custo.

A determinação dos custos é de grande importância dentro da manufatura, visto que é através dele que se estipula o preço de venda do produto, possibilitando tomar decisões mais confiáveis sobre o que e quanto produzir, ou seja, se é viável para a empresa investir capital e mão-de-obra na fabricação de um determinado produto e também tornar este produto mais competitivo no mercado. Isto é possível pelo simples motivo de conhecer cada parcela do custo do produto, permitindo promover melhorias no processo que gerem menores custos para o produto final.

O cálculo destes custos será baseado na metodologia utilizada por SILVA *et al* (2000) em que o autor faz um comparativo entre diversos processos de soldagem e verifica o custo por metro de solda realizado para cada um destes processos.

O referido autor cita que o custo é composto pelo custo do material, laboratório, eletricidade e equipamento utilizado para a soldagem. Custos indiretos não serão considerados visto que serão os mesmos para o dois tipos de proteção gasosa e não sendo assim significativos a título de comparação. Desta forma, o custo total é definido como sendo:

$$CT = CM + CL + CE + CEE \quad (5.12)$$

A equação 5.12 tem suas parcelas desmembradas em outras equações menores que as constituem, apresentadas na Tabela 5.20:

Fatores de Custo (R\$/m)		Equações de custo	
Material (CM)			
	Eletrodo / Arame (Cw)	$Cw = Pw \cdot (D \cdot 100 / de) / (tspeed \cdot 60 / 100)$	(5.13)
	Gás (Cg)	$Cg = Pg \cdot Rg \cdot 100 / tspeed$	(5.14)
Laboratório (CL)			
	Laboratório (CL)	$CL = Sw / (tspeed \cdot 60 / 100 \cdot fop / 100)$	(5.15)
Equipamento (CE)			
	Investimento (Ci)	$Ci = Ve \cdot (Ir / 100) \cdot D / (Pm \cdot tspeed \cdot 60 / 100)$	(5.16)
	Depreciação (Cd)	$Cd = Ve \cdot D / (Td \cdot Pm \cdot tspeed \cdot 60 / 100)$	(5.17)
	Manutenção (Cm)	$Cm = Em \cdot D / (Pm \cdot tspeed \cdot 60 / 100)$	(5.18)
Energia Elétrica (CEE)			
	Energia Elétrica (CEE)	$CEE = (Im \cdot Vm \cdot Pel) / (1000 \cdot (ee / 100) \cdot tspeed \cdot 60 / 100)$	(5.19)

Tabela 5.20 – Equações para determinação do custo – Fonte: SILVA et al (2000)

Onde:

Fatores de custo		Valor Adotado	
		Argônio puro	Mistura C25
CM	Custo material	-	
Cw	Custo eletrodo / arame	-	
Cg	Custo gás	-	
CL	Custo laboratório	-	
CE	Custo equipamento	-	
Ci	Custo investimento	-	
Cd	Custo depreciação	-	
Cm	Custo manutenção	-	
CEE	Custo energia elétrica	-	
te	Vida útil estimada do arame (h)	30	
tspeed	Velocidade de avanço (cm/mim)	40	
Pw	Preço eletrodo / arame (R\$/kg)	15,00	
D	Taxa deposição (kg/h)	2,97	2,26
de	Eficiência deposição (%)	99,07	91,11
Pg	Preço gás (R\$/l)	0,04	
Rg	Vazão gás (l/min)	15	
Sw	Salário operador (R\$/h)	10,00	
fop	Fator de operação (%)	65	
Ve	Valor equipamento (R\$)	15000,00	
Ir	Taxa de retorno (%)	2,5	
Pm	Produção mensal de solda (kg/mês)	475,2	361,6
Td	Depreciação (meses)	60	
Em	Custo manutenção mensal (R\$/mês)	62,50	
Im	Corrente média (A)	180	
Vm	Voltagem média (V)	28	
Pel	Preço eletricidade (R\$/kWh)	0,50	
ee	Eficiência elétrica equipamento (%)	75	

Tabela 5.21 – Nomenclatura e valores adotados para equações de custo

Vale citar que os fatores fop, Ir e Td foram adotados conforme utilizado por SILVA *et al* (2000). Sendo que os fatores taxa e eficiência de deposição foram calculados a partir dos resultados obtidos com os ensaios para validação do modelo de simulação, ou seja, utilizando a condição que apresenta melhor resultado para cada um dos gases, segundo análise DOE, extraindo estes valores através da média obtida. Estes dois fatores são caracterizados pelas seguintes equações:

$$D = 3,6 * (mf - m\Phi) / (tsolda * 60) \quad (5.20)$$

$$de = ((mf - m\Phi) / mt) * 100 \quad (5.21)$$

Desta forma obtém-se uma aproximação dos custos gerados por cada uma das atmosferas de proteção por metro de solda realizado, como demonstrado pela Tabela 5.22:

Argônio puro			Mistura C25		
Material		R\$	Material		R\$
	Cw	1,86		Cw	1,55
Cg	1,50	Cg	1,50		
Laboratório	CL	0,64	Laboratório	CL	0,64
Equipamento	Ci	0,10	Equipamento	Ci	0,10
	Cd	0,07		Cd	0,07
	Cm	0,02		Cm	0,02
E. Elétrica	CEE	0,14	E. Elétrica	CEE	0,14
Custo Total		4,33	Custo Total		4,02

Tabela 5.22 – Planilha de custos

Embora o preço dos gases esteja igual conforme informado pelo fornecedor, o custo quando se utiliza a mistura C25 apresenta-se menor aproximadamente 7,15 %, o que já era esperado de ocorrer. Este fato mostra que a utilização da mistura torna-se competitiva, até mesmo por apresentar resultados tão bom quanto aqueles conseguidos quando se usa o argônio puro, sendo que com a mistura consegue-se um aspecto melhor do cordão de solda, explicado pelo grau de diluição conseguido por este gás e também por apresentar um índice de convexidade mais adequado. Um pesar para o uso da mistura, é que esta apresenta um maior nível de respingos, o que pode necessitar algum retrabalho da peça soldada, podendo acarretar algum incremento no custo final, o que não foi considerado neste trabalho.

A partir da Tabela 5.22, pode-se criar um modelo para ser simulado e inserir a variabilidade do custo para cada proteção gasosa. O modelo utilizado é caracterizado pelas próprias equações propostas por Silva et al (2000), o que pode ser isto em anexo.

O conhecimento desta variabilidade pode ser bastante útil em tomadas de decisão, tanto para novos produtos e processos, quanto para melhorias e/ou redução de custo. Exemplificando, esta análise pode ser de grande valia quando se deseja saber se determinado produto vai gerar benefícios para a empresa, ou seja, a empresa sabe que o custo do produto pode chegar até um valor “x” para ser competitivo no mercado, e estando de posse da distribuição de probabilidades do custo, a empresa conhecerá a chance de ter sucesso ou não em conseguir produzir igual ou abaixo do valor estipulado “x”. Desta maneira, é feita a SMC para os dois tipos de gases e verificada sua variabilidade.

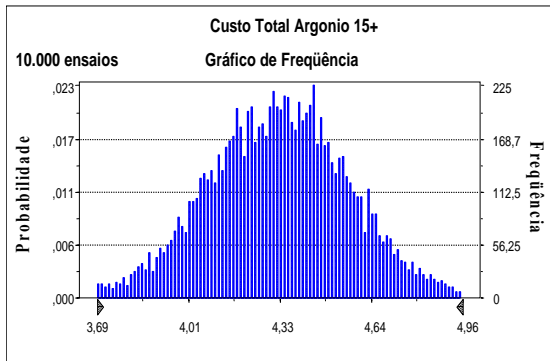


Figura 5.28 – SMC do custo – Argônio puro

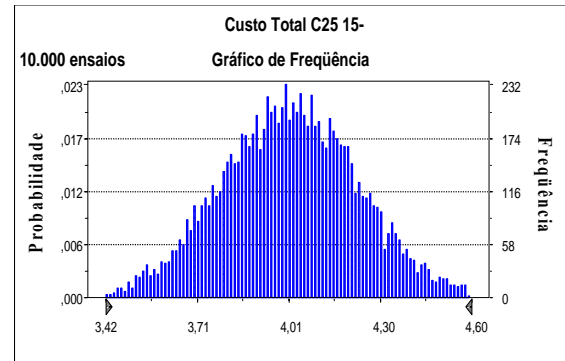


Figura 5.29 – SMC do custo – Mistura C25

Analisando as Figuras 5.28 e 5.29 percebe-se claramente que nesta aproximação dos custos gerados por cada um dos gases, a mistura C25 apresenta-se bem mais competitiva comparadamente com o argônio puro, como já havia sido verificado com o cálculo simples dos custos.

5.8.1 Análise de sensibilidade

Outra verificação que pode ser feita, através de uma análise de sensibilidade, é descobrir qual fator tem maior impacto na variação dos custos. Esta análise pode ser vista na Figura 5.30 e 5.31:

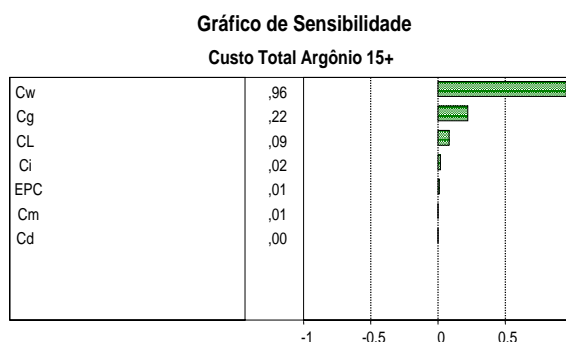


Figura 5.30 – Análise de sensibilidade – Argônio puro

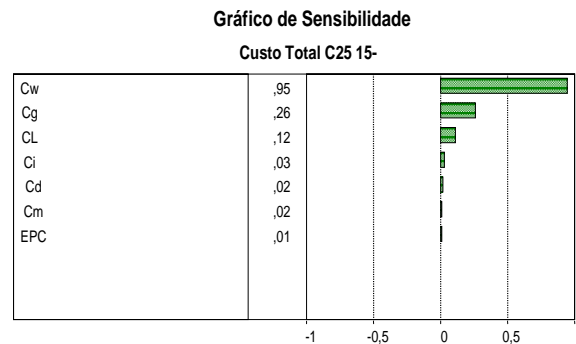


Figura 5.31 – Análise de sensibilidade – Mistura C25

Para ambas as análises os fatores que carregam maior impacto, e que por sua vez causam maior variação para o custo total calculado foram Cw e Cg, ou seja, os custos do arame e gás.

Em uma primeira análise foi feito um estudo do comportamento de soldagem quando esta foi realizada com vazões diferentes de gás, mantendo-se as condições encontradas

anteriormente e consideradas apresentar os melhores resultados com o planejamento experimental adotado. Cabe citar que este será um estudo para verificar, de modo simplificado, o impacto da vazão do gás sobre o aspecto do cordão de solda e verificar se a diminuição ou aumento da vazão proporcionam resultados semelhantes com aqueles conseguidos com a vazão de 15 l/min. Este estudo será realizado em virtude do gás ter apresentado uma parcela grande na variação do custo total, mostrando ser este uma variável importante, segundo a análise de sensibilidade realizada. Cabe frisar que estudos mais aprofundados devem ser realizados para checar de forma mais adequada a influência da vazão do gás sobre o aspecto e qualidade do cordão de solda, como um projeto experimental que o considere como fator.

Desta forma ensaios foram realizados com três vazões diferentes para cada gás estudado e cada um deles em duas condições, uma em que apresenta os melhores resultados e a segunda, a condição encontrada como sendo a mais adequada para o outro gás, e vice versa. As condições de ensaio são mostradas pela Tabela 5.23:

Argônio puro		Mistura C25	
Nível	Vazão (l/min)	Nível	Vazão (l/min)
Superior	10	Superior	10
Superior	15	Superior	15
Superior	20	Superior	20
Inferior	10	Inferior	10
Inferior	15	Inferior	15
Inferior	20	Inferior	20

Tabela 5.23 – Condições de ensaio para diferentes vazões

Como era de se esperar, o argônio puro gerou melhores resultados quando utilizada a condição em que os parâmetros de pulso são colocados no nível superior, fato observado para as três vazões empregadas. O mesmo ocorreu com a mistura C25, esta obteve os melhores resultados estando os parâmetros de pulso no nível inferior, novamente observado para as três vazões. Isto pode ser considerado um ponto a favor da análise feita com o projeto de experimentos, mostrando estar a condição escolhida, a princípio, adequada. Os resultados gerados serão expostos em forma gráfica para melhor análise. Os pontos de comparação entre as vazões serão os mesmos adotados anteriormente, penetração, diluição, índice de convexidade e índice de respingos. Também será considerado nesta análise o fator econômico taxa de deposição. Os resultados podem ser observados pelas Figuras 5.32 a 5.41:

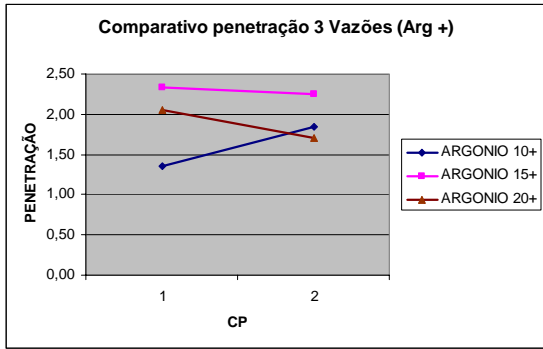


Figura 5.32 – Penetração com diferentes vazões – Argônio puro

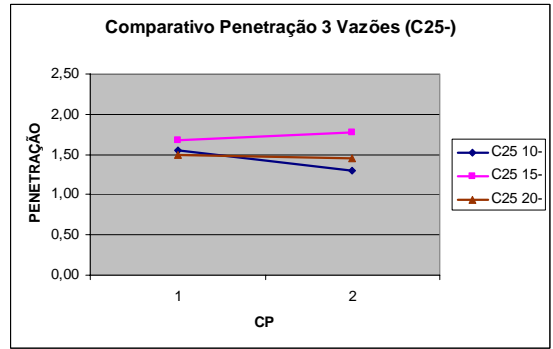


Figura 5.33 – Penetração com diferentes vazões – Mistura C25

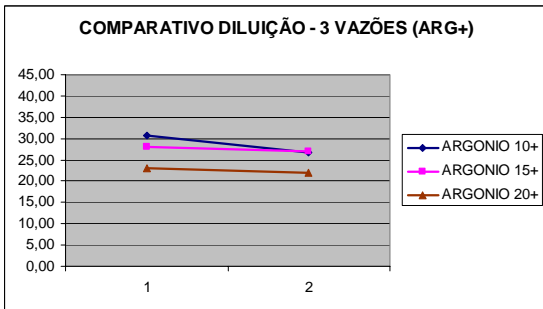


Figura 5.34 – Diluição com diferentes vazões – Argônio puro

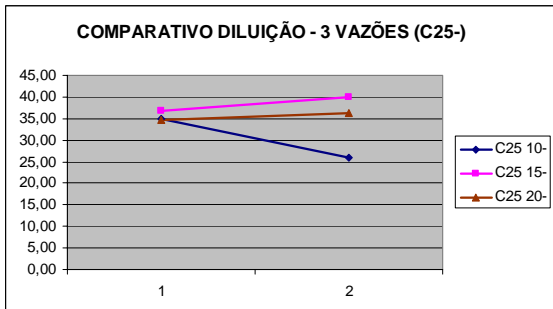


Figura 5.35 – Diluição com diferentes vazões – Mistura C25

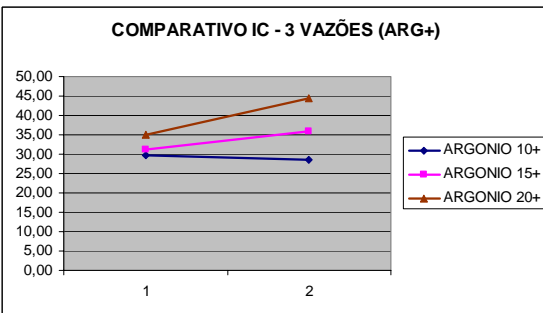


Figura 5.36 – IC com diferentes vazões – Argônio puro

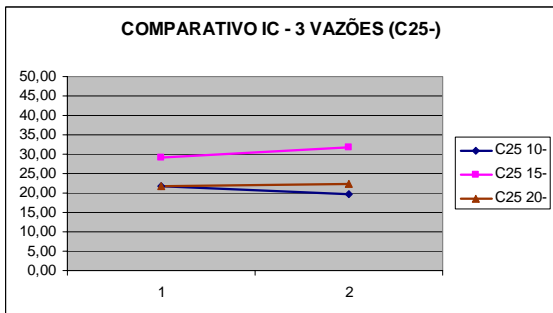


Figura 5.37 – IC com diferentes vazões – Mistura C25

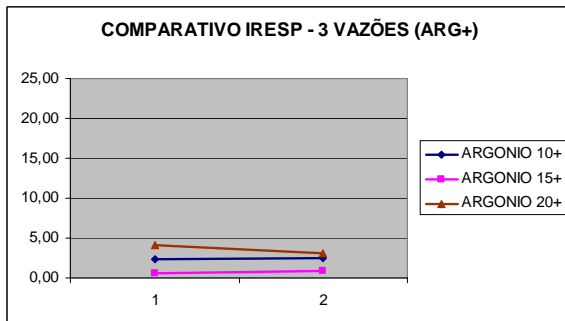


Figura 5.38 – Iresp com diferentes vazões – Argônio puro

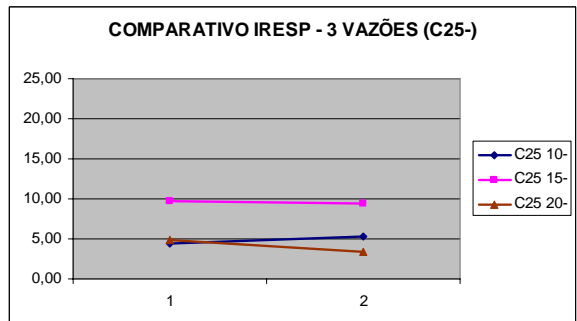


Figura 5.39 – Iresp com diferentes vazões – Mistura C25

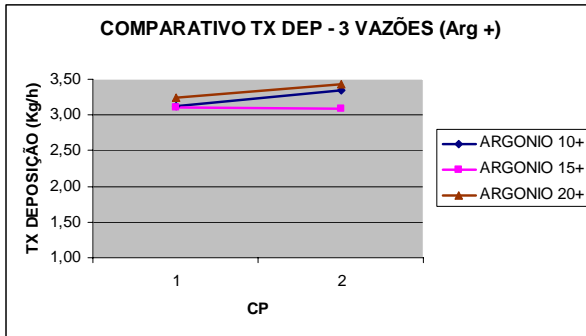


Figura 5.40 – Taxa deposição com diferentes vazões – Argônio puro

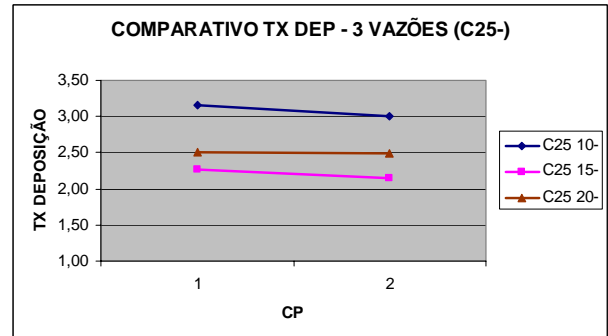


Figura 5.41 – Taxa deposição com diferentes vazões – Mistura C25

Analisando as Figuras 5.32 a 5.41, nota-se que quando é usada a atmosfera protetora com argônio puro há uma predominância de melhores resultados quando a vazão é de 15 l/min, sendo que para diluição e índice de convexidade há certa vantagem quando se utiliza a vazão de 10 l/min. Estes resultados apresentados para o argônio puro indicam que um estudo mais aprimorado do efeito da vazão do gás sobre os aspectos geométricos e de qualidade do cordão de solda podem apresentar resultados bastante interessantes, visto que há a possibilidade de se encontrar resultados parecidos ou até mesmo melhores com utilização de menor quantidade de gás durante a soldagem, o que tornaria menor o custo do processo.

Com relação à mistura C25 também há tendência a se utilizar a vazão de 15 l/min, por esta apresentar em sua maioria resultados melhores como penetração, diluição, que é um aspecto bastante importante para a qualidade do cordão de solda, e índice de convexidade em torno de 30% como indicado pela literatura como o mais adequado. Por outro lado, quando se analisa o índice de respingos há uma diferença significativa, em que as vazões de 10 e 20 l/min conseguiram obter resultados em torno de 5% enquanto a vazão de 15 l/min com 10% de respingos. Estes resultados podem ser explicados pelo fato de a condição escolhida ter sido feita toda com relação à vazão de 15 l/min, o que implica que experimentos e análises mais aprofundadas devem ser realizados para saber com maior certeza que condição seria mais indicada e qual o comportamento destas respostas quando variada a vazão do gás de proteção.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

6.1 Conclusões Gerais

Considerando os objetivos deste trabalho os resultados obtidos nesta dissertação mostram que:

- ✓ O uso combinado de ferramentas para gerar melhorias em um processo produtivo pode ser uma forma de aliar metodologias que quando utilizadas separadamente não fornecem resultados tão significativos.
- ✓ O uso das Técnicas de Análise e Experimentos juntamente com a Simulação de Monte Carlo pode se transformar em uma ferramenta com ampla gama de utilização, em que a primeira metodologia define os fatores mais impactantes nos resultados de um determinado processo, encontrando uma condição ideal de trabalho e em consequência disto consegue dispor para a outra, meios e modelos matemáticos para que se possa analisar como esta condição encontrada se comporta através do tempo, o que seria praticamente impossível de se fazer para comprovar se realmente houve melhoria, tanto por tempo necessário quanto pelo custo que incorreria para isso.
- ✓ Os resultados práticos mostraram que a simulação da condição encontrada pela análise DOE está adequada, tornando o processo de melhoria mais rápido, eficiente e barato.
- ✓ Este trabalho permitiu evidenciar a importância de se analisar não somente a descoberta de uma condição ideal para operação de um processo, mas também a de se conhecer a variabilidade natural presente em qualquer atividade, e o conhecimento desta pode trazer informações muito relevantes e evitar que decisões sejam tomadas não tão acertadamente como se poderia pensar.

- ✓ O estudo realizado mostra que a mistura C25 apresenta boa relação entre custo e benefício em comparação com o argônio puro, visto que apresenta resultados até mesmo superiores, como no caso do índice de convexidade e diluição, que apresenta níveis mais próximos do ideal e uma relação entre largura e reforço do cordão de solda mais adequada do que aquela obtida com o argônio puro, à um custo mais baixo.
- ✓ Com relação aos fatores que trazem maior impacto no custo final de soldagem, as duas proteções gasosas apresentaram resultados bastante semelhantes, como pode ser notado pela análise de sensibilidade, estando o arame e gás como os mais críticos para o custo final, necessitando, portanto, maiores estudos para se conseguir chegar a uma configuração tal que se consiga reduzir os custos.

6.2 Propostas para Trabalhos Futuros

Em virtude das limitações encontradas para a realização deste trabalho, podem-se citar algumas recomendações para trabalhos futuros, o que possibilitaria obter resultados mais eficientes e completos. Sendo assim, algumas sugestões podem ser abordadas:

1. Por consequência de resultados associados entre interações, recomenda-se fazer um experimento fatorial completo para os gases estudados, possibilitando obter maiores conclusões sobre os fatores significativos ao processo e, por conseguinte criar um modelo mais adequado para simulação.
2. O processo estudado por apresentar grande número de variáveis que atuam no resultado da soldagem, é sugerido avaliar outros fatores que não foram aqui abordados, como por exemplo, a velocidade de alimentação do arame, que pode afetar de forma significativa a qualidade do cordão de solda e por ser também, como visto na análise de sensibilidade, um fator importante no custo de soldagem. Outro elemento que pode ser tratado como fator em um próximo projeto experimental é a vazão de gás utilizada, que como visto, também tem impacto no custo e qualidade do cordão de solda.

3. Não se tratando do objetivo principal deste trabalho, o custo do processo não foi calculado considerando todos seus elementos e desta forma, pode ser foco de estudo para trabalhos futuros, em que este seria calculado de forma mais adequada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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

CHOI, S. K., YOO, C. D., KIM, Y. S., *Dynamic simulation of metal transfer in GMAW, Part 1: globular and spray transfer modes*. Welding journal, January, pp. 38-44, 1998.

CHOI, S. K., KO, S. H., YOO, C. D., KIM, Y. S., *Dynamic simulation of metal transfer in GMAW, Part 2: short-circuit transfer mode*. Welding Journal, January, pp. 45-51, 1998.

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

COLOMBARI, R. R., *Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Julho 2004.

CORREIA NETO, J. F.; MOURA, H. J.; FORTE, S. H. C. A., *Modelo prático de previsão de fluxo de caixa operacional para empresas comerciais considerando os efeitos do risco, através do método de Monte Carlo*. READ – Revista eletrônica de administração. N 2. v 8, Porto Alegre. Julho de 2002.

CRYER, S. A., SCHERER, P. N., *Observations and process parameter sensitivities in fluid-bed granulation*. AIChE Journal, Vol. 49, n° 11, pp. 2802-2809, november 2003.

DAVIES, A.C., 1996, *The science and practice of welding*. vol.2, Cambridge University Press, Tenth edition.

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.

DUTRA, J.C., 1996, *Manual da fonte de soldagem Inversal 450*. Universidade Federal de Santa Catarina.

EHRlich, Pierre Jacques. *Pesquisa operacional: curso introdutório*. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1985.

EVANS, James R., OLSON, David L. *Introduction to Simulation and Risk Analysis*. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998.

FARSON, D., CONRARDY, C., TALKINGTON, J., BAKER, K., KERSCHBAUMER, T., EDWARDS, P., *Arc initiation in gas metal arc welding*. Supplement to the Welding Journal, August, pp. 315-321, 1998.

GAVIRA, M. O., *Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento*. Dissertação de Mestrado, UFSC, 2003.

GHOSH, P. K., GUPTA, P. C., GOYAL, V. K., *Stainless steel cladding of structural steel plate using the pulsed current GMAW process*. Supplement to the Welding Journal, July, pp. 307-314, 1998.

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

HARREL, C. R.; GHOSH Biman K., BOWDEN, ROEYCE. *Simulation Using Promodel*. McGraw-Hill, 4^o edição, 2000.

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

KOTECKI, D. J., *Carbon pickup from argon-CO₂ blends in GMAW*. Welding Journal, December, pp. 43-48, 2001.

LAUBSCH, A. J., ULMER, A. *Risk Management – A Practical Guide*. Riskmetrics Group, 2001. Capturado do site www.riskmetrics.com dia 27 de agosto de 2003.

LINNERT, G. E.: *Welding metallurgy*, volume 1, third edition, 1965.

LYTTLE, K. A. : *GMAW – A versatile process on the move*. Welding Journal, pp.9-17, March, 1983.

LOWERY, J., *Gases de proteção para soldagem ao arco*. Soldas e Eletrodos, pp. 9-17, dezembro, 1977.

LOZANO, W.R., 2000, *Redução de perdas na produção por meio da redução da variabilidade do processo usando planejamento de experimentos*. Dissertação de mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Março de 2000.

MACHLINE, Claude; MOTTA, I. S.; SCHOEPS, W.; WEIL, K. E. *Manual de Administração da Produção*. Vol.2, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 1970.

MOLAK, V. *Fundamentals of risk analysis and risk management* Lewis Publishers. USA, 1997.

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

MONTGOMERY, D.C.: *Design and analysis of experiments*. New York. John Wiley & Sons, 1991.

MONTGOMERY, D.C., RUNGER, G.C., *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. 2ª Edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2003.

MONT'ALVÃO, C.A., 1998, *Determinação dos fatores significativos do processo de corte por plasma a ar comprimido através da utilização do projeto e análise de experimentos*. Dissertação de mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Junho de 1998.

MOYER, N., *The evolution of shielding gas*. Welding Journal, September, pp. 51-52, 2002.

MURUGAN, N., PARMAR, R. S., *Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel*. Journal of Materials Processing Technology, 41, pp. 381-398, 1994.

NATTER, M. *Monte Carlo Simulation and scenario analysis*. Cornell University. 1995

NAYLOR, T. H. et al. *Técnicas de simulação em computadores*. Editora Vozes, São Paulo, 1971.

NILO JR, L. P., *Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica de projeto e análise de experimentos*. 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

NETO, B.B., SCARMINIO, 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, I. C. *Proposta de sistematização da simulação para fabricação em lotes*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UNIFEI, Itajubá, MG, 2000.

PHILLIPS, A. L.: *Welding Handbook*, section 2, fifth edition, 1968.

RATHWELL, I. M., *Tips for better gas metal arc welding*. Welding Journal, July, pp. 100-101, 2001.

RIBEIRO, L.G., 2002, *Efeito dos parâmetros de pulso no processo MIG sobre a qualidade e produtividade do cordão de solda*. Dissertação de mestrado: Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Março de 2002.

SALIBY, E. *Repensando a simulação - A amostragem descritiva*. Editora Atlas e Editora da UFRJ. São Paulo, 1989.

SAUNDERS, H. L., *MIG / MAG welding guide*. American Society for Metals, Third Edition, 1997.

SCOLLNIK, D. P. M., *An Introduction to Markov Chain Monte Carlo Methods and Their Actuarial Applications*. Casualty Actuarial Society, Proceedings, Vol. LXXXIII, Part 1, Nr. 158, 1996.

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.

SUBAN, M. & TUSEK, J., *Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used*. Journal of Materials Processing Technology, 119 , pp.185-192, 2001.

SUBRAMANIAN, S.; WHITE, D. R.; JONES, J. E.; LYONS, D. W.: *Droplet transfer in pulsed Gas Metal Arc Welding of aluminium*. 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.

VAIDYA, V. V., *Shielding gas mixtures for semiautomatic welds*. Welding Journal, pp. 43-48, September, 2002.

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

WANG, Q. L., LI, P. J., *Arc Light Sensing of droplet transfer and its analysis in pulsed GMAW process*. Supplement to the Welding Journal, November, pp. 458-469, 1997.

WANG, Y., TSAI, H. L., *Impingement of filler droplets and weld pool dynamics during gas metal arc welding process*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 44, pp. 2067-2080, 2001.

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

VAIDYA, V. V., *Shielding gas mixtures for semiautomatic welds*. Welding Journal, September, pp. 43-48, 2002.

ZAWODNY, J., *Welding with the right shielding gas*. Welding Journal, December, pp. 49-50, 2001.

ZHANG, Y. M., LI, P. J., *Modified active control of metal transfer and pulsed GMAW of titanium*, Welding Journal, February, pp. 54-61, 2001.

ZHANG, Z., *Application of experimental design in new product development*. The TQM Magazine, vol. 10, número 6, pp.432-437, 1998.